



Transformation zur Kreislaufwirtschaft

Leistungsfähigkeit, industrie- und
FTI-politische Förderung

**Andreas Reinstaller, Ina Meyer,
Michael Peneder**

Mitarbeit: Jürgen Janger

Wissenschaftliche Assistenz: Kathrin Hofmann,
Peter Reschenhofer, Nicole Schmidt-
Padickakudy, Tim Slickers, Fabian Unterlass

August 2022

Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung

Transformation zur Kreislaufwirtschaft

Leistungsfähigkeit, industrie- und FTI-politische Förderung

Andreas Reinstaller, Ina Meyer, Michael Peneder

August 2022

Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung

Im Auftrag des Rates für Forschung und Technologieentwicklung

Mitarbeit: Jürgen Janger

Begutachtung: Mark Sommer

Wissenschaftliche Assistenz: Kathrin Hofmann, Peter Reschenhofer, Nicole Schmidt-Padickakudy, Tim Slickers, Fabian Unterlass

Die vorliegende Kurzstudie bietet Evidenz zu technologischen Entwicklungen in Österreich, die die Transformation zur Kreislaufwirtschaft unterstützen. Derartige Tätigkeiten spielen im österreichischen Innovationssystem – unter Berücksichtigung wichtiger Einschränkungen bei der Messung – sowohl in absoluten als auch in anteilmäßigen Zahlen nur eine untergeordnete Rolle. Trotzdem sind technologisch und kommerziell relevante Entwicklungstätigkeiten zu beobachten. Eine Fallstudie zur Etablierung von Kreislaufwerterschöpfungsketten im Bereich der Lithium-Ionen-Batterien zeigt die Bedeutung umfassender wirtschaftlicher, sozialer und FTI-politischer Ansätze, die für eine Transformation hin zu einer Kreislaufwirtschaft notwendig sind. In dem erforderlichen "whole of government"-Ansatz kann der Rat für Forschung und Technologieentwicklung eine wichtige Koordinationsrolle übernehmen.

2022/2/S/WIFO-Projektnummer: 9021

© 2022 Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung

Medieninhaber (Verleger), Herausgeber und Hersteller: Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung,
1030 Wien, Arsenal, Objekt 20 • Tel. (+43 1) 798 26 01-0 • <https://www.wifo.ac.at/> • Verlags- und Herstellungsort: Wien

Verkaufspreis: 40 € • Kostenloser Download: <https://www.wifo.ac.at/wwa/pubid/69445>

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	3
2. Kreislaufwirtschaft als industriepolitische Herausforderung	4
2.1 Das Konzept der Kreislaufwirtschaft	4
2.2 Digitalisierung und Kreislaufwirtschaft	8
2.3 Europäische Agenda	9
2.4 Österreichische Agenda	10
3. Innovationstätigkeit auf dem Gebiet der Kreislaufwirtschaft in Österreich und Bedeutung für die österreichische Außenwirtschaft	15
3.1 Datengrundlage und Messung der Innovationstätigkeit und des Warenhandels in kreislaufwirtschaftsrelevanten Technologien	16
3.2 Entwicklung des österreichischen Unternehmenssektors in der Entwicklung von Technologien und im Handel im Bereich der Kreislaufwirtschaft	20
3.2.1 Finanzierung und Förderung von F&E im Bereich der Kreislaufwirtschaft im Unternehmenssektor	20
3.2.2 Patentaktivitäten in kreislaufwirtschaftsrelevanten und unterstützenden Technologien	23
3.2.3 Handel kreislaufwirtschaftsrelevanter Waren in Österreich	31
3.3 Schlussfolgerungen	35
4. Kreislaufwirtschaft und Dekarbonisierung am Beispiel Lithium-Ionen-Batterien	36
4.1 Kreislaufwirtschaft und Ressourcensicherheit	37
4.2 Fallbeispiel Recycling von Lithium-Ionen-Batterien	38
4.2.1 Den Rücklauf von Batterien sicherstellen	40
4.2.2 Eco-Design als Chance für eine effiziente Nutzung und Verwertung	41
4.2.3 Die Bedeutung des Re-Use von EoL-LIB	42
4.2.4 Wirtschaftspolitische Instrumente und Rahmenbedingungen für ein wettbewerbsfähiges Recycling in Europa	44
4.2.5 Förderung von Forschung und Entwicklung für LIB	45
4.3 Schlussfolgerungen	47
5. Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse und FTI-politische Schlussfolgerungen	48
Literaturverzeichnis	52
Anhänge	56

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Organische und technische Systeme einer zirkulären Wirtschaft	6
Abbildung 2: Ansatzpunkte kreislaufwirtschaftlicher Strategien auf Unternehmensebene	7
Abbildung 3: Geförderte Gesamtkosten, Gesamtförderung und Förderbarwerte, FFG	21
Abbildung 4: Geförderte Gesamtkosten nach Branchen; Entwicklung 2016-2020.	22
Abbildung 5: Patentanmeldungen beim Europäischen Patentamt für kreislaufwirtschaftsrelevante Erfindungen mit österreichischen Erfindern.	25
Abbildung 6: Patentanmeldungen beim Europäischen Patentamt für Erfindungen im Bereich unterstützender Grundlagentechnologien mit österreichischen Erfindern.	25
Abbildung 7: Patentanmeldungen beim Europäischen Patentamt für Erfindungen im Bereich kreislaufwirtschaftsrelevanter und unterstützender Grundlagentechnologien mit österreichischen Erfindern.	26
Abbildung 8: Patentanmeldungen österreichischer Erfinder beim Europäischen Patentamt, die Patente im Bereich kreislaufwirtschaftsrelevanter Technologien zitieren.	27
Abbildung 9: Patentanmeldungen beim Europäischen Patentamt aus dem Rest der Welt, die Patente im Bereich kreislaufwirtschaftsrelevanter Technologien mit österreichischen Erfindern zitieren.	27
Abbildung 10: Internationales Ranking der Patentanmeldungen für kreislaufwirtschaftsrelevante Erfindungen; PageRank Scores/Bevölkerungsgröße	29
Abbildung 11: Internationales Ranking der Patentanmeldungen für unterstützende Grundlagentechnologien; PageRank Scores/Bevölkerungsgröße	29
Abbildung 12: Internationales Ranking der im Bereich kreislaufwirtschaftsrelevanter und unterstützender Grundlagentechnologien; PageRank Scores/Bevölkerungsgröße	30
Abbildung 13: Entwicklung der Importe, Exporte und Handelsbilanz	32
Abbildung 14: Entwicklung des Handels mit kreislaufwirtschaftsrelevanten Waren	34
Abbildung 15: Gesamtförderung nach Branchen; Entwicklung 2016-2020	56
Abbildung 16: Förderbarwerte nach Branchen; Entwicklung 2016-2020	57
Abbildung 17: Internationales Ranking der Patentanmeldungen für kreislaufwirtschaftsrelevante Erfindungen; PageRank Scores	58
Abbildung 18: Internationales Ranking der Patentanmeldungen für Technologien zur Speicherung von Elektrizität; PageRank Scores (gesamt)	59
Abbildung 19: Internationales Ranking der Patentanmeldungen für Technologien zur Speicherung von Elektrizität; PageRank Scores (per capita)	60

Übersichtsverzeichnis

Übersicht 1: Ansätze zur Umsetzung der österreichischen Kreislaufwirtschaftsstrategie in ausgewählten strategischen Sektoren	13
Übersicht 2: Kreislaufwirtschaftsrelevante Umwelttechnologien	18

1. Einleitung

Die Transformation der Wirtschaft durch Prinzipien der Kreislaufwirtschaft wird seit einigen Jahren durch internationale Institutionen als wichtiger Ansatz zur Lösung von Umweltproblemen und der Erreichung der Klimaziele beworben. Die Europäische Union hat bereits im Jahr 2015 den "EU-Aktionsplan für die zirkuläre Wirtschaft"¹ beschlossen, der im Zuge des Grünen Deals zur Erreichung der Klimaneutralität neues Gewicht erhalten hat.² Denkfabriken wie das World Economic Forum (WEF) oder die Ellen Mac Arthur Foundation (EMF) haben derartige Ansätze eingehend untersucht und Managementansätze und Empfehlungen für Unternehmen vorgeschlagen. Diese Entwicklungen nachvollziehend, wurde auch in Österreich eine nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie³ ausgearbeitet, die sich derzeit im Begutachtungsprozess befindet.

Die Bedeutung und das Interesse an Kreislaufwirtschaftskonzepten liegen vor allem darin begründet, dass sich auf deren Grundlage Lösungen für umwelt- und klimapolitische Anliegen entwickeln lassen, die auch neue wirtschaftliche Spielräume eröffnen und zentrale wirtschaftliche Grundsätze, wie etwa die effiziente Nutzung von Ressourcen, in den Vordergrund stellen. Durch Kreislaufwirtschaft gesteigerte Ressourceneffizienz bedeutet im Wesentlichen, das Streben nach einer höheren Wertschöpfung bei geringerem Einsatz natürlicher Ressourcen. Die Transformation der Wirtschaft nach kreislaufwirtschaftlichen Prinzipien wird somit als ein Streben nach einem nachhaltigen Wirtschaftswachstum wahrgenommen.

Der Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft ist für die österreichischen Unternehmen sowohl eine Herausforderung als auch eine große Chance, die umfangreiche Innovationsaktivitäten sowohl in der Adoption als auch in der Entwicklung geeigneter Technologien und neuer Geschäftsmodelle erfordert. In einer Kreislaufwirtschaft werden Materialien rückgewonnen bzw. wiederverwendet. Produkte, Materialien und Ressourcen bleiben so lange wie möglich erhalten und generieren somit über einen längeren Zeitraum wirtschaftlichen Wert. Die Abfallerzeugung wird minimiert. Die Kreislaufwirtschaft wird als Gegenteil zu einer linearen Wirtschaftsweise definiert, die ein Produktions- und Konsummodell nach dem Motto "Nehmen, Herstellen, Entsorgen" verfolgt.

Diese Konzeption wirtschaftlicher Prozesse hin zu einer nachhaltigeren, energie- und ressourceneffizienteren Wirtschaftsweise erfordert eine Neubewertung bestehender Technologien, Logistikketten und Geschäftsmodelle und erfordert somit umfangreiche Forschungs- und Innovationsanstrengungen. Diese gilt es zu beobachten und zu analysieren, damit Entscheidungsträger in forschungs-, technologie- und innovationspolitischen Belangen wohlinformierte Entscheidungen treffen können. Ziel der vorliegenden Kurzstudie ist es dementsprechend, Evidenz zur technologischen Entwicklungen zu bieten, die die Transformation zur Kreislaufwirtschaft unterstützen.

¹ Europäische Kommission (2015).

² Vgl. https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_de

³ Siehe https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/abfall/Kreislaufwirtschaft/strategie.htm |

Abschnitt 2 stellt die allgemeinen Herausforderungen einer Transformation der Wirtschaft nach Gesichtspunkten der Kreislaufwirtschaft für die Industriepolitik dar und diskutiert die entsprechenden Ansätze auf europäischer Ebene und in Österreich. In Abschnitt 3 wird der Versuch unternommen, die Innovationsaktivitäten im Bereich kreislaufwirtschaftsrelevanter Technologien im Unternehmenssektor anhand einer Reihe von Input- und Outputindikatoren zu messen. Abschnitt 4 fokussiert auf die Herausforderungen und Handlungsoptionen zur Umsetzung der Kreislaufwirtschaft am konkreten Beispiel von Lithium-Ionen-Batterien in Österreich. Eine Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse aus diesen Analysen schließt diese Studie.

2. Kreislaufwirtschaft als industriepolitische Herausforderung

2.1 Das Konzept der Kreislaufwirtschaft

Der Begriff der Kreislaufwirtschaft hat eine lange Geschichte und kennt viele Definitionen, die in der Literatur ebenso wie in öffentlichen Dokumenten oft vage und unpräzise verwendet werden. Lazarevic und Brandao (2020, S. 19) bezeichnen die Kreislaufwirtschaft daher als eine *sozio-technische Imagination*, deren wichtigste Funktion darin besteht, "Forschungs- und Innovationspfade zu informieren und zu gestalten, Visionen von dem zu entwerfen, was gut, wünschenswert und erstrebenswert ist". Im politischen Prozess könne eine solche Unbestimmtheit und Flexibilität des Konzepts notwendig sein, indem sie hilft, ein erfolgreiches Narrativ zu entwickeln, das verschiedene Akteure auf eine weitgehend kohärente und gemeinsame Vision ausrichtet.

In diesem Sinne geht das Konzept der Kreislaufwirtschaft bereits auf Forderungen in den 1970er Jahren zurück, Materialien in einem geschlossenen Kreislauf zu verarbeiten und Abfall als Ressource zu betrachten und auf diese Weise die industrielle Wirtschaft zu entmaterialisieren (Stahel und Reday, 1976). In dem durch die Begriffskette „Nehmen – Herstellen – Entsorgen“ als *cradle-to-grave* charakterisiertem „linearen“ Modell der Wirtschaft werden große Mengen von nicht erneuerbaren Ressourcen für die Produktion entnommen und die Produkte nach ihrem Gebrauch als Abfall entsorgt. Diesem Bild wurde unter dem Motto *cradle-to-cradle* (McDonough und Braungart, 2002) die Vision einer zirkulären Wirtschaft gegenübergestellt, die durch die Begriffskette „Nehmen – Herstellen – Verwenden – Wiederverwenden“ beschrieben wird und darauf abzielt, den Kreislauf der Materialflüsse zu schließen und somit Abfall zu vermeiden. Einen besonderen Stellenwert nimmt dabei die Vorstellung ein, dass Produkte zunehmend als Dienstleistung (*product-as-a-service*) angeboten werden (Stahel, 2016). Dahinter steht die Vorstellung, dass die Hersteller mit dem Eigentum während des gesamten Lebenszyklus auch die Verantwortung für eine Leistung behalten und dadurch die Umsetzung dieser Ziele strukturiert managen und kontrollieren können.⁴

Ungeachtet der zuvor angeführten Überlegungen erfordert die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft dennoch einen begrifflichen Grundkonsens über Konzepte und Begriffe als

⁴ Siehe z.B. Peneder T. (2021).

