



# Nachhaltige Wertschöpfungssysteme

# Inhaltsverzeichnis

- 04** Einleitung
- 10** Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft
- 16** Normative Vorgaben
- 20** Maßnahmen und Ansatzpunkte
- 26** Nachhaltigkeit und Wettbewerbsfähigkeit
- 32** Mögliche Lösungsansätze
- 52** Diskussionsanstöße
- 58** Zusammenfassung und Ausblick
- 62** Literaturverzeichnis

## Autoren

Sebastian Schlund, Stefanie Eisl, Robert Weidner, Lennart Ralfs, Ulrike Kirschnick, Ralf Schledjewski, Steffen Tilmann, Stefanie Elgeti, Andreas Lehner, Paul Rudolf, Jürgen Stampfl, Jakob Ecker, Wolfgang Posch, Gerald Feichtinger, Matthias Wolf, Christian Ramsauer, Atacan Ketenci, Franz Haas, Gernot Schlögl

\*Der Text baut auf dem Kapitel „Nachhaltige Wertschöpfung“ der 5. Auflage des Handbuchs Unternehmensorganisation auf und erweitert ihn um Fallbeispiele und Positionen für die Produktionstechnik mit besonderem Augenmerk auf Österreich

## Editor

Univ. Prof. Dr.-Ing. Sebastian Schlund  
TU Wien | Institute of Management Science  
Theresianumgasse 27  
1040 Wien, Austria

## Graphics & Design

Thomas Nordwest

## Contact / Distribution

ÖWGP Österreichische Wissenschaftliche Gesellschaft für Produktionstechnik  
Karlsplatz 13  
1040 Vienna, Austria

## oewgp.at

Publication date: October 2024



# Einleitung



# 1. Einleitung

Lange Zeit galt Wachstum und der damit verbundene Ressourcenverbrauch als der gesellschaftlich akzeptierte Weg zu mehr Wohlstand und Lebensqualität. Das damit einhergehende Konsumverhalten übersteigt vor diesem Hintergrund schon lange die auf der Erde zur Verfügung stehenden Ressourcen. Während der Earth Overshoot Day im Jahr 1987 auf den 19. Dezember (Umweltbundesamt, 2020) fiel, wurde dieser Tag 2024 in Österreich bereits am 7. April erreicht (Umweltberatung Österreich, 2024). Der anhaltend steigende Ressourcenverbrauch, vor allem durch die Herstellung und Nutzung von Produkten und Flächen verursachte seit Beginn der Industrialisierung irreparable Schäden der Umwelt wie beispielsweise in den Bereichen Klima, Biodiversität und Grundwasser. Die negativen Konsequenzen dieser Art des Wirtschaftens sind spätestens seit der 1972 veröffentlichten Studie „Die Grenzen des Wachstums“ (Meadows et al., 1972) zur Zukunft der Weltwirtschaft bekannt.

Im europäischen Green Deal von 2019 wurde auf europäischer Ebene beschlossen, im Jahr 2050 keine Netto-Treibhausgasemissionen mehr freizusetzen und somit das Wirtschaftswachstum defacto von der Ressourcennutzung abzukoppeln (Europäische Kommission, 2019). Gleichfalls wurde in diesem Zusammenhang die Mobilisierung eines Investitionsvolumen von einer Billion Euro von der Europäischen Kommission zugesagt. Neben dezidierten Investitionsprogrammen werden große Teile dieser Mittel durch eine Zweckbindung von Posten des EU-Haushalts adressiert. Explizit wird bei diesen normativen Vorgaben betont, dass Ausgaben im Rahmen des Green Deal Zukunftsinvestitionen darstellen, welche die Transformation der EU zu einer ressourceneffizienten und wettbewerbsfähigen Wirtschaft vorantreiben.

Wenngleich Zielsetzung und Programmatik gemeinhin akzeptiert sind, stellt

die Transformation zu nachhaltiger Wertschöpfung Organisationen vor beträchtliche Herausforderungen, vor allem im Bereich der sachverarbeitenden Industrie. Insbesondere geraten Produktivität und Wettbewerbsfähigkeit europäischer Standorte durch die Umsetzung der normativen Vorgaben unter Druck solange keine direkt valorisierbaren Mehrwerte bei den Produkten, Prozessen und Geschäftsmodellen erzielt werden und/oder die entstehenden Kosten nicht durch den Markt und alternativ den Staat übernommen werden. Da gleichzeitig davon ausgegangen werden kann, dass die normative Gültigkeit bestehen bleibt, kommt der Umsetzung nachhaltiger Wertschöpfung im Sinne produktiver und wettbewerbsfähiger Wertschöpfungsnetzwerke vor dem Hintergrund hoher Ressourcenschonung eine Schlüsselrolle der Unternehmensstrategie zu.

## 1.1 Nachhaltigkeit

Das vorrangig genutzte Verständnis nachhaltiger Entwicklung als ausgewogene Zielerreichung in den drei Dimensionen Ökonomie, Ökologie und Soziales (Drei-Säulenmodell) geht auf die Umsetzung des Berichts „Our Common Future“ zurück, den die Weltkommission für Umwelt und Entwicklung der Vereinten Nationen im Jahr 1987 veröffentlichte. Nach der Kommissionsvorsitzenden Gro Harlem Brundtland wird das Dokument häufig als „Brundtland-Bericht“ bezeichnet. Hier wird Nachhaltigkeit dahingehend beschrieben, dass „die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt werden, ohne zu riskieren, dass künftige Generationen ihre eigenen Bedürfnisse nicht befriedigen können.“ (Brundtland, 1987). Daraufhin formulierte die Enquete-Kommission „Schutz des Menschen und der Umwelt“ des Deutschen Bundestages Nachhaltigkeit als eine auf Dauerhaftigkeit angelegte Konzeption der ökonomischen, ökologischen und sozialen Dimension menschlicher Existenz. Im

Jahr 2015 wurden von den Vereinten Nationen mit der Agenda 2030 in Summe 17 Ziele nachhaltiger Entwicklung verabschiedet (Vereinte Nationen, 2015). Diese SDGs (Sustainable Development Goals) bilden die Grundlage für nationale Entwicklungspläne zur Umsetzung der Agenda. Wie aus der nachfolgenden Tabelle ersichtlich ist, erweitern die SDGs nicht nur das Drei-Säulenmodell, sondern berücksichtigen zudem zahlreiche übergeordnete Aspekte der Nachhaltigkeit.

**Ziele nachhaltiger Entwicklung der Vereinten Nationen** (SDGs: Sustainable Development Goals):

1. Keine Armut
2. Kein Hunger
3. Gesundheit und Wohlergehen
4. Hochwertige Bildung
5. Geschlechtergleichheit
6. Sauberes Wasser und Sanitäreinrichtungen
7. Bezahlbare und saubere Energie
8. Menschenwürdige Arbeit und Wirtschaftswachstum
9. Industrie, Innovation und Infrastruktur
10. Weniger Ungleichheiten
11. Nachhaltige Städte und Gemeinden
12. Nachhaltiger Konsum und Produktion
13. Maßnahmen zum Klimaschutz
14. Leben unter Wasser
15. Leben an Land
16. Frieden, Gerechtigkeit und starke Institutionen
17. Partnerschaften zur Erreichung der Ziele

**1.2 Twin Transition**

Die Übergangspfade der Digitalisierung und der Nachhaltigkeit werden ob ihrer hohen gesellschaftlichen Relevanz, Dynamik und zahlreicher Überschneidungen häufig als Twin Transition bezeichnet. Damit verbunden ist sowohl eine Gleichzeitigkeit der Entwicklungen als auch damit verbundene verstärkende und hemmende Rückbeziehungen.

Digitalisierung beschreibt hier vor allem die unter dem Schlagwort Industrie 4.0 beschriebene digitale Vernetzung von Objekten innerhalb industrieller Wertschöpfungsnetzwerke aber auch andere Anwendungsdomänen der Digitalisierung wie das Energiesystem und die Mobilität. In der 2021 vom EU-Generaldirektorat veröffentlichten Publikation Industry 5.0 (Europäische Kommission, 2021) wird die Verknüpfung zur Twin Transition dahingehend gefordert, indem sie Nachhaltigkeit als eine der drei großen Weiterentwicklungsthemen digitaler Vernetzung eingeordnet. Neben einer stärkeren Menschzentriertheit und einer Förderung der Resilienz industrieller Systems kommt der Orientierung an Nachhaltigkeit somit eine Schlüsselrolle in der Weiterentwicklung der Industrie 4.0 zu.

Bezogen auf die gegenseitige Beeinflussung sollen exemplarisch einige prinzipiell verstärkende bzw. hemmende Entwicklungsrichtungen aufgezeigt werden:

- Die Orientierung von Optimierungsfragenstellungen an globalen statt an lokalen Optima wird durch die digitale Vernetzung von Objekten, einen Datenaustausch und die Transparenz über größere Betrachtungsbereiche prinzipiell verbessert und in vielen Fällen durch die Digitalisierung erst ermöglicht. Optimierungsfragenstellungen der Ressourceneffizienz, beispielsweise des sparsameren Energie- und Materialeinsatzes können somit prinzipiell besser und schneller gelöst werden. Dieser Zugang ermöglicht sowohl Verbesserungen im operativen Betrieb als auch in der Planung. So können während des Fertigungsprozesses durch echtzeitnahen Datenaustausch und Regelungsalgorithmen Maschinen- und Prozessparameter angepasst und somit ungewünschte Effekte, beispielsweise Ausschuss, minimiert werden. Über einen längeren Betrachtungszeitraum ermöglicht die kontinuierliche Aufnahme und Auswertung großer Datenmengen vorausschauende Wartungs- und Instandhaltungskonzepte, die sowohl die Anlagennutzung erhöhen als auch den Ressourceneinsatz minimieren helfen.
- Digitalisierung erlaubt in vielen Fällen erst den wirksamen Einsatz von Transparenz. So zielen Entwicklungen im Bereich digitaler Produktpässe auf eine verursachergerechte Ausweisung von Schadstoffen und weiteren Nachhaltigkeitsindikatoren und ermöglichen erst Konsequenzen durch eine Anpassung des Kaufverhaltens der Kunden sowie

etwaiger Förderungen bzw. Bestrafungen durch den Gesetzgeber.

- Digitalisierung ermöglicht häufig eine genauere Erfassung von Kontexten in spezifischen Problemstellungen. So trägt die Erfassung von Bild- und Videoinformationen und die Auswertung definierter Merkmale zu einer passgenaueren Auslösung von Aktionen, beispielsweise bei der Benachschubung von Materialien oder der Planung und Steuerung von Prozessen bei.
- Auf der anderen Seite benötigt Digitalisierung zusätzliche Ressourcen; vor allem Energie. Der Energieverbrauch aller Rechenzentren weltweit betrug im Jahr 2021 zwischen 500 bis 650 Terrawattstunden Strom. In Deutschland wurden im Vergleich insgesamt 518 Terrawattstunden Strom ins Netz eingespeist.

In Summe bleibt noch offen, ob und welche Digitalisierungseffekte zu einer gesamtheitlich vorteilhaften Nachhaltigkeitsbilanz beitragen werden. Andererseits ist aus heutiger Sicht klar, dass eine wirkliche Veränderung unserer Wirtschaft und Gesellschaft in Richtung nachhaltiger Ressourcennutzung nur durch die Nutzung der Möglichkeiten der Digitalisierung funktionieren wird.



# Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft



## 2. Nachhaltigkeit und Kreislaufwirtschaft

Eine der anerkanntesten und relevantesten Lösungsansätze für eine nachhaltige Transformation von Wirtschaft und Gesellschaft stellt der Übergang zur Kreislaufwirtschaft (engl. Circular Economy) dar. Dabei konkurrieren unterschiedliche Rahmenmodelle, welche sich zentral an vielfältigen Konzepten einer stärkeren Ressourcenschonung orientieren. Aufbauend auf der Definition der Kreislaufwirtschaft der Ellen MacArthur Foundation (MacArthur, 2013) wird folgend das Modell nach Potting vorgestellt und in den Kontext des aktuellen Umsetzungsstand sowie zukünftiger Entwicklungsrichtungen eingeordnet (Potting et al., 2017).

Die Erhöhung der Zirkularität – des Anteils der Wertschöpfung, die nicht auf der Nutzung von Primärressourcen basiert – ermöglicht prinzipiell eine Entkopplung des gesellschaftlichen und individuellen Wohlstands vom Ressourcenverbrauch. Der Verbrauch an Biomasse, fossilen Brennstoffen, Metallen und Mineralien hat sich allein im Zeitraum von 1990 bis 2017 verdoppelt und betrug 2017 92 Milliarden Tonnen (BMK, 2022). Neben globalgesellschaftlichen Entwicklungen wie dem Bevölkerungs- und Wirtschaftswachstum trägt insbesondere die aktuell dominierende lineare Wertschöpfung zu dieser Entwicklung bei. Diese basiert auf dem viergliedrigen Grundprinzip take-make-use-waste. Damit wird die Entnahme und Aufbereitung von Primärressourcen (take), deren Verarbeitung durch Produktionsprozesse (make), die verbrauchende Nutzung (use) sowie Entsorgung (waste) beschrieben. Das alternative Konzept der Kreislaufwirtschaft hingegen beschreibt „ein Wirtschaftssystem, welches auf einer Lebenszyklusbetrachtung um die hierarchischen Konzepte Materialreduzierung, -wiederverwendung, -recycling und -deponierung aufbaut“ (MacArthur, 2013). Wie die folgenden beiden Tabellen darstellen, setzt die Kreislaufwirtschaft an der ressourceneffizienteren Transformation linearen Wirtschaftens an

und erweitert diese um zusätzliche ressourcenschonende Konzepte, beispielsweise des Verzichts und der gemeinsamen Nutzung.

Stufen linearen Wirtschaftens	Ansatzpunkte der Kreislaufwirtschaft
Take	<ul style="list-style-type: none"> <li>Umweltverträgliche Ressourcengewinnung</li> </ul>
Make	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ressourcenschonende und</li> <li>abfallarme Herstellung</li> </ul>
Use	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verlängerung der Lebensdauer und</li> <li>Nutzungsintensivierung</li> </ul>
Waste	<ul style="list-style-type: none"> <li>Rückführung von Produkten und Gütern in Produktkreislauf</li> <li>Möglichst lange Werterhaltung</li> <li>Wenn nicht möglich, energetische Verwertung</li> </ul>

Tabelle 1: Stufen linearen Wirtschaftens und Ansatzpunkte der Kreislaufwirtschaft

	Grundsatz	Beschreibung
Intelligente Entwicklung, Nutzung und Herstellung von Produkten und Infrastruktur	1. Refuse	<b>Verzicht:</b> (Das Produkt) überflüssig machen: Anderweitige Erbringung des Produktnutzens
	2. Rethink	<b>Neu denken</b> und zirkulär designen: Produkte neu gestalten und intensiver nutzen, bspw. durch Sharing-Ansätze
	3. Reduce	<b>Reduzieren:</b> Effizienzsteigerung in der Produktherstellung und -nutzung durch geringeren Ressourcen- und Materialverbrauch
Verlängerte Lebensdauer von Produkten, Komponenten und Infrastruktur	4. Reuse	<b>Wiederverwendung</b> funktionsfähiger Produkte
	5. Repair	Produkte warten, instand halten und durch <b>Reparatur</b> weiternutzen
	6. Refurbish	<b>Produkte aufarbeiten</b> und auf den neuesten Stand bringen
	7. Remanufacture	<b>Wiederaufbereiten</b> von Produkten bzw. Teile aus defekten Produkten für neue Produkte (desselben Funktionsbereichs) nutzen
Wiederverwertung von Materialien	8. Repurpose	<b>Anders weiternutzen</b> bzw. Teile aus defekten Produkten für neue Produkte (anderer Funktionsbereiche) nutzen
	9. Recycle	<b>Aufbereitung</b> von Materialien und Rückführung in den Materialkreislauf
	10. Recover	<b>(Thermische) Verwertung</b> mit Energierückgewinnung

Tabelle 2: R-Grundsätze der Kreislaufwirtschaft am Beispiel des Modells nach Potting et al. (2017)

Der Blick auf die Tabelle der R-Grundsätze offenbart die eingangs erwähnten hierarchischen Konzepte. Im Sinne der Ressourcenschonung nimmt der positive Effekt mit steigender Ordnungszahl ab. Offensichtlich benötigen die zuvorderst aufgeführten, im Wesentlichen auf Verzicht basierenden, Ansätze wesentlich weniger Ressourceneinsatz im Sinne von Material und Energie. Gleichwohl befindet sich der aktuelle Umsetzu-

ngsstand noch auf einem sehr niedrigen Niveau. So beträgt die Zirkularitätsrate (Circular Material Use Rate, CMU) europaweit (EU-27) aktuell lediglich 12,8 Prozent (BMK, 2022). Für Österreich zeigen Zahlen von 2023, dass zwar bereits 75 Prozent der Industrieunternehmen Optionen der Kreislaufwirtschaft gemäß der 10R einsetzen, jedoch damit durchschnittlich nur 14 Prozent ihres Jahresumsatzes bestreiten (Vieth et al., 2023).

Es ist nicht davon auszugehen, dass der Umsetzungsstand in den ressourcenschonend höherwertigen Bereichen der R-Gliederung noch wesentlich niedriger ist. Da eine gesamtheitliche Statistik dazu fehlt, kann hier nur von Indikatoren ausgegangen werden. So beträgt der Anteil österreichischer Produktionsunternehmen, die aktuell Remanufacturing-Konzepte nutzen, weniger als zehn Prozent. Dieser Wert beinhaltet zudem nur die Anzahl der aktiven Unternehmen und nicht deren Remanufacturing-Anteil an der Gesamtproduktion, der wahrscheinlich noch wesentlich geringer ausfällt.

Wenngleich die dargestellte Untergliederung der Kreislaufwirtschaftsansätze schon handlungsleitend ist und Unternehmen einen Pfad zu ressourcenschonenden Wertschöpfungskonzepten aufzeigt, existieren zahlreiche Umsetzungshürden und Zielkonflikte. Bevor diese in den nachfolgenden Abschnitten thematisiert werden, soll an dieser Stelle auf drei wesentliche Voraussetzungen für eine erfolgreiche Umsetzung eingegangen werden.

Zuallererst basiert der Ansatz auf Innovation. Zahlreiche bestehende Produkte und Prozesse erschweren heute den einfachen Übergang hin zu ressourcenschonenderen Konzeptstufen. Eine erfolgreiche Umkehr zu zirkulären Konzepten benötigt Innovationen, beispielsweise in der Demontagetechnologie, der Materialklassifizierung und der Zustandsmessung genutzter Produkte. In diesem Sinne fördert Kreislaufwirtschaft Innovation, auch wenn es beim Blick auf die ersten Stufen im Bereich Verzicht, nicht sofort so scheint. Weiterhin basieren einige der Konzepte auf gemeinsamen, plattform- und dienstleistungsbasierten Ansätzen. Teilweise existieren diese heute noch nicht als funktionierende Ökosysteme, beispielsweise für Ersatzteile und Altteilenutzung. Gerade vor diesem Hintergrund sei darauf verwiesen, dass Kreislaufwirtschaft ein stark interdisziplinär getriebener Lösungsansatz ist, der Expertisen aus vielfältigen Bereichen der Technologie sowie der gesellschaftlichen Innovationsforschung bündelt und zusammenführt. Zuletzt sei an dieser Stelle auf die Notwendigkeit international akkordierter Initiativen hingewiesen. Initiativen in Europa können langfristig nur erfolgreich sein, wenn die Opportunitätskosten einer Nutzung von Ressourcen außerhalb des Betrachtungsraums nicht wesentlich geringer sind.



# Normative Vorgaben



### 3. Normative Vorgaben

Neben der offenkundigen Sinnhaftigkeit ressourcenschonenden Verhaltens für jeden Einzelnen und die gesamte Gesellschaft wird die Transition zu nachhaltigen Wertschöpfungssystemen stark normativgetrieben. Sowohl die Europäische Union als auch vor allem die skandinavischen und die deutschsprachigen Länder setzen hier aktuell auf sehr ambitionierte Ansätze. Diese werden sowohl politisch als auch wirtschaftlich und gesellschaftlich an ihrer Umsetzung und den daraus erzielten Erfolgen gemessen. Um dies aus wirtschaftlicher Sicht einzuschätzen und wirkungsvolle Umsetzungsmaßnahmen vorzuschlagen ist Kenntnis über die grundlegenden aktuellen gesetzlichen Vorgaben, Zielsetzungen, Restriktionen und Förderungen notwendig.

Aktuell bestimmen drei wesentliche Zielsetzungen die Diskussion.

