

Circular Economy als Basis für resiliente und erneuerbare Rohstoffkreisläufe

Der ungebremste Ressourcenverbrauch und die Nutzung fossiler Energien sind die Hauptverursacher der globalen Klimakrise. Etwa die Hälfte der globalen Treibhausgas-Emissionen entstehen bereits vor der eigentlichen Nutzung: während der Bereitstellungsphase von Materialien, Energie und Nahrung [1]. Neben einem erneuerbaren Energiesystem bedarf es einer raschen Abkehr vom derzeit noch vorherrschenden, linearen Wirtschaftsmodell „Produzieren-Nutzen-Wegwerfen“ hin zu einer Kreislaufwirtschaft mit nachhaltigen Rohstoffkreisläufen. Eine leistungsfähige und verlustarme Circular Economy mit hoher Materialeffizienz ist von entscheidender Bedeutung, soll die Energie- und Ressourcenwende gelingen. Um eine hohe Resilienz mit geringstmöglichem Energiebedarf zu erreichen, sollten bis auf Weiteres möglichst nachhaltig gewonnene Rohstoffe und Nachnutzungsoptionen bestehen bleiben (► Abbildung 1).

Die aktuellen geopolitischen Spannungen unterstreichen die Notwendigkeit für diesen grundlegenden Strukturwandel. Die Konkurrenz um knappe Rohstoffe, die auch zur Herstellung Erneuerbarer-Energiotechnologien und für Effizienzverbesserungen benötigt werden, nimmt zu (► Abbildung 2). Dabei handelt es sich bei einer Vielzahl der zukünftig in noch größerem Umfang benötigten Materialien bereits heute um kritische Rohstoffe für die Europäische Union [2], wie bspw. seltene Erden, Lithium, Graphit oder auch Phosphor.

Um die vielseitigen und komplexen Herausforderungen der anstehenden Transformation zu meistern, müssen zentrale Fragen untersucht und diskutiert werden, wie beispielsweise:

- Zukunftsbild Kreislaufwirtschaft: Welche Methoden, Einsichten und Innovationen braucht es für die Transformation?
- Wie können regenerative Kreisläufe Resilienz und Wachstum fördern?
- Wie kann der Weg von der Abfallwirtschaft zur Kreislaufwirtschaft gelingen?

Mit dem hier vorgestellten Tagungsbeitrag werden nachfolgend ausgewählte Lösungs- und Innovationsansätze für die Transformation zu einer

kreislauforientierten und nachhaltigen Industriegesellschaft der Zukunft zusammengefasst.

Transformation der chemischen Industrie

Damit die Transformation der chemischen Industrie weg von fossilen Quellen gelingt, müssen benötigte Rohstoffe und Energie sowie der Wasserstoff- und Kohlenstoffbedarf auf eine nachhaltige Weise gedeckt werden. Als alternative Kohlenstoffressourcen kommen CO₂ (via Direct Air Capture), Biomasse oder insbesondere Kunststoffabfälle in Frage.

Um den zukünftigen Bedarf an Wasserstoff – und somit auch an Strom für den Wandel – erheblich zu reduzieren, kann sowohl eine Kaskadennutzung von Biomassen mit hoher Priorität auf einer Bindung des enthaltenen Kohlenstoffs als auch eine Fokussierung auf bisher nicht im Markt etablierte, neue chemische und rohstoffliche Kunststoff-Recyclingverfahren ins Auge gefasst werden [3]. In Kombination mit neuen Sammel- und Sortierungsverfahren können über das rohstoffliche Recycling von Kunststoffen mittels Pyrolyseverfahren Kohlenstoff und Wasserstoff für die Erzeugung chemischer Grundstoffe bereitgestellt werden. Sowohl am Institut für technische Chemie des Karlsruher Instituts für Technologie als auch am Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg werden verschiedene Pyrolyse-Technologien auf Basis von Schnecken- und Drehrohrreaktoren sowie Vor- und Nachbehandlungsschritte untersucht [4]. Übergeordnetes Ziel hierbei ist die Effizienz des rohstofflichen Recyclings durch die Optimierung von Energie- und Stoffflüssen zu steigern, um leistungsfähige Technologiebausteine für eine Bereitstellung chemischer Grundstoffe zu ermöglichen [5].