Voraussetzung für die Verständigung zwischen Wissenschaft, Politik sowie Fachleuten, die für die praktische Umsetzung verantwortlich sind. Internationale Organisationen, Nichtregierungsorganisationen und Wissenschaftler haben daher unterschiedliche Definitionen vorgelegt, denen aber folgende Elemente gemein sind (vgl. de Jesus et al., 2018):

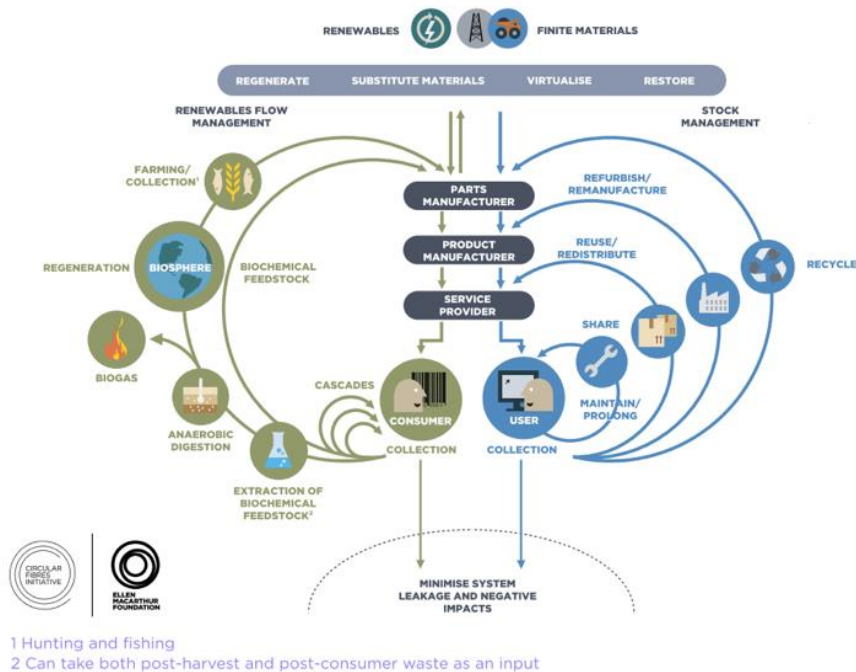
- **Effiziente Nutzung von Ressourcen:** Es wird die Minimierung von Vorleistungen und Materialien und effiziente Nutzung v.a. regenerativer Ressourcen in den Vordergrund gestellt (Material- und Energieeffizienz sowie Beschaffung und vorrangige Verwendung von erneuerbaren und ungefährlichen Materialien)
- **Verlängerung von Produktlebenszyklen:** Es wird die Bedeutung der Ausdehnung von Produktlebenszyklen durch Reparatur-, Wiederaufbereitungs- und Wiederherstellungsoptionen hervorgehoben. Ebenso wird die Bedeutung neuer Geschäftsmodelle im Bereich der Beschaffung, z.B., durch gemeinsame Nutzung oder den Aufbau von unternehmensübergreifenden Wiederverwendungskreisläufen von Materialien und Produkten, oder durch das Design von Produkten, das eine Wieder- oder Weiterverwendung in anderen Anwendungsbereichen ermöglicht, betont.
- **Verringerung des Produktionsausstoßes und Abfallminimierung:** Recycling, der Aufbau von Verwertungsnetzen zur Rückführung von Rohstoffen, Materialien und Produkten am Ende ihres Lebenszyklus und damit deren Valorisierung stellt in den meisten Definitionen der Kreislaufwirtschaft die dritte zentrale Säule dar.

Zusammenfassend kann man festhalten, dass die Kreislaufwirtschaft einen geschlossenen Prozess anstrebt, der den Ressourceneinsatz minimiert, toxische Stoffe aus dem Verkehr zieht und Abfälle minimiert. Die Ellen MacArthur Foundation (EMF, 2013, S. 7) beschreibt dabei die Kreislaufwirtschaft als ein restauratives bzw. regeneratives **industrielles System**, welches das End-of-Life-Konzept durch das der Wiederherstellung ersetzt, die Nutzung erneuerbarer Energien vorantreibt, und Abfälle sowie die Verwendung giftiger (die Wiederverwendung beeinträchtigender) Chemikalien durch ein intelligentes Design von Materialien, Produkten, Systemen und Geschäftsmodellen beseitigt. In diesem Sinne definieren auch Lazarevic und Brandao (2020, S. 15) die Kreislaufwirtschaft als Aktivitäten, "die darauf abzielen, die Gewinnung von Ressourcen und die Erzeugung von Abfällen zu minimieren, mit dem Ziel, sie vollständig zu beseitigen."

Während manche Autoren die Auffassung vertreten, dass die Kreislaufwirtschaft die natürlichen Lebenszyklen widerspiegeln soll,⁵ beziehen andere Autoren nicht-organische Materialien wie Polymere (Kunststoffe) als technische Ausgangsmaterialien für die neue Produktgenerationen ein. In ihrem „Schmetterlingsdiagramm“ unterscheidet die Ellen MacArthur Foundation daher zwischen biologischen und technologischen Kreisläufen (Abbildung 1). Innerhalb des biologischen Kreislaufts sind Fasern oder ganze Produkte biologisch abbaubar (z. B. durch Kompost) und tragen dadurch auch zur Regeneration organischer Systeme bei. Technische Kreisläufe konzentrieren sich hingegen auf die Weiter- und Wiederverwertung von Produkten, z. B. durch lange Lebensdauer, Wiederverwendung, Wiederherstellung oder Recycling.

⁵ So wie z. B. Lebensmittelabfälle oder Holzprodukte am Ende ihres Lebenszyklus zu biologischen Nährstoffen werden.

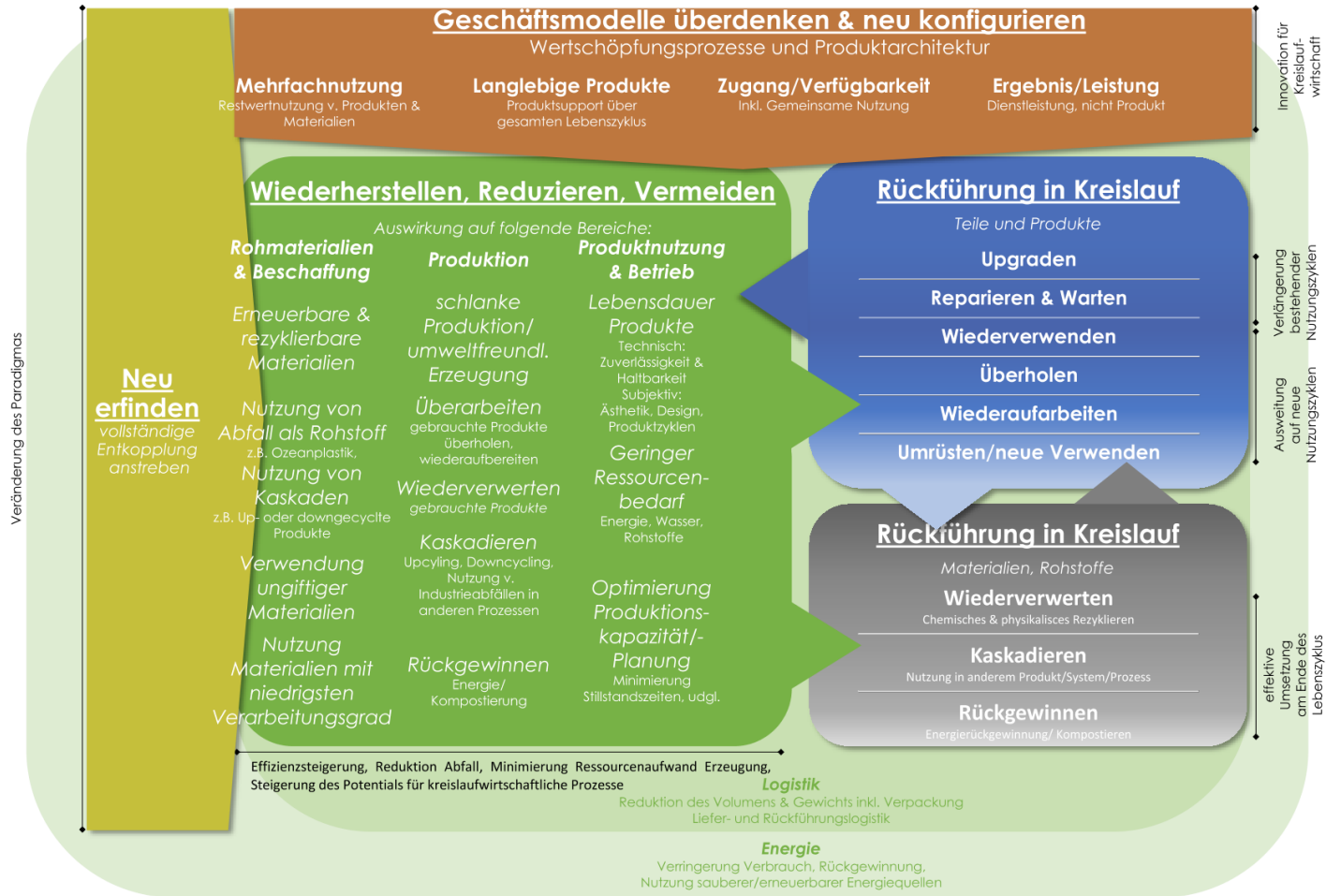
Abbildung 1: Organische und technische Systeme einer zirkulären Wirtschaft



Q: EMF (2022)

Abbildung 2 die dem Aufsatz von Blomsma et al. (2019) entnommen ist, stellt die zentralen Aspekte der Kreislaufwirtschaft als Ansatzpunkte zur Anpassung von Unternehmensstrategien dar. Innovationsbedarf entsteht einerseits in der gesamten Produktarchitektur und den Wertschöpfungsprozessen vor allem bei produzierenden Unternehmen. Zum Beispiel müssen Erzeugnisse in modularer Form überarbeitet werden, um die Möglichkeit des Austausches von Komponenten, bzw. die Weiterverwertung von Produktkomponenten am Ende des Lebenszyklus sicherzustellen. Andererseits bieten auch unterschiedliche Bereitstellungs- und Nutzungsformen Potential für Innovationen im Geschäftsmodell. Werden Produkte nicht mehr an Endnutzer verkauft, sondern in Form von Dienstleistungspaketen (z.B. zusammen mit Wartungs- oder Trainingsleistungen für die Nutzung der Produkte) zur Verfügung gestellt, so wird die Leistung eines Produktes von dessen physischem Eigentum durch den Endnutzer entkoppelt. Dies ermöglicht die Nutzungsintensität, den Lebenszyklus, die Wartung und Lebensdauer der Erzeugnisse durch den Hersteller zu optimieren, während es auf Seiten des Endkunden den Aufwand für Betrieb und Wartung minimiert. Andererseits, kann durch sog. „sharing“ Konzepte die Nutzungsintensität von Produkten gesteigert werden.

Abbildung 2: **Ansatzpunkte kreislaufwirtschaftlicher Strategien auf Unternehmensebene**



Q: Angepasst aus Blomsma et al. (2019, S. 9).

Diese Konzepte wirken sich ihrerseits auf unterschiedliche Teilbereiche der Wertschöpfungskette wie Beschaffung, Produktion, sowie Vertrieb und Betrieb der Erzeugnisse aus und erfordern Anpassungen und Innovationen, die darauf abzielen den Verbrauch finiter Ressourcen zu minimieren bzw. deren Rückführung in den Wertschöpfungskreislauf sicherzustellen, die Effizienz in der Produktion zu erhöhen und den Energieaufwand zu minimieren. Dazu sind auch neue Logistikkonzepte zur Rückführung und Verteilung gebrauchter Produkte und Stoffe notwendig. Dabei unterscheiden sich die möglichen Ansatzpunkte in Abhängigkeit davon, ob Produkte und Komponenten (aus diskreter Produktion) oder Materialien und Stoffe (aus kontinuierlicher Produktion) im Kreislauf geführt werden sollen.

Was vor dem Hintergrund dieser Betrachtungen für die Messung von Innovationsaktivitäten im Bereich der Kreislaufwirtschaft wichtig erscheint ist, dass entsprechende Innovationen nicht nur auf Technologien der Abfallverwertung und Rohstoffrückgewinnung eingeschränkt werden können. Vielmehr sind diese breit zu definieren, denn alle Technologien, die zur Steigerung der Effizienz, zur Minimierung des Ressourceneinsatzes, zur Optimierung von Lieferketten undgl. beitragen bzw. die Erreichung derartiger Ziele unterstützen, spielen für die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft eine zentrale Rolle.

Dementsprechend wird von der Europäischen Kommission (2017) betont, dass die Kreislaufwirtschaft von einem systemischen Ansatz für Umweltinnovationen abhängt, der die Wertschöpfungs- und Lieferketten in ihrer Gesamtheit sowie alle an diesen Ketten beteiligten Akteure erfasst und einbezieht. Damit wird seitens der Kommission eine explizite Verbindung zwischen der Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft und Umweltinnovationen hergestellt. Damit erlauben Umweltinnovationen den breiten Rahmen abzustecken, innerhalb dessen es jedoch notwendig ist, weitere Abgrenzungen vorzunehmen (siehe Abschnitt 3).