1. Umgestaltung der Wirtschaft und Gesellschaft zu einer umfassend nachhaltigen Kreislaufwirtschaft
2. Realisierung der Klimaneutralität bis zum Jahr 2040 (Österreich (Bundeskanzleramt Österreich, 2020)) bzw. 2045 (Deutschland)
3. Positionierung als führender Industriestandort für hochwertige, ressourcenschonende und CO<sub>2</sub>-arme Produktion

Wenngleich die Zielstellungen in ihrer Ausrichtung sinnvoll sind, zeigt der Blick auf den aktuellen Umsetzungsstand die Dimension dieser Ambitionen. Am Beispiel der CO<sub>2</sub>-äquivalenten Emissionen der österreichischen Sachgüterindustrie wird ersichtlich, dass diese im Zeitraum von 2010 bis 2019 nur minimal rückläufig waren. Eine Weiterführung ähnlicher Reduzierungen bis zum Zielzeitpunkt 2040 würde eine dramatische Verfehlung des Ziels der Klimaneutralität bedeuten. Stattdessen ist es notwendig, dass bereits in der aktuellen Dekade (2024 – 2033) massive Einsparungen an Treibhausgasäquivalenten getätigt werden müssen, um auch nur annähernd eine ausgeglichene Klimabilanz 2040 zu erreichen. Dieser Ansatz unterstellt, dass jeder einzelne Industriesektor eine für sich sektorspezifische Klimaneutralität anstreben und erreichen muss. Von einem sektorübergreifenden Ausgleich durch eventuelle Überkompensation einzelner Sektoren kann aktuell nicht ausgegangen werden. Global gesehen kommt der Sachgüterindustrie im Kontext der Nachhaltigkeitsdiskussion eine Schlüsselposition zu. So verursacht die Gewinnung und Verarbeitung von Ressourcen ca. 50% der Treibhausgasemissionen und mehr als 90% der Biodiversitätsverluste und das Wasserstress (Europäische Kommission, 2020a). Allein die Produktion von Stahl, Zement, Kunststoffen, Papier und Aluminium verursacht 36% aller globalen Treibhausgasemissionen (BMK, 2022).

Zur Erfüllung der Nachhaltigkeitsziele stellt eine erfolgreiche Umsetzung zirkulärer Wirtschafts- und Gesellschaftskonzepte einen starken Hebel dar. So sind mindestens sechs der 17 globalen Nachhaltigkeitsziele durch die Kreislaufwirtschaft beeinflussbar. Konkret sind dies die Ziele 12: Nachhaltige Konsum- und Produktionsstrukturen, 9: Industrie, Innovation und Infrastruktur, 11: Nachhaltige Städte und Gemeinden, 13: Maßnahmen zum Klimaschutz sowie indirekt 8: Menschenwürdige Arbeit und Wirtschaftswachstum und 10: Weniger Ungleichheiten.

Die wahrscheinlich aktuell drastischste Maßnahme der Umsetzung der Nachhaltigkeitsziele auf europäischer Ebene ist die seit 2022 gültige Taxonomieverordnung. Sie beschreibt detailliert, was künftig als nachhaltige Wirtschaftsaktivität gilt (Europäische Kommission, 2020b). Nach einer Phase der Operationalisierung und des Übergangs ist davon auszugehen, dass spätestens 2027 detaillierte Kennzahlen zu Nachhaltigkeit vorgelegt (und erfüllt) werden müssen, um Zugang zu öffentlichen und vielen privaten Investitionsmitteln zu erlangen.

## **Maßnahmen und Ansatzpunkte**



Gear 7-38 1:2.75

s/n: 3

Trans.Gear 1:3.25

s/n: 3941501

MT-450919

Teeth 40

STATOR (s3x51n)

s/n: 3941501

MT-450919

Op.T 10-150

Winding F: 0.99

n.c. 24

## 4. Maßnahmen und Ansatzpunkte

Politische Maßnahmen zielen aktuell darauf ab, die bereits beschriebenen Strategien in Richtung erfolgreicher Kreislaufwirtschaft zu unterstützen. Als anstrebenswerte Ziele dafür definiert beispielsweise die österreichische Kreislaufwirtschaftsstrategie 2022 folgende sieben Bereiche (BMK, 2022):

### 1. Verbreitung des Circular-by-Design-Ansatzes

*Circular-by-Design* bzw. *Design for R* beschreibt die priorisierte Berücksichtigung der Anforderungen eines möglichst kreislaufgerechten Produktlebenszyklus. Damit diese rechtzeitig in Produktmerkmale und -eigenschaften umgesetzt werden können, ist es notwendig, sie bereits in den frühen Phasen der Produktentwicklung zu berücksichtigen. Zusätzlich dazu müssen sie gegenüber weiteren, teilweise konfliktären, Anforderungen überpriorisiert werden. Dieses Vorgehen benötigt die Orientierung der Produktentwicklung mit all ihren Beteiligten an einem Qualitätsbegriff, der sich stark an den Anforderungen der Stakeholder des Produktes und nicht (nur) der Kunden orientiert bzw. die Internalisierung externen Umweltkosten und eine erwartete Veränderung der Kundenpräferenzen hin zu kreislaufgerechten Produkten und Dienstleistungen vorwegnimmt. Modularisierung, möglichst unaufwändig trennbare Materialkombinationen und trennbare Fügeverfahren ermöglichen die Demontage und eine energieschonende Weiterverarbeitung. Für die operative Umsetzung existieren zahlreiche Handreichungen, Richtlinien und Checklisten, beispielsweise aus dem Bereich des Ecodesigns sowie des Designs for Remanufacturing (Ijomah et al., 2007).

### 2. Ermöglichung systemischer zirkulärer Innovationen (technisch und explizit auch sozial)

Zirkuläre Innovationen zielen auf eine ökologisch und betriebswirtschaftlich sinnvolle Produktnutzung ab, die gemeinhin über die konventionelle Produktbesitzlogik hinausgeht. Sie umfasst dabei vor allem Sharing- und Tauschkonzepte. Diese haben das Ziel einer wesentlich höheren Produktnutzung bzw. -auslastung und gleichzeitig dazu eines geringeren Ressourceneintrags durch in Summe weniger hergestellte und verbrauchte Produkte gemein. Im Sinne der Nachhaltigkeit können solche Ansätze häufig auch besonders sinnstiftend und sogar sozial positiv umgesetzt werden, wie zahlreiche Quartier- oder Nachbarschaftskonzepte zeigen, die auf dem Grundprinzip aufbauen. Gleichzeitig entsteht der betriebswirtschaftliche Druck, den geringeren Produktabsatz durch alternative Einnahmequellen oder höhere Deckungsbeiträge wettzumachen.

### 3. Initiierung und Stärkung zirkulärer Geschäfts- und Organisationsmodelle

Genau wie das vorhergehende Ziel setzen zirkuläre Geschäftsmodelle an einer kreislauforientierten Betrachtung der Erfüllung von Kundennutzen an und antizipieren zukünftige Faktorkostensteigerungen sowie einen Wertewandel auf Kundenseite. Auf dieser Grundlage werden heute durch Produkte erfüllte Anforderungen in Dienstleistungskonzepte übertragen und beispielsweise Mobilität statt Autos, Löcher statt Bohrmaschinen und Maschinenstunden statt Maschinen verkauft. Während der bisherige Schwerpunkt neuer Geschäftsmodelle meist auf der intelligenten Datennutzung zur Effizienzsteigerung lag, geraten nun vermehrt zirkulär getriebene Konzepte in den Blickpunkt.

#### **4. Erhöhung der Nutzungsdauer und -intensität von Produkten, Komponenten und Infrastruktur und Sicherstellung der Wieder- und Weiterverwendung auf möglichst hohem Niveau im Wertschöpfungsnetzwerk**

Grundsätzlich bieten sich mit Blick auf die R-Ansätze die folgenden drei, sinnvollerweise parallel laufenden, Strategien an:

- a) Berücksichtigung und Anwendung von Kreislaufwirtschaftskonzepten, beispielsweise Einbindung heute noch nicht energetisch genutzter Abfälle in den Kreislauf (auch wenn dies im ersten Ansatz noch einen sehr weiten Zugang zur Zirkularität darstellt)
- b) Effizienz- und Effektivitätssteigerung innerhalb einer Stufe, bspw. Erhöhung des Recyclinganteils eines Materials
- c) Stufenaufstieg zu höheren, energie- und materialschonenderen Konzepten; bspw. von Recover zu Recycle oder von Remanufacture zu Refurbish

#### **5. Markteinflussnahmen um die betriebswirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit für zirkuläre Produkte und Dienstleistungen zu ermöglichen**

In diesem Ziel lassen sich prinzipiell zwei Ansätze unterscheiden. Zum einen können besonders kreislaufwirtschaftsfreundliche Lösungen gefördert werden. Solche Subventionen haben eine lange Tradition politisch motivierter Markteinflussnahme, lassen sich aber sinnvoll nur über einen begrenzten Transitionszeitraum und einen Teilmarkt erfolgreich umsetzen. Auf der anderen Seite kann gezielt der Faktoreinsatz in definierten Bereichen verteuert werden. Besonders populär und begründet durch die angestrebte Reduzierung von Emissionen ist dabei die Orientierung an Treibhausgasäquivalenten (CO<sub>2</sub>-Bepreisung bzw. -Besteuerung) oder einzelnen Abgasen (Russpartikel u.ä.).

#### **6. Förderung material- und energieeffizienter, schad- und stofffreier Herstellungsprozesse und Produktionssysteme**

Gerade im industriellen Bereich beitragen die Investitions- und Abschreibungszyklen für Maschinen und Produktionsequipment eher Dekaden als Jahre. Die Konsequenz ist, dass die Ressourceneffizienz der aktuell eingesetzten Produktionssysteme häufig nicht dem aktuell technisch möglichen State-of-the-Art entspricht. Eine Förderung (bzw. auch eine Forderung) moderner aktueller Systeme und inno-

vativer Zukunftslösungen erhöht die Ressourceneffizienz, erzeugt aber Investitions- und Finanzierungsbedarf bei den betroffenen Organisationen (häufig Unternehmen). Gleiches gilt für die Einführung und Umsetzung von ressourcenschonenden Prozessinnovationen.

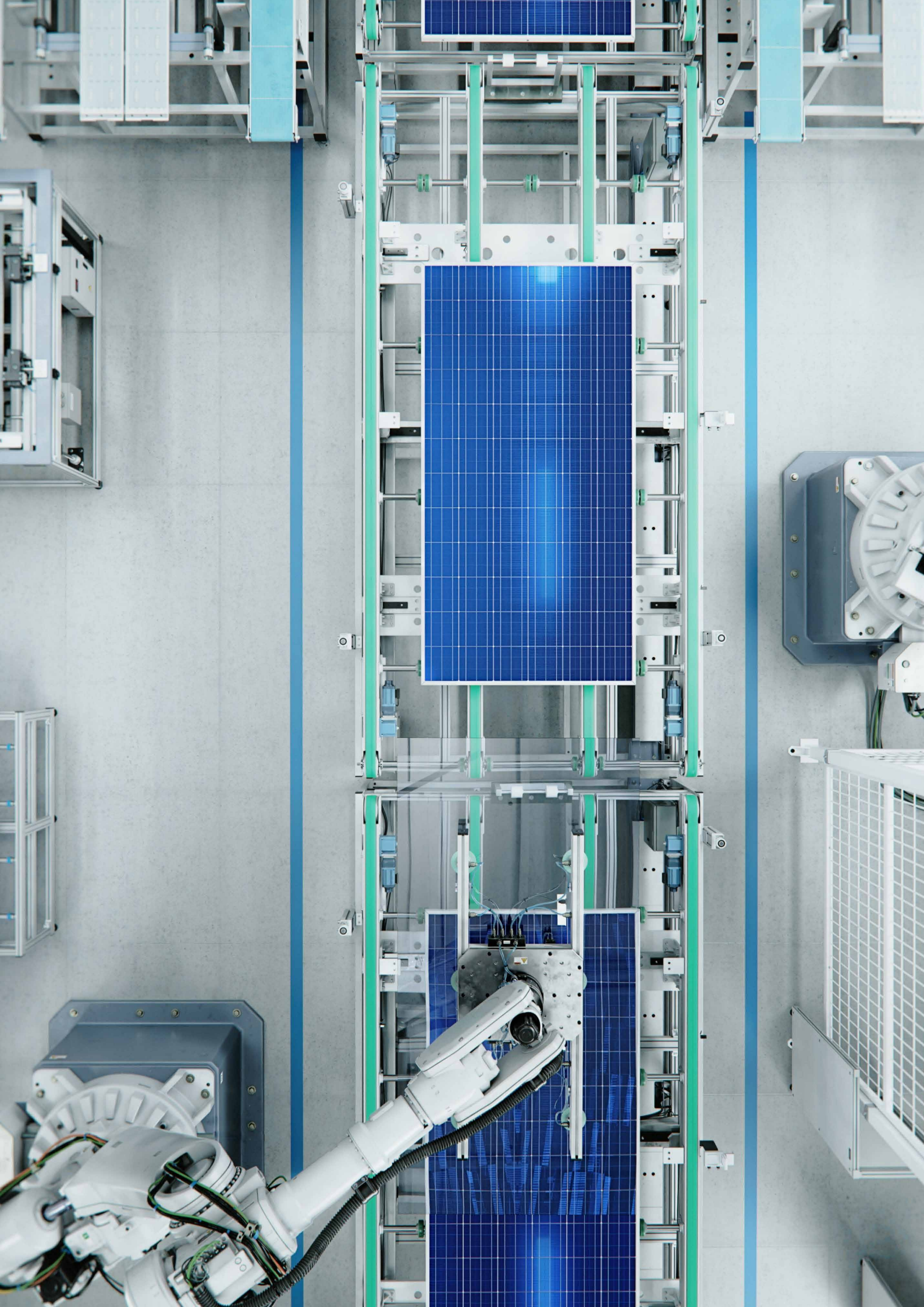
#### **7. Schließung von Materialkreisläufen und Erhöhung des Einsatzes von Sekundärrohstoffen**

Für viele Produkte beträgt die Materialrückführungsquote weit unter 100 Prozent. Da damit der technisch mögliche Anteil an Recycling festgelegt wird, ist es klar ersichtlich, dass eine Erhöhung der Rückführungsquote erstrebenswert ist. Beispiele dafür sind Aluminiumanteile in Fahrzeugen, Plastikflaschen aus PET (Polyethylenterephthalat; europaweit unterschiedlich zwischen 30 und 90% je nach gesetzlichen Pfand- und Sammelvorgaben) und Alttextilien (europaweit bei unterhalb von 20% (Kommunalwirtschaft, 2020)). Der Kreislauf von Textilien zeigt stellvertretend noch weitere Probleme der globalen Rohstoffströme auf, wie die Weiternutzung und Entsorgung in Drittstaaten außerhalb Europas.

#### **8. Umstellung auf nachwachsende Rohstoffe, klimaneutrale Erzeugung kohlenstoffbasierter Produkte und Nutzung der Möglichkeiten der Carbon Capture and Utilization (CCU)**

Dieses Ziel subsummiert vor allem den Anfang und das Ende des Rohstoffkreislaufs, da hier bei zahlreichen Materialien, vor allem Metallen, ein Großteil des negativen Emissionseintrags festgelegt wird. Neben dem Einsatz nachwachsender Rohstoffe ist hier auch die Nutzung weniger energieintensiv hergestellter Materialien möglich. Für die klimaneutrale Erzeugung kohlenstoffbasierter Produkte wird aktuell häufig auf den Einsatz erneuerbarer Energien zur Herstellung verwiesen. Dieser Lösungsansatz scheint langfristig sinnvoll, stellt aber heute bestenfalls eine Zwischenlösung dar, weil in den wenigsten Regionen Europas tatsächlich große Anteile des Energiebedarfs aus erneuerbaren Quellen kommen. Eine weitere Möglichkeit ist der gezielte Einsatz von CO<sub>2</sub>-Senken, insbesondere biologischen Ursprungs (Tiere und Pflanzen) um entstehende Treibhausgase direkt am Entstehungsort aufzunehmen und zu kompensieren.

# Nachhaltigkeit und Wettbewerbsfähigkeit



## 5. Nachhaltigkeit und Wettbewerbsfähigkeit

Die zentrale Fragestellung bei der Transformation zu einer nachhaltigen Wirtschaft und Gesellschaft ist die nach der gleichzeitigen Sicherstellung der Wettbewerbsfähigkeit und der damit verbundenen Wohlstandssicherung. Die meisten der Maßnahmen stellen steuernde Eingriffe in das Marktverhalten dar und verteuern die traditionelle (nicht nachhaltige) Erbringung von Wertschöpfung beziehungsweise den Leistungsbezug für einheimische Kunden. Häufig wird angeführt, dass diese Kostensteigerungen auf lange Sicht Innovation beschleunigen und, durch die gleichzeitige Förderung nachhaltiger Technologien, europäische Unternehmen zukünftig wettbewerbsfähiger stellen werden. Für eine langfristig erfolgreiche Umsetzung dieser Argumentation ist es jedoch unbedingte Voraussetzung, dass die Maßnahmen abgestimmt durchgeführt werden. Gleichzeitig gilt es zu vermeiden, dass der industrielle Kern der betroffenen Volkswirtschaften während der Transformation zu stark geschädigt wird. Vor diesem Hintergrund werden die aktuell eingeleiteten Maßnahmen in der Folge diskutiert und eingeschätzt.

### 1. Definition, Beibehaltung und internationale Abstimmung der Nachhaltigkeitsindikatorik

Eine Grundbedingung für den Erfolg einer nachhaltigen Wirtschaft und Gesellschaft ist die Orientierung an Kennzahlen. Gemäß dem Grundtheorem des Qualitätsmanagements „You cannot improve what you don't measure“ sind zielführende, möglichst widerspruchsfreie, messbare und handlungsleitende Kennzahlen zu definieren. Für den Bereich der Kreislaufwirtschaft kommen dafür aktuell beispielsweise folgende Kennzahlen infrage:

- CO<sub>2</sub>-Äquivalente
- Wasserverbrauch

- Ressourcenverbrauch (material footprint), auch inländischer Materialverbrauch bzw. DMC (domestic material consumption):
- Ressourcenproduktivität: wirtschaftliche Leistung in Euro je Tonne Materialeinsatz (DMC)
- Zirkularitätsrate (Nutzungsrate wiederverwendbarer Stoffe, Circular Material Use Rate CMU)
- Masse der Siedlungsabfälle sowie Recyclingrate von Siedlungsabfällen
- Bodenverbrauch bzw. Flächeninanspruchnahme

Bei allen aufgeführten Indikatoren stellt eine Reduzierung eine Verbesserung im Sinne der Nachhaltigkeit dar. Aktuell sind die Kennzahlen zwar definiert; eine handlungsleitende Orientierung von Maßnahmen auf Einzelebene ist jedoch kaum darstellbar. Eine viel engmaschigere, durchgängigere und transparentere Darstellung des „Ressourcenrucksacks“ von Produkten und Prozessen ist demzufolge notwendig, um nachdrücklich eine Reduzierung umzusetzen und darzustellen. Die EU-weiten Anstrengungen in Richtung eines Digitalen Produktpasses gehen eindeutig in die Richtung; die europaweite Operationalisierung ist jedoch heute (2023) zeitlich noch nicht absehbar. Eine weitere Herausforderung stellt die Zuweisung negativer Effekte dar, welche indirekt aus nicht-nachhaltigem Verhalten resultieren. So werden beispielsweise Treibhausgasemissionen in drei Dimensionen unterteilt. Neben den direkt von Unternehmen verantworteten und kontrollierten Emissionen (*Scope 1*) werden auch indirekte Emissionen der eingekauften Energie aufgenommen (*Scope 2*). Darüber hinaus verursacht die Herstellung von Produkten auch Emissionen bei der Verarbeitung von benötigten Rohmaterialien und Halbzeugen, im Liefernetzwerk sowie im gesamten späteren Produktle-



## **5. Ungleichmäßige globale Voraussetzungen**

Die Voraussetzungen für die Umsetzung von Kreislaufwirtschaftsaktivitäten sind heute aus vielerlei Gründen verschieden. Weltweit unterscheiden sich vor allem der bestehende und gesellschaftlich akzeptierte Stand der Technologie, die Umweltgesetzgebung sowie die Ausgestaltung sozialer Mindeststandards. Daraus folgt eine sehr unterschiedliche Priorisierung in verschiedenen Weltgegenden. Abhängig von der globalen Arbeitsteiligkeit bzw. Verwobenheit der Wertschöpfungsnetzwerke unterschiedlicher Branchen ist die potenzielle Umsetzungsgeschwindigkeit sehr hoch, beispielsweise bei der Zementherstellung (regional, hohe Emissionen) bis sehr gering, beispielsweise bei der Elektronikherstellung. Ein weiterer Hebel stellt hier die Konsumentenmacht dar, doch ist aktuell noch nicht absehbar, wie weit abwärts die Zulieferstrukturen damit beeinflusst werden können.

## **6. Kollateralschäden durch Wegbrechen der Wettbewerbsfähigkeit der Industrie durch höhere Abgaben und fehlende technologische Innovationen**

Der Erfolg nachhaltiger Wertschöpfung wird insgesamt nicht nur am zukünftigen Ergebnis gemessen, sondern wesentlich vom Umsetzungsprozess bestimmt. Dieser Transformationsprozess muss gestaltet werden, und zwar so, dass Unternehmen ihre Wettbewerbsfähigkeit über den gesamten Zeitraum behalten. Somit ist das Timing etwaiger Maßnahmen und der Einsatz politischer Unterstützung eminent wichtig und wird voraussichtlich gewaltige finanzielle Ressourcen binden. Gleichzeitig besteht das Risiko, dass gesellschaftliche Nachhaltigkeitsziele durch andere Krisen abgelöst und depriorisiert werden und/oder „nachhaltiges“ Konsumentenverhalten weiter Teile der Gesellschaft nicht aufrechterhalten werden kann.