Rolle der Biomasse

Ein wichtiger Baustein für eine resiliente Circular Economy ist die effiziente Nutzung von Biomasse in Stoffkreisläufen. Dazu zählt die Kaskadennutzung von biogenen Rohstoffen (z.B. als Kohlenstoff-



ZSW

Dr. Jochen Brellochs
jochen.brellochs@zsw-bw.de

Julia Goy
julia.goy@zsw-bw.de

CAE

Dr. Christian Scherdel
christian.scherdel@cae-zeroarbon.de

DBFZ

Dr. Romy Brödner
romy.broedner@dbfz.de

Prof. Dr. Michael Nelles
michael.nelles@dbfz.de

DLR

Tom Lorenz
tom.lorenz@dlr.de

Fraunhofer ISE

Dr. Karl-Anders Weiß
karl-anders.weiss@ise.fraunhofer.de

FZ Jülich

Dr. Felix Kullmann
f.kullmann@fz-juelich.de

IZES

Bernhard Wern
wern@izes.de

KIT

Dr. Salar Tavakkol
salar.tavakkol@kit.edu

UFZ

Dr. Malorzata Borchers
malorzata.borchers@ufz.de

Dr. Danny Otto
danny.otto@ufz.de

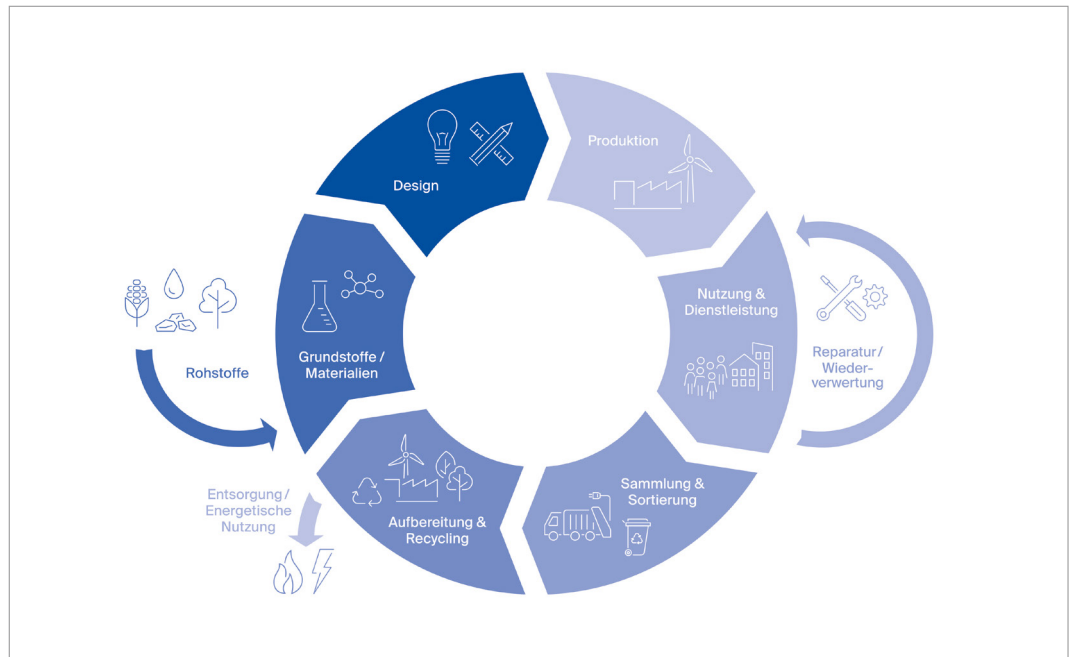
Wuppertal Institut

Dr. Holger Berg I
holger.berg@wupperinst.org

► **Abbildung 1**

Konzeptionelle Darstellung einer Circular Economy mit nachhaltigen Rohstoffkreisläufen.