2.2 Digitalisierung und Kreislaufwirtschaft

Während viele Ziele und Konzepte der Kreislaufwirtschaft noch sehr visionär und mitunter utopisch anmuten, bietet der technologische Wandel eine Vielzahl konkreter Möglichkeiten, die Kreislauffähigkeit der Wirtschaft zu verbessern. Insbesondere die Digitalisierung ist ein wichtiger Wegbereiter. Denn neue Technologien wie Künstliche Intelligenz (KI), additive Fertigung oder das Internet der Dinge können in dieser Transformation eine entscheidende Rolle spielen, indem sie u.a. ein hohes Maß an Transparenz von Daten sowie verbesserte Fertigungsmethoden ermöglichen (MacArthur und Morlet, 2020; Lacy, 2020):

- *Cloud Dienste* und das *Internet der Dinge* (IoT) erlauben die zunehmende Vernetzung unterschiedlicher Akteure und Aktivitäten über das Internet. So ermöglicht z.B. das Speichern und Teilen von Daten in der Cloud, dass Prozesse und Abläufe effizienter gestaltet und Industrieumgebungen optimiert oder neue Abfallbewirtschaftungsstrategien in intelligenten Städten implementiert werden. Ein Beispiel sind digitale Produktpässe, die den Materialfluss entlang besonders sensibler Wertschöpfungsketten möglichst lückenlos erfassen.
- Durch die *Big Data Analyse* (BDA) werden Muster, Trends und Wechselwirkungen besser erkannt, die u.a. auch für eine bessere Kreislauffähigkeit industrieller Prozesse genutzt

werden können. Ein Beispiel sind bessere Prognosen zur Bedarfsplanung bzw. der vorausschauenden Wartung von Maschinen und Anlagen.

- Beim *Maschinellen Lernen* (ML) werden Algorithmen anhand historischer Datensätze trainiert, sodass Computer, Roboter und andere elektronische Geräte automatisch arbeiten und selbständig neue Aufgaben ausführen können. Ihre Leistung steigt dabei mit der Fähigkeit, relevante Daten (z.B. digitale Bilder) aus der realen Welt zu extrahieren, zu erfassen und zu verarbeiten. Beispiele aus der Kreislaufwirtschaft betreffen z.B. den Einsatz von Robotern zur Müllsortierung (maschinelle Sehen) oder die Optimierung von Verbrennungsprozessen.
- In der *Additiven Fertigung* (AM) werden durch die computergesteuerte Bildung aufeinander folgender Materialschichten dreidimensionale Objekte erzeugt ("3D-Druck"). Für die Kreislaufwirtschaft bietet das die Chance, in der Fertigung sowohl den Abfall als auch den Materialbedarf insgesamt zu verringern.

Die Digitalisierung bietet somit auf dem Weg zu einer Kreislaufwirtschaft eine Vielzahl von Chancen. Die tatsächlichen Auswirkungen dieser neuen Technologien auf den Klimawandel werden aber letztlich von deren konkreter Umsetzung abhängen sowie von indirekten Rebound-Effekten, wie z.B. einer gesteigerten Nachfrage nach IKT-Diensten aufgrund höherer Qualität und neuer Leistungen. So bestätigt z.B. eine aktuelle Studie für Deutschland positive Klimaeffekte durch die Digitalisierung, schätzt diese aber als deutlich geringer ein als bisher angenommen und warnt dementsprechend vor überzogenen Erwartungen (Clausen et al., 2022).

2.3 Europäische Agenda

In der Europäischen Union setzt der *Grüne Deal* beim Thema Kreislaufwirtschaft auf eine enge Verzahnung mit der Industriepolitik. Die Europäische Kommission (2019, S. 8) stellte daher die „Mobilisierung der Industrie für eine saubere und kreislaforientierte Wirtschaft“ ins Zentrum der Überlegungen. Im darauffolgenden Jahr wurden die *Neue Industriestrategie* sowie der *Neue Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft* im Doppelpack beschlossen⁶.

Darin finden sich eine Vielzahl von Strategielinien, Instrumenten und Maßnahmen, wie sie einer modernen Industriepolitik entsprechen⁷.

Beispiele sind Initiativen zur Stärkung von für die Kreislaufwirtschaft notwendiger

- Forschung und technologischer Entwicklungen,
- Qualifikation und Humankapital,
- Öffentliche Nachfrage,
- Transparenz und Information sowie
- Awareness bei Unternehmen und KonsumentInnen.

In der Folge hat die Europäische Kommission (2021) Maßnahmen, die zur Erreichung der Ziele dieser beiden Strategiepläne beitragen, als allgemeine Kriterien für die Würdigung der Vereinbarkeit von staatlichen Beihilfen mit dem Binnenmarkt im Rahmen der **Förderung**

⁶ Siehe European Commission (2020 a, b; 2021).

⁷ Siehe z.B. Peneder (2017) und Polt et al. (2021).

wichtiger Vorhaben von gemeinsamem europäischem Interesse (IPCEI)⁸ aufgenommen. Daneben tritt im Kontext der Kreislaufwirtschaft aber insbesondere die **Regulierung** bestimmter Produkte und der dazugehörigen Fertigungsverfahren durch Verbote, Auflagen und andere gesetzliche Regelungen in den Vordergrund. In Kombination mit den zuvor genannten Instrumenten sollen diese „Produktpolitiken“ dem Neuen Aktionsplan der EU folgend u.a. auf folgende Prinzipien der Nachhaltigkeit gerichtet sein:

- Verbesserung der Energie- und Ressourceneffizienz
- Haltbarkeit, Wiederverwendbarkeit, Aufrüst- und Reparierbarkeit von Produkten
- Einschränkung des Einweggebrauchs und Erhöhung des Recyclinganteils
- Verbote für die Vernichtung von unverkauften langlebigen Gütern
- Nutzung digitaler Produktinformationen (z.B. digitale Pässe)
- Verringerung des Kohlenstoff- und des ökologischen Fußabdrucks
- Weniger Einsatz von gefährlichen Chemikalien in Produkten

Gesetzliche Regulierungen gehören zu den stärksten Formen öffentlicher Eingriffe in private marktwirtschaftliche Entscheidungen. Sie erfordern daher ein besonders hohes Maß an Umsicht sowie die Einbindung der betroffenen Stakeholder, um mit möglichst geringen Compliance Kosten eine möglichst hohe Wirksamkeit der Instrumente zu erreichen. Dabei führt der Informationsvorsprung der Unternehmen gegenüber Konsumentinnen und Konsumenten sowie gegenüber den öffentlichen Einrichtungen zur Gefahr der „Grünfärberei“ („green washing“) ihrer Produkte. Die Transformation zur Kreislaufwirtschaft erfordert daher größtmögliche Transparenz über die mit den Produkten verbundenen Stoff- und Materialströme sowie den Aufbau umfassender Informations- und Monitoringsysteme. Zum einen wären die Nationalstaaten damit oft überfordert. Zum anderen müssen im Binnenmarkt einheitliche Regeln gelten. Aus diesen Gründen werden auch in Zukunft die entscheidenden (regulatorischen) Impulse für die Transformation zur Kreislaufwirtschaft von der europäischen Ebene ausgehen müssen.

2.4 Österreichische Agenda

Das *Österreichische Regierungsprogramm 2020-2024*⁹ kündigt erstmals im Kapitel zur Standort- und Industriepolitik die Entwicklung eines strategischen Maßnahmenplans für Umwelttechnologien sowie für die Kreislauf- und Recyclingwirtschaft an. Im Kapitel zu Umwelt- und Naturschutz werden die konkreten Vorhaben dann näher ausgeführt. Sie reichen von der steuerlichen Begünstigung für kleine Reparaturleistungen über den Ausbau von Mehrwegsystemen, dem Verbot des Entsorgens von genusstauglichen Lebensmitteln im Lebensmitteleinzelhandel, der Verbesserung der Datenbasis und Transparenz von Stoffströmen, finanziellen Anreizen und den Abbau regulatorischer Hindernisse für den Einsatz von Sekundärrohstoffen in der Industrie, Pfandsystemen für Batterien und Kleingeräte, der Novellierung des Altlastensanierungsgesetzes bis

⁸ IPCEI steht für "Important Projects of Common European Interest". Siehe auch Polt et al. (2021).

⁹ Die neue Volkspartei, Die Grünen – Die Grüne Alternative (2020).

zur Ausweitung von Förderprogrammen und der Unterstützung von Modellregionen für die Kreislaufwirtschaft.

Im Unterschied zur Europäischen Union fehlt in Österreich eine eigenständige industriepolitische Strategie, weshalb diese auch nicht direkt mit den Zielsetzungen der Kreislaufwirtschaft verzahnt ist. Allerdings sieht der Rat für Forschung und Technologieentwicklung (2021) in seiner Empfehlung zur österreichischen Industriepolitik die Transformation zur Kreislaufwirtschaft als eine von deren drei übergeordneten Zielen an. Nach umfangreichen Vorbereitungen und unter Einbindung von mehr als 400 Stakeholdern hat das BMK (2021) eine **Österreichische Kreislaufwirtschaftsstrategie** vorgestellt, die den leitenden Rahmen für die nächsten Jahre festlegt. Dabei werden zahlreiche Anknüpfungspunkte und Schnittstellen zu bereits bestehenden Programmen und strategischen Dokumenten bzw. solchen, die noch in Vorbereitung sind, identifiziert. Beispiele sind das Abfallvermeidungsprogramm, der Aktionsplan Mikroplastik, der Bundes-Abfallwirtschaftsplan, die Energieforschungs- und Innovationsstrategie, der Masterplan Umwelttechnologie (MUT), der Masterplan Rohstoffe 2030, der Nationale Energie- und Klimaplan, die Plattform Grüne Chemie oder die Standortstrategie. Abgesehen von der Standortstrategie zielen – so wie auch im Aktionsplan der EU – die meisten Aktivitäten auf Regulierungen bestimmter Produkte und Materialströme.

Insgesamt setzt die österreichische Kreislaufstrategie dabei folgende **Ziele**:

1. Reduktion des inländischen Materialverbrauchs (*domestic material consumption*, DMC) bis 2030 um 25% auf den derzeitigen EU-Durchschnitt und bis 2050 um insgesamt 63% auf einen inländischen Verbrauch von 7 Tonnen pro Kopf.
2. Erhöhung der *Ressourceneffizienz* der österreichischen Wirtschaft um 50% bis 2030.
3. Die Nutzungsrate wiederverwendbarer Stoffe (*circular material use rate*, CMU) soll von derzeit rund 12% bis 2030 um mindestens ein Drittel auf über 16% steigen.
4. Schließlich soll der Materialverbrauch im privaten Konsum durch Siedlungsabfälle aus Haushalten und ähnlichen Einrichtungen bis 2030 um 10% sinken.

Zum ersten Ziel ist kritisch anzumerken, dass der inländische Materialverbrauch nicht dem gesamten Ressourcenverbrauch, also inklusive des inländischen Netto-Verbrauchs aus Importen und Exporten („Material-Fußabdruck“) entspricht. Diesbezüglich wird in der Kreislaufstrategie lediglich darauf hingewiesen, dass Verlagerungen des Materialverbrauchs ins Ausland vermieden werden sollen. Darüber hinaus definiert sie aber eine Reihe von industriespezifischen strategischen Schwerpunkten in den Bereichen:

- Bauwirtschaft und bauliche Infrastruktur
- Mobilität
- Abfallmanagement
- Biomasse
- Textilien und Bekleidung
- Kunststoffe und Verpackungen
- Elektro- und Elektronikgeräte

Übersicht 1 führt zu jedem der strategischen Schwerpunkte ausgewählte Beispiele aus der österreichischen Kreislaufwirtschaftsstrategie an. Ebenso wie im Neuen Aktionsplan der EU,

werden neben Maßnahmen zur Förderung von Forschung und Technologieentwicklung, Qualifizierung, sowie einer kreislauforientierten öffentlichen Nachfrage auch in der österreichischen Kreislaufstrategie v.a. regulatorische Eingriffe angesprochen. Diese sehr direkte Form öffentlicher Intervention in private Entscheidungen erfordert daher einen fortlaufenden strukturierten Dialog mit den betroffenen Stakeholdern. Aufgrund der Vielfalt unterschiedlicher Materialströme ist es dabei wesentlich, dass die einzelnen Instrumente und Maßnahmen jeweils sehr genau auf die konkreten technologischen, wirtschaftlichen und rechtlichen Rahmenbedingungen in den einzelnen Industriezweigen, wo sie Anwendung finden sollen, abgestimmt werden. Um in diesen Prozessen die Umsetzung der ambitionierten Ziele nicht aus den Augen zu verlieren, will die Bundesregierung ein laufendes Monitoring der Kreislaufwirtschaft einführen, das im Wesentlichen an das bestehende Indikatorenset des EU-weiten Monitorings anknüpft aber auch zu dessen Weiterentwicklung beitragen möchte (siehe auch Abschnitt 4). Eine wichtige Information, die in den technischen Kennzahlen zum Monitoring der Kreislaufwirtschaft allerdings fehlt, sind die kreislauforientierten Aktivitäten in den Unternehmen selbst. Ein mögliches Instrument dafür wären z.B. regelmäßige Unternehmensbefragungen ähnlich der EU-weiten Innovationserhebungen (Community Innovation Surveys, CIS).¹⁰

¹⁰ *Stucki und Wörter* (2021) haben einen Pilotversuch für die Schweiz unternommen. Siehe auch *Stucki et al.* (2018) oder *Peneder et al.* (2021) im Kontext unternehmerischer Aktivitäten zur Erhöhung der Energieeffizienz.