## Mögliche Lösungsansätze



M

T

V

Search

Growth 100%

Fund average return 100%

S Sustainability

April

July

August

September

October

1

## 6. Mögliche Lösungsansätze

Nachfolgenden werden theoretische Grundlagen und Herausforderungen der Nachhaltigkeit und im konkreten der Kreislaufwirtschaft in praktischen Kontext veranschaulicht. Die ausgewählten Fallbeispiele beleuchten unterschiedliche Aspekte und Facetten nachhaltiger Wertschöpfung. Sie zeigen auf, wie mit aktuellen Herausforderungen umgegangen werden kann und gleichzeitig Chance genutzt werden können, um den Transformationsprozess in Richtung nachhaltige Wertschöpfung weiter voranzutreiben.

### 6.1. Nachhaltige Additive Fertigung

**Jürgen Stampfl & Jakob Ecker**, Institut für Werkstoffwissenschaft und Werkstofftechnologie, Forschungsbereich Polymer- und Verbundwerkstoffe, TU Wien, Wien, Österreich

Im Hinblick auf die Ressourceneffizienz und die Verwendung nachhaltiger Ausgangsmaterialien ist die additive Fertigung (engl. Additive Manufacturing, kurz AM) bereits ein vergleichsweise umweltfreundliches Verfahren und bringt vielerlei Vorteile mit sich:

(1) die Möglichkeit, Bauteile kurzfristig in bedarfsgerechten Mengen herzustellen, verhindert übermäßige Lagerbestände, (2) der Einsatz von AM reduziert den Materialabfall, da nur das benötigte Material während des Herstellungsprozesses bei der Fertigung des spezifischen Bauteils zugegeben wird, und (beschränkt auf polymere Werkstoffe) (3) Rohstoffe aus nachhaltigen Quellen können unter vergleichsweise milden Bedingungen (z.B. niedriger Temperatur) verarbeitet werden. Beispiele sind Epoxide, Polyamide und Polymilchsäure, die alle aus nachwachsenden Rohstoffen wirtschaftlich gewonnen werden können.

Lichtbasierte Verfahren (Stereolithographie, DLP) bieten insbesondere in anderen Bereichen, wie z.B. in der Elektronikindustrie und bei der Herstellung

von elektrochemischen Speichern, ein großes Potenzial, als nachhaltige Fertigungsverfahren eingesetzt zu werden. Um eine höhere Leistungsfähigkeit elektronischer Bauteile zu erreichen, müssen deren Komponenten (Leiterplatten, Mikrochips, passive Bauteile, ...) in einem immer komplexer werdenden und hoch integrativen Ansatz hergesellt werden. Beim Recycling und der damit einhergehenden Trennung der erhaltenen Materialien führt dies zu komplizierten Demontageprozessen. Insbesondere Edelmetalle oder seltene Erden können daher nur mit großem Aufwand zurückgewonnen werden und landen häufig auf der Deponie. Aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit dieser Materialklassen und des weltweit steigenden Ressourcenbedarfs ist ihre vollständige Rückgewinnung jedoch langfristig unumgänglich.

Design for Disassembly (DfD) stellt ein neues Konzept dar, bei dem der 3D-Druck sinnvoll in den Herstellungsprozess von Elektrobauteilen integriert wird, um eine leichtere Recyclierbarkeit zu gewährleisten. Bauteile sind so zu gestalten, dass ihre Einzelteile leicht zugänglich sind und einfach getrennt und wiederverarbeitet werden können.

Durch die Kombination und Entwicklung neuer 3D-Drucksysteme und Materialien können Bauteile mit kleinsten Strukturen im Mikrometerbereich hergestellt werden und mit gezielten Sollbruchstellen versehen werden. Die gezielt eingepprägten Sollbruchstellen sollen die mechanischen Eigenschaften des Bauteils während der normalen Lebensdauer nicht beeinträchtigen und nur durch bestimmte "Auslöser" aktiviert werden. Nach der Nutzungsdauer können die Produkte durch die „Aktivierung“ der Sollbruchstelle in ihre Einzelteile zerlegt und die jeweiligen Komponenten separat wiederverwendet oder recycelt werden. Der 3D-Druck bietet damit die Möglichkeit einer hohen Merkmalsauflösung, die Herstellung

von Multimaterial-Bauteilen sowie das Potenzial zur Massenproduktion von sehr kleinen Bauteilen. All diese Vorteile kombiniert in einem Verfahren eröffnen zahlreiche neue Möglichkeiten in der Entwicklung und Produktion von elektronischen Komponenten.

Das Konzept des DfD in der AM wurde mit dem Ziel entwickelt, diesen Ansatz in industrielle Produktionsprozesse zu integrieren und die Kreislaufwirtschaft weiter voranzutreiben. Es stellt einen transformativen Ansatz für das Recycling und die Rückgewinnung von Ressourcen aus Elektroschrott dar, kann aber auch auf andere Sektoren angewendet werden. Durch die Entwicklung von Produkten, die leicht zerlegt werden können, und den Einsatz additiver Fertigungstechnologien wird das Potenzial für Recycling, einer nachhaltigen Konsumweise und die Motivation zur Reparatur von Komponenten erhöht. Mit AM und DfD können Hersteller Produkte erstellen, die sich leicht demontieren lassen und die Rückgewinnung wertvoller Materialien erleichtern. Dies gilt insbesondere für Edelmetalle und seltene Erden, die daraufhin für künftige Fertigungsprozesse wiederverwendet werden können.

## 6.2. Robuste Optimierung in der Produktionstechnik

**Steffen Tillmann & Stefanie Elgeti**, Institut für Leichtbau und Struktur-Biomechanik, Forschungsbereich Leichtbau, TU Wien, Wien, Österreich

Robuste Optimierung ist ein Ansatz für Design und Entscheidungsfindung unter Unsicherheit, der darauf abzielt, Lösungen zu finden, die nicht übermäßig empfindlich auf Unsicherheiten in den Eingaben reagieren. Es gibt verschiedene Arten von Unsicherheiten, die in einem physikalischen System auftreten können und in einer Optimierungsumgebung berücksichtigt werden können. Die erste Art sind unbekannte Umwelt- und Betriebsbedingungen, die normalerweise als unkontrollierbare Eingaben in das System auftreten. Zum Beispiel variierende oder unbekannte Materialeigenschaften oder andere Betriebsbedingungen. Die zweite Art sind Toleranzen und Ungenauigkeiten in den Designparametern des Systems, wie zum Beispiel Fertigungsfehler. Hier führen größere Fertigungstoleranzen zu mehr Unsicherheit bei den Designparametern (Chen et al., 1996). Die dritte Art der Unsicherheit liegt in der Bewertung der Systemausgänge. Diese Unsicherheiten ergeben sich aus Mess- und Modellfehlern. Darüber hinaus kann eine Kombination dieser Unsicherheiten zur Verletzung von Nebenbedingungen und damit zur Unzulässigkeit des gefundenen Optimums führen (Beyer & Send-

hoff, 2007; Gabrel et al., 2014; Jung & Lee, 2002).

Es gibt mehrere Methoden zur Berücksichtigung der Unsicherheiten, von denen die erste von Taguchi (Taguchi, 1989) vorgeschlagen wurde. Die Taguchi-Methode ist ein statistischer Ansatz zur Designoptimierung, der darauf abzielt, die Qualität eines Produkts oder Prozesses zu verbessern, indem die Variabilität minimiert und die Empfindlichkeit des Ausgangs gegenüber den Eingangsparametern verringert wird. Es handelt sich um einen systematischen Ansatz zur Ermittlung der wichtigsten Faktoren, die die Qualität eines Produkts oder Prozesses beeinflussen, und die Anwendung statistischer Verfahren zur Optimierung der Werte dieser Faktoren. Sie wird in der Fertigungsindustrie und im Maschinenbau häufig eingesetzt, um die Produktqualität zu verbessern und die Kosten zu senken. Diese Methode skaliert jedoch exponentiell mit der Dimensionalität des Problems, was das Hauptproblem der robusten Optimierung darstellt (Trosset, 1996).

Neuere robuste Optimierungsmethoden versuchen, das Problem der exponentiellen Skalierung der Rechenkosten zu lösen und können in deterministische und probabilistische Methoden unterteilt werden. Die deterministischen Methoden berechnen eine robuste Lösung in Bezug auf den "schlimmsten Fall" der unsicheren Variablen (Trosset, 1996). Sie sind billiger in der Auswertung, aber die Lösung ist in der Praxis möglicherweise nicht praktikabel, weil sie zu konservativ ist. Stattdessen modellieren probabilistische Methoden die Unsicherheit mit einer Zufallsverteilung. Der Nachteil dieser Methode ist, dass zur Berechnung des Robustheitsmaßes in der Regel Integrale erforderlich sind, deren Auswertung im Allgemeinen teuer ist (Beyer & Sendhoff, 2007; Gabrel et al., 2014).

Ein Beispiel für eine deterministische Methode ist der sogenannte Robust Counterpart Ansatz, welcher für Optimierungsprobleme mit unsicheren Daten gedacht ist. Dabei wird ein Optimierungsproblem formuliert, das den maximalen Wert der Zielfunktion minimiert, wenn die unsicheren Parameter innerhalb eines bestimmten Intervalls variieren (Li & Floudas, 2012; Trosset, 1996).

Ein Beispiel für eine probabilistische Methode ist die Mean-Variance Methode, die auch als Erwartungsmaß der Robustheit bekannt ist. Hier werden die unsicheren Parameter mit einer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion modelliert, aus der der Mittelwert und die Varianz der Zielfunktion berechnet werden können (Kumar Tarei et al., 2022). Das

Problem wird dann zu einem mehrkriteriellen Optimierungsproblem, da Mittelwert und Varianz unterschiedliche Minima aufweisen. Eine Lösung für dieses Optimierungsproblem besteht darin, den Mittelwert und die Varianz zu einer gewichteten Summe zu kombinieren. Eine andere Möglichkeit ist die Verwendung von pareto-optimalen Lösungen. Je nach Problemstellung muss die Bedeutung der Varianz gewählt werden (Beyer & Sendhoff, 2007). In Bontinck et al. (2018) wird der Robust Counterpart Ansatz mit der Mean-Variance Methode verglichen, wobei die Gleichwertigkeit der beiden Methoden bei Verwendung der Linearisierung gezeigt wird (Bontinck et al., 2018).

Eine weitere probabilistische Methode ist das sogenannte Probabilistic Threshold Robustness Maß. Es quantifiziert die Unsicherheit durch die Wahl eines Schwellenwerts und die Messung des Prozentsatzes der Ergebnisse, die unter diesem Schwellenwert liegen (Beyer & Sendhoff, 2007; Inatsu et al., 2021). Die Berechnung dieses Prozentsatzes kann entweder durch Monte-Carlo-Sampling (MC) oder durch einen iterativen Algorithmus erfolgen. In Iwazaki et al. (2020) wird ein Algorithmus vorgeschlagen, der Bayes'sche Optimierung einsetzt, um den Prozentsatz genau zu berechnen und sein Optimum mit der geringsten Anzahl von High-Fidelity-Modellbewertungen zu finden (Iwazaki et al., 2020).

Das Problem bei den probabilistischen Methoden, wie der Mean-Variance Methode und der Probabilistic Threshold Robustness Methode, besteht darin, dass für jede Iteration des Optimierungsalgorithmus ein Integral über den variierenden Parameter gelöst werden muss. Dies kann mit MC-Sampling oder einer Quadraturregel geschehen. MC-Sampling erfordert je nach Problem Hunderte bis Tausende von Stichproben (Yakowitz et al., 1978), was nicht praktikabel ist, wenn die Zielfunktion teuer zu berechnen ist. Quadraturformeln erfordern in der Regel einige Dutzend Auswertungen für ein 1D-Integral, was billiger ist, aber immer noch teuer sein kann, je nach den Kosten für die einmalige Berechnung der Zielfunktion. Außerdem steigt die Anzahl der für Quadraturformeln erforderlichen Auswertestellen exponentiell mit der Anzahl der Dimensionen, so dass MC-Sampling für hochdimensionale Integrale günstiger ist (Novak & Ritter, 1997). In speziellen Fällen kann die Anzahl der Auswertungen reduziert werden. Wenn zum Beispiel die Zielfunktion einer Normalverteilung folgt, kann die Gauß-Hermite-Quadratur zur Auswertung der Integrale verwendet werden. In Huang & Du (2006) wird vorgeschlagen, dass in diesem Fall drei oder vier Quadraturpunkte für technische Probleme ausreichend

sind (Huang & Du, 2006). Eine weitere Möglichkeit zur Verringerung der Rechenkomplexität besteht in der Verwendung von Modellen reduzierter Ordnung oder Ersatzmodellen. Bei klassischen Optimierungsproblemen werden sie verwendet, um die Anzahl der notwendigen High-Fidelity-Modellauswertungen zu reduzieren (Eldred & Dunlavy, 2006). Sie können auch in der robusten Optimierung verwendet werden, um die Kosten für die Berechnung von Integralen für das Robustheitsmaß zu reduzieren. In Fuhrländer & Schöps (2020) wird ein Algorithmus zur Verwendung eines Surrogatmodells für die probabilistische robuste Optimierung vorgeschlagen (Fuhrländer & Schöps, 2020). Hier wird eine Gaußprozess-Regression (GPR) als Ersatzmodell verwendet. Dann wird das GPR für MC-Sampling verwendet, und es werden nur wenige Modellevaluierungen mit dem High-Fidelity-Modell durchgeführt. Diese Methode wurde für die robuste Optimierung von elektromagnetischen Geräten angewandt. Es ist auch möglich, Taylor-Entwicklungsreihen anstelle der Quadratur zu verwenden, um Mittelwert und Varianz zu berechnen, wie in Darlington et al. (2000) gezeigt (Darlington et al., 2000).

Zum Abschluss werden Beispiele für robuste Optimierungsanwendungen in der Produktionstechnik vorgestellt. In Zhang & Li (2018) ermitteln die Autoren optimale Toleranzen bei der Produktion von Verbrennungsmotoren unter Berücksichtigung von Parameter-, Modell- und Metamodellierungsunsicherheiten (Zhang & Li, 2018). Hier wird GPR zusammen mit der Mean-Variance Methode zur robusten Optimierung eingesetzt. In Aouma et al. (2018) wird die Methode des robusten Gegenstücks in der Produktionsplanung zur Annahme oder Ablehnung eines Auftrags verwendet (Aouam et al., 2018). In Salmasnia et al. (2018) wird ein Ansatz zur statistischen Prozesskontrolle und Instandhaltungspolitik vorgestellt, der die Robust Counterpart Methode zur Minimierung der Modellkosten unter unsicheren Parametern verwendet (Salmasnia et al., 2018). Ein weiteres Beispiel ist die robuste Optimierung der Herstellung von Großserienbauteilen aus Titanlegierungen mit mehreren Rippen, um die Formfüllung und die Homogenität der Verformung zu verbessern. Hier wird die Mean-Variance Methode in Kombination mit der Auswahl von Pareto-optimalen Lösungen verwendet (Wei et al., 2018). Weitere Beispiele sind in der Übersichtsarbeit von (Knapczyk et al., 2019) zu finden.

### 6.3. Nachhaltigkeit von Faser-Kunststoff-Verbundwerkstoffen

**Ulrike Kirschnick & Ralf Schledjewski**, Institut für Kunststofftechnik, Lehrstuhl für Verarbeitung von Verbundwerkstoffen und Design für Recycling, Montanuniversität Leoben, Leoben, Österreich

Faser-Kunststoff-Verbundwerkstoffe (FKV) werden vielfältig eingesetzt. Zudem wird ein weiteres globales Wachstum erwartet, wodurch diese Materialgruppe hinsichtlich Bestrebungen zur Erreichung von Nachhaltigkeitszielen in den Fokus rückt. Aufgrund ihres Leichtbaupotenzials bei gleichzeitig hervorragenden Materialeigenschaften kommen FKV in multiplen industriellen Anwendungen zum Einsatz, in welchen sie einen Beitrag zu den nachhaltigen Entwicklungszielen der UN leisten. Im Mobilitätsbereich können z.B. Kraftstoffeinsparungen durch Gewichtsreduktion erzielt werden. Auch in anderen innovativen und zukunftsweisenden Technologien, z.B. in der Windkraft oder im medizinischen Bereich, tragen FKV direkt zu ökologischen Zielen der Energiewende und sozialen Zielen bei.

Im Sinne der Nachhaltigkeit sind der Einsatz von fossilen Ressourcen und ein geringes Kreislaufwirtschafts-Potenzial als wesentliche Herausforderungen zu sehen. Die Herstellung der Ausgangsmaterialien basiert größtenteils auf fossilen Ressourcen sowohl zur Materialsynthese als auch zur Bereitstellung der benötigten Energie entlang der Prozessketten. Bezüglich ihres Lebensendes haben Reparaturansätze bislang kaum Bedeutung und auch die Recyclingprozesse für FKV sind mit ökonomischen und technischen Herausforderungen verbunden.

Die Substitution von fossilen Ressourcen mit nachwachsenden, biobasierten Ausgangsmaterialien (Fasern und Kunststoffe) und erneuerbare Energien in den Prozessen bieten vielversprechende Möglichkeiten. Dennoch ist auch hier kritisch zu bewerten (z.B. mittels Ökobilanzierung), inwiefern diese Alternativen einen Beitrag sowohl zum Klimaschutz als auch zur Verringerung anderer negativen Umweltwirkungen beitragen können. Die Nutzung von regionalen Potenzialen (z.B. nachhaltige Landwirtschaft aber auch biogenen Rest- und Abfallstoffe) leisten einen Beitrag zur ökologischen Nachhaltigkeit und zur regionalen Wertschöpfung. Weitere Forschung zur Materialentwicklung und hinsichtlich geeigneter Verfahren entlang der Prozesskette ist notwendig, um das tatsächliche Substitutionspotenzial (auf den Anwendungsfall bezogen) zu bewerten.

Die Prinzipien der Kreislaufwirtschaft müssen stärker umgesetzt werden. Es

gibt vielversprechende Ansätze zur Reparatur von FKV, diese sind jedoch noch im Entwicklungsstadium und müssen weiter erforscht werden. Recyclingverfahren (z.B. mechanisches Recycling, Pyrolyse oder Solvolyse) sollten auf eine möglichst hochwertige Art der Wiederverwendung abzielen, d.h. eine minimale Schädigung der Fasern sowie eine erneute Nutzung der polymeren Matrix gewährleisten. Neben dem material- und prozesstechnischen Handlungsbedarf sind hier auch rechtliche Fragestellungen zu beantworten, z.B. hinsichtlich des Endes der Abfalleigenschaft und Produktzulassungen für recycelte Materialien. Nur dann kann die Verfügbarkeit am Markt hinsichtlich Kapazitäten und Mengen realisiert werden. Sowohl Reparatur- als auch Recyclingmöglichkeiten bieten vielversprechende Optionen, um die Nachhaltigkeit von FKV zu steigern. Im Rahmen der kritischen Bewertung bedarf dieser antizipierte ökologische Nutzen einer Überprüfung, da die genannten Möglichkeiten teilweise mit sehr aufwändigen und ressourcenintensiven Prozessen verbunden sind. Daher kommt insgesamt im Themenfeld FKV der Optimierung von Herstellungs- und Verarbeitungsprozessen eine bedeutende Rolle zu.

### 6.4. Sustainability Impact Measurement bei Refurbed

**Paul Rudolf**, Fraunhofer Austria Research GmbH, Wien, Österreich

Die Herstellung von Elektronikgeräten wie Smartphones, Tablets und Laptops sowie der damit verbundene Einsatz von wertvollen Ressourcen hat erhebliche Auswirkungen auf die Umwelt. Der kurze Lebenszyklus und die hohe Anzahl neuer Geräte verschärfen die ökologischen Auswirkungen dabei zusätzlich. Im Jahr 2022 wurden allein in Europa rund 175 Millionen neue Smartphones verkauft (statista, 2023). Die durchschnittliche Nutzungsdauer beträgt etwa 3 Jahre, obwohl die Hersteller softwareseitig eine längere Lebensdauer ermöglichen (Euler Hermes, 2022). Eine zweite Nutzungsphase nach einem Refurbishment kann die Umweltauswirkungen erheblich reduzieren. Bis dato existieren jedoch nur rudimentär ökologische Kennzahlen für aufbereitete Elektronik, um den Vorteil quantitativ darzustellen.

Das Hauptziel des Projekts bestand darin, transparente ökologische Kennzahlen für Elektronikprodukte zu erheben, um einen Vergleich zwischen neuen und aufbereiteten Geräten zu ermöglichen. Durch die Fokussierung auf Referenzprodukte und eine detaillierte Analyse konnten die Einsparungen in der Umweltbilanz nachgewiesen und quantifiziert werden.

Im Rahmen des Projektes wurden fünf Referenzprodukte ausgewählt, welche entweder einen signifikanten Anteil auf dem online Marktplatz für aufbereitete Elektronik von Refurbed darstellen oder für einen herstellerübergreifenden Vergleich relevant sind. Diese

Produkte wurden im Detail analysiert, wobei der gesamte Lebenszyklus eines „Refurbished Produktes“ berücksichtigt wurde. Eine Visualisierung der gesetzten Systemgrenzen und des Untersuchungsgegenstands ist in Abbildung 1 zu sehen.