(Quelle: ZSW)

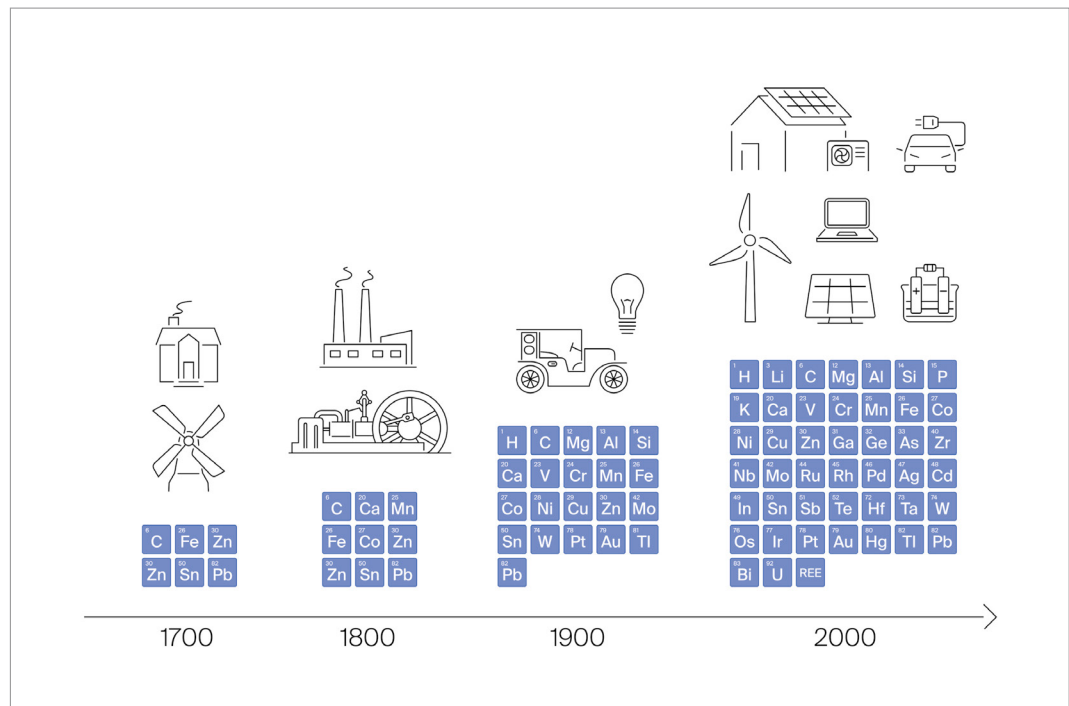


► **Abbildung 2**

Steigender Rohstoffbedarf:

Zunahme der genutzten Elemente im Periodensystem für u.a. die Energieerzeugung und -wandlung (auf Basis von [15]).

(Quelle: ZSW)



ressource für die chemische Industrie) genauso wie die Wiederaufbereitung gebrauchter Produkte. Da die Biomasseproduktion auf land- und forstwirtschaftlichen Flächen begrenzt ist, können Stoffkreisläufe und neue Verwendungszwecke für biogene Nebenprodukte zur Minderung des Ressourcenbedarfs und zur Substitution fossiler Rohstoffe beitragen. In Deutschland beläuft sich das technische Biomassepotenzial von Nebenprodukten aus der Land- und Forstwirtschaft, Siedlungsabfällen,

Klärschlamm, industriellen Reststoffen sowie Reststoffen von sonstigen Flächen auf 86,6 bis 139,6 Mio. Tonnen Trockenmasse pro Jahr gemäß Ressourcendatenbank des Deutschen Biomasseforschungszentrums (DBFZ). Davon befinden sich rund drei Viertel bereits in einer stofflichen und/oder energetischen Nutzung. Neben der Optimierung der bestehenden Nutzung könnten noch 12,8 bis 45,5 Mio. Tonnen Trockenmasse pro Jahr für weitere Anwendungen mobilisiert werden.

Verbesserungspotenziale bisheriger Nutzungspfade ergeben sich in Hinblick auf die Verwertung von Nährstoffressourcen wie beispielsweise Phosphor oder auch die CO₂-Speicherung im Boden als Beitrag zur Abmilderung des menschen-gemachten Treibhauseffekts.

Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlamm

Ohne Phosphor, einen endlichen und nicht substituierbaren Schlüsselnährstoff, gäbe es auf der Erde kein Leben. Phosphor wird als Rohstoff in vielen Industriebereichen wie zur Herstellung von Dünge- und Reinigungsmitteln benötigt, dabei ist Europa stark abhängig von Importen u.a. ausgepolitisch instabilen Regionen. Es werden rund 80.000 Tonnen Phosphor pro Jahr als fossiler Mineraldünger importiert [6]. Je Tonne Phosphor-Mineraldünger entstehen herstellungsbedingt derzeit ca. 2,5 Tonnen CO₂ [7]. Menschen und Tiere nehmen Phosphor über die Nahrung auf. Der vom Menschen wieder ausgeschiedene Phosphor gelangt schließlich in das Abwassernetz und somit in den Klärschlamm. In Deutschland könnten rund 60% des Phosphor-Mineraldüngerbedarfs durch die Phosphor-Rückgewinnung aus kommunalem Klärschlamm gedeckt werden [8]. Um eine nachhaltige Kreislaufführung mit hochwertigen Phosphor-Rezyklaten zu erreichen, hat das Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) gemeinsam mit Partnern einen innovativen Prozess mit in-situ Alkali-Additivzugabe entwickelt. Der Prozess wird aktuell bereits im 1-Megawatt-Pilotmaßstab realisiert ▶ Abbildung 3). Hierbei wird Klärschlamm in einer Wirbelschichtenanlage verbrannt. Durch die Additivzugabe wird die Pflanzenverfügbarkeit des Phosphors deutlich erhöht. Die Verbrennungsbedingungen können so eingestellt werden, dass es zusätzlich zu einer Mobilisierung von Schwermetallen während der Verbrennung kommt. Die phosphorhaltige Asche wird im Rauchgas als Flugasche ausgetragen und anschließend bei hohen Temperaturen von > 700°C abgeschieden. Mit dieser Technologie kann ein phosphorhaltiger Wertstoff mit reduzierten Schwermetallgehalten und hoher Pflanzenverfügbarkeit gewonnen werden.

Design nachhaltiger und kreislauffähiger Produkte

Die heutige Wegwerf-Gesellschaft bietet bisher kaum Anreize, Produkte und Konsumgüter nachhaltiger und kreislauffähiger zu gestalten, obwohl bis zu



▶ Abbildung 3
Phosphor-Rückgewinnung aus Klärschlamm:

Baustelle der 1 Megawatt-Pilotanlage im Juli 2023 .

(Quelle: Abwasserzweckverband Stauffener Bucht, <https://azv-stauffener-bucht.de/p-xtract/>)

80% der Umweltauswirkungen durch das Produktdesign beeinflussbar wären [9]. Das Institut für CO₂-arme Industrieprozesse des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) entwickelt eine einheitliche Methodik, wie zukünftige Produktdesigns den End-of-Life (Demontage, Sortierung, Recycling) berücksichtigen können. Durch bessere Trennbarkeit der Materialien lassen sich reinere Abfallfraktionen für ein höherwertigeres Recycling erreichen, was insbesondere die Recyclingquote für kritischen Legierungs- und Technologiemetalle verbessert. Zu diesem Zweck wird ein digitales Tool entwickelt, das Produktentwickler an den entscheidenden Punkten im Designprozess durch Hervorheben problematischer Baugruppen und mit Alternativvorschlägen unterstützt.