Übersicht 1: **Ansätze zur Umsetzung der österreichischen Kreislaufwirtschaftsstrategie in ausgewählten strategischen Sektoren**

Sektor	Beispiele
Bauwirtschaft	<ul style="list-style-type: none"> - Nachhaltige öffentliche Beschaffung (naBE) - KLW-Kriterien bei der Vergabe von Wohnbauförderungen - Bewilligungspflichten für den Abbruch von Gebäuden unter Einbeziehung von KLW-Kriterien - Förderung ressourcenschonender & zirkulärer Bauweisen - Praxisorientierter Rechtsrahmen für die Wiederverwertung von Bauteilen - Deponieverbote, Verwertungsgebote, Mindestanteile von Recyclingbaustoffen, etc.
Mobilität	<ul style="list-style-type: none"> - Mobilitätsmasterplan 2030 (z.B. Redimensionierung der Straßen; Ausbau von Fuß- und Radwegen) - Sharing Economy: z.B. reservierte Fahrspur bei Besetzungsgrad > 2; Anpassung der Pendlerpauschale - Förderung der Entwicklung und Nutzung nicht-fossiler Antriebstechnologien (z.B. e-Mobilität) - Batterien: z.B. strenge Regeln entlang der Wertschöpfungskette; Sekundärnutzung - Förderung neuer Fahrzeugmodelle für die „letzte Meile“ bei der Nutzung öffentlicher Verkehrsmittel - Anwendungsorientierte Forschung für die Nutzung von Sekundärrohstoffen
Abfallmanagement	<ul style="list-style-type: none"> - Regelungen für getrennte Sammlung und qualitative Grenzwerte; Rezyklat-Einsatzquoten - Berücksichtigung schadstoffarmer und recyclingfähiger Güter in der öffentlichen Beschaffung - Förderungen (FTE, Modernisierung von Sortier- und Recyclinganlagen, etc.) - Informationspflichten und -systeme - Schnittstellen im Abfall- und Chemikalienrecht festlegen - Rückgewinnung von Phosphor aus kommunalen Abwässern und tierischen Nebenprodukten
Biomasse	<ul style="list-style-type: none"> - Biogasanlagen in den Biomasse-Wertschöpfungskreislauf integrieren - Industriesymbiose durch branchenübergreifende Werkstoffflüsse - Vernetzte, dezentrale Bioraffinerien ausbauen - Vermeidung von Lebensmittelabfällen; Nutzung der unvermeidbaren Überproduktion - Sammlung und Sortierung von biogenen Reststoffen optimieren - Digitale Reststoffbörse als Marktplatz etablieren
Textilien und Bekleidung	<ul style="list-style-type: none"> - Einsatz von regionalen, umwelt- und ressourcenschonenden Fasern und Stoffen fördern - Nachhaltige und zirkuläre Designregeln in der Ausbildung und in den Textilunternehmen verankern - Informations- und Bewusstseinsbildung, Aufklärungskampagnen (z.B. Fast Fashion, Online-Käufe) - EU-Produktpass (gegen Greenwashing) - Nachhaltige & zirkuläre öffentliche Beschaffung - Förderung von KI-unterstützten Sortier- und Textilrecyclingtechnologien
Kunststoffe & Verpackungen	<ul style="list-style-type: none"> - Wirkungsbereich der Einwegkunststoffrichtlinie erweitern - Schadstofffreiheit bei alternativen Artikeln überprüfen

**Elektro- und
Elektronikgeräte**

- Beschränkung von Verpackungsvolumen/-gewicht auf notwendige Mindestmaße (Produktschutz)
- Verpflichtende Mehrwegquoten und Kennzeichnungspflichten erhöhen
- Verbindliche Rezyklat Anteile
- Märkte für Rezyklate durch Regeln, Zertifizierungen etc. stärken
- Hohe EU-weite Anforderungen an Mindesthaltbarkeit, Reparierbarkeit und Ersatzteilverfügbarkeit
- Längere Gewährleistungsfristen sowie Verfügbarkeit von Software-Updates und Ersatzteilen
- Kriterien wie Langlebigkeit und Reparaturfähigkeit in der öffentlichen Beschaffung berücksichtigen
- Qualitätssicherung bei Reparaturleistungen stärken
- Verpflichtende Sammelziele für den Handel evaluieren
- Kontrollen bei der Abfallsammlung (z.B. Meldepflichten) verstärken

Q: BMK (2021), WIFO Auswahl und Darstellung. NB: K LW = Kreislaufwirtschaftsstrategie.

3. Innovationstätigkeit auf dem Gebiet der Kreislaufwirtschaft in Österreich und Bedeutung für die österreichische Außenwirtschaft

Im vorliegenden Abschnitt sollen die Innovationsanstrengungen des Unternehmenssektors im Bereich der Kreislaufwirtschaft in Österreich erstmals anhand einer Reihe von Indikatoren gemessen werden, die einerseits den Input in Forschungs- und Innovationsprozesse und andererseits Outputs aus derartigen Prozessen darstellen. Eine genaue statistische Abgrenzung derartiger Aktivitäten ist zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht möglich und steht einer Reihe von Herausforderungen gegenüber, die in den folgenden Abschnitten dargelegt werden. Denn derzeit besteht noch kein Konsens hinsichtlich der genauen Definition und Abgrenzung des Konzeptes der Kreislaufwirtschaft, die aber Voraussetzung für die Messung von entsprechenden FTI-Aktivitäten wäre (vgl. Kirchherr et al., 2017, Saidani et al., 2019; siehe Abschnitt 2). In den nachfolgenden empirischen Abschnitten wird dementsprechend der Ansatz von de Jesus et al. (2018) verfolgt und *Umweltinnovation* als Ausgangspunkt für die Identifizierung von kreislaufwirtschaftsrelevanten Technologien herangezogen. Kemp (2010) definierte Umweltinnovationen als den Einsatz neuartiger Methoden in der Produktion, bei Prozessen oder im Management, die auf eine allgemeine Verringerung des Umweltrisikos und eine Verringerung der Umweltverschmutzung und anderer negativer Auswirkungen auf die Ressourcen, einschließlich des Energieverbrauchs, abzielen. In diesem Bereich sind bereits eine Reihe von Klassifikationen für Patente und für Güter und Waren verfügbar, die somit als Ausgangspunkt verwendet werden¹¹.

Im nachfolgenden Abschnitt 3.1 wird die Identifikationsstrategie für kreislaufwirtschaftsrelevante Innovation beschrieben, in Abschnitt 3.2 die berechneten Indikatoren. Abschnitt 3.3 schließt mit einer kurzen Zusammenfassung der wichtigsten Befunde.

¹¹ Ein wichtiger Aspekt, der in der Mitteilung der Europäischen Kommission angesprochen wird, ist die Bedeutung von Umweltinnovationen mit systemischem Charakter für die Umsetzung von kreislaufwirtschaftlichen Konzepten. Dabei wird der Innovationsbegriff weit gefasst. Auf der gesamtwirtschaftlichen Ebene sind kreislaufwirtschaftliche Strategien und Maßnahmen notwendig, die die Schließung von Warenkreisläufen, sowie ein effizientes Ressourcen- und Abfallmanagement ermöglichen. Dabei handelt es sich um institutionelle Innovationen. Auf der Ebene unterschiedlicher Industrien (der Meso-Ebene) sind Maßnahmen notwendig, die Koordinationsversagen beseitigen und die Zusammenarbeit zwischen Unternehmen und anderen Akteuren begünstigen, wie dies etwa für die Umsetzung kreislaufwirtschaftlicher Prinzipien in der Organisation von Lieferketten oder Rückführungslogistik der Fall ist. Auf Unternehmensebene, sind hingegen technologische und nicht-technologische Innovationen notwendig, wie etwa neue Geschäftsmodelle, der Verkauf von Dienstleistungen anstelle von Produkten – Ökodesign, Dematerialisierung (vgl. de Jesus et al., 2018). Die in dieser Studie abgebildeten Indikatoren bilden damit nur einen sehr begrenzten Ausschnitt von Innovationsaktivitäten im Zusammenhang mit der Kreislaufwirtschaft ab. Zukünftige Erweiterungen der Indikatoren sollten vermehrt versuchen, diese breitere Dimension abzubilden.

3.1 Datengrundlage und Messung der Innovationstätigkeit und des Warenhandels in kreislaufwirtschaftsrelevanten Technologien

Zur Messung der Innovationstätigkeit im Bereich von Technologien für die Kreislaufwirtschaft wurde auf drei Datenquellen zurückgegriffen:

- Inputs für den Innovationsprozess beruhen auf Förderdaten der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft.¹² Diese erlauben Rückschlüsse auf den Umfang der F&E Aktivitäten im Bereich kreislaufwirtschaftlicher Technologien.¹³
- Outputs aus dem Forschungsprozess werden durch einerseits Patentanmeldungen von Erfindern und Erfinderrinnen mit Wohnsitz in Österreich und andererseits den Warenhandel in Technologiefeldern bzw. Produktklassen mit einer hohen Affinität zur Kreislaufwirtschaft gemessen. Die Daten zu den Patentanmeldungen wurden der PatStat Datenbank des Europäischen Patentamtes entnommen.¹⁴ Zur Quantifizierung des Warenhandels in kreislaufwirtschaftsaffinen Waren wurde hingegen die BACI Datenbank (vgl. Gaulier und Zignago, 2010) herangezogen, die harmonisierte Warenströme auf Grundlage der Comtrade Datenbank der Vereinten Nationen auf einem niedrigen Aggregationsniveau enthält.

Aufgrund der im vorangegangenen Abschnitt diskutierten Abgrenzungsprobleme wird in diesem Bericht eine Messung der Innovationstätigkeiten und der Entwicklungen im Warenhandel angestrebt, die eine hohe Affinität zur Kreislaufwirtschaft abbilden. Eine exakte Zuordnung ist derzeit aufgrund bestehender definitorischer Unschärfen (noch) nicht möglich. Daher sind die Ergebnisse zunächst dahingehend zu interpretieren, dass vor allem bei den Patent- und Außenhandelsindikatoren möglicherweise eine Übererfassung vorliegt und die tatsächlichen Aktivitäten auf einem niedrigeren Niveau stattfinden als hier abgebildet. Eine Ausnahme bilden hier die FFG Förderdaten, die, wie später beschrieben wird, genauer identifiziert werden konnten.

Die Diskussion im vorangegangenen Abschnitt illustriert auch, dass der Fokus auf technologische Innovationen und den Warenhandel in kreislaufwirtschaftsaffinen Technologien und Produkten nur einen kleinen Ausschnitt der für eine umfassenden Transformation notwendigen Innovationsanstrengungen, abbildet. Diese umfassen aufgrund deren breiten, systemischen Charakters auch andere Formen der gesellschaftlichen und institutionellen Anpassung, die in dieser Arbeit nicht abgebildet werden (vgl. z.B. Reinstaller, 2008), aber auch etwa notwendige Innovationen in Geschäftsmodellen („product-as-service“).

Betrachtet man zunächst die Inputseite der Entwicklung der Innovationsaktivitäten im Bereich der Kreislaufwirtschaft, so stellen die Förderdaten der FFG die zuverlässigste Datenquelle dar. Im Jahr 2021 hat die FFG mit der FTI-Initiative Kreislaufwirtschaft¹⁵ ein Förderprogramm ins Leben gerufen. Es richtet sich an Unternehmen, sowie Akteure aus der universitären und

¹² Der Autor dankt der FFG und vor allem Josef Saeckl und Leonhard Jörg, für die Bereitstellung der Daten.

¹³ Unter der Annahme, dass sich die Anteile der geförderten Projekte in dem Bereich auf die F&E Ausgaben gesamt übertragen lassen.

¹⁴ https://www.epo.org/searching-for-patents/business/patstat_de.html

¹⁵ <https://www.ffg.at/FTI-kreislaufwirtschaft>

außeruniversitären Forschung und verfolgt das Ziel, Innovationsvorhaben zu fördern, die entweder auf die Intensivierung der Produktnutzung, den optimierten Ressourceneinsatz oder das Schließen von Stoffkreisläufen abzielen. Auf der Grundlage der Information und der Schlagworte, die in den Anträgen geförderten Projekte enthalten sind, wurde unter Anwendung semantischer Suchverfahren, die gesamte Förderdatenbank der FFG für die Jahre 2016-2021 durchsucht. Auf diese Art konnte eine größere Anzahl von Projekten, die in anderen Förderschienen eingereicht und gefördert wurden jedoch mit hoher Wahrscheinlichkeit Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten im Bereich der Kreislaufwirtschaft zum Inhalt haben, identifiziert werden. Diese Daten wurden dem WIFO anonymisiert zur Auswertung zur Verfügung gestellt. Aufgrund des Umstandes, dass sich zunächst Antragsteller selbst in die FTI-Initiative Kreislaufwirtschaft selektieren und in weiterer Folge Experten auf der Grundlage dieser Anträge einen Trainingsdatensatz für die weitere Suche in der FFG Förderdatenbank zusammengestellt haben, lässt auf eine gute inhaltliche Abgrenzung dieser Daten schließen. Bei der Identifizierung relevanter Patentanmeldungen österreichischer Erfinder¹⁶ gestaltete sich die Identifikation relevanter Patente schwieriger. Hier wurde Information zu den Technologiefeldern, die durch IPC bzw. CPC Codes in den Patentanmeldungen vorliegen, verwendet. Ausgangspunkt war die Klassifikation von Umweltpatenten der OECD¹⁷, die um Subkategorien bereinigt wurde, die nicht mit den Prinzipien einer Kreislaufwirtschaft vereinbar sind. In Übersicht 2 sind zehn Kategorien von Umwelttechnologie zusammengefasst, auf deren Grundlage relevante kreislaufwirtschaftsrelevante Patente identifiziert wurden.