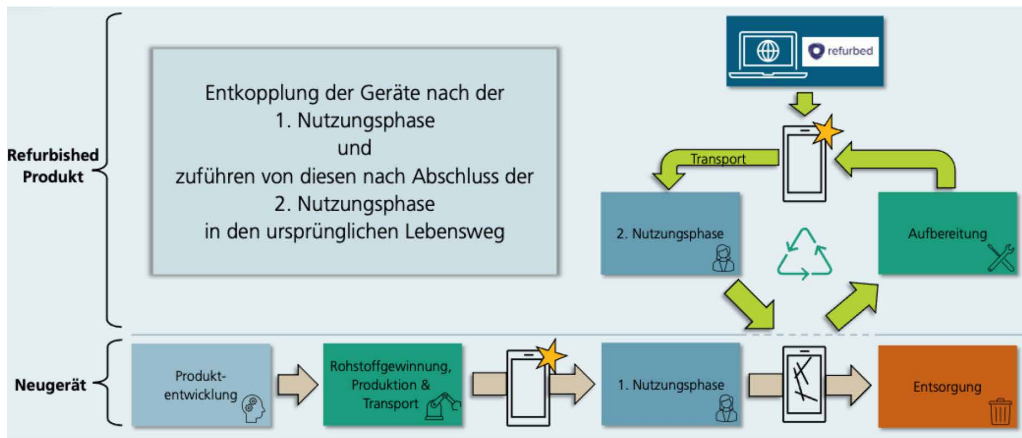


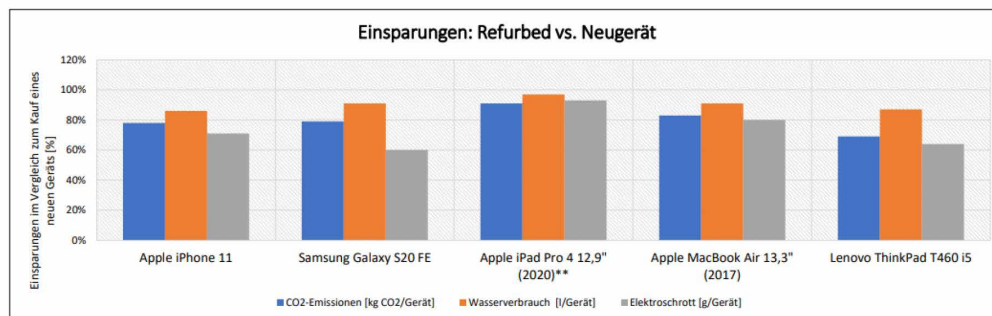
Abbildung 1: Lebensphasen/-zyklus: Neugerät vs. Refurbished Gerät

Auf Basis der Ergebnisse aus der partiellen Lebenszyklusanalyse konnte ein detaillierter Produktvergleich durchgeführt und die Umweltauswirkungen eines „Neugeräts“ dem eines „Refurbed Produktes“ gegenübergestellt werden. Dabei wurden die drei ökologischen Größen THG-Emissionen, Wasserverbrauch und Elektroschrott berücksichtigt.

Die durchgeführte Analyse zeigte signifikante Einsparungen durch die Nutzung aufbereiteter Elektronikprodukte im Vergleich zu neuen Geräten (durchschnittlich rund 80%). Eine Übersicht der Ergebnisse ist in Abbildung 2 zu sehen.

### Übersicht der Studienergebnisse

Berechnungen basieren auf Refurbed spezifischen Daten*	CO <sub>2</sub> -Emissionen [kg CO <sub>2</sub> /Gerät]			Wasserverbrauch [l/Gerät]			Elektroschrott [g/Gerät]		
	Refurbed	Neugerät	Einsparungen: Refurbed vs. Neugerät	Refurbed	Neugerät	Einsparungen: Refurbed vs. Neugerät	Refurbed	Neugerät	Einsparungen: Refurbed vs. Neugerät
Apple iPhone 11	15,7	72	78%	1695	12075	86%	70	239	71%
Samsung Galaxy S20 FE	15,1	72	79%	1065	12075	91%	93	235	60%
Apple iPad Pro 4 12,9" (2020)**	12,2	140	91%	622	23479	97%	51	688	93%
Apple MacBook Air 13,3" (2017)	57,7	339	83%	5385	56853	91%	330	1616	80%
Lenovo ThinkPad T460 i5	143,5	462	69%	10438	77481	87%	617	1697	64%



\*Die ermittelten Werte basieren auf Umfragen bei Partnern des Online-Marktplatzes Refurbed. Die Werte können nicht verallgemeinert für das Refurbishment verwendet werden.  
 \*\*Die Einsparungen im Vergleich zu anderen Geräten sind bei diesem Modell sehr hoch, da es meist weiterverkauft wird und selten neue Ersatzteile enthält.

Quelle: Fraunhofer Austria Research GmbH. (2023). Sustainability Impact Measurement Refurbed GmbH

Abbildung 2: Ergebnisübersicht: Sustainability Impact Measurement bei der Refurbed Marketplace GmbH

Eine zentrale Erkenntnis dabei ist, dass wie auch bei Neugeräten der wesentliche Anteil der ökologischen Größen bei der Herstellung/Reparatur durch die dabei verwendeten Komponenten entstehen. Eine Einstufung der aufbereiteten Produkte in A, B und C Qualitätsstufen, so wie es bereits heute der Fall ist, sorgt dafür, dass auch Produkte mit optischen Mängeln ein zweites Leben erhalten und dabei nur ein Minimum an ökologischen Größen zu verantworten haben.

Das Projekt liefert Erkenntnisse über die positiven Umweltauswirkungen einer zweiten Nutzungsphase von Elektronikprodukten. Durch die Einführung quantitativer ökologischer Kennzahlen auf Produktebene ist die Grundlage für verantwortungsbewusste Kaufentscheidungen geschaffen, die zu einer nachhaltigeren Elektronikindustrie beitragen können. Im nächsten Schritt sind weitere Untersuchungen und die Entwicklung solcher Kennzahlen für eine breitere Palette von Elektronikprodukten notwendig. Dies ist entscheidend, damit Endverbraucher einen transparenten Vergleich beim Kauf von Produkten durchführen können und somit einen Beitrag zu einer nachhaltigeren Elektroniknutzung leisten.

### 6.5. EPS-Recycling

**Andreas Lehner**, Fraunhofer Austria Research GmbH, Wien, Österreich

Expandiertes Polystyrol, auch als Styropor oder EPS bekannt, ist zu 100 Prozent recyclingfähig. Bei Bauware wird es aktuell aber nur zu rund einem Viertel, bei Verpackungen nur zur Hälfte recycelt. Im Forschungsprojekt „EPSolutely“ haben zwölf Partner aus der gesamten Wertschöpfungskette unter der Leitung von Fraunhofer Austria erste Erfolge bei der Schaffung einer Kreislaufwirtschaft für EPS erzielt.

EPS eignet sich nicht nur als Wärmedämmung im Hausbau, sondern auch als leichte, stoßdämpfende und thermisch isolierende Verpackung für eine Vielzahl von Gütern. Laut der aktuellen Converso-Studie beträgt die EPS-Recyclingquote in Österreich 26 Prozent bei Bauware und 56 Prozent bei Verpackungen. Oft kommt das recycelte Material aber nur als Wärmedämmungsgleichschüttung zum Einsatz. Wünschenswert im Sinne der Nachhaltigkeit wäre dagegen eine echte Kreislaufwirtschaft, in der das recycelte EPS in gleichwertiges Rohmaterial umgewandelt und dem Kreislauf erneut zugeführt wird.

Das Forschungsprojekt „EPSolutely“ ist auf dem besten Weg, ökonomisch sowie ökologisch funktionierende Konzepte

für eine EPS-Kreislaufwirtschaft zu entwickeln und zu demonstrieren. Nach dem 2. Projektjahr konnte das Konsortium, das Unternehmen entlang der gesamten Wertschöpfungskette sowie Interessensvertretungen und Forschungseinrichtungen umfasst, wichtige Erfolge verbuchen und ist somit diesem Ziel einen beachtlichen Schritt nähergekommen.

Der Rückbau einer Fassade stellt für die Kreislaufwirtschaft von Anfang an eine Herausforderung dar. Nach den Abbrucharbeiten ist EPS mit Fremdmaterialien wie Putz, Klebstoffen, Armierungsgittern und Dübel vermischt sowie in den meisten Fällen mit Hexabromcyclododecan (HBCD) versetzt. Dieses Flammschutzmittel wurde in Österreich bis 2015 eingesetzt, die Inverkehrbringung dessen ist seitdem verboten. Wenn EPS mit HBCD versetzt ist, gilt es zwar nicht als gefährlicher Abfall, muss aber zerstört werden und darf nicht wieder in den Kreislauf zurückgeführt werden. Der vom Fraunhofer Institut für Verfahrenstechnik und Verpackung (IVV) entwickelte CreaSolv®-Prozess ermöglicht das Abtrennen von HBCD in einem lösemittelbasierten Verfahren, wodurch auch aus diesem Material wieder Polystyrol-Rezyklat gewonnen werden kann.

Um diesen Prozess allerdings ökonomisch rentabel durchführen zu können, muss das Material zuvor bestmöglich von Verunreinigungen befreit werden. „Die Kreislaufführung von EPS aus dem Abbruch bzw. Rückbau gilt wegen der Verunreinigungen als äußerst komplex. Gemeinsam mit dem Projektpartnern wurden verschiedene Lösungsansätze zur Aufbereitung dieses Materials erarbeitet und experimentell überprüft. „Bis jetzt sind alle Ergebnisse äußerst vielversprechend“, erklärt Sebastian Lumetzberger, der das Projekt bei Fraunhofer Austria leitet.

Für die Untersuchungen analysierten die Projektpartner unterschiedlich stark verunreinigtes Material aus manuell und maschinell durchgeführten Fassadenrückbauten. Um die Bindung zwischen EPS und den restlichen Komponenten des Wärmedämmverbundsystems zu lösen, wurde das Material zunächst geschreddert. Im Experiment zeigte sich, dass auch das Zerkleinern von maximal verunreinigtem Material möglich ist und der Materialaufschluss zwischen dem EPS und den restlichen Komponenten gut gelingt. Als nächstes galt es, Fremdmaterialien aus der Materialmischung zu entfernen. Dafür kam eine kombinierte Anlage aus Vibrations- und Lufttechnik zum Einsatz – ebenfalls mit großem Erfolg.

„Das Auftrennen mit dem Schredder sowie das Sortieren des Materials haben hervorragend funktioniert. Aufgrund dieser Ergebnisse sind wir sehr zuversichtlich, hier gemeinsam mit den Projektpartnern Lösungen zu finden, damit die Aufbereitung des Materials dem Recycling nicht mehr im Weg steht“, sagt Lumetzberger. Nach Abschluss der Untersuchungen wird das aufbereitete Material an das Fraunhofer IVV geschickt, wo der CreaSolv®-Prozess zum Entfernen der verbleibenden Verunreinigungen sowie des HBCD durchgeführt wird. Das dadurch gewonnene Polystyrol-Rezyklat verarbeiten die Projektpartner zu neuen EPS-Dämmplatten.

Auch bei sauberen, getrennt gesammelten EPS-Verpackungen waren die Projektpartner erfolgreich. In einem Versuch stellten sie aus mittels mechanischem Recycling rezykliertem EPS (rEPS) aus Abfällen der Möbelindustrie eine Transportverpackung für Kühlschränke her. Weder bei der mechanischen Belastbarkeit noch bei der Optik ist ein Qualitätsverlust zu erkennen. Dieser Prozess erlaubt die Kreislaufführung von jährlich etwa 2000 Tonnen getrennt gesammelten EPS-Verpackungen. Der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck wird dabei durch den Entfall des energieintensiven Herstellungsprozesses des Ausgangswerkstoffs Styrol signifikant reduziert. In einem beispielhaften Szenario können so 75% der CO<sub>2</sub>-Emissionen eingespart werden. Um künftig auch verunreinigte, nicht getrennt gesammelte EPS-Verpackungen im Kreislauf führen zu können, soll im Projekt noch geprüft werden, ob der CreaSolv®-Prozess auch für das Recycling verunreinigter EPS-Verpackungen eingesetzt werden kann. Eine besondere Herausforderung stellt das große Volumen von EPS-Verpackungen dar. Bereits 60 Kilogramm füllen einen Kleintransporter. Um das Material effizient transportieren und einem Recycling zuführen zu können, muss es daher möglichst früh im Prozess kompaktiert werden.

Das Volumen von EPS ist auch beim Sammeln von Verschnitten, die beim Anbringen neuer EPS-Platten auf Baustellen anfallen, ein Thema. Diese können, sofern sie sauber gesammelt werden, direkt wieder in der EPS-Produktion eingesetzt werden, da sie das neue sichere Flammenschutzmittel PolyFR und nicht mehr HBCD enthalten. Allerdings dürfen sie für dieses direkte Recycling nicht kompaktiert werden. Abhängig von der Gebäudegröße fallen unterschiedlich viele Säcke mit EPS-Abschnitten an. „Hier legen wir besonderen Wert darauf, sowohl Lösungen für kleine als auch große Mengen zu finden. Dazu haben wir verschiedene Konzepte, beispielsweise mit direkter Abholung von der Baustelle oder die Sammlung in Hubs,

entwickelt“, erklärt Lumetzberger.

Für die Sammlung hat das Projektteam Säcke mit QR-Codes entworfen. Diese können gescannt werden und führen zu einer Webapplikation, mit der die Abholung initiiert wird. Das reduziert den Aufwand auf der Baustelle und die Abholung kann effizient koordiniert werden. Zusätzlich sollen RFID-Tags die Nachverfolgbarkeit der Säcke ermöglichen und so Transparenz bei den Materialflüssen schaffen. Als Logistiker ist Sebastian Lumetzberger zuversichtlich: „Wir entwickeln mögliche Konzepte, bewerten diese aus der ökologischen Perspektive und prüfen diese auf ihre Wirtschaftlichkeit, denn die Kreislaufwirtschaft soll sich für die Unternehmen auch lohnen. Ich bin überzeugt, dass es uns gemeinsam mit den Projektpartnern gelingen wird, erste effiziente und praxistaugliche Lösungen in den nächsten Monaten zu finden.“

## 6.6. Kreislaufwirtschaft von Batteriesystemen – Benchmark und Lösungsansätze

**Franz Haas & Gernot Schlögl**, Institut für Fertigungstechnik, TU Graz, Graz, Österreich

Die Transformation der Mobilität ist in aller Munde. Ab 2035 sollen innerhalb der Europäischen Union keine neuen Fahrzeuge mit Verbrennungskraftmaschinen zugelassen werden. Die vom EU-Parlament beschlossene Richtlinie muss allerdings noch von den Regierungen der Mitgliedstaaten beschlossen und vor allem auch gelebt werden. Neben dem sehr hohen Anteil des Verkehrs an den gesamten Treibhausgasemissionen sprechen auch sehr viele technische Gründe für ein möglichst rasches „Aus“ für den Verbrenner. Die Alternativen „Wasserstoff“ und „E-Fuels“ werden dringend in anderen Bereichen benötigt und besitzen in der Erzeugung sehr schlechte Wirkungsgrade. Bei den so genannten BEVs (Battery Electric Vehicles) werden vor allem die hohen Emissionen bei der Erzeugung des Energiespeichers „Batterie“ sowie die hier notwendigen „kritischen“ Rohstoffe sehr kritisch gesehen. Sowohl bei der Erzeugung als beim Recycling von „Battery Cells“ und „Battery-Packs“ sind smarte und nachhaltige Lösungen gefragt. Neue Geschäftsmodelle werden rund um die Wiederverwertung und die Rohstoffaufbereitung entstehen. Dies sollte uns optimistisch stimmen, auch wenn der Transformationsprozess langsamer und mühevoller von statten gehen wird, als von der Politik ursprünglich gefordert.

Das Institut für Fertigungstechnik der TU Graz beschäftigt sich schon seit über fünf Jahren intensiv mit der Automatisierung,

der messtechnischen Beurteilung und seit kurzem auch mit dem Recycling von Batteriesystemen. Grundsätzlich gilt, dass bei jedem neuen Produkt automatisch dessen Wiederverwendbarkeit, Reparierfähigkeit und Zerlegbarkeit mit zu berücksichtigen sind. Dass diese Grundregel gerade bei Batteriesystemen aktuell nicht eingehalten wird, war eine der ersten Erkenntnisse des Projektes BATTBOX, das mit den Unternehmen Fill und AVL gemeinsam durchgeführt wird. Mit der Vielfalt umzugehen, wird zur großen Herausforderung für die notwendigen Rezyklier-Anlagen von „Battery-Packs“ der kommenden zehn Jahre. Neben dem „Recycling“ umfasst des Kompetenz-Portfolio zum Thema E-Mobilität aber auch die Gestaltung von Produktionsanlagen für die E-Fahrzeuge der Zukunft und Gegenwart. Insbesondere der Aufbau des „Battery Innovation Centers (BIC)“ der AVL List GmbH (siehe Abbildung 6 links) sowie die Inbetriebnahme einer Roboter-Testzelle für Batteriemodule am IFT der TU Graz sind Meilensteine für eine nachhaltige Gestaltung der Wertschöpfung von E-Antrieben und Stromspeichern. Im BIC-Projekt war die Flexibilität der Assemblierung aller gängigen Zelltypen (zylindrisch, prismatisch, Pouch) zu Modulen und „Packs“ eine zentrale Forderung. Zudem kommt vor allem bei dieser sicherheitskritischen Komponente der Qualitätsprüfung und Nachverfolgbarkeit eine sehr große Bedeutung zu. Die gelingt durch eine sehr hohe Prozesssicherheit der Anlagentechnik, aber auch durch eine hundertprozentige Qualitätskontrolle der Zellen vor dem Einbau. Dazu wurde am Institut ein so genannter Zelltester im Projekt CERES gebaut und umfassend getestet (siehe Abbildung 6 rechts). Ziel war es, die geometrischen Merkmale in sehr kurzer Zeit zu erfassen sowie Beschädigungen an der Oberfläche von Batteriezellen sofort zu erkennen, um die Qualität und Lebensdauer des gesamten „Packs“ zu maximieren. Die Abbildung 5 veranschaulicht den Batterie-Lebenszyklus und ordnet die genannten Beispielprojekte den jeweiligen Phasen zu.

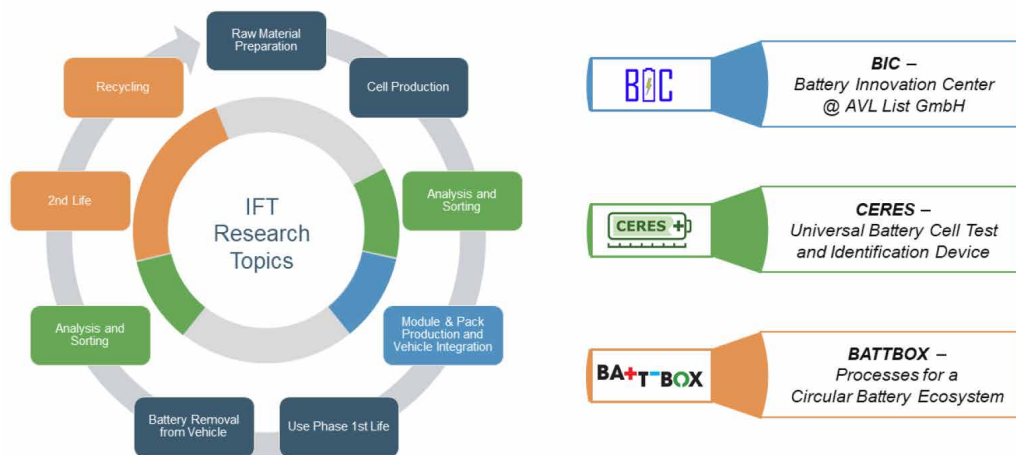


Abbildung 5: Projektstruktur am IFT der TU Graz mit Bezug zum Batterie-Lebenszyklus

Wie bereits kurz ausgeführt ist die Nachhaltigkeit bestimmter Batteriematerialien trotz der Vorteile (hohe Energiedichte, Langlebigkeit, sehr gute elektrische und chemische Eigenschaften) Gegenstand von Diskussionen. Gründe dafür sind die Umstände der Gewinnung kritischer Materialien, wie Lithium und Kobalt, und die potenziellen Umwelt- und Gesundheitsgefahren, die ihre Entsorgung mit sich bringt (Wu et al., 2023). Es wird erwartet, dass der Absatz von batterieelektrischen Fahrzeugen (BEV) erheblich steigen und bis 2030 über 14 Millionen Stück pro Jahr erreichen wird. Infolgedessen wird prognostiziert, dass ab 2040 jährlich mindestens 14 Millionen BEV-Batteriesysteme anfallen werden.

Dies macht deutlich, wie wichtig es ist, effiziente Recyclingverfahren zu entwickeln, die die Zerlegung von Akkupacks und die Rückgewinnung wertvoller Materialien wie Lithium, Nickel, Kobalt und Graphit beinhalten (Lander et al., 2023). Der allgemeine Trend beim End-of-Line-Management von „BEV-Batterie-Packs“ geht in Richtung Kreislaufwirtschaft. Wenn Elektrofahrzeugbatterien das Ende ihrer Lebensdauer im Fahrzeug erreichen, haben sie noch einen SOH-Wert (State of Health) von etwa 70 bis 80% (Gu et al., 2023; Michelin di San Martino et al., 2023). Es liegt daher nahe, diese noch leistungsfähigen Systeme als Second-Life-Anwendungen einzusetzen.