Digitalisierung: Ein wichtiger Hebel für die Kreislaufwirtschaft

Die Digitalisierung stellt einen wichtigen Hebel zur Etablierung einer resilienten und ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft dar. Zahlreiche zirkuläre Instrumente und Prozesse bedürfen digitaler Unterstützung, um für komplexe Produkte und Wertschöpfungsketten umsetzbar zu sein. Die Schaffung von Transparenz und Zuverlässigkeit hinsichtlich der Beschaffenheit und Verfügbarkeit von Sekundärmaterialien sind hier z.B. von hoher Relevanz für ein hochwertiges Recycling. [10] Ebenso die Möglichkeit, durch geeignete Informationen prädiktive Wartung und ein effizientes Refurbishment durchzuführen. Zentrale Bausteine sind unter anderem der digitale Produktpass und Datenräume für die Circular Economy. Die gewonnenen Erkenntnisse tragen dann zur Verbesserung und Erhöhung der Kreislaufwirtschaftsfähigkeit bei. Da Materialien und Komponenten in die Kreisläufe verschiedener Industrien eingebracht werden können, entsteht ein digital-ermöglichtes Wertschöpfungsnetz. Das Wuppertal Institut für

Klima, Umwelt, Energie fokussiert beispielsweise die Entwicklung geeigneter digitaler Zwillinge, die Umsetzung im Engineering sowie die Erforschung und Verbreitung relevanter Datenkompetenzen.

Übergeordnete und einheitliche Datenbasis

Für eine leistungsfähige Circular Economy sind neue Formate der Zusammenarbeit und ein zuverlässiger Datenraum entscheidend. Mit dem am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesystem (ISE) verfolgten Konzept der Circonomy® Hubs sollen Netzwerke aus Wirtschaft, Wissenschaft, Politik und Gesellschaft aufgebaut werden und darüber hinaus sollen auch Instrumente zur interdisziplinären Zusammenarbeit und eine gemeinsame transparente Datenbasis zur Bewertung von zirkulären Wertschöpfungsketten geschaffen werden.

Die Komplexität der internationalen Lieferketten – und folglich auch der entsprechenden Daten – wurde beispielhaft für die Photovoltaik aufgezeigt. Die global installierte Photovoltaik-Kapazität lag im Jahr 2022 erstmals bei über 1 TW_{dc}. Bis 2050 wird je nach Studie ein exponentieller Zubau von insgesamt bis zu 80 TW_{dc} erforderlich, wenn die Klimaziele eingehalten werden sollen [11]. Die Herstellung von Solarzellen benötigt ein breites Portfolio mineralischer Rohstoffe [12]. Bisher wird Silber als

Metallkontakt von Solarzellen eingesetzt. Gervais et al. zeigten zuletzt, dass bereits 2021 mehr als 10% des geförderten Silbers für die globale Photovoltaik-Produktion genutzt wurde. Gemessen am weltweit erwarteten Zubau wird perspektivisch das für die Produktion benötigte Silber knapp. Als größter Produzent verarbeitet China am meisten Silber zu Solarmodulen (► Abbildung 4). Derartige Rohstoffdaten und Zusammenhänge könnten in einem Circonomy® Hub zur Photovoltaik-Industrie genutzt werden, um Stoffströme in Kreisläufe zu überführen und somit die Nachhaltigkeit zu erhöhen und auch Lieferketten resilienter zu gestalten.