¹⁶ Um die erfinderische Tätigkeit in Österreich abzubilden und auch die Problematik konzerninterner Patentanmeldestrategien bei multinationalen Unternehmen zu umgehen, wurden relevante Patente auf der Grundlage der Wohnsitzinformation der im Patent genannten Erfinder identifiziert. Die Zählung erfolgt dabei anteilmäßig anhand der Anzahl der im Patent genannten Erfinder. So wird ein Patent zu einem Drittel Österreich zugerechnet, wenn einer von drei im Patent angeführten Erfindern seinen Wohnsitz in Österreich hat.

¹⁷ <https://www.oecd.org/environment/innovation.htm>; <http://stats.oecd.org/wbos/fileview2.aspx?IDfile=0befc58e-d72f-4ff9-b27e-84e446240e34>.

Übersicht 2: **Kreislaufwirtschaftsrelevante Umwelttechnologien**

1.	Umweltmanagement (ohne Kapitel: 1.1. Technologien zur Beseitigung von Luftverschmutzung, 1.2.1 Abwasserbehandlung, 1.2.3 Beseitigung von Ölverschmutzungen und Schadstoffen; 1.3.5 Technologien für Mülldeponien)
2.	Technologien zur Minderung des Klimawandels im Zusammenhang mit der Erzeugung, Übertragung oder Verteilung von Energie (ohne Kapitel: 2.4 Kernenergie)
3.	Technologien zur Abscheidung, Speicherung oder Entsorgung von Treibhausgasen
4.	Technologien zur Minderung des Klimawandels im Bereich Verkehr (ohne Kapitel: 4.1.1. Konventionelle Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren)
5.	Technologien zur Minderung des Klimawandels in Bezug auf Gebäude
6.	Technologien zur Minderung des Klimawandels im Zusammenhang mit der Abwasserbehandlung oder der Abfallbewirtschaftung
7.	Technologien zur Minderung des Klimawandels bei der Herstellung oder Verarbeitung von Gütern
8.	Technologien zur Minderung des Klimawandels in den Informations- und Kommunikationstechnologien [IKT]
9.	Technologien zur Abschwächung des Klimawandel
10.	Technologien für eine nachhaltige Meereswirtschaft

Q: WIFO.

Diese Technologiegruppen wurden durch weitere Klassifikationen ergänzt bzw. für unterschiedliche Subgruppen getrennt ausgewertet. Folgende Klassifikationen wurden dabei berücksichtigt: wasserbezogene Technologien (vgl. Leflaive et al., 2020), Technologien für die Energiewende (Europäisches Patentamt, 2021) sowie Batterietechnologien (Europäisches Patentamt, 2020), sofern diese nicht bereits in der Hauptklassifikation zu Umwelttechnologien der OECD berücksichtigt waren.

Durch diese Eingrenzung wurde der Versuch unternommen, Technologien zu identifizieren, die weitgehend folgenden kreislaufwirtschaftlichen Prinzipien entsprechen:

- Nutzung biologischer Materialien aus nachhaltigen Quellen
- Rückführung, Recycling oder Rückgewinnung von nicht nachwachsenden Rohstoffen
- Verwendung von Rohstoffen aus wiederverwendeten oder recycelten Quellen
- Längerer Gebrauch von Produkten (z. B. durch Wiederverwendung/Weitergabe/Verbesserung der Haltbarkeit)
- Wiederverwendung von Komponenten oder Recycling von Materialien nach dem Gebrauch des Produkts
- Intensivere Nutzung von Produkten (z. B. durch Service-, Sharing- oder Leistungsmodelle)
- Sicherstellung, dass biologische Materialien unbelastet und biologisch zugänglich bleiben

Diese überarbeitete Klassifikation von Umwelttechnologien wurde durch eine Klassifikation digitaler Technologien ergänzt. Diese werden als wichtige **unterstützende Grundlagentechnologien** angesehen, die die Organisation der Produktion nach kreislaufwirtschaftlichen Prinzipien, bzw. die Umsetzung kreislaufwirtschaftlicher Geschäftsmodelle erst ermöglicht, angesehen (vgl. z.B. Kristoffersen et al., 2020). Digitale Technologien ermöglichen Warenströme und Materialien in einem geographisch verteilten Produktionsprozess zu verfolgen und die daraus

resultierenden Daten für ein besseres Ressourcenmanagement und eine bessere Entscheidungsfindung in den verschiedenen Phasen des industriellen Lebenszyklus zur Verfügung stellen. Sie ermöglichen damit die Umsetzung zirkulärer Ressourcenströme. So können beispielsweise Technologien des Internets der Dinge (IoT) eine automatisierte Standortverfolgung und Überwachung von natürlichen Ressourcen, Komponenten und Produkten ermöglichen. Big Data erleichtert verschiedene Aspekte zirkulärer Strategien, wie etwa die Verbesserung der Zuordnung von Abfällen zu Ressourcen durch die Erfassung und Verarbeitung von Input-Output-Strömen in Echtzeit zu überwachen und zu steuern.

Dementsprechend wurde die Klassifikation des Europäischen Patentamtes (2017) zu Patenten der vierten Industriellen Revolution verwendet, um österreichische Erfindungen auf diesem Gebiet, die entweder in Umweltpatenten mit Kreislaufbezug zitiert werden, bzw. diese zitieren, zu identifizieren. Dabei wird unterstellt, dass diese digitalen Technologien entweder technisch auf den Stand der Technik der zitierenden Umweltpatente Einfluss nehmen oder aber deren Stand der Technik davon beeinflusst wird. Dies deutet dementsprechend auf eine Technologiediffusion zwischen diesen Technologien hin. Analog wurde auch mit Patenten aus dem Bereich der industriellen Biotechnologie verfahren. Industrielle Biotechnologie wird ebenso wie digitale Technologien als wichtige Grundlagentechnologie für viele Bereiche der Kreislaufwirtschaft angesehen. Zur Identifizierung dieser Patente wurde auf die Klassifikation der „Advanced Technologies for Industry (ATI)“¹⁸ der Europäischen Kommission zurückgegriffen.

Als weiterer Outputindikator wird in dieser Arbeit der Handel mit kreislaufwirtschaftsaffinen Gütern und Waren herangezogen. Zur Identifizierung der relevanten Produktklassen wurde die Klassifikation von Umweltgütern der OECD (vgl. Garsous, 2019), die auf jener des Eurostat aufbaut (vgl. Eurostat, 2009) als Ausgangspunkt genommen und entsprechend der Arbeit von Schoenmaker und Delhaye (2017) erweitert und angepasst.

Die Auswahl relevanter HS Produktklassen wurde unter Verwendung einer Korrespondenzliste, die Technologieklassen in Patenten (IPC/CPC Klassen) mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit entsprechenden Produktklassen (nach dem Harmonisierten System der Außenhandelsstatistik) zuordnet (vgl. Goldschlag et al., 2019, bzw. Lybbert und Zolas, 2014) weiter verfeinert. Dabei wurden Produktklassen, bei denen die Zuordnung zu einer kreislaufwirtschaftsaffinen Technologieklasse in Patenten über einem gewissen Wahrscheinlichkeitswert liegt, als kreislaufwirtschaftsaffin klassifiziert und in die Berechnung der Indikatoren aufgenommen.

¹⁸ https://ati.ec.europa.eu/sites/default/files/2021-11/ATI%20Methodological%20Report%20Indicator%20framework%20and%20data%20calculations_0.pdf.

3.2 Entwicklung des österreichischen Unternehmenssektors in der Entwicklung von Technologien und im Handel im Bereich der Kreislaufwirtschaft

3.2.1 Finanzierung und Förderung von F&E im Bereich der Kreislaufwirtschaft im Unternehmenssektor

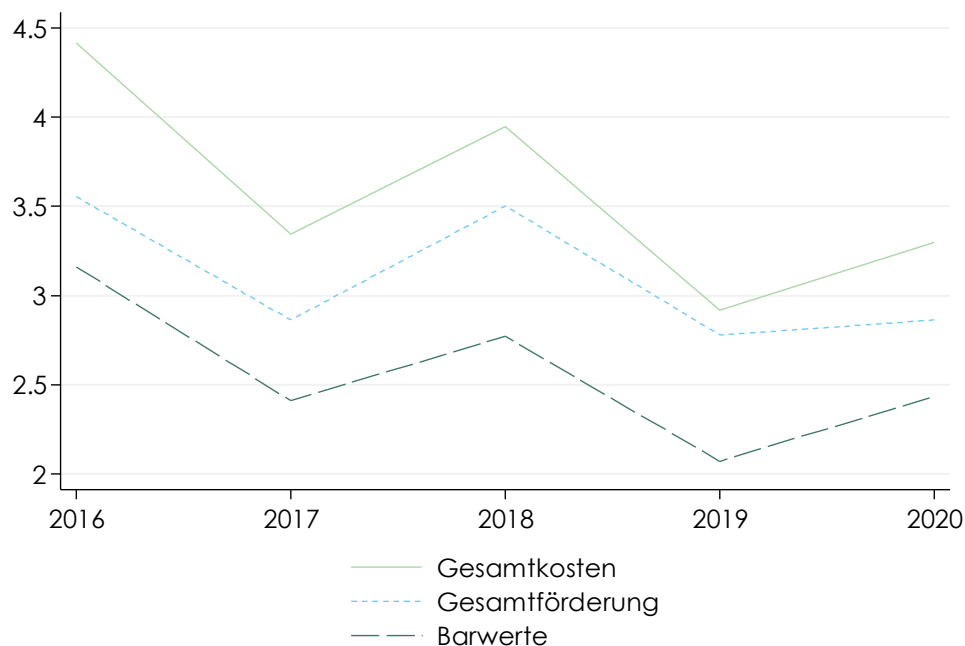
Die F&E Statistik erlaubt keine genau thematische Zuordnung von Forschungsausgaben sowohl im tertiären als auch im Unternehmenssektor. Eine gute Annäherung für die Forschungsausgaben zu kreislaufwirtschaftsrelevanten Technologien bieten daher die Forschungsförderungsdaten der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft.

Abbildung 3 stellt die Förderungen für F&E Vorhaben im Bereich der Kreislaufwirtschaft im Zeitverlauf zwischen 2016 und 2020 als Anteil an den gesamten durch die FFG gewährten Förderungen bzw. der geförderten Gesamtkosten dar.¹⁹ Die Gesamtförderung umfasst Förderbarwerte und Garantien und ist somit höher als die tatsächlichen Vergünstigungen (die Förderbarwerte), die an die Fördernehmer geflossen sind.

Im Beobachtungszeitraum ist der Anteil von F&E Projekten im Bereich der Kreislaufwirtschaft sowohl an den geförderten Gesamtkosten als auch an den Fördervolumen gesunken. Der Anteil derartiger Projekte an den gesamten durch die FFG geförderten Gesamtkosten ist von knapp 4,5% auf etwas über 3,3% gesunken. Die Entwicklung der Gesamtförderungen und der Förderbarwerte spiegeln diese Entwicklung. Der Anteil der F&E im Bereich der Kreislaufwirtschaft ist also gering. Stellt man die absoluten Zahlen des Jahres 2019 einander gegenüber, so standen 572 Mio.€ Gesamtförderungen der FFG 17,6 Mio. € an Gesamtförderungen für Kreislaufwirtschaftsprojekte gegenüber. Im gleichen Zeitraum betrugen die gesamten F&E Ausgaben des Unternehmenssektors lt. F&E Statistik der Statistik Austria über 8,7 Mrd. €. Im Zeitraum von 2016 bis 2021 wurden seitens der FFG Gesamtkosten für F&E im Bereich der Kreislaufwirtschaft von etwas über 242 Mio.€ gefördert. Im Jahr 2021 waren es rund 31,5 Mio. €.

¹⁹ Die Daten für F&E Projekte im Bereich der Kreislaufwirtschaft wurden für den Zeitraum 2016-2021 zur Verfügung gestellt. Ein Vergleich mit den gesamten gewährten Förderungen war zu diesem Zeitpunkt jedoch nur bis 2020 möglich.