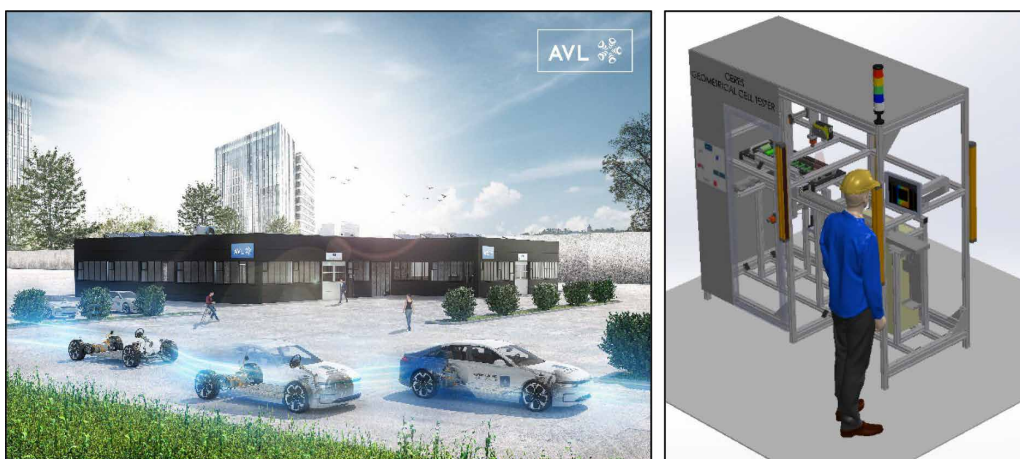


Abbildung 6: Battery Innovation Center (links) und CERES-Zelltester (rechts)

Bislang wird die Zerlegung von Batteriepacks in EoL-Prozessen von der manuellen Demontage dominiert. In Anbetracht der erwarteten Mengen an EoL-EV-Batterien in der Zukunft ist diese Methode für ein wirtschaftliches und nachhaltiges EoL-Management von Lithium-Ionen-Batterien ungeeignet (Harper et al., 2023). Die Automatisierung wird als Schlüssel zur Bewältigung dieser Probleme erkannt (Baazouzi et al., 2021). Studien von Lander et al. (2021) zufolge wird dies dazu beitragen, die Effizienz

der Demontageabläufe wesentlich zu verbessern und den mit dem Recycling von E-Autobatterien verbundenen Aufwand wesentlich zu verringern (Lander et al., 2021, 2023). Darüber hinaus ist die Automatisierung der Demontage ein Muss für die Sicherheit, da die manuelle Demontage von Lithium-Ionen-Batterien nicht nur ineffizient und kostspielig, sondern auch sehr risikoreich ist (Kay et al., 2022).

Die Literaturübersicht von Wu et al. (2023) zeigt, dass die Forschung auf dem Gebiet der manuellen und automatisierten Demontage von Batteriepacks vor allem seit 2018 zugenommen hat (Wu et al., 2023). Studien zur Automatisierung haben sich jedoch überwiegend abstrakte Darstellungen von Layout-Konzepten beschränkt. Es gibt nur wenige Untersuchungen zur Umsetzung solcher Konzepte in einer experimentellen oder realen Umgebung. Choux et al. [12] haben beispielsweise einen autonomen Aufgabenplaner für die Demontage von Lithium-Ionen-Batteriepacks in Elektrofahrzeugen vorgeschlagen, der ein Computer-Vision-System verwendet. Li et al. [13] haben einen Entwurf für ein automatisches Demontagesystem für Lithium-Ionen-Batteriezellen zur Demontage und Trennung einzelner Zellkomponenten vorgestellt. Mehrere neuere Studien haben sich auf die Entwicklung von Roboter-Demontagesystemen für LIB-Packs konzentriert, um die Effizienz und Sicherheit im Recyclingprozess zu verbessern (Kay et al., 2022; Zhou et al., 2021) [12].

Das 3R-Modell („Reduce“ – „Reuse“ – „Recycle“) ist bei Betrachtung der Kreislaufwirtschaft von Batterie-systemen jedenfalls anzuwenden. „Reduce“ bedeutet die Minimierung und/oder Substituierung der erforderlichen meist als kritisch zu bewertenden Rohstoffe. „Reuse“ erscheint aktuell als der größte Hebel und schlägt Lösungen für die Weiterverwendung von Modulen und Zellen außerhalb der E-Fahrzeuge vor. Als Voraussetzungen sind die Produktnachverfolgung (Digitaler Produktpass) und der schonende Einsatz der Batterie-zellen im Fahrzeug zu nennen. Das „Recycling“ der Rohstoffe erfolgt durch pyrometallurgische und hydrometallurgische Prozesse, wobei das letztgenannte Verfahren bezüglich der Ausbeute an Rohstoffen, dem Energieaufwand und der freigesetzten Emissionen klar im Vorteil ist.

Wie die der Literaturrecherche zeigt, steht die Forschung an industriell einsetzbaren Systemen noch ganz am Anfang, wodurch das vorgestellte 3R-Modell durchaus zu einem 4R-Modell erweitert werden muss. Das vierte R steht für „Robotics“ und unterstreicht die Notwendigkeit des Einsatzes modernster Automatisierungs-, Sensor- und KI-Technologien zur Bewältigung der Herausforderungen rund um die Kreislaufwirtschaft von Batteriesystemen, wobei bei aller Notwendigkeit der Fokussierung auf Fahrzeuge möglichst alle Arten von Batterien zu berücksichtigen sind.

## 6.7. Chancen einer ökologisch nachhaltigen Produktion

**Matthias Wolf & Christian Ramsauer,**  
Institut für Innovation und Industrie  
Management, TU Graz, Graz, Österreich

Der Weltklimarat IPCC und andere wissenschaftliche Quellen weisen auf die zunehmenden Auswirkungen der steigenden globalen Treibhausgasemissionen (THG) hin und prognostizieren einen Temperaturanstieg von 1,5°C bis 2030 (Forster et al., 2023; IPCC, 2018, 2023). Der Industriesektor, der für 23 % der weltweiten Emissionen verantwortlich ist, spielt hier international und national eine entscheidende Rolle (IEA, 2023). In Österreich zum Beispiel sind der Energieverbrauch der Industrie (28 %) und industrielle Prozesse (21 %) für fast die Hälfte der gesamten THG-Emissionen verantwortlich (Umweltbundesamt Österreich, 2022). Europäische Unternehmen stehen unabhängig von ihrem Sektor vor der Aufgabe, THG Emissionen zu erkennen, zu vermeiden und zu reduzieren, was auch eine Beschäftigung mit den Emissionen ihrer Partner in der Wertschöpfungskette erfordert (European Commission, 2021b, 2022a).

Um negative Effekte von CO<sub>2</sub>-Emissionen zu begrenzen setzt die EU strenge Ziele für die Reduzierung von Treibhausgasemissionen und gibt mit der Richtlinie zur Nachhaltigkeitsberichterstattung von Unternehmen (CSRD) sowie der Taxonomie-Verordnung nachhaltiger Wirtschaftstätigkeiten und den Europäischen Standards für die Nachhaltigkeitsberichterstattung (ESRS) ein rigoroses Regelwerk zur Berichterstattung vor (European Commission, 2022c, 2023b, 2023a). Weiterführende Initiativen wie der Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) und die Corporate Sustainability Due Diligence (CSDDD) zielen darauf ab, die Verlagerung von CO<sub>2</sub>-Emissionen zu bekämpfen und die Unternehmen, welche die Emissionen verursachen, zur Verantwortung zu ziehen (European Commission, 2020a, 2021a, 2022b, 2023a). Für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) ist es jedoch schwierig, diese Anforderungen kurzfristig (bis 2027) zu erfüllen, da es häufig noch an geeigneten Instrumenten, Verfahren und Schulungen für ein effektives THG-Management mangelt.

Im Allgemeinen wird zwischen organisationsbezogenen und produktbezogenen Treibhausgasemissionen (THG) und Standards zu deren Erhebung und Reduktion unterschieden. Der Corporate Carbon Footprint (CCF) und der Product Carbon Footprint (PCF) werden dabei für die Quantifizierung der verursachten THG verwendet. Der CCF umfasst die Emissionen eines Unternehmens entlang seiner Wertschöpfungskette

und hilft bei der Suche nach unternehmensweiten Reduktionspotentialen. PCF-Studien quantifizieren die Treibhausgasemissionen über den gesamten Lebenszyklus eines Produkts und bieten Erkenntnisse für produktbezogene Optimierungen und die Kommunikation nach außen (siehe z.B. Navarro et al., 2017).

Die Beschäftigung mit den verursachten THG Emissionen kann von Unternehmen als Chance wahrgenommen werden. Praxisbeispiele in der österreichischen Industrie zeigen, dass durch eine transparente THG-Bilanzierung Treiber im Unternehmen identifiziert und mittels kurz-, mittel- und langfristiger Maßnahmen gezielt reduziert werden können (Wolf, Unegg, et al., 2023). Neben dem Beitrag zur Erreichung der vorgegebenen Reduktionsziele kann für Unternehmen dabei auch ein Wettbewerbsvorteil entstehen, wenn z.B. der Energiebezug oder -einsatz mittels Energieflussanalysen analysiert und reduziert wird. Mehrere Industriekooperationen mit österreichischen KMUs zeigten hier einheitlich zweistellige Prozent-Einsparungen bei den Energiekosten und verursachten THG Emissionen je analysiertem Standort (Wolf & Ramsauer, 2023). Weiterführend werden Unternehmen auch durch Banken hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeitsberichterstattung durchleuchtet und haben bei einer guten Performance Vorteile beim Zugang zu Investitionsmitteln zu erwarten, oder können entstehende Kosten der CO<sub>2</sub>-Bepreisung zukünftig vermeiden.

Auch ein transparent erfasster Product Carbon Footprint (PCF) kann als Marktvorteil durch Unternehmen genutzt werden. Bewältigen Unternehmen die Herausforderungen der Datenbeschaffung innerhalb (Produktionsprozesse und produktspezifische Zuteilung eingesetzter Ressourcen) und außerhalb der Unternehmensgrenzen (Abbilden der Emissionen der Lieferketten) können Anhand des PCF Optimierungspotentiale in der eigenen Produktion (z.B. Produkt- oder Tagesspezifische interne Benchmarks) abgeleitet und die Produktion vor allem kostenseitig weiter optimiert, oder Technologieentscheidungen um THG-Emissionen erweitert werden (Rüdele & Wolf, 2023). Weiterführend liegen die großen Hebel zur Optimierung der THG-Emissionen allerdings zum größten Teil in der Beschaffung kohlenstoffarmer Materialien und optimierter Transporte. Neben den Kosteneinsparungen erwachsen für Unternehmen vor allem marktbezogene Vorteile, wenn die Vergabestrategie bei Aufträgen aktuell und zukünftig eingekaufte THG Emissionen gegen den Einkaufspreis gegenrechnet (CBAM, CS-DDD) und transparent berechnete PCF

auf Basis internationaler Standards als Grundlage für diese Berechnungen verlangt werden.

Um bestehende Chancen der nachhaltigeren Produktion zu nutzen biete die Twin Transition durch gezielte Kombination der Möglichkeiten der digitalen Datenerfassung und -auswertung und deren Nutzung zur Entwicklung nachhaltiger Produktionssysteme und Produkte (z.B. digitaler Produktpass) eine sich verstärkende Wirkung zur Nutzung der vielfältigen Chancen für österreichische Industriebetriebe.

## **6.8. LCA-gestützte Optimierung des ökologischen Fußabdruck von Produkten**

**Wolfgang Posch & Gerald Feichtinger,**  
Lehrstuhl Wirtschafts- und Betriebswissenschaftlichen, Montanuniversität Leoben, Leoben, Österreich

Verschiedene europäische Initiativen erfordern ein nachhaltigeres Design von Produkten und Dienstleistungen, um einen wesentlichen Beitrag zur Erreichung der übergeordneten europäischen Klimaziele zu leisten. Der europäischen Aktionsplan für Kreislaufwirtschaft, die EU-Taxonomie für nachhaltige Aktivitäten oder auch die kürzlich präsentierte europäische Ökodesign-Verordnung für nachhaltige Produkte (European Commission, 2020a, 2020b, 2023c) untermauern die Bedeutung von lebenszyklus-basierten Bewertungen von Umweltauswirkungen aller in Kreislauf gebrachter Produkte. Das European Design Council schätzte im Jahr 2012, dass bereits die Designphase in etwa 80% der gesamten Umweltauswirkungen eines Produkts während dessen gesamten Lebenszyklus bestimmt (European Commission, 2012). Durch Anwendung eines sogenannten Ökodesign-Ansatzes könnten durch Einbindung zielführender Analyse- und Bewertungsmethoden somit frühzeitig schädliche Umweltauswirkungen von Produkten verhindert werden. Zu den anerkannten lebenszyklus-bezogenen Analysemethoden zählen sogenannte Life Cycle Assessments.

Life Cycle Assessments (kurz LCA), auch als Lebenszyklusanalysen oder auch Ökobilanzen bekannt, umfassen eine systematische Analyse aller direkter und indirekter Umweltwirkungen von Produkten während des gesamten Produktlebenszyklus. Zu den in einer LCA betrachteten direkten und indirekten Umweltwirkungen zählen sämtliche Entnahmen aus der Umwelt (Inputs, u.a. Energie, natürliche Rohstoffe, sonstige Hilfsstoffe und Materialien) sowie Abgaben in die Umwelt (Outputs, u.a. Emissionen von Treibhausgasen, Abfälle). Ein

vollständiger Produktlebenszyklus fängt bei der Rohstoffgewinnung an (Feichtinger & Posch, 2023) und umfasst insgesamt fünf verschiedene Phasen: (i) Rohstoffgewinnung, (ii) Herstellung und Verarbeitung, (iii) Transport und Verteilung, (iv) Nutzung und Verkauf sowie (v) Entsorgung. Vollständige LCA berücksichtigen alle fünf Produktlebensphasen und sind als „Cradle-to-Grave“-Analysen (Von der Wiege zur Bahre) bekannt. Im Gegensatz dazu dienen partielle LCA der Analyse von ausgewählten Produktlebensphasen wie beispielsweise „Cradle-to-Gate“ (Wiege zum Tor) oder „Gate-to-Gate“ (Tor zu Tor). Weitere Abwandlungen davon sind spezielle LCA wie beispielsweise „Wheel-to-Wheel“ (speziell für die Bewertung von Kraftstoffen) oder „Cradle-to-Cradle“ (oder „Closed-Loop“). Letzterer Ansatz wird typischerweise für die Analyse der Kreislaufwirtschaft (Circular Economy) herangezogen, worin Produkte möglichst vollständig rezykliert und somit im Kreislauf gehalten werden sollen.

Die Durchführung einer LCA erfolgt in der Regel gemäß der internationalen Normenreihe ISO 14040 bis ISO 14044 und umfasst insgesamt vier Analysephasen (Frischknecht, 2020): (i) Definition von Ziel und Untersuchungsrahmen, (ii) Sachbilanz oder Bestandsanalyse, (iii) Wirkungsabschätzung und (iv) Auswertung und Interpretation der Ergebnisse. Die Zieldefinition beschreibt den Untersuchungsgegenstand und definiert die funktionelle Einheit („Was wird analysiert“) sowie die zu betrachtenden Umweltaspekte durch die geplante LCA. In Phase zwei erfolgt die Erstellung einer Sachbilanz, in der alle Umwelteinwirkungen erfasst und in Bezug zur gewählten funktionellen Einheit gesetzt werden. Aufbauend darauf werden anhand einer Wirkungsabschätzung die eingangs festgelegten Wirkungskategorien (u.a. Klimawandel, Versauerung, Überdüngung) anhand verschiedener Wirkungssindikatoren (u.a. Treibhauseffekt, Abbau Ozonschicht, Partikelbildung) analysiert. Abschließend werden alle daraus gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse entsprechend des vorab definierten Ziels sowie des festgesetzten Untersuchungsrahmens bewertet und um hilfreiche Schlussfolgerungen ergänzt. Eine Abwandlung der vollständigen LCA ist die Abschätzung eines gewöhnlichen CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks von Produkten (Product Carbon Footprint, PEF) gemäß ISO 14067, in der ausschließlich die Wirkungskategorie „Klimawandel“ betrachtet wird. Folgende Beispiele verdeutlichen ein sehr breites Anwendungsspektrum dieses leistungsfähigen Analysetools:

- Komparativer Vergleich des CO<sub>2</sub> sowie ökologischen Fußabdrucks von ähnlichen Bauteilen (u.a. Stahl-

teile inkl. Legierungen, Verbundwerkstoffe)

- Analyse von Schwachstellen und Identifizierung von Optimierungspotentialen entlang komplexer Produktionsketten
- Entwicklung von multikriteriellen Tools für die Unterstützung von Entscheidungsfindungsprozessen insbesondere zur Eliminierung bestehender Risikofaktoren entlang von Produktionsketten basierend auf vorgelagerten LCA-Ergebnissen
- Analyse von CO<sub>2</sub>-Einsparungspotentialen bei der Entwicklung neuartiger Technologien zur Kohlenstoffabscheidung, -nutzung und -speicherung (CCUS)
- Optimierung der vor- und nachgelagerten internationalen Lieferketten in bestehenden Produktionsprozessen durch Integration neuartiger Elemente der Automatisierung (u.a. roboterunterstützten Fertigungssystemen)

Die gelisteten Beispiele untermauern die vielseitigen Vorteile von LCA-basierten Betrachtungen zur Verbesserung von Produktdesigns. Für Unternehmen besteht somit die Herausforderung darin, verschiedenste Ökodesign-Grundsätze bereits frühzeitig in die Konzept- und Design-Überlegungen bei der Entwicklung von neuen und Weiterentwicklung von bestehenden Produkten einfließen zu lassen (Posch & Leitenmüller, 2019), um deren schädliche Umweltauswirkungen zu verhindern oder zumindest auf ein Minimum zu reduzieren.

## 6.9. Potenziale und Herausforderungen der Kreislaufwirtschaft in der Windindustrie

**Stefanie Eisl & Sebastian Schlund**, Institut für Managementwissenschaften, TU Wien, Wien, Österreich

75 % der Treibhausgasemissionen der Europäischen Union stammen aus der Energienutzung und -erzeugung, weshalb die Dekarbonisierung des Energiesektors einen entscheidenden Schritt auf dem Weg zu einer klimaneutralen EU darstellt (European Commission, 2019a, 2019b). Der Einsatz nachhaltiger Energiequellen (RES) spielt dabei eine wichtige Rolle (UNEP, 2019). Zuzugabe der Internationalen Agentur für Erneuerbare Energie (IRENA) wurden weltweit fast 295 Gigawatt (GW) an erneuerbaren Energien errichtet, wobei allein die Windenergie rund ein Viertel des Zubaus ausmacht (IRENA, 2023).

Um das ambitionierte Klimaziel der EU,

Klimaneutralität bis 2050, zu erreichen, wird der Ausbau erneuerbarer Energien weiter forciert. Bis 2030 soll deshalb der Anteil an RES auf 32% erhöht werden, wobei die Windenergie einen zentralen Faktor des Ausbaus darstellt (European Commission, 2019a). Zuzugabe der Wind Europe werden allein in Europa von 2023 bis 2027 rund 129GW an neuen Windkraftanlagen (WKA) errichtet (Wind Europe, 2023). Jedoch ist dieser Ausbau mit einem hohen Ressourcenverbrauch verbunden, da die Anlagen einen deutlich höheren Materialverbrauch aufweisen als andere erneuerbare Energiequellen. Um diesen steigenden Ressourcenbedarf zu decken und damit der Klimaneutralität einen Schritt näher zu kommen, werden neue innovative Lösungen benötigt.

Gleichzeitig geht die steigende Anzahl an errichteten Windkraftanlagen mit einer steigenden Anzahl an abzubauenen Anlagen einher, zeitversetzt um 20 bis 25 Jahren, was der Nennlebensdauer einer WKA entspricht. Beschleunigt durch den rasanten Technologiefortschritt innerhalb der Windindustrie, der dazu führt, dass alte Windkraftanlagen durch neue, effizientere Modelle ersetzt werden (Repower), nimmt die Rückbauquote weiter zu und damit die Betriebslebensdauer zunehmend ab (Breeze, 2016; IG Windkraft, 2023). Die steigende Zahl stillgelegter Anlagen stellt eine enorme Herausforderung für das End-of-Life (EoL) Management dar, da die großen Anlagen mehr als 25.000 Komponenten enthalten und mehrere tausend Tonnen wiegen (Graulich et al., 2021; Mali & Garrett, 2022). Es stellt sich die Frage, was mit den ausgedienten Windenergieanlagen gemacht werden soll sobald sie das Ende ihrer regulären Nutzungsdauer erreichen, und was mit den entstehenden Abfallströmen passiert.