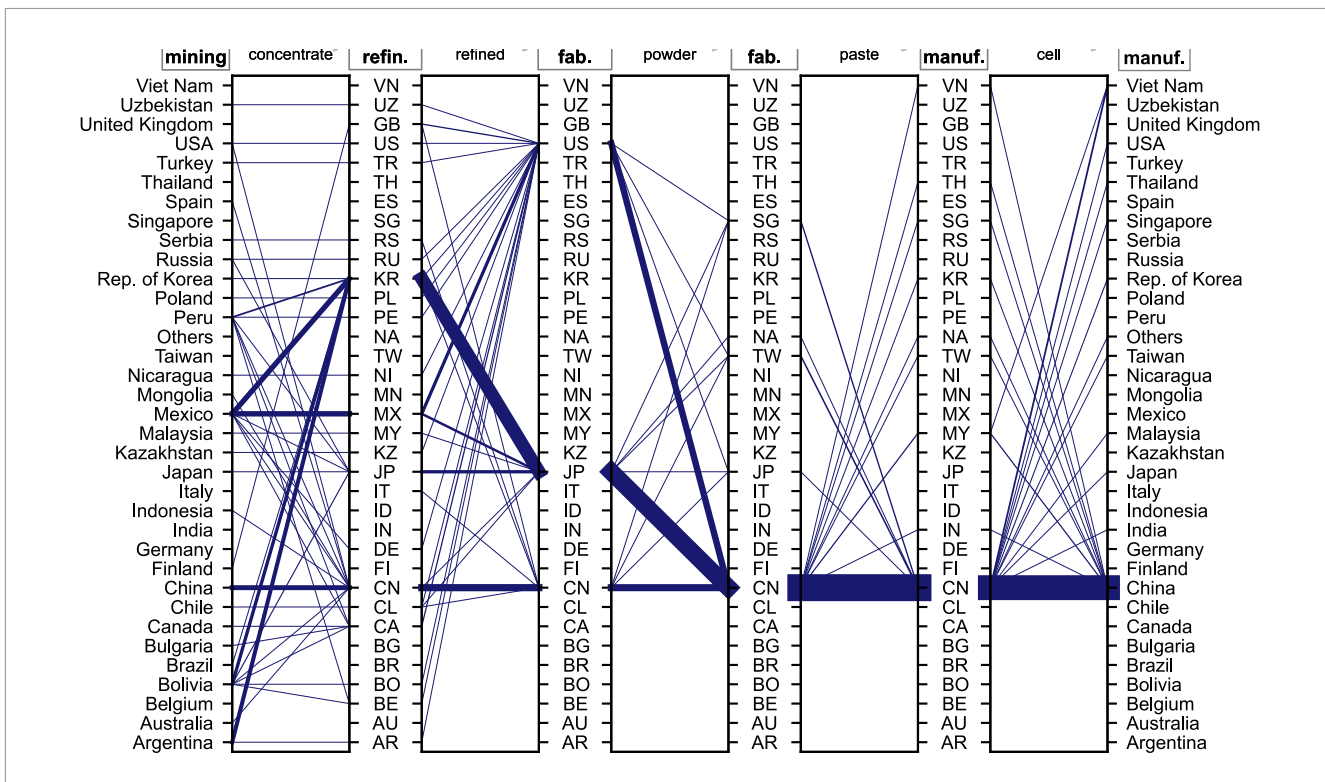
Einsatz Künstlicher Intelligenz

Der Künstlichen Intelligenz (KI) wird zukünftig ein großes Potenzial für den Erhalt der industriellen Wertschöpfung zugeschrieben [14]. Somit wird KI auch im Zuge des Strukturwandels zu einer Circular Economy zur Anwendung kommen, wie die nachfolgenden Forschungsarbeiten am Center of Applied Energy Research (CAE) zeigen.

Durch die Abkehr von der Kohleverstromung in Deutschland wird in absehbarer Zeit kein Gips (CaSO₄) mehr aus den Rauchgasentschwefelungsanlagen der Kohlekraftwerke gewonnen werden können. Es stellt sich die Frage inwiefern dieser Baustoff substituiert oder nachhaltige Gips-Herstellverfahren genutzt werden können.

► Abbildung 4
Silber in der Photovoltaik-Industrie:
Übersicht zu Bergbau, Aufbereitung und Verarbeitung.

(Quelle: [13])



Der Gebäudebestand stellt zukünftig einen wichtigen Lieferanten für Recycling-Gips dar, der jedoch aufgrund der etablierten Bauweisen oft in Mischung mit weiteren Baustoffen beim Rückbau anfallen wird. Insofern gilt es, neue Methoden zu entwickeln und zu etablieren, die zuverlässig und hochempfindlich Fremd-/ Schad-/ Gefahrstoffen (z.B. lungengängige Mineralfasern) in Recycling-Gips erkennen können. Hierfür bietet sich der Einsatz von KI an, die nach einem gewissen Lerneffekt, eine automatisierbare Charakterisierung mit hochpräziser Erkennungsmethodik ermöglichen wird.

Fazit

Zirkuläre Wertschöpfungsketten mit einer Bereitstellung von Sekundärrohstoffen fördern die Ressourcenautonomie. Bisher genutzte Primärressourcen können substituiert werden.