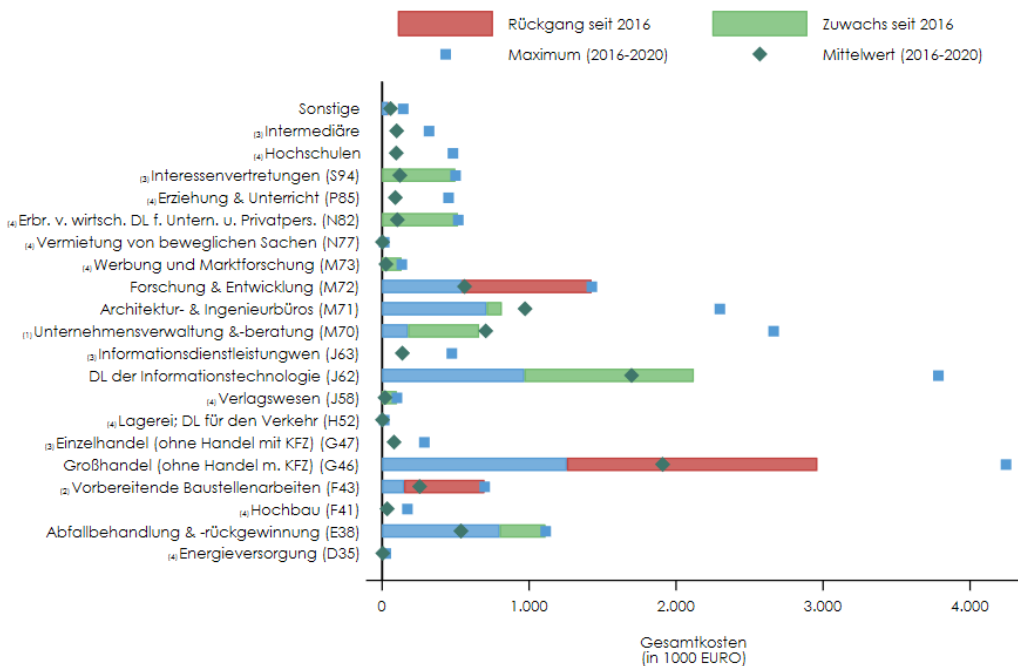
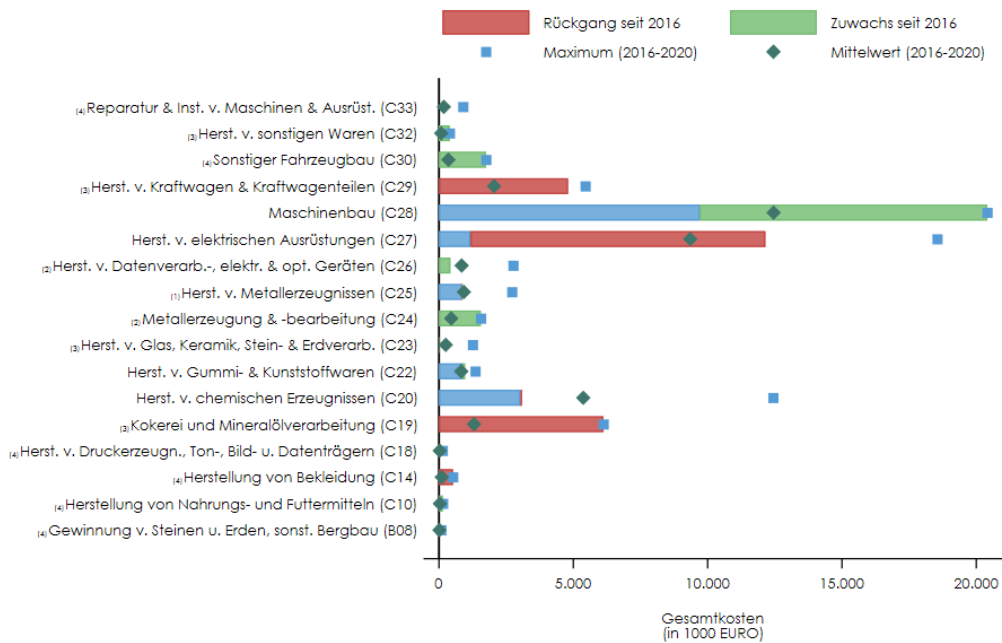
Abbildung 3: **Geförderte Gesamtkosten, Gesamtförderung und Förderbarwerte, FFG**



Q: FFG Daten; WIFO Auswertung.

Betrachtet man die Aufteilung der geförderten Gesamtkosten nach Branchen, so zeigt Abbildung 4, dass vor allem in der Maschinenbauindustrie bereits 2016 in absoluten Zahlen (nominal) die höchsten geförderten Gesamtkosten angefallen sind und dies bis 2020 auch am stärksten zugenommen haben. Im Dienstleistungssektor ist im Bereich der Dienstleistungen der Informationstechnologie ein ähnliches Muster, wie in der Maschinenbauindustrie zu beobachten. In der elektrotechnischen Industrie lagen 2016 hingegen die geförderten Gesamtkosten sogar über jenen der Maschinenbauindustrie, sind aber 2020 stark zurückgegangen. Angesichts der geringen Volumina sind derartige Schwankungen nur bedingt aussagekräftig. Abbildung 4 legt aber nahe, dass geförderte F&E Projekte mit Kreislaufwirtschaftsbezug vor allem im Maschinenbau und den IKT Dienstleistungen anzutreffen waren und damit branchenmäßig sehr konzentriert sind.

Abbildung 4: **Geförderte Gesamtkosten nach Branchen; Entwicklung 2016-2020.**



Q: FFG Daten; WIFO Auswertung. Anmerkung: die blauen und roten Abschnitte (im Fall eines Rückganges gegenüber dem Ausgangsjahr) der Balken zeigen die Ausgangssituation im Jahr 2016. Die roten und grünen Abschnitte verdeutlichen die Veränderungen zwischen 2016 und 2020.

3.2.2 Patentaktivitäten in kreislaufwirtschaftsrelevanten und unterstützenden Technologien

Ein wichtiges Outputmaß für Innovationstätigkeiten im Bereich kreislaufwirtschaftsrelevanter Technologien sind Patentanmeldungen. Wie in Abschnitt 2 ausgeführt wurde, bilden nicht-technische und soziale Innovationen neben technischen Innovationen weitere wichtige Standbeine einer Transformation der Wirtschaft nach kreislaufwirtschaftlichen Prinzipien. Die hier dargestellten Daten bilden daher nur ein, wenngleich sehr wichtiges Subsystem ab. Die Patentindikatoren, die in diesem Abschnitt dargestellt und diskutiert werden stellen unterschiedliche Aspekte des Innovationsprozesses ab. Einerseits wird die Entwicklung neuer Technologien in Österreich dargestellt, andererseits bilden andere Indikatoren die Verbreitung kreislaufwirtschaftsrelevanter Technologien ab.

Im ersten Unterabschnitt wird die erfinderische Tätigkeit im Bereich kreislaufwirtschaftsrelevanter Umwelttechnologien, sowie unterstützender Grundlagentechnologien dokumentiert (siehe Abschnitt 3.1 für die entsprechenden Abgrenzungen). Im zweiten Unterabschnitt wird hingegen die Bedeutung kreislaufwirtschaftsrelevanter Technologien für den Stand der Technik anderer Erfindungen abgebildet. Während dies, wie z.B. in Reinstaller und Reschenhofer (2017) diskutiert, nicht als direkte Wissensübertragung eingestuft werden kann, so geben derartige Zitationsmuster einen Hinweis auf die Bedeutung kreislaufwirtschaftsrelevanter Technologien für andere Erfindungen.

Die dargestellten Patentindikatoren beziehen sich auf Patentanmeldungen beim Europäischen Patentamt²⁰ in denen Personen mit Wohnsitz in Österreich als Erfinder angeführt werden. Bei Indikatoren, die auf Patentzitationen auf vor- oder durch nachgelagerte Patente aufbauen, wurden die Zählungen um sog. familieninterne Zitationen²¹ bereinigt. Es wurden also Zitation zwischen Patenten, die unterschiedliche Aspekte der gleichen Erfindung schützen, nicht berücksichtigt, um den Einfluss auf andere Erfindungen akkurat abzubilden.

Entsprechend der in Abschnitt 3.1 vorgenommenen Abgrenzung werden Auswertungen zu Patentanmeldungen, bei denen es sich um Umwelttechnologien mit einer direkten kreislaufwirtschaftlichen Relevanz handelt, sowie zu unterstützenden Grundlagentechnologien präsentiert.

²⁰ Die Einschränkung auf ein spezifisches internationales Patentamt erlaubt die Vergleichbarkeit der Anmeldungen, da sich Anmeldungen je nach Meldeamt in Umfang und inhaltlich unterscheiden können. Andererseits kann bei Anmeldungen beim Europäischen Patentamt davon ausgegangen werden, dass es sich um Anmeldungen handelt, für die ein Schutz in mehreren europäischen Mitgliedsländern angestrebt wird und damit ein breiteres Marktpotential seitens der Anmeldeur gesehen wird (vgl. Guellec und van Pottelsberghe, 2007).

²¹ Patentfamilien (im vorliegenden Fall sog. INPADOC-Patentfamilien) umfassen alle Patente, die dieselbe Priorität (oder eine Reihe von Prioritäten) beanspruchen, und werden in der Regel als eine Reihe von Patenten betrachtet, die ähnlichen technischen Inhalt betreffen schützen. (vgl. https://www.epo.org/searching-for-patents/helpful-resources/first-time-here/patent-families_de.html). Selbstzitate innerhalb einer Familie sind zwar ein Indikator für Folgeinnovationen (Hall et al., 2005; Moser et al., 2018), die Anzahl der Patente, die im Laufe der die im Laufe eines umfangreichen Forschungsprogramms angemeldet werden, ist jedoch von der IPR-Strategie eines jeden Unternehmens bestimmt.

Gewichtete Zählungen österreichischer Erfindungen kreislaufwirtschaftsrelevanter und unterstützender Technologien

Abbildung 5 zeigt die Entwicklung der Patentanmeldungen in kreislaufwirtschaftsrelevante Technologien über die Zeit zwischen 2000 und 2019 sowohl in absoluten Zahlen als auch als Anteil an allen Patentanmeldungen mit der Beteiligung österreichischer Erfinder beim Europäischen Patentamt. Die Zählungen sind durch Zitationen auf die entsprechenden Patente gewichtet.^{22,23,24.}

Die Abbildung zeigt, dass der Anteil von Patentanmeldungen kreislaufwirtschaftsrelevanter Umwelttechnologien an allen Patentanmeldungen österreichischer Erfinder über die Zeit leicht gestiegen ist. Von knapp 11,5 % im Jahr 2000 ist der Anteil auf ca. 14% zwischen 2019 angestiegen. Stellt man diese Zahlen den geförderten Gesamtkosten der FFG gegenüber, die im Zeitraum 2016-2020 zwischen 4,5 und 3,3% der gesamten geförderten Gesamtkosten schwanken, so ist davon auszugehen, dass sich es sich bei diesen Anteilen um die obere Grenze der Innovationsaktivitäten im Bereich der kreislaufwirtschaftsrelevanten Umweltinnovationen handelt. Analog zu den FFG Datenreihen zeigt der Anteil dieser Patente ebenfalls einen Rückgang in der Dynamik ab 2015.

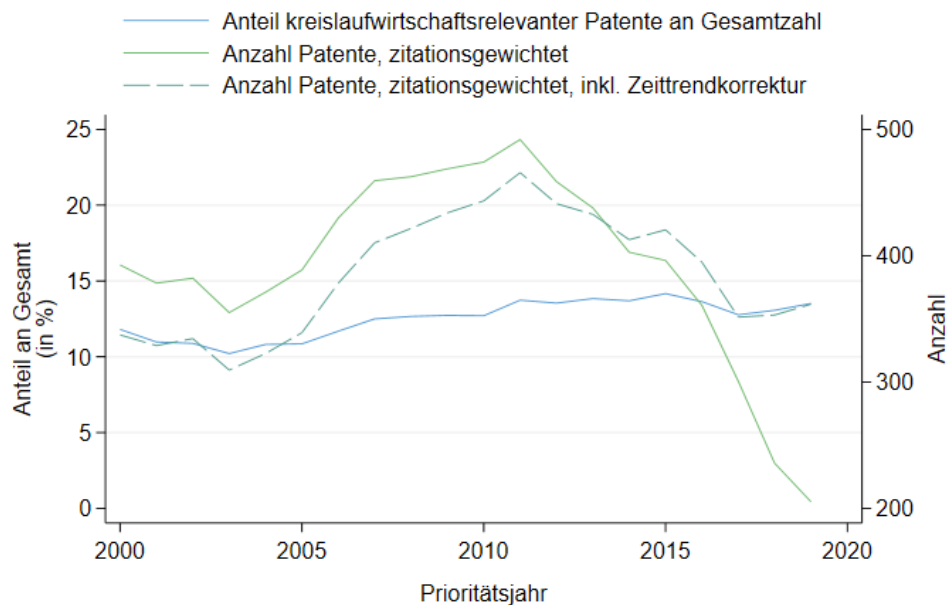
Abbildung 6 und Abbildung 7 zeigen die entsprechenden Entwicklungen für unterstützende Technologien und die Schnittmenge der kreislaufwirtschaftsrelevanten mit den unterstützenden Technologien (also das gemeinsame Auftreten der entsprechenden Technologieklassifikationen in einem Patent). Bei den unterstützenden Technologien (Abbildung 6) zeigt sich ein über die Zeit relativ stabiler Verlauf des Anteils, der um 6% schwankt. Der Anteil der Patentanmeldungen, die kreislaufwirtschaftsrelevante Umwelttechnologien mit unterstützenden Technologien kombinieren ist hingegen sehr gering und derartige Anmeldungen waren auch stark rückläufig.

²² Frühere Forschungsarbeiten haben gezeigt, dass der wirtschaftliche Wert eines Patentbesitzes positiv mit den Zitationen, die ein Patent erhält, korreliert. Durch die Gewichtung wird also Patenten mit einer potentiell höheren wirtschaftlichen Bedeutung auch ein höheres Gewicht beigemessen. In Abschnitt 0 werden internationale Rankings aufgrund derartiger gewichteter Zählungen präsentiert.

²³ Bei einfachen Zählungen ist aufgrund der Verzögerung bei der Veröffentlichung der Anmeldungen am aktuellen Rand immer ein starker Rückgang zu beobachten. Unter der Annahme, dass der Rückgang aber zwischen allen Patenten gleichermaßen zu beobachten ist, sollten die Anteile der Anmeldungen in einzelnen Unterteilungen des Datensatzes stabil bleiben, was auch beobachtet wird.