Das richtige EoL-Management birgt enormes Potenzial, den steigenden Ressourcenverbrauch der erneuerbaren Energien zu decken und damit den Ausbau der erneuerbaren Energieträger weiter voranzutreiben. Gleichzeitig kann durch die Schließung der Stoffkreisläufe im Sinne der Kreislaufwirtschaft das steigende Abfallaufkommen abgefangen werden. Nach Angaben der Europäischen Umweltagentur birgt allein der Windenergiesektor ein Materialrückgewinnungspotenzial von 4,75 Millionen Tonnen jährlich bis 2023 (European Environmental Agency, 2021).

Um dieses Potenzial nutzen zu können, müssen jedoch noch zahlreiche Herausforderungen überwunden werden. Gegenwärtig werden die Rentabilität und die Effektivität des EoL-Managements zur Schließung der Lücke in der

Kreislaufwirtschaft durch verschiedene Faktoren eingeschränkt, darunter (Woo & Whale, 2022):

- i. Begrenzte Vertrautheit der Akteure (z. B. politische Entscheidungsträger, Industrie, Windparkbesitzer) mit den Optionen des EoL-Managements, den damit verbundenen Herausforderungen und Chancen
- ii. Unzureichende Daten zur Quantifizierung der Umweltauswirkungen unterschiedlicher End-of-Life Optionen
- iii. Fehlende Infrastruktur für die Sammlung und Vorbehandlung der Rohstoffe und Materialien
- iv. Ungewissheit über die verbleibende Nutzungsdauer der Anlagen und die Qualität der Sekundärrohstoffe
- v. Komplexer EoL-Entscheidungsfindungsprozess aufgrund der Variabilität vieler Faktoren (z.B. Anlagenzustand, Umweltauflagen, öffentlicher Akzeptanz, Kosten, ...)

Es ist ein Paradigmenwechsel nötig, weg von der Wahrnehmung der stillgelegten Anlage als Abfallquelle hin zu einer Ressourcenquelle, die den Ausbau erneuerbarer Energieträger weiter beschleunigt. Um diesen Bewusstseinswandel und damit einhergehend die Entkopplung des Wirtschaftswachstums vom materiellen Ressourcenverbrauch weiter zu forcieren, ist jedoch eingehende Forschung im Bereich des EoL-Managements der Windkraftanlagen nötig. Aufgrund dessen beschäftigt sich das Institut für Managementwissenschaften der TU Wien intensiv mit der Bearbeitung aktueller Herausforderungen im Bereich Kreislaufwirtschaft in der Windindustrie.

## 6.10. Energieeffiziente Produktion mittels Energieflussanalysen

**Atacan Ketenci, Matthias Wolf & Christian Ramsauer**, Institut für Innovation und Industrie Management, TU Graz, Graz, Österreich

Der Sektor Industrie ist weltweit für 23% der Emissionen verantwortlich (IEA, 2021). In diesem Kontext kommt kleinen- und mittelständischen Unternehmen (KMU) in der Europäischen Union eine besondere Bedeutung zu, da diese über 99% der Gesamtzahl der Unternehmen ausmachen (European Commission, 2021a). Entsprechend sind KMUs für 63% aller von europäischen Unternehmen verursachten Emissionen verantwortlich (European Commission, 2022b) und spielen daher bei der Verringerung von Umweltbelastungen innerhalb der EU eine entscheidende Rolle. Nicht nur zur Reduktion der Umweltauswirkungen, sondern auch um den steigenden Energiepreisen (World Bank, 2021) entgegen zu wirken, versuchen Unternehmen vermehrt ihre Energieeffizienz zu erhöhen.

Dies stellt insbesondere KMUs vor Herausforderungen, da es diesen oftmals an Möglichkeiten und Know-How fehlt die wesentlichen Treiber der Energiekosten innerhalb der Produktion zu identifizieren (Mickovic & Wouters, 2020) oder es für die Implementierung entsprechender Energieeffizienzmaßnahmen an finanziellen Ressourcen mangelt (Williams & Schaefer, 2013). Um Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz in produzierenden Unternehmen umsetzen zu können, ist ein Verständnis der vorliegenden Energieflüsse erforderlich (Khripko et al., 2018). Um diese Flüsse zu verstehen, wurden Methoden entwickelt, die in der Regel auf Energieaudits basieren und eine Analyse der Energieinputs- und outputs ermöglichen (Menghi et al., 2019). Diese Methoden werden Energieflussanalysen genannt und beinhalten oftmals die Durchführung von Leistungsmessungen an ausgewählten Anlagen (Richert, 2017). Um den speziellen Anforderungen von KMUs gerecht zu werden, wurden Ansätze zur Durchführung von Energieflussanalysen entwickelt bzw. modifiziert, die darauf ausgerichtet sind, Barrieren von KMUs und nicht-energieintensiven Organisationen zu überwinden.

Energieflussanalysen ermöglichen es insbesondere Schwachstellen im aktuellen Energieverbrauch aufzuzeigen und entsprechende Verluste zu identifizieren. Durch die Durchführung von Leistungsmessungen wurde beispielsweise im Rahmen einer Fallstudie bei einem Produktionsunternehmen für Landmaschinen gezeigt, dass durch eine bedarfsgerechte Regelung (Abschaltungen an Wochenenden und dritte Schicht) der Absaugsysteme für Schweißgase Einsparungen von ca. 114.000 kWh pro Jahr bei einem durchschnittlichen Verbrauch von ca. 290.000 kWh (Reduktion von 39%) erzielt werden können. Ein weiterer großer Stellhebel lag in der Eliminierung der Leckagen im Druckluftsystem mit Einsparungen in Höhe von ca. 107.000 kWh/Jahr bei einem durchschnittlichen Verbrauch von ca. 202.000 kWh (Reduktion von über 50%). Durch die Energieflussanalyse konnten in Summe 19 Maßnahmen in zwei Werken eines Standorts definiert werden, die Gesamt ca. 13% der anfallenden Energiekosten einsparen (siehe Wolf et al., 2021).

Obwohl die Ergebnisse einer Energieflussanalyse für jedes Unternehmen unterschiedlich ausfallen, zeigen sich erkennbare Tendenzen die eine Verallgemeinerung für KMUs zulassen. Der Einsatz dieser Methode ermöglicht die Identifizierung von Einsparungen an Energiekosten im zweistelligen Prozent-Bereich je Standort. Daraus resultieren, je nach eingesetztem Energiemix, entsprechende Reduktionen an THG

Emissionen und anderer Umweltbelastungen. Eine Vielzahl der identifizierten Maßnahmen weist bei entsprechender Implementierung eine Amortisationszeit von unter drei Jahren auf.

Aus diesen Erkenntnissen kann geschlossen werden, dass Energieflussanalysen geeignete Instrumente darstellen, KMUs bei der Steigerung ihrer Energieeffizienz zu unterstützen. Durch adäquaten Einsatz ermöglichen sie es Unternehmen ihren Energieverbrauch durch die Identifikation unterschiedlicher Maßnahmen auf eine kosteneffiziente Weise zu reduzieren. Dadurch unterstützen Energieflussanalysen KMUs dabei, simultan ihre Energiekosten und Umweltauswirkungen zu reduzieren. Darüber hinaus ermöglichen sie den Entscheidungsprozess hinsichtlich energierelevanter, erforderlicher Investitionen ohne die Notwendigkeit eines umfassenden Fachwissens transparent zu gestalten.

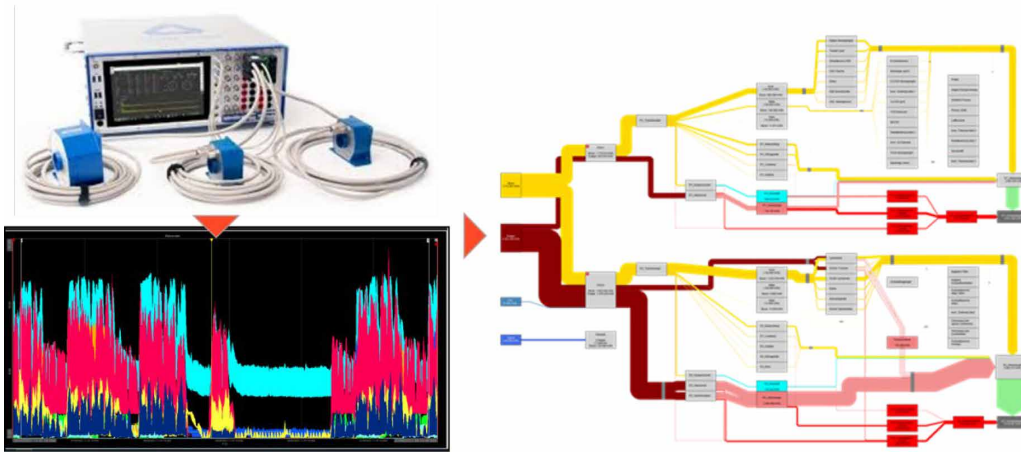


Abbildung 4: Energieflussanalyse in der Produktion (links Energiemessung an einem Verbraucher, rechts Sankey Flussdiagramm der Fabrik)

### 6.11. Gesunde Produktionsarbeit

**Robert Weidner & Lennart Ralfs**, Institut für Mechatronik, Professur für Fertigungstechnik, Universität Innsbruck, Innsbruck, Österreich

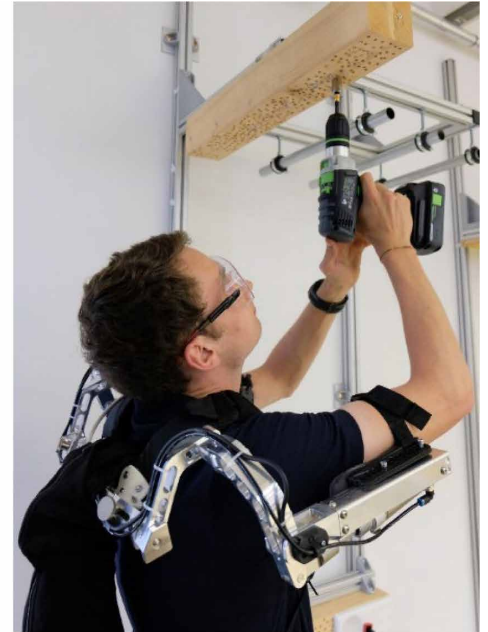
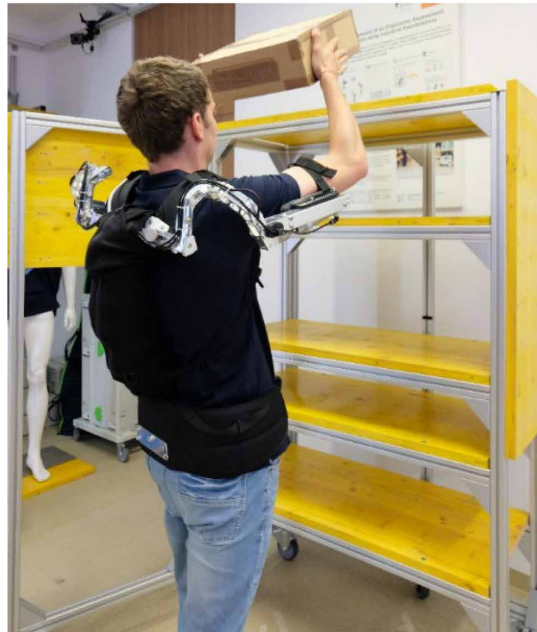
Menschzentrierte Technologien bieten vielfältiges Potenzial zur nachhaltigen Gestaltung der Produktionsarbeit und können Beschäftigte bei manuellen Arbeiten und Tätigkeiten unterstützen. So wird trotz fortschreitender Automatisierung erwartet, dass der Mensch in gegenwertigen wie zukünftigen Wertschöpfungsketten als zentraler Akteur notwendig und in Fabriken erhalten bleiben wird (Casla et al., 2019; May et al., 2015; Romero et al., 2020). Neben der Menschzentrierung formen die Nachhaltigkeit und Widerstandsfähigkeit den Rahmen für die Gestaltung einer gesunden Produktionsarbeit (Europäische Kommission, 2021), die gemäß Ergonomieverständnis die Verfolgung humanitärer Ziele und Optimierung des menschlichen Wohlbefindens anstrebt (DIN EN ISO 26800, 2011). Für eine menschengerechte und ergonomische Gestaltung von Arbeitssystemen ist dabei die Berücksichtigung individueller physischer, psychischer und sozialer Bedürfnisse des Menschen am Arbeitsplatz entscheidend (Schlick et al., 2018). Beurteilungsebenen menschlicher Arbeit wie die Ausführbarkeit, Erträglichkeit, Zumutbarkeit und Zufriedenheit sind dabei zu betrachten (Kirchner, 1972; Schlick et al., 2018). Ein möglicher Ansatz zum Erhalt der Fähigkeiten und Fertigkeiten des Menschen einerseits sowie die Kompensation von Funktionseinbußen andererseits – beides bei gleichzeitiger Adressierung der Bedürfnisse – ist der Einsatz von Unterstützungstechnologien. Dies sind technische oder digitale Lösungen, die eine kontextgerechte und nutzerindividuelle Unterstützung des Menschen in Arbeitssituationen ermöglichen können (Weidner et al., 2017), indem bspw. Körperbewegun-

gen und -haltungen erleichtert oder stabilisiert werden (Weidner & Karafillidis, 2018) oder bei der Wahrnehmung und Verarbeitung von Informationen assistiert werden (Reinhart, 2017). Durch den Einsatz von körpergetragenen Unterstützungssystemen, sog. Exoskeletten, können bspw. physische Beanspruchungen reduziert bzw. gar präventiv verhindert und folglich die Arbeitsergonomie verbessert werden. Für den industriellen Kontext existieren verschiedene Exoskelette, die primär eine Körperregion unterstützen. Hierzu zählen bspw. die Unterstützung des unteren Rückens (z.B. während dem Heben schwerer Lasten von Bodenhöhe oder in Oberkörpervorbeuge), der Schulter- und Oberarmregion (z.B. während der andauernden Ausführung von Tätigkeiten in und über Kopfhöhe), der Hand (z.B. beim Greifen und Halten von Werkzeugen) oder der unteren Extremitäten (z.B. durch Absetzen bei Tätigkeiten an Arbeitsstationen) (Fox et al., 2019; Weidner et al., 2020).

Allgemein adressiert der Einsatz von Unterstützungstechnologien nachhaltige Entwicklungsziele der UN (z.B. Nr. 3 (Gesundheit und Wohlergehen) und Nr. 8 (menschenwürdige Arbeit und Wirtschaftswachstum)), die sich dem Streben nach Einklang von umweltschonendem Handeln, Ökonomie und sozialer Gerechtigkeit verschreiben (United Nations, o. J.). So können physische und psychische Beanspruchungen reduziert werden, um bspw. die Ausbreitung von arbeitsbedingten Muskel-Skelett-Erkrankungen oder physischem Stress zu reduzieren sowie auf diese Weise die Gesundheit und das Wohlergehen der Belegschaft zu fördern. Zudem kann die Arbeit auf diese Weise ergonomisch und tätigkeitsspezifisch angemessen und nachhaltig gestaltet werden. Weiteres Potenzial liegt darin, die Eintrittsbarrieren für Menschen in Arbeitsszenarien mit physisch intensiven Arbeitstätigkeiten zu reduzieren.

Diese Punkte gewinnen gleichzeitig an Relevanz, da die Nutzung von Unterstützungstechnologien die Produktionsarbeit attraktiver gestalten und so Herausforderungen wie dem Umgang mit dem demographischen Wandel oder

dem Fachkräftemangel entgegenwirken kann. Entsprechend wird es möglich, die Ressource Mensch mit seinem Humankapital an die Produktionsarbeit zu binden und die ergonomische Gestaltung von Arbeitssystemen zu fördern.



### 6.12. Aufbau von Nachhaltigkeitskompetenzen durch praxisnahe Qualifizierung in Lernfabriken

**Matthias Wolf & Christian Ramsauer,**  
Institut für Innovation und Industrie Management, TU Graz, Graz, Österreich

Die unterschiedlichen Initiativen zur Förderung des nachhaltigen Wirtschaftens stellen Unternehmen vor neue Herausforderungen bei der Gestaltung von Produktionsarbeit in Bezug auf die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit (ökonomisch, ökologisch, sozial). Da diese Themenstellungen bisher meist nicht im Fokus des betrieblichen Handelns vieler Unternehmen standen, fehlt es in vor allem in Klein- und Mittelbetrieben (KMU) häufig an entsprechenden Qualifikationen und Ausbildungsangeboten.

Nachhaltiges Handeln wird durch integrative, problemzentrierte und forschende Formen des Lernens ermöglicht, welche Lernende befähigen kritisch, kreativ und veränderungsfähig zu werden (BMBWF, 2023). Genau das wird durch „on the job“ Ausbildungs- und Trainingsangeboten in Lernfabriken gefördert. Diese ermöglichen nicht nur einen interdisziplinären und anwendungsnahen Wissenstransfer, sondern führen auch zu einem dauerhaften Lernerfolg (Jaeger et al., 2012), durch Adressierung der Problemlösungskompetenz bei neuartigen Problemstellungen. Lernfabriken sind realitätsnahe Nachbildungen von Produktionsumgebungen samt Wertschöpfungskette, in der Teil-

nehmende durch ihr eigenes Handeln eine reale Problemstellung erkennen, analysieren, bewerten, lösen und ihre Handlungen reflektieren um praxisbezogenes Erfahrungswissen zu sammeln (Abele et al., 2015; Steffen et al., 2013). Sowohl Hochschulen als auch Unternehmen nutzen diese Lehr-Lernumgebungen zur Aus- und Weiterbildung im Industrial Engineering, insbesondere um aktuelle Themen wie beispielsweise die Digitalisierung anzugehen. Daher ist es nur konsequent alle drei Dimensionen der Nachhaltigkeit in Ausbildungs- und Trainingsmodulen in Lernfabriken zu vermitteln (IALF, 2023).

Ein Beispiel für die praktische Umsetzung von Trainings in den drei Dimensionen des nachhaltigen Wirtschaftens ist die „LEAD Factory“ am Institut für Innovation und Industrie Management an der Technischen Universität in Graz. Dort werden zu Lehr- und Forschungszwecken handelsübliche Scooter mit ca. 60 Einzelteilen hergestellt. Anschaulich werden etablierte und neue Methoden genutzt um einen ineffizienten Produktionsablauf in einen schlankeren, digitalisierten, energieeffizienten und agileren Prozess zu überführen (IIM, 2024). Die Inhalte sind modular, sodass je nach Schwerpunkt und verfügbarer Zeit auch nur einzelne Aspekte vermittelt werden können. Seit Inbetriebnahme der LEAD Factory im Jahr 2014 werden dort die Kernelemente der schlanken Produktion (bzw. Lean Management) für Studierende und Teilnehmende aller Hierar-

chiestufen von Industrieunternehmen unterrichtet. Eine verschwendungsfreie Wertschöpfung senkt Kosten, erhöht die Wettbewerbsfähigkeit und ist damit als ökonomisch und ökologisch nachhaltig anzusehen.

In den letzten Jahren ist zunehmend die ökologische Dimension in den Vordergrund der Entwicklung neuer Inhalte gerückt. Erstes Standbein für die Ausbildung von Studierenden und Praktikern im Bereich des nachhaltigen Wirtschaftens ist ein Lehrmodul zur Energieeffizienz, bei welchem Teilnehmende lernen Leistungsprofile und Stromverbräuche zu messen, zu analysieren und zu reduzieren (Rüdele et al., 2022). Zur Messung und zum Aufbau eines Energiemanagement-Systems wird dazu im Training auf modernste Sensorik und Softwarelösungen zurückgegriffen.

Aufbauend auf die Energieeffizienz wurde in der LEAD Factory ein Trainingsmodul für die Ökobilanzierung entwickelt. Anstatt mit vorgegebenen oder fiktiven Werten und Szenarien zu arbeiten, quantifizieren die Teilnehmenden in diesem Modul die realen Ressourcenverbräuche (Material, Energie, etc.) für die Herstellung des Scooters und analysieren Verbesserungspotentiale am Produkt und in den Produktionsprozessen (Wolf, Rüdele, et al., 2023). Zukünftig wird dieses Angebot auch auf bestehende inhaltliche und bürokratische Herausforderungen im Zusammenhang mit der Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD) erweitert, welche die verpflichtende und standardisierte Erstellung von Umwelt- und Nachhaltigkeitsberichten für nahezu alle Unternehmen verpflichtend macht (European Commission, 2022a). Um KMUs auf ihrem Weg zur CSRD-konformen Berichterstattung zu unterstützen wird derzeit in einem Pilotprojekt mit mittelständischen Industrieunternehmen und Wirtschaftsprüfern an einem Trainingsmodul für die LEAD Factory gearbeitet. Das erklärte Ziel ist es die Lernfabrik zu nutzen, um Anwender sowohl an die unterschiedlichen Indikatoren und Prüfpunkte (z.B. des European Sustainability Reporting Standards) als auch die Herausforderungen der ressourcenschonend Datenerhebung und -aufbereitung, durch Nutzung der Digitalisierung (Twin Transition), heranzuführen.