Mit Blick auf die aktuellen geopolitischen Schocks sollten für eine hohe Resilienz hierzulande weiterhin Grundstoffe für die weitere Verarbeitung produziert werden. Ein wesentlicher Schlüssel zur Begegnung der Klimakrise liegt in einer raschen Abkehr vom linearen Wirtschaftsmodell hin zu einer leistungsfähigen Circular Economy. Systemische und technologische Innovationen, wie in diesem Beitrag beschrieben, können zudem die Material- und Energieeffizienz steigern.

Referenzen

- [1] Oberle et al.: „Global Resources Outlook 2019: Natural Resources for the Future We Want.“; A Report of the International Resource Panel, United Nations Environment Programme, Nairobi (Kenia), 2019
- [2] Europäische Kommission: „Widerstandsfähigkeit der EU bei kritischen Rohstoffen: Einen Pfad hin zu größerer Sicherheit und Nachhaltigkeit abstecken“; Mitteilung der Kommission an das europäische Parlament, den Rat, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen; Brüssel, den 3.9.2020
- [3] Bierau-Delpont et al.: „Chemistry4Climate – Wie die Transformation der Chemie gelingen kann“ (Kurzfassung); Verband der Chemischen Industrie e.V. (VCI) & Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI); 2023
- [4] Netsch et al.: „Chemical Recycling of Polyolefinic Waste to Light Olefins by Catalytic Pyrolysis“; Chemie Ingenieur Technik 95, No. 8, 2023
- [5] Stallkamp et al.: „Economic and environmental assessment of automotive plastic waste end-of-life options“; Journal of Industrial Ecology, 2023
- [6] <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/206779/umfrage/inlandsabsatz-von-duengemitteln-nach-naehrstoffarten-in-deutschland/>; Abrufdatum 03.11.2023 (Kalkulation auf Basis der letzten drei Jahre)
- [7] Ouikhalfan et al.: „Toward Net-Zero Emission Fertilizers Industry: Greenhouse Gas Emission Analyses and Decarbonization Solutions“; Energy & Fuels, Vol. 36, 2022 (Kalkulation nach Tabelle 9)
- [8] Roskosch et al.: „Klärschlamm-Entsorgung in der Bundesrepublik Deutschland“; Umweltbundesamt, 2018 (Kalkulation nach Tabelle 13)
- [9] Europäische Kommission: „Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft für ein saubereres und wettbewerbsfähigeres Europa“; Mitteilung der Kommission an das europäische Parlament, den Rat, den europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen; Brüssel, den 11.3.2020
- [10] Berg, H., Bendix, P., Jansen, M., Le Blévenec, K., Bottermann, P., Magnus-Melgar, M., ... & Wahlström, M. (2021). Unlocking the potential of Industry 4.0 to reduce the environmental impact of production. European Environment Agency, European Topic Centre on Waste and Materials in a Green Economy. <https://www.eionet.europa.eu/etcs/etc-wmge/products/etc-wmge-reports/unlocking-the-potential-of-industry-4-0-to-reduce-the-environmental-impact-of-production>
- [11] Haegel et al.: „Photovoltaics at multi-terawatt scale: Waiting is not an option“; Science, Vol. 380, Issue 6640, pp. 39-42, 2023; <https://doi.org/10.1126/science.adf6957>
- [12] Dörner, Liedtke: „Mineralische Rohstoffe für die Energiewende“; Commodity TopNews, Bd. 50, 2016; https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Commodity_Top_News/Rohstoffwirtschaft/50_rohstoffe-energiewende.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- [13] Gervais et al.: „Risk-based due diligence in supply chains: The case of silver for photovoltaics“; Resources, Conservation & Recycling, Vol. 198, Issue 107148, 2023; <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2023.107148>
- [14] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi): „Technologieszenario „Künstliche Intelligenz in der Industrie 4.0““; Working Paper, 2019
- [15] Faulstich: „Circular Economy – Herausforderungen und Perspektiven“; Nachhaltige Industrie, No. 1, 2020