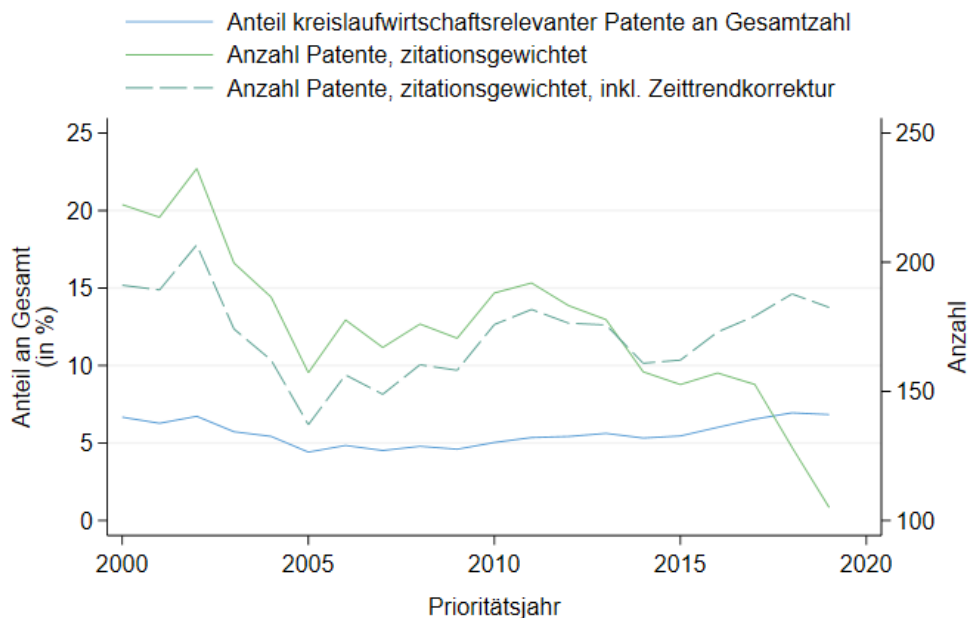
²⁴ Die Zeittrendkorrektur in den Abbildungen extrapoliert die vergangene Anmeldedynamik und erlaubt den Abriss der Zeitreihe bei einfachen Zählungen abzuschwächen.

Abbildung 5: Patentanmeldungen beim Europäischen Patentamt für kreislaufwirtschaftsrelevante Erfindungen mit österreichischen Erfindern.



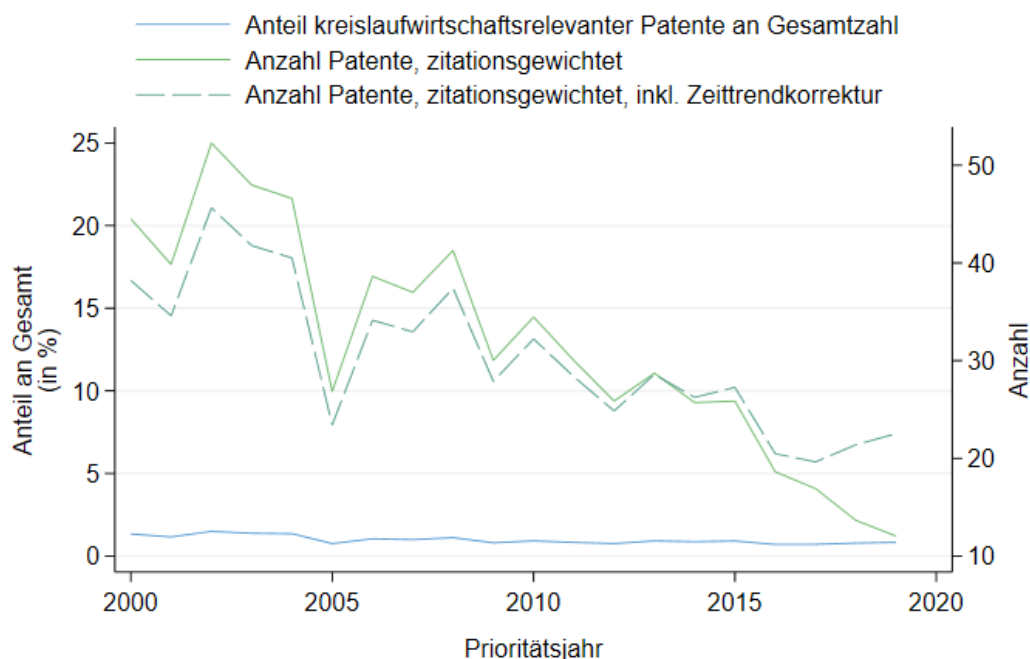
Q: Europäisches Patentamt PatStat. WIFO Berechnungen.

Abbildung 6: Patentanmeldungen beim Europäischen Patentamt für Erfindungen im Bereich unterstützender Grundlagentechologien mit österreichischen Erfindern.



Q: Europäisches Patentamt PatStat. WIFO Berechnungen.

Abbildung 7: Patentanmeldungen beim Europäischen Patentamt für Erfindungen im Bereich kreislaufwirtschaftsrelevanter und unterstützender Grundlagentechnologien mit österreichischen Erfindern.



Q: Europäisches Patentamt PatStat. WIFO Berechnungen.

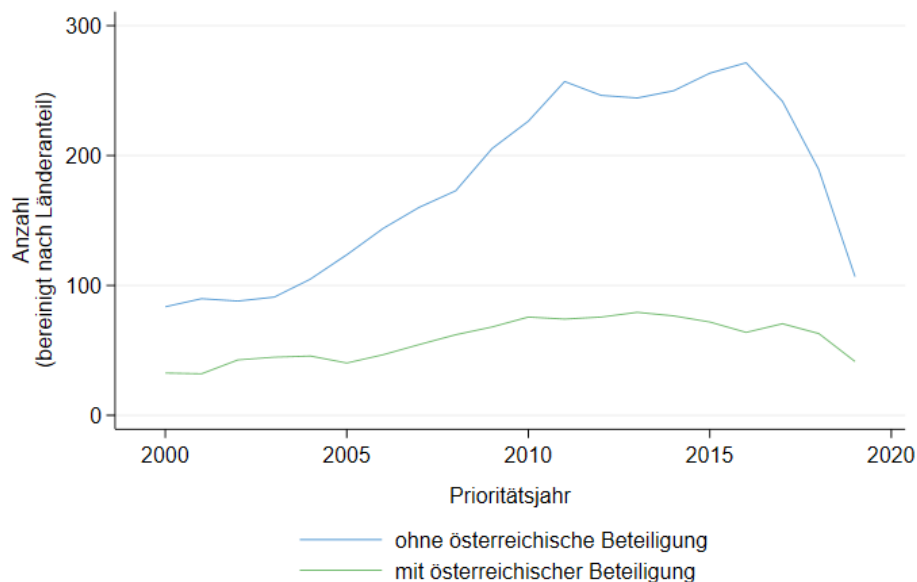
Gewichtete Zählungen von Patentanmeldungen, die kreislaufwirtschaftsrelevante Erfindungen österreichischer Erfinder zitieren

Abbildung 8 und Abbildung 9 stellen gewichtete Zählungen von Patenten, die kreislaufwirtschaftsrelevante Erfindungen mit österreichischer Beteiligung zitieren und damit ein Maß dafür darstellen, wie diese den Stand der Technik bei Erfindungen in anderen Technologiefeldern in Österreich (Abbildung 8) und im Ausland (Abbildung 9) beeinflussen.

Beide Auswertungen zeigen einen starken Anstieg der jährlichen Zitationen bis 2010 sowohl für Patentanmeldungen österreichischer Erfinder als auch für Patentanmeldungen von Erfindern aus dem Rest der Welt. Angesichts des Umstandes, dass im Beobachtungszeitraum beim Europäischen Patentamt jährlich zwischen 140.000 und 200.000 Patentanmeldungen einlangen, von denen zwischen 1700 und 2300 aus Österreich stammten,²⁵ erscheinen absoluten Zahlen der Patente, die kreislaufwirtschaftsrelevante Erfindungen österreichischer Erfinder gering. Die effektive Wirkung lässt sich daraus jedoch nicht ableiten. Die Analyse im folgenden Unterabschnitt vertieft diesen Aspekt.

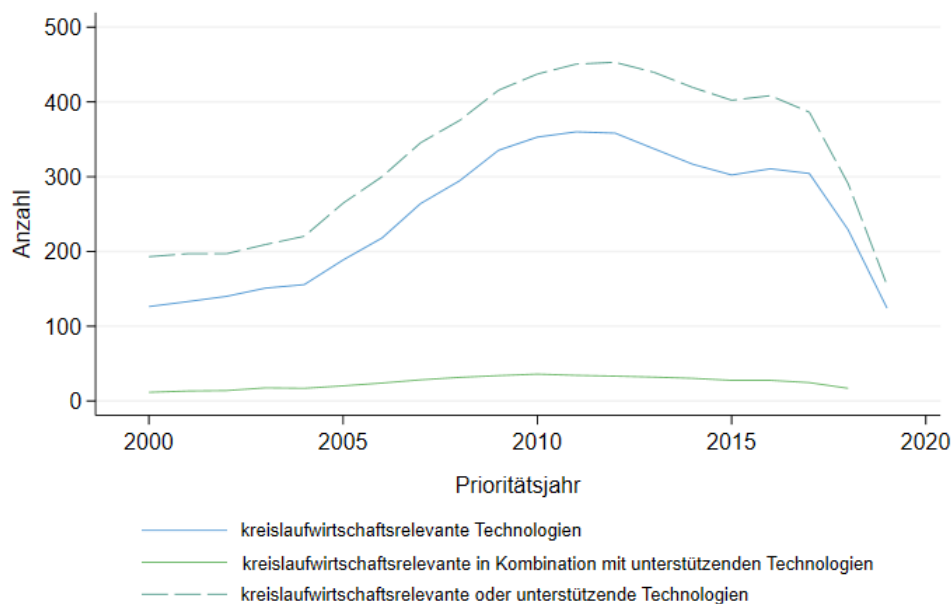
²⁵ Vgl. <https://www.epo.org/about-us/annual-reports-statistics/statistics.html#data>; [https://documents.epo.org/projects/babylon/eponet.nsf/0/EF610C9864E63FDBC1258699004AB942/\\$File/austria_2020_en.xlsx](https://documents.epo.org/projects/babylon/eponet.nsf/0/EF610C9864E63FDBC1258699004AB942/$File/austria_2020_en.xlsx) (abgerufen am 7.2.22).

Abbildung 8: Patentanmeldungen österreichischer Erfinder beim Europäischen Patentamt, die Patente im Bereich kreislaufwirtschaftsrelevanter Technologien zitieren.



Q: Europäisches Patentamt PatStat. WIFO Berechnungen.

Abbildung 9: Patentanmeldungen beim Europäischen Patentamt aus dem Rest der Welt, die Patente im Bereich kreislaufwirtschaftsrelevanter Technologien mit österreichischen Erfindern zitieren.



Q: Europäisches Patentamt PatStat. WIFO Berechnungen.

Rankings für österreichische Erfindungen in kreislaufwirtschaftsrelevanten Technologien

Einfache Zählungen, wie sie im vorangegangenen Abschnitt präsentiert wurden, erlauben keinen Rückschluss auf die technologische oder kommerzielle Bedeutung dieser Patente. Wie bereits kurz ausgeführt wurde, werden Vorwärtszitate, also Zitate, die aus später erteilten Patenten stammen und in den vorliegenden Indikatoren ab dem Veröffentlichungszeitpunkt der Patentanmeldung gezählt werden²⁶. Derartige Zitate werden durch Erfinder oder Patentprüfer aufgenommen um entweder die Kenntnis des Standes der Technik oder aber Rechtfertigungen für die Einschränkung von Patentansprüchen vorgenommen. Patente definieren also einen technologischen Raum, von dem der Inhaber des Patentes dritte ausschließen kann. Dieser wird durch die Zitate abgegrenzt. „In dieser geometrischen Analogie besetzt ein Patent, das viele Nennungen erhält, also wahrscheinlich eine neu entdeckte Grenze dieses Raumes und zieht viele neue Nachbarn an, die an diesem lukrativen technischen Grundbesitz teilhaben möchten“ (siehe Higham et al., 2020, S. 10, eigene Übersetzung). Eine Gewichtung einer Patentzählung durch Vorwärtszitate ermöglicht also eine Korrektur um die technologische und kommerzielle Bedeutung von Patenten.

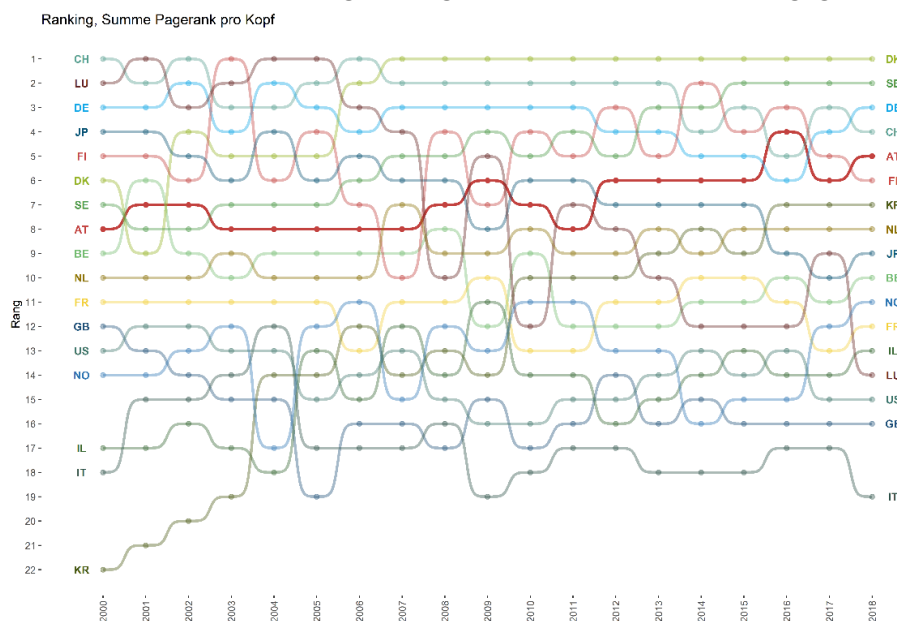
Wird nun ein Patent, das selbst viele Vorwärtszitationen erhält, durch Patente, die ihrerseits viele Vorwärtszitationen erhalten, zitiert, so ist davon auszugehen, dass dessen technologische und kommerzielle Bedeutung mit der Anzahl derartiger Zitationen steigt. Wird diese Logik rekursiv auf das gesamte Zitationsnetzwerk angewandt, so ermöglicht dies, die wichtigsten Patente in einem Feld und einem gegebenem Zeitfenster zu identifizieren (vgl. Reinstaller und Reschenhofer, 2017). Dieses Verfahren wird in dem folgenden Indikator abgebildet, der den PageRank Algorithmus auf die Patente in kreislaufwirtschaftsrelevanten Technologien anwendet. Dies ermöglicht ein internationales Ranking auf Grundlage der Bedeutung der Erfindungen in diesem Feld mit der Beteiligung von Erfindern der einzelnen gereihten Länder aufzustellen. Um für die Größe des Landes und damit die Anzahl der aktiven Erfinder zu korrigieren, werden die berechneten PageRank-Werte durch die Bevölkerungszahl gewichtet.²⁷ Dies kann nun dazu führen, dass ein kleines Land, das wenige aber wichtige Patente anmeldet in der Rangordnung in den oberen Rängen aufscheint.²⁸

²⁶ In der Literatur werden üblicherweise die Vorwärtszitate nach einem bestimmten Zeitraum (z.B. 10 Jahre) gezählt. Dies erhöht die bereits bestehende Verzögerung bei der Konstruktion von Patentindikatoren, die Zitationsinformation verwenden. Um dieses Problem zu mildern werden in der vorliegenden Arbeit gleitende Zeitfenster verwendet, die erlauben die aktuelle Bedeutung der Patente eines Landes zeitnäher abzubilden, vgl. Reinstaller und Reschenhofer (2017), s. 1428.