Perspektivisch wird sich die LEAD Factory auch verstärkt mit der Kreislaufwirtschaft auseinandersetzen. Aktuell werden Lernmodule entwickelt, welche die bekannten R-Grundsätze der Kreislaufwirtschaft adressieren (Barth et al., 2024; Rüdele et al., 2024). Auch hier bietet die Twin Transition Synergien zur Erfassung und Steuerung der Materialflüsse. Im Training in der LEAD

Factory wird beispielsweise ein Bilderkennungssystem zur Prüfung der Wiederwertbarkeit von Bauteilen genutzt um Ausschussquoten und Fehlteile zu reduzieren.

Neben der ökonomischen und ökologischen Dimension bietet die LEAD Factory auch Trainingsangebote für soziale Nachhaltigkeit. Unterschiedliche Module fokussieren die menschenzentrierte Arbeitsgestaltung. Diese Schulungs- und Trainingsangebote der Lernfabrik beschäftigen sich mit der Analyse und dem Design effizienter und gesunder Produktionsarbeit durch Nutzung von Digitalisierungslösungen wie der Mensch-Simulation zur Auslegung von Arbeitsprozessen (Wolf, Dilena, et al., 2023), oder virtueller Realität zur Analyse und Optimierung von Arbeitsabläufen (Herstätter et al., 2024), oder der Arbeitsplatzauslegung mit Exoskeletten zur körperlichen Unterstützung (Wolf, Mitterlehner, et al., 2023). Zusätzlich werden auch soziale Aspekte der Arbeit, wie z.B. die Integration von speziellen Gruppen von MitarbeiterInnen (Hulla et al., 2024) oder der Fähigkeitserhalt im demographischen Wandel (Wolf et al., 2019) (Wolf et al., 2019) adressiert und Lösungen unterrichtet.

Wie am Beispiel der LEAD Factory gezeigt eignen sich vor allem Lernfabriken um gesellschaftliche Herausforderungen im Bereich der nachhaltigen Wertschöpfung (ökonomisch, ökologisch, sozial) didaktisch aufzubereiten und Ausbildungs- und Trainingsmodule für Praktiker und Studierende anzubieten um die neuen Herausforderungen der CSRD Richtlinie gezielt entgegenzutreten. Unsere Erfahrungen zeigen, dass Lernfabriken als etabliertes und innovatives Mittel der „Executive Education“ und Ingenieurausbildung geeignet sind, Kompetenzen aufzubauen, um die notwendigen Transformationsprozesse aktiv gestalten zu können.

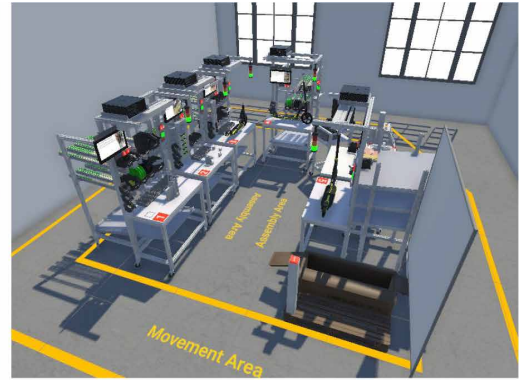


Abbildung 3: LEAD Factory des Institutes für Innovation und Industrie Management der TU Graz (Links real, rechts Virtual Reality Anwendung)

# Diskussionsanstöße



## 7. Diskussionsanstöße

Um den Transformationsprozess in Richtung einer nachhaltigen industriellen Wertschöpfung weiter voranzutreiben, gilt es verschiedenste Herausforderungen zu überwinden. Zur Stärkung der österreichischen Produktion ist die Überprüfung kritischer Abhängigkeiten und eine Neugestaltung zu resilienten Wertschöpfungsnetzwerken nötig. Dabei werden innovative Lösungen für nachhaltiges Wirtschaften, CO<sub>2</sub>-neutrale Produkte und Produktionsprozesse sowie Ressourcenschonung für jedes Industrieunternehmen unabdingbar. Neben Effizienz- und Verzichtsziele stehen das Streben nach technologischem Fortschritt und die Nutzung von Produktionsinnovation zur nachhaltigeren Produktion im Vordergrund. Um die notwendige Kompetenztransformation erfolgreich zu bewältigen sind Qualifizierungsoffensiven, die Kompetenzen auf den Gebieten der Digitalisierung, der Agilität und des nachhaltigen Wirtschaftens mit den Gegebenheiten und Besonderheiten der industriellen Produktion vereint und Wechselwirkungen dieser Strömungen berücksichtigt, eine Grundvoraussetzung. Es liegt gleichermaßen in der Verantwortung von staatlichen Fördermaßnahmen, Bildungseinrichtungen, Unternehmen und ihren Mitarbeitern, die dafür erforderlichen Ressourcen bereitzustellen und aktiv zu nutzen. Die daraus abgeleiteten zentralen Maßnahmen für die österreichische Industrie werden im nachfolgend ausgeführt und sind dabei in drei Themenschwerpunkte unterteilt: Digitalisierung, Kreislaufwirtschaft und Nachhaltigkeit.

### Digitalisierung:

- 1. Twin Transition:** Es benötigt eine Erkennung und Unterstützung der Wechselwirkungen zwischen Digitalisierung und Nachhaltigkeit (Twin Transition), durch gezielte Förderung von Projekten und Initiativen, die beide Ziele integrieren sowie gezielt die Konsequenzen (positiv wie negativ) aufzeigen
- 2. Globaler Fokus:** Zur Verbesserung des Datenaustausches und der Transparenz über größere Betrachtungsbereiche, ist die Förderung einer Optimierung von Prozessen und Systemen auf globaler Ebene, inklusive einer Schließung aktueller Transparenzlücken, notwendig.
- 3. Transparenz und Nachhaltigkeit:** Für die Transparente Darstellung von Schadstoffe und Nachhaltigkeitsindikatoren muss die Entwicklungen im Bereich digitaler Produktpässe weiter vorangetrieben werden.
- 4. Datensammlung:** Zur langfristigen Verbesserung der Umweltdatenbanken und Ermöglichung einer Datenanalyse über das gesamte System, bedarf es der Sammlung umweltrelevante Daten, in einer Form die es ermöglicht, Simulationen und nicht nur Materialflussanalysen durchzuführen.
- 5. Dependable IoT:** Von zentraler Bedeutung für den zuverlässigen Betrieb homogener oder heterogener kognitiver Produktensembles sind sichere Energieversorgung und sichere drahtlose Kommunikation. Des weiteren ist eine garantierte Absicherung eines für den Menschen gefahrlosen Umganges mit solchen Systemen über deren gesamten Produktlebenszyklus hinweg unerlässlich. Daher ist die anwendungsspezifische IoT-Zuverlässigkeit ein äußerst wichtiges offenes Forschungsthema.
- 6. Datenanalyse und vorausschauende Wartung:** Die Schaffung von Anreizen zur Förderung der Aufnahme und Auswertung großer Datenmengen, insbesondere im Hinblick auf vorausschauende Wartung und Instandhaltung, ist unabdingbar um die Ressourceneffizienz zu steigern und Umweltauswirkungen zu minimieren.

- 7. Integrierte Informationssysteme:** Die vollständige Durchdringung der Wertschöpfungsprozesse durch integrierte Informationssysteme und systemübergreifende Optimierungsmethoden stellen entscheidende Schlüssel für die ressourcenschonende Fertigung dar.
- 8. Künstliche Intelligenz:** Um Material- und Prozessdaten mit der Modellwelt zu verknüpfen, die sich selbstständig mit zunehmenden Datenmengen verbessern, bedarf es künftig einer bidirektionalen Anbindung der Daten zum Modell. Unterschiedliche Methoden der Big Data Analyse (Reverse Engineering) können einerseits genutzt und weiterentwickelt werden, um für neue chemische Zusammensetzungen und gegebene Verarbeitungsrouten die Gebrauchseigenschaften von Werkstoffen vorherzusagen.
- 9. Innovationsoffensive:** Das Ziel der aktuellen Entwicklung sollte eine Innovationsoffensive in Österreich sein, die von einer Vielzahl neuer, durch "Machine Learning" ertüchtigter Produkte des Maschinen- und Anlagenbaus getragen wird. Der damit verbundene Forschungsbedarf umfasst hier vor allem neue Ansätze hinsichtlich der Einbindung von unterschiedlichen Steuerungs- und Kommunikationssystemen (Aufbrechen der gängigen Automatisierungspyramide), von Technologien zu Safety und IT-Security sowie der Entwicklung und Adaptierung von Informationsschnittstellen und Datensemantik.

## Kreislaufwirtschaft:

- 1. Internationale Zusammenarbeit:** Aufgrund der grenzüberschreitenden Ressourcenflüsse, stellt die Förderung internationaler Initiativen zur Stärkung der Kreislaufwirtschaft auf globaler Ebene ein wichtiges Ziel dar.
- 2. Sharing- und Tauschkonzepte:** Die Nutzenmaximierung von Produkten und gleichzeitige Minimierung des Ressourceneinsatzes stehen im direkten Zusammenhang mit Sharing- und Tauschkonzepten, weshalb es einer Förderung dieser Bedarf.
- 3. Plattformbasierte Ansätze:** Zur Befähigung der Kreislaufwirtschaft Transformationsprozess ist eine Förderung von gemeinsamen, plattform- und dienstleistungsbasierten Ansätzen notwendig.
- 4. Circular-by-Design in Produktent-**

**wicklung:** Damit Circular-by-Design Ansätze rechtzeitig in Produktmerkmale und -eigenschaften umgesetzt werden können, ist es notwendig, sie bereits in den frühen Phasen der Produktentwicklung zu berücksichtigen.

- 5. Modularisierung und Trennbarkeit:** Zur Befähigung einer ressourcenschonenden und energieschonenden Demontage und Weiterverarbeitung, ist die Berücksichtigung der Modularisierung zur leichten Trennbarkeit von Materialkombinationen bereits in der Produktentwicklung wichtig.
- 6. Innovation und Forschungsförderung:** Um den Übergang zu zirkulären Konzepten zu erleichtern, ist eine Unterstützung der Innovation in Bereichen wie Demontage-technologie, Materialklassifizierung und der Zustandsmessung von Produkten unabdingbar.
- 7. Sofortige Emissionsreduktionen:** Um das Ziel der Klimaneutralität zu erreichen, sind massive Einsparungen an Treibhausgasen in der aktuellen Dekade (2023-2033) anzustreben, um die Klimabilanz bis 2040 auszugleichen.
- 8. CO<sub>2</sub>-Bepreisung und Besteuerung:** Die Politik kann gezielt den Einsatz von CO<sub>2</sub>-Bepreisung oder Besteuerung fördern, um den Faktoreinsatz in definierten Bereichen zu verteuern und Emissionen zu reduzieren.
- 9. Reverse Logistik:** Um die Rückführungsquote von Materialien zu erhöhen und die Verwendung weniger energieintensiv hergestellter Materialien zu fördern, bedarf es eines Anreizsystems.

## Nachhaltigkeit:

- 1. Materialentwicklung:** Aufgrund der Tatsache, dass Materialien mit verbesserter Umweltverträglichkeit auf dem Markt bessere Chancen haben als solche, die schwer wiederverwertbar sind, besteht ein dringender Bedarf an zukünftiger Forschung in diesem Bereich. Ebenso eröffnet die Entwicklung sogenannter intelligenter Materialien, die sich autonom an äußere Umweltbedingungen anpassen, wie beispielsweise selbstheilende Werkstoffe, ein vielversprechendes Forschungsfeld mit erheblichem Potenzial für Fortschritte. Die Schaffung eines digitalen Materialabbaus über den ersten Leb-

enszyklus hinaus könnte hierbei wertvolle Unterstützung bieten, welche ein unternehmensübergreifendes Materialdatentracking erfordert.

**2. Werkstoffcharakterisierung:** In Bezug auf die beschleunigte Entwicklung neuer Werkstoffe sollte die intensive Erforschung hoch effizienter Charakterisierungsmethoden im Mittelpunkt stehen. Die ÖWGP erkennt einen gesteigerten Bedarf an Forschung, insbesondere in den folgenden Bereichen: Bildgebende Analyse, Chemische Analysen, In-Situ-Analysen und weitere Analyseverfahren.

**3. Herstellungs- und Verarbeitungsprozessen:** Um die Ressourceneffizienz einer weiteren Verbesserung zu unterziehen, bedarf es weiterer Forschung im Bereich der Optimierung von Herstellungs- und Verarbeitungsprozessen beispielsweise für FKV.

**4. Wandlungsfähige Produktionssysteme:** Um Aspekte der Qualitätssicherung bereits innerhalb des Fertigungsprozess während der Bearbeitung zu übernehmen, ist eine Integration von Sensorik, echtzeitfähige Datenanalyse und Rückkoppelung der Analyseergebnisse nötig. Dadurch kann das Risiko des Wertverlustes durch Ausschuss verringert und gleichzeitig so die Ressourceneffizienz der Produktion gesteigert werden.

**5. Nachhaltigkeitskennzahlen:** Es Bedarf einer klaren Festlegung widerspruchsfreie, handlungsleitender und messbare Nachhaltigkeitskennzahlen zur Darstellung nachhaltigkeitsrelevanter Effekte. So kann die Grundlage für zielgenaue und bewertbare Verbesserungsprojekte geschaffen werden.

**6. Darstellung des Ressourcenverbrauchs:** Es ist wichtig, eine detailliertere und transparentere Darstellung des Ressourcenverbrauchs von Produkten und Prozessen zu fördern, um die Reduzierung von Ressourcenverbrauch nachdrücklich zu unterstützen.

**7. CO<sub>2</sub>-Zertifikatsbepreisung:** Durch die CO<sub>2</sub>-Zertifikatsbepreisung wird eine Abbildung der Folgen einer gezielten Faktorkostenverteuerung für das beteiligte Ökosystem ermöglicht.

**8. Scope 3-Emissionen:** Zur systematischen Erfassung und Berichterstattung indirekte Emissionen

(Scope 3-Emissionen) in ihren Wertschöpfungsnetzwerken ist weitere Forschung & Entwicklung notwendig.

**9. Innovationsprogramme:** Um den Ressourceneinsatz langfristig zu verringern ist eine teils disruptive Umgestalten der Produktionsstätten zu neuen Wertschöpfungszentren und -netzwerken einer ökologischen Produktion nötig, welche die Beherrschung komplexer Wirkzusammenhänge und den Einsatz von neu gedachten, geschlossenen Materialkreisläufen voraussetzt. Hierfür sind rasch fokussierte Innovationsprogramme unabdingbar.



## Zusammenfassung und Ausblick



## 8. Zusammenfassung und Ausblick

Der Umbau der Industrie anhand der Nachhaltigkeitsziele ist mit zahlreichen gesellschaftlichen und normativen Maßnahmen der vergangenen Jahre eingeleitet. Der vorliegende Beitrag stellt den aktuellen Diskussionsstand im Spannungsfeld nachhaltiger (industrieller) Wertschöpfung dar und ordnet aktuelle normative Vorgaben, anstehende Maßnahmen und ausgewählte Risiken ein. Die gekoppelte Zielstellung ökologischer, sozialer und ökonomischer Nachhaltigkeit wird aktuell flächendeckend in die Umsetzung gebracht. Die Entkopplung des wirtschaftlichen Wachstums vom Ressourcenverbrauch und damit eine generationengerechte Nutzung der Ressourcen ist damit eingeleitet. Die Kreislaufwirtschaft mit zahlreichen ressourcenschonenden Möglichkeiten bietet große Chancen auf neue – nachhaltige – Geschäftsmodelle sowie Produkt- und Prozessinnovationen.

So große Einigkeit über das Ziel und die Notwendigkeit dieses Paradigmenwechsels besteht, so vielfältig sind die möglichen Transformationspfade. Es ist bereits absehbar, dass zahlreiche, heute als notwendig betrachtete, Maßnahmen Effekte auf die Wettbewerbsfähigkeit der Industrieakteure haben werden. Neben neuen Möglichkeiten durch nachhaltigkeitsbezogene Geschäftsmodelle, beispielsweise im Bereich der Krei-

slaufwirtschaft, betrifft dies vor allem Faktorkostenanstiege. Diese betreffen direkt die Industrie und die Verbraucher in einzelnen Weltregionen und basieren auf der Grundlage einer korrespondierenden Umsetzung der Nachhaltigkeitsziele weltweit. Risiken bestehen dabei in der Aufrechterhaltung der Wettbewerbsfähigkeit über den gesamten Transformationsprozess, in der mangelnden Bereitschaft der Marktakteure diese Faktorkostensteigerungen für den Mehrwert nachhaltigen Wirtschaftens mitzutragen und in der Nutzung von Opportunitäten durch globale Wettbewerber.

Vor diesem Hintergrund kommt der ausgewogenen Gestaltung der jeweiligen Transformationspfade eine herausragende Rolle zu. Verstärkt wird diese Herausforderung durch die Dringlichkeit, in welche uns die bis heute anhaltende Emissionserhöhung der vergangenen Dekaden manövriert haben. Nur eine konzertierte Anstrengung der beteiligten Akteure aus Industrie, Wissenschaft, Staat und Gesellschaft bei gleichzeitiger technologieoffener Diskussion und Abwägung der Maßnahmen eröffnet überhaupt noch die Chance auf eine erfolgreiche Transformation bei gleichzeitiger Wahrung der Wettbewerbsfähigkeit der industriellen Wertschöpfung.



# Literaturverzeichnis

- Abele, E., Metternich, J., Tisch, M., Chrystosolouris, G., Sihn, W., ElMaraghy, H., Hummel, V., & Ranz, F. (2015). Learning Factories for Research, Education, and Training. *Procedia CIRP*, 32, 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.02.187>
- Aouam, T., Geryl, K., Kumar, K., & Brahim, N. (2018). Production planning with order acceptance and demand uncertainty. *Computers & Operations Research*, 91, 145–159. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.11.013>
- Baazouzi, S., Rist, F. P., Weeber, M., & Birke, K. P. (2021). Optimization of Disassembly Strategies for Electric Vehicle Batteries. *Batteries*, 7(4), 74. <https://doi.org/10.3390/batteries7040074>
- Barth, J., Ruzicic, N., Mennenga, M., Panagiotopoulou, V., Wolf, M., Vega Ayora, R., Sattari, M., Köppe, G., Weyand, A., Seyfried, S., Mangers, J., Niemeyer, J., Ghazanfarpour, Z., Thiede, S., Petrusch, N., Herrmann, C., Stavropoulos, P., Hummel, V., Braun, A., ... Weigold, M. (2024). Development of an IALF overarching learning module for circular economy. *Proceedings of the 14th conference on Learning Factories (14th conference on Learning Factories)*. Springer (in press).
- Beyer, H.-G., & Sendhoff, B. (2007). Robust optimization – A comprehensive survey. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 196(33), 3190–3218. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2007.03.003>
- BMBWF. (2023). Bildung für Nachhaltige Entwicklung. <https://www.bmbwf.gv.at/Themen/schule/schulpraxis/ba/bine.html>
- BMK. (2022). Österreich auf dem Weg zu einer nachhaltigen und zirkulären Gesellschaft. Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie.
- Bontinck, Z., Lass, O., Schöps, S., De Gersem, H., Ulbrich, S., & Rain, O. (2018). Robust optimisation formulations for the design of an electric machine. *IET Science, Measurement & Technology*, 12(8), 939–948. <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2018.5235>
- Breeze, P. (2016). Wind Farms, Electrical Optimization, and Repowering. In P. Breeze (Hrsg.), *Wind Power Generation* (S. 59–65). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804038-6.00007-4>
- Brundtland, G. H. (1987). Our Common Future—Call for Action. *Environmental Conservation*, 14(4), 291–294. <https://doi.org/10.1017/S0376892900016805>
- Bundeskanzleramt Österreich. (2020). Aus Verantwortung für Österreich. – Regierungsprogramm 2020–2024.
- Casla, P., Larreina, J., Fletcher, S., Johnson, T., Parigot, L., Otero, M., Adlon, T., Riegau, A., Marguglio, A., Kaasinen, E., Aromaa, S., Heikkilä, P., Honka, A., Zikos, S., Albanis, G., Tsourma, M., Drosou, A., Zarpalas, D., Daras, P., & Ng, A. (2019). Human-centered factories from theory to industrial practice. Lessons learned and recommendations. Chen, W., Allen, J., Tsui, K.-L., & Mistree, F. (1996). A Procedure For Robust Design: Minimizing Variations Caused By Noise Factors And Control Factors. *ASME Journal of Mechanical Design*, 118, 478–485. <https://doi.org/10.1115/1.2826915>
- Darlington, J., Pantelides, C., Rustem, B., & Tanyi, B. A. (2000). Decreasing the sensitivity of open-loop optimal solutions in decision making under uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 121, 343–362. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(99\)00034-X](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00034-X)
- DIN EN ISO 26800:2011-11, Ergonomie\_- Genereller Ansatz, Prinzipien und Konzepte (ISO\_26800:2011); Deutsche Fassung EN\_ISO\_26800:2011. (2011). Beuth Verlag GmbH. <https://doi.org/10.31030/1775247>
- Eldred, M., & Dunlavy, D. (2006). Formulations for Surrogate-Based Optimization with Data Fit Multifidelity and Reduced-Order Models. <https://doi.org/10.2514/6.2006-7117>
- Europäische Kommission. (2019). Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Europäischen Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen: Der europäische Grüne Deal. [https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/finance-and-green-deal\\_de](https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal/finance-and-green-deal_de)
- Europäische Kommission. (2020a). Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft für ein saubereres und wettbewerbsfähigeres Europa. (Nr. KOM(2020) 98 endgültig).
- Europäische Kommission. (2020b). Regulation (EU) 2020/852 of the European Parliament and of the Council of 18 June 2020 on the establishment of a framework to facilitate sustainable investment, and amending Regulation (EU) 2019/2088 (Text with EEA relevance).
- Europäische Kommission. (2021). Industry 5.0 (2021). Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry, Publications Office of the European Union. Directorate-General for Research and Innovation. <https://data.europa.eu/doi/10.2777/308407>
- European Commission. (2012). Ecodesign your future: how ecodesign can help the environment by making products smarter. Amt für Veröffentlichungen der Europäischen Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2769/38512>
- European Commission. (2019a). Directorate-General for Climate Action, Going climate-neutral by 2050 – A strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate-neutral EU economy. Publication Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2834/02074>
- European Commission. (2019b). The European Green Deal—Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Region. European Commission.
- European Commission. (2020a). Circular Economy Action Plan. [https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan\\_en](https://environment.ec.europa.eu/strategy/circular-economy-action-plan_en)
- European Commission. (2020b). EU taxonomy for sustainable activities. [https://finance.ec.europa.eu/sustainable-finance/tools-and-standards/eu-taxonomy-sustainable-activities\\_en](https://finance.ec.europa.eu/sustainable-finance/tools-and-standards/eu-taxonomy-sustainable-activities_en)
- European Commission. (2021a). Annual report on European SMEs 2020/2021: Digitalisation of SMEs: background document. Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2826/120209>

European Commission. (2021b). Der europäische Grüne Deal. [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal\\_de](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_de)

European Commission. (2022a). Directive 2022/2464 of the European Parliament and of the Council. <http://data.europa.eu/eli/dir/2022/2464/oj/eng>

European Commission. (2022b). Eurobarometer: EU SMEs working towards sustainability. [https://single-market-economy.ec.europa.eu/news/eurobarometer-eu-smes-working-towards-sustainability-2022-03-28\\_en](https://single-market-economy.ec.europa.eu/news/eurobarometer-eu-smes-working-towards-sustainability-2022-03-28_en)

European Commission. (2022c). Proposal for a directive of the European Parliament and of the Council on Corporate Sustainability Due Diligence and amending Directive (EU) 2019/1937. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52022PC0071>

European Commission. (2023a). Corporate sustainability reporting. [https://finance.ec.europa.eu/capital-markets-union-and-financial-markets/company-reporting-and-auditing/company-reporting/corporate-sustainability-reporting\\_en](https://finance.ec.europa.eu/capital-markets-union-and-financial-markets/company-reporting-and-auditing/company-reporting/corporate-sustainability-reporting_en)

European Commission. (2023b). Directive 2013/34/EU of the European Parliament and of the Council as regards sustainability reporting standards. [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=PL\\_COM:C\(2023\)5303](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=PL_COM:C(2023)5303)

European Commission. (2023c). Ecodesign for Sustainable Products Regulation. [https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/standards-tools-and-labels/products-labelling-rules-and-requirements/sustainable-products/ecodesign-sustainable-products-regulation\\_en](https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/standards-tools-and-labels/products-labelling-rules-and-requirements/sustainable-products/ecodesign-sustainable-products-regulation_en)

European Environmental Agency. (2021). Emerging waste streams: Opportunities and challenges of the clean-energy transition from a circular economy perspective. [https://doi.org/10.1163/9789004322714\\_ccllc\\_2021-0190-601](https://doi.org/10.1163/9789004322714_ccllc_2021-0190-601)

Feichtinger, G., & Posch, W. (2023). Evaluation of European critical raw material assessments under energy transition considerations: 3rd EURECA-PRO Conference 2023. Eureka-Pro Conference 2023, 1.

Forster, P. M., Smith, C. J., Walsh, T., Lamb, W. F., Lamboll, R., Hauser, M., Ribes, A., Rosen, D., Gillett, N., Palmer, M. D., Rogelj, J., von Schuckmann, K., Seneviratne, S. I., Trewin, B., Zhang, X., Allen, M., Andrew, R., Birt, A., Borger, A., ... Zhai, P. (2023). Indicators of Global Climate Change 2022: Annual update of large-scale indicators of the state of the climate system and human influence. *Earth System Science Data*, 15(6), 2295–2327. <https://doi.org/10.5194/essd-15-2295-2023>

Fox, S., Aranko, O., Heilala, J., & Vahala, P. (2019). Exoskeletons: Comprehensive, comparative and critical analyses of their potential to improve manufacturing performance. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 31(6), 1261–1280. <https://doi.org/10.1108/JMTM-01-2019-0023>

Frischknecht, R. (2020). *Lehrbuch der Ökobilanzierung*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-54763-2>

Fuhrländer, M., & Schöps, S. (2020). A blackbox yield estimation workflow with Gaussian process regression applied to the design of electromagnetic devices. *Journal of Mathematics in Industry*, 10, 25. <https://doi.org/10.1186/s13362-020-00093-1>

Gabrel, V., Murat, C., & Thiele, A. (2014). Recent advances in robust optimization: An overview. *European Journal of Operational Research*, 235(3), 471–483. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.09.036>

Graulich, K., Bulac, K., Betz, J., Dolega, P., Hermann, C., Manhart, A., Bilsen, V., Blay, F., Watkins, E., & Stainforth, T. (2021). Emerging waste streams – Challenges and opportunities. Oeko-Institut e.V., Freiburg. <https://policycommons.net/artifacts/3363067/emerging-waste-streams/4161760/>

Gu, X., Bai, H., Cui, X., Zhu, J., Zhuang, W., Li, Z., Hu, X., & Song, Z. (2023). Challenges and Opportunities for Second-life Batteries: A Review of Key Technologies and Economy (arXiv:2308.06786). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2308.06786>

Harper, G. D. J., Kendrick, E., Anderson, P. A., Mrozik, W., Christensen, P., Lambert, S., Greenwood, D., Das, P. K., Ahmeid, M., Milojevic, Z., Du, W., Brett, D. J. L., Shearing, P. R., Rastegarpanah, A., Stolkin, R., Sommerville, R., Zorin, A., Durham, J. L., Abbott, A. P., ... Boons, F. (2023). Roadmap for a sustainable circular economy in lithium-ion and future battery technologies. *Journal of Physics: Energy*, 5(2), 021501. <https://doi.org/10.1088/2515-7655/aca57>

Herstätter, P., Wolf, M., Rantschl, M., & Ramsauer, C. (2024). Complementing Learning Factories with Virtual Reality Technology – examination and summary of practical applications (14th conference on Learning Factories). Springer (in press).

Huang, B., & Du, X. (2006). A robust design method using variable transformation and Gauss–Hermite integration. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 66, 1841–1858. <https://doi.org/10.1002/nme.1577>

Hulla, M., Rouschal, P., Schwarzl, P., Wolf, M., & Ramsauer, C. (2024). Towards a learning factory-based training for SMEs for flexible assembly planning (14th conference on Learning Factories). Springer (in press). IALF. (2023). Sustainability and Circular Economy in Learning Factories. <https://ialf-online.net/index.php/activities/working-groups.html>

IEA. (2021). Global energy-related CO2 emissions by sector – Charts – Data & Statistics. IEA. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/global-energy-related-co2-emissions-by-sector>

IEA. (2023). CO2 Emissions in 2022 – Analysis. <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022>  
IG Windkraft. (2023). Beschleunigung der Windgeschwindigkeit 2023? Große Chancen für die Enerbaren im neuen Jahr.

IIM. (2024). LEAD Factory. <https://www.tugraz.at/institute/iim/infrastruktur/lead-factory>  
Ijomah, W. L., McMahon, C. A., Hammond, G. P., & Newman, S. T. (2007). Development of design for remanufacturing guidelines to support sustainable manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 23(6), 712–719. <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2007.02.017>

- Inatsu, Y., Iwazaki, S., & Takeuchi, I. (2021). Active Learning for Distributionally Robust Level-Set Estimation. *Proceedings of the 38th International Conference on Machine Learning*, 4574–4584. <https://proceedings.mlr.press/v139/inatsu21a.html>
- IPCC. (2018). Summary for Policymakers. In: *Global Warming of 1.5°C*. <https://www.ipcc.ch/sr15/>
- IPCC. (2023). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III [Sixth Assessment Report of the IPCC]*.
- IRENA. (2023). *Renewable Capacity Statistics 2023*. International Renewable Energy Agency (IRENA). <https://www.irena.org/Publications/2023/Mar/Renewable-capacity-statistics-2023>
- Iwazaki, S., Inatsu, Y., & Takeuchi, I. (2020). Bayesian Quadrature Optimization for Probability Threshold Robustness Measure (arXiv:2006.11986). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.11986>
- Jaeger, A., Mayrhofer, W., Kuhlmann, P., Matyas, K., & Sihm, W. (2012). The “Learning Factory”: An immersive learning environment for comprehensive and lasting education in industrial engineering. *16th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics 2*.
- Jung, D., & Lee, B. (2002). Development of a simple and efficient method for robust optimization. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 53, 2201–2215. <https://doi.org/10.1002/nme.383>
- Kay, I., Farhad, S., Mahajan, A., Esmaeeli, R., & Hashemi, S. R. (2022). Robotic Disassembly of Electric Vehicles' Battery Modules for Recycling. *Energies*, 15(13), Article 13. <https://doi.org/10.3390/en15134856>
- Khripko, D., Dunkelberg, H., Summerbell, D., & Hesselbach, J. (2018). Energy Efficiency and demand side management: A case study of a holistic energy concept in polymer processing. *Procedia Manufacturing*, 21, 702–709. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.174>
- Kirchner, J.-H. (1972). *Arbeitswissenschaftlicher Beitrag zur Automatisierung—Analyse und Synthese von Arbeitssystemen*. Beuth.
- Knapczyk, A., Francik, S., Jewiarz, M., Mudryk, K., & Wróbel, M. (2019). Robust optimization in production engineering – methods and application. *E3S Web of Conferences*, 132, 01007. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201913201007>
- Kommunalwirtschaft. (2020). *Textilmüll: Entsorgung und Recycling im Europavergleich*. [https://kommunalwirtschaft.eu/tagesanzeiger/detail/i37005/c000?view=presse\\_detail&tmpl=component](https://kommunalwirtschaft.eu/tagesanzeiger/detail/i37005/c000?view=presse_detail&tmpl=component)
- Kumar Tarei, P., Kumar, G., & Ramkumar, M. (2022). A Mean-Variance robust model to minimize operational risk and supply chain cost under aleatory uncertainty: A real-life case application in petroleum supply chain. *Computers & Industrial Engineering*, 166, 107949. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.107949>
- Lander, L., Cleaver, T., Rajaeifar, M. A., Nguyen-Tien, V., Elliott, R. J. R., Heidrich, O., Kendrick, E., Edge, J. S., & Offer, G. (2021). Financial viability of electric vehicle lithium-ion battery recycling. *iScience*, 24(7), 102787. <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.102787>
- Lander, L., Tagnon, C., Nguyen-Tien, V., Kendrick, E., Elliott, R. J. R., Abbott, A. P., Edge, J. S., & Offer, G. J. (2023). Breaking it down: A techno-economic assessment of the impact of battery pack design on disassembly costs. *Applied Energy*, 331, 120437. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120437>
- Li, Z., & Floudas, C. A. (2012). Robust counterpart optimization: Uncertainty sets, formulations and probabilistic guarantees. In *Proceedings of the 6th Conference on Foundations of Computer-Aided Process Operations*.
- MacArthur, E. (2013). Towards the circular economy. *Journal of Industrial Ecology*, 2(1), 23–44.
- Mali, S., & Garrett, P. (2022). *Life Cycle Assessment of Electricity Production From an Onshore V150–4.2MW Wind Plant*. Vestas.
- May, G., Taisch, M., Bettoni, A., Maghazei, O., Matarazzo, A., & Stahl, B. (2015). A New Human-centric Factory Model. *Procedia CIRP*, 26, 103–108. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.07.112>
- Meadows, D., Meadows, D. H., Zahn, E., & Milling, P. (1972). *Die Grenzen des Wachstums. Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit*. Deutsche Verlags-Anstalt.
- Menghi, R., Papetti, A., Germani, M., & Marconi, M. (2019). Energy efficiency of manufacturing systems: A review of energy assessment methods and tools. *Journal of Cleaner Production*, 240, 118276. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118276>
- Michelini di San Martino, E., Höschle, P., Ratz, F., Stadlbauer, M., Rom, W., Ellersdorfer, C., & Moser, J. (2023). Potential and Most Promising Second-Life Applications for Automotive Lithium-Ion Batteries Considering Technical, Economic and Legal Aspects. 16, 2830. <https://doi.org/10.3390/en16062830>
- Mickovic, A., & Wouters, M. (2020). Energy costs information in manufacturing companies: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*, 254, 119927. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119927>
- Navarro, A., Puig, R., & Fullana-i-Palmer, P. (2017). Product vs corporate carbon footprint: Some methodological issues. A case study and review on the wine sector. *Science of The Total Environment*, 581–582, 722–733. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.190>
- Novak, E., & Ritter, K. (1997). The Curse of Dimension and a Universal Method For Numerical Integration. *Multivariate Approximation and Splines*. [https://doi.org/10.1007/978-3-0348-8871-4\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-0348-8871-4_15)
- Posch, W., & Leitenmüller, V. (2019). *R&D Evaluation in the Upstream Business with the Focus on Life Cycle Assessments*. In *Sustainability Management for Industries (Bd. 8, S. 111–122)*. Rainer Hampp Verlag.
- Potting, J., Hekkert, M. P., Worrell, E., & Hanemaaijer, A. (2017). *Circular Economy: Measuring innovation in the product chain*.
- Reinhart, G. (2017). *Handbuch Industrie 4.0*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 51–88.
- Richert, M. (2017). An energy management framework tailor-made for SMEs: Case study of a German car company. *Journal of Cleaner Production*, 164, 221–229. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.06.139>

- Romero, D., Stahre, J., & Taisch, M. (2020). The Operator 4.0: Towards socially sustainable factories of the future. *Computers and Industrial Engineering*, 139(C). <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106128>
- Rüdele, K., Ketenci, A., Wolf, M., & Ramsauer, C. (2022). Lehrmodul Energieeffizienz in der LEAD Factory am Institut für Innovation und Industrie Management. *WING-Business*, 32–36.
- Rüdele, K., Streßler, T., & Wolf, M. (2024). Circular economy in learning factories using the example of transfer molding. (14th conference on Learning Factories). Springer (in press).
- Rüdele, K., & Wolf, M. (2023). Identification and Reduction of Product Carbon Footprints: Case Studies from the Austrian Automotive Supplier Industry. *Sustainability*, 15(20), Article 20. <https://doi.org/10.3390/su152014911>
- Salmasnia, A., Namdar, M., & Noroozi, M. (2018). Robust design of a VP-NCS chart for joint monitoring mean and variability in series systems under maintenance policy. *Computers & Industrial Engineering*, 124, 220–236. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2018.06.026>
- Schlick, C., Bruder, R., & Luczak, H. (2018). *Arbeitswissenschaft*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-56037-2>
- Steffen, M., Frye, S., & Deuse, J. (2013). Vielfalt Lernfabrik. *wt* 103(3).
- Taguchi, G. (1989). *Introduction to quality engineering*. American Supplier Institute.
- Trosset, M. W. (1996). Taguchi and Robust Optimization. <https://hdl.handle.net/1911/101885>
- Umweltberatung Österreich. (2024, April 5). „Earth Overshoot Day“ ein Weckruf für bewusstes Leben. <https://www.umweltberatung.at/earth-overshoot-day>
- Umweltbundesamt. (2020). Earth Overshoot Day 2020: Ressourcenbudget verbraucht [Text].
- Umweltbundesamt; Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/earth-overshoot-day-2020-ressourcenbudget>
- Umweltbundesamt Österreich. (2022). Austria's national inventory report. <https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0811.pdf>
- UNEP. (2019). Emissions Gap Report 2019. United Nations Environmental Programme (UNEP). United Nations Environment Programme. <https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822>
- Vereinte Nationen. (2015). Transformation unserer Welt: Die Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung. Resolution der Generalversammlung, verabschiedet am 25. September 2015.
- Wei, K., Fan, X., Zhan, M., Zeng, X., & Jiang, X. (2018). Uncertainty analysis and multi-objective billet robust optimization for transitional region of multi-rib component under isothermal local loading forming. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 97(1–4), 1165–1179. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2000-3>
- Weidner, R., Argubi-Wollesen, A., Karafillidis, A., & Otten, B. (2017). Human-Machine Integration as Support Relation: Individual and Task-Related Hybrid Systems in Industrial Production. *I-Com*, 16(2), 143–152. <https://doi.org/10.1515/icom-2017-0019>
- Weidner, R., Linnenberg, C., Hoffmann, N., Prokop, G., & Edwards, V. (2020). Exoskelette für den industriellen Kontext: Systematisches Review und Klassifikation.
- Williams, S., & Schaefer, A. (2013). Small and Medium-Sized Enterprises and Sustainability: Managers' Values and Engagement with Environmental and Climate Change Issues. *Business Strategy and the Environment*, 22(3), 173–186. <https://doi.org/10.1002/bse.1740>
- Wind Europe. (2023). Wind energy in Europe: 2022 Statistics and the outlook for 2023-2027. <https://windeurope.org/intelligence-platform/product/wind-energy-in-europe-2022-statistics-and-the-outlook-for-2023-2027/>
- Wolf, M., Dilena, M., Spitzhirn, M., & Ramsauer, C. (2023). Development of a Training Module for Virtual Workplace Design and Evaluation in the LEAD Factory (SSRN Scholarly Paper 4470042). <https://doi.org/10.2139/ssrn.4470042>
- Wolf, M., Herstätter, P., & Ramsauer, C. (2019). Using the IIM LEAD factory to identify countermeasures for the demographic challenge. *Procedia Manufacturing*, 31, 123–128. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.03.026>
- Wolf, M., Mitterlehner, L., & Ramsauer, C. (2023). Training Module on the Implementation and Human-Centered Evaluation of Industrial Exoskeletons (SSRN Scholarly Paper 4491759). <https://doi.org/10.2139/ssrn.4491759>
- Wolf, M., & Ramsauer, C. (2023). Carbon Footprint Management in Austrian SMEs: Strategies, Mitigation Measures, Challenges, and Case Studies. (unpublished), 15th International Conference on Mechanical and Intelligent Manufacturing Technologies.
- Wolf, M., Ramsauer, C., & Haidenbauer, M. (2021). Methodik zur Erstellung einer CO2-Bilanz der Orasis Industries Holding GmbH. 02 21, 48–53(Wing Business). [https://issuu.com/beablond/docs/heft\\_02\\_2021\\_end/s/12783121](https://issuu.com/beablond/docs/heft_02_2021_end/s/12783121)
- Wolf, M., Rüdele, K., Ketenci, A., & Ramsauer, C. (2023). Design of a Teaching Module for the Determination of Carbon Footprints at Learning Factory Assembly Lines (SSRN Scholarly Paper 4470034). <https://doi.org/10.2139/ssrn.4470034>
- Wolf, M., Unegg, M., Ketenci, A., Mayer, J., Steininger, K. W., & Ramsauer, C. (2023). Netto-Null-Emissionen: Ein Wegweiser für Unternehmen. <https://doi.org/10.3217/978-3-85125-971-1>
- Woo, S. M., & Whale, J. (2022). A mini-review of end-of-life management of wind turbines: Current practices and closing the circular economy gap. *Waste Management & Research: The Journal for a Sustainable Circular Economy*, 40(12), 1730–1744. <https://doi.org/10.1177/0734242X221105434>
- World Bank. (2021). Price index of energy worldwide from 2013 to 2020, with a forecast until 2035 (in nominal U.S. dollars) [Graph]. Statista. <https://www.statista.com/statistics/252795/weighted-price-index-of-energy/>

Wu, S., Kaden, N., & Dröder, K. (2023). A Systematic Review on Lithium-Ion Battery Disassembly Processes for Efficient Recycling. *Batteries*, 9(6), Article 6. <https://doi.org/10.3390/batteries9060297>

Yakowitz, S., Krimmel, J. E., & Szidarovszky, F. (1978). Weighted Monte Carlo Integration. *SIAM Journal on Numerical Analysis*, 15(6), 1289–1300.

Zhang, Y., & Li, M. (2018). Robust Tolerance Optimization for Internal Combustion Engines Under Parameter and Model Uncertainties Considering Metamodeling Uncertainty From Gaussian Processes. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 18(041011). <https://doi.org/10.1115/1.4040608>

Zhou, L., Garg, A., Zheng, J., Gao, L., & Oh, K.-Y. (2021). Battery pack recycling challenges for the year 2030: Recommended solutions based on intelligent robotics for safe and efficient disassembly, residual energy detection, and secondary utilization. *Energy Storage*, 3(3), e190. <https://doi.org/10.1002/est.2.190>



QR Code

[www.oewgp.at](http://www.oewgp.at)

© 2024, ÖWGP, Karlsplatz 13, 1040 Vienna, Austria. All rights reserved. The copyrights and rights of use of the lectures and their content remain with the respective rights holders. The reproduction or distribution of this document in whole or in part, be it on paper, on the Internet or on another medium, requires the approval of the respective rights holder.