²⁷ Für eine Auswertung ohne Ländergrößenbereinigung siehe Abbildung 17 im Anhang.

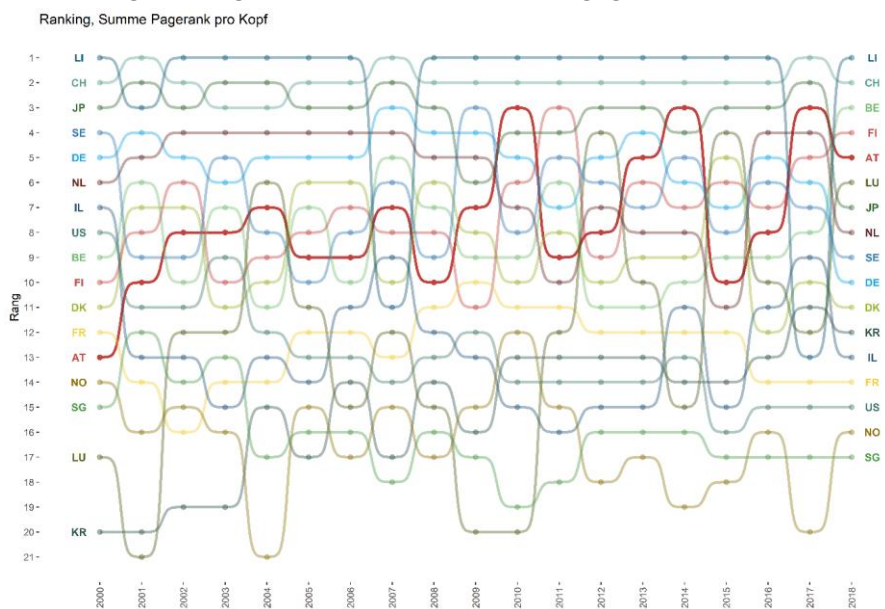
²⁸ Der Nachteil einer derartigen Größenbereinigung ist, dass internationale Steueroasen in denen Unternehmen aus Gründen der Steuerminimierung Schutzrechtverwaltungstochtergesellschaften ansiedeln, in diesen Rangordnungen mitunter an oberster Stelle aufscheinen können. Dieser Effekt wird eingedämmt, wenn die Zählung auf Grundlage des Wohnortes der Erfinder und nicht der Anmelder erfolgt. Er lässt sich jedoch nicht vollkommen vermeiden, den auch wirtschaftlich erfolgreiche Erfinder können aus steuerlichen Gründen ihren Hauptwohnsitz in Steueroasen verlegen.

Abbildung 10: Internationales Ranking der Patentanmeldungen für kreislaufwirtschaftsrelevante Erfindungen; PageRank Scores/Bevölkerungsgröße



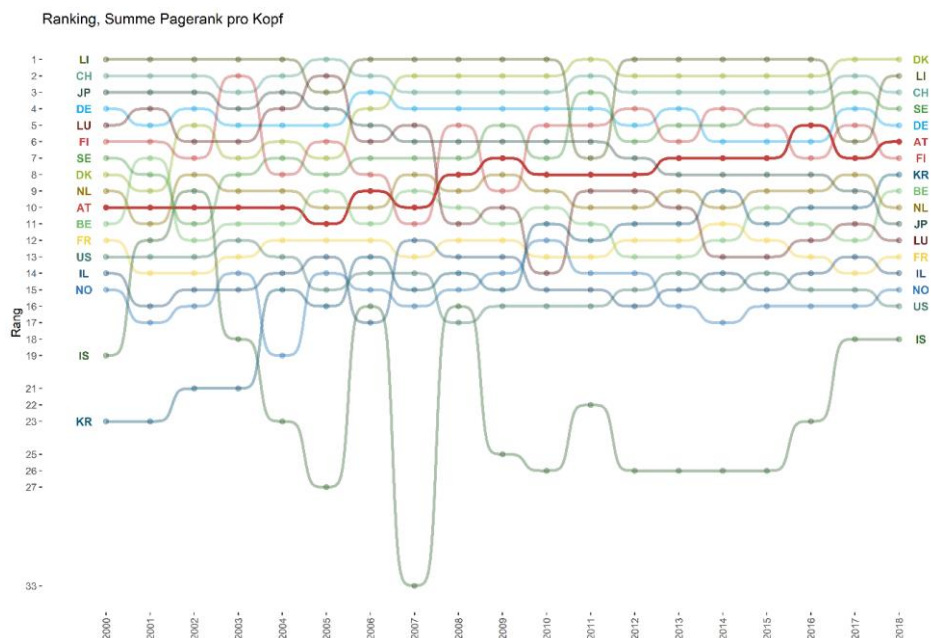
Q: Europäisches Patentamt PatStat. WIFO Berechnungen Patentanmeldungen beim Europäischen Patentamt mit (anteiligen) Erfindern der abgebildeten Länder.

Abbildung 11: Internationales Ranking der Patentanmeldungen für unterstützende Grundlagentechnologien; PageRank Scores/Bevölkerungsgröße



Q: Europäisches Patentamt PatStat. WIFO Berechnungen. Patentanmeldungen beim Europäischen Patentamt mit (anteiligen) Erfindern der abgebildeten Länder.

Abbildung 12: Internationales Ranking der im Bereich kreislaufwirtschaftsrelevanter und unterstützender Grundlagentechnologien; PageRank Scores/Bevölkerungsgröße



Q: Europäisches Patentamt PatStat. WIFO Berechnungen. Patentanmeldungen beim Europäischen Patentamt mit (anteiligen) Erfindern der abgebildeten Länder.

Abbildung 10 und Abbildung 11 bilden die entsprechende Rangordnung für kreislaufwirtschaftsrelevante Patentanmeldungen mit der Beteiligung österreichischer Erfinder (Abbildung 10) und unterstützender Grundlagentechnologien (Abbildung 11) im internationalen Vergleich. Wie aus den Abbildungen hervorgeht, reiht sich Österreich bei kreislaufwirtschaftsrelevanten Umwelttechnologien im Spitzenfeld ein und konnte zwischen 2000 und 2019 seine Position vom 8. auf den 5. Gesamtrang verbessern.²⁹ In den unterstützenden Grundlagentechnologien (Abbildung 11) zeigt sich ein ähnliches Bild, wenngleich die Position über die Zeit wesentlich stärkeren Schwankungen unterliegt, sich aber über die Zeit merklich verbessert hat. Am aktuellen Rand reihen sich auch hier die Patente mit Beteiligung österreichischer Erfinder auf dem 5. Gesamtrang ein. Der Verlauf bei der Schnittmenge aus kreislaufrelevanten und unterstützenden Grundlagentechnologien (Abbildung 12) zeigt ein ähnliches Verhalten über die Zeit. Österreich reiht sich auch hier im Spitzenfeld ein und hat sich über die Zeit verbessert.³⁰

²⁹ Abbildung 17 im Anhang präsentiert die entsprechende Reihung ohne Bereinigung der Ländergröße. Österreich reiht sich hier immer noch unter die ersten fünfzehn Länder ein.

³⁰ In Anschluss an Abschnitt 3 zeigen Abbildung 18 und Abbildung 19 im Anhang eine Auswertung für Stromspeichertechnologien in Österreich. Die Auswertung liefert analoge Ergebnisse.

Fazit

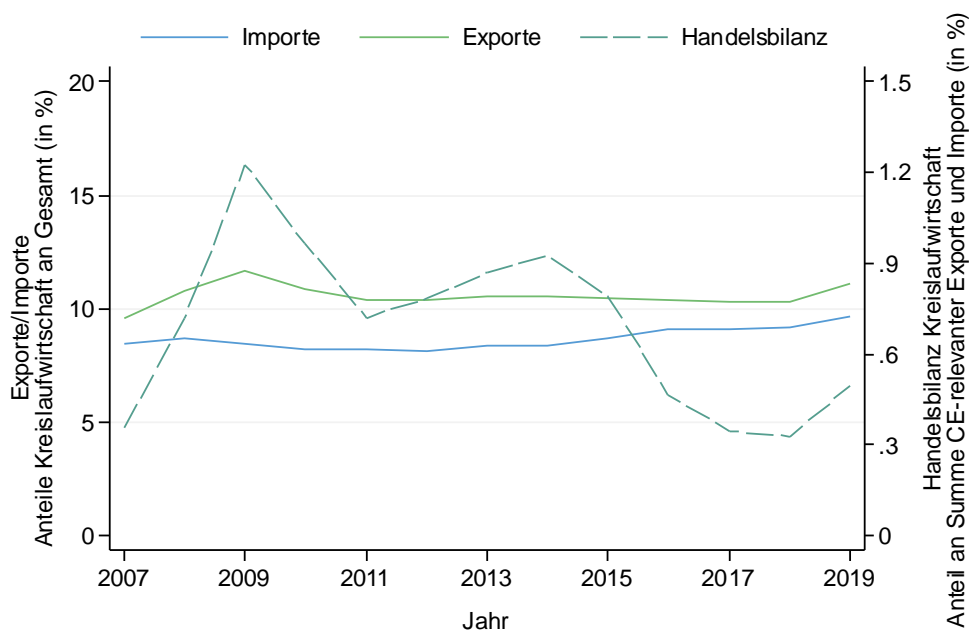
Den in absoluten und anteilmäßig geringen Zahlen von Patentanmeldungen in den untersuchten Technologiefeldern steht eine international hohe technologische und kommerzielle Bedeutung (angenähert durch die PageRank Zitationsgewichte) dieser Erfindungen gegenüber, wenn man die Vorwärtszitationen auf diese Erfindungen betrachtet. Dementsprechend ist die erfinderische Tätigkeit in kreislaufwirtschaftsrelevanten Umwelttechnologien relativ zur erfinderischen Tätigkeit in anderen Technologiefeldern von untergeordneter Bedeutung. Diese getätigten Erfindungen scheinen aber eine im internationalen Vergleich hohe technologische und kommerzielle Bedeutung zu entfalten.

3.2.3 Handel kreislaufwirtschaftsrelevanter Waren in Österreich

Der Handel mit kreislaufwirtschaftsrelevanten Waren bietet ein Abbild der wirtschaftlichen Aktivität im Bereich der Kreislaufwirtschaft. Er ist einerseits Ausdruck von Innovationen, die in Produkten aufgehen, die erfolgreich exportiert werden. Andererseits auch Ausdruck der inländischen Nachfrage nach derartigen Produkten und Technologien. Die Handelsbilanz in diesen Güterkategorien deutet auf bestehende Stärken oder Schwächen bzw. auf günstige oder weniger günstige Spezialisierungsmuster der inländischen Erzeuger relativ zu ausländischen Mitbewerbern hin.

Abbildung 13 bietet eine Darstellung der Entwicklung des Warenhandels kreislaufwirtschaftsrelevanter Waren über die Zeit. Sie stellt die Entwicklung der Importe gemessen in ihrem Anteil an den gesamten Warenimporten jener der Exporte wiederum gemessen als Anteil an den gesamten Warenexporten gegenüber. Die Handelsbilanz wird als Anteil am gesamten Handelsvolumen in diesem Bereich, also der Exporte und der Importe zusammen dargestellt und ist als Überhandindikator zu interpretieren.

Abbildung 13: **Entwicklung der Importe, Exporte und Handelsbilanz**



Q: BACI/Comtrade (vgl. Gaulier und Zignano, 2010). WIFO Berechnungen.

Der Exportanteil kreislaufwirtschaftsrelevanter Waren an den gesamten Warenexporten entwickelte sich stabil und schwankte zwischen 2007 und 2019 zwischen 10 und 12 Prozent. Ein ähnliches Entwicklungsmuster war auch bei den entsprechenden Warenimporten zu beobachten. Deren Importanteil lag aber konsistent unter dem Exportanteil der entsprechenden Warenkategorien, wobei auch über den gesamten Zeitverlauf eine positive Handelsbilanz zu beobachten war, die sich im Beobachtungszeitraum im Bereich zwischen 0,3 und 1,2 Prozent des gesamten Handelsvolumens bewegt hat. Dies deutet auf eine günstige Exportspezialisierung hin. Die Exportüberschüsse in diesem Bereich können damit zur Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit und Sicherung der Beschäftigung in Österreich beitragen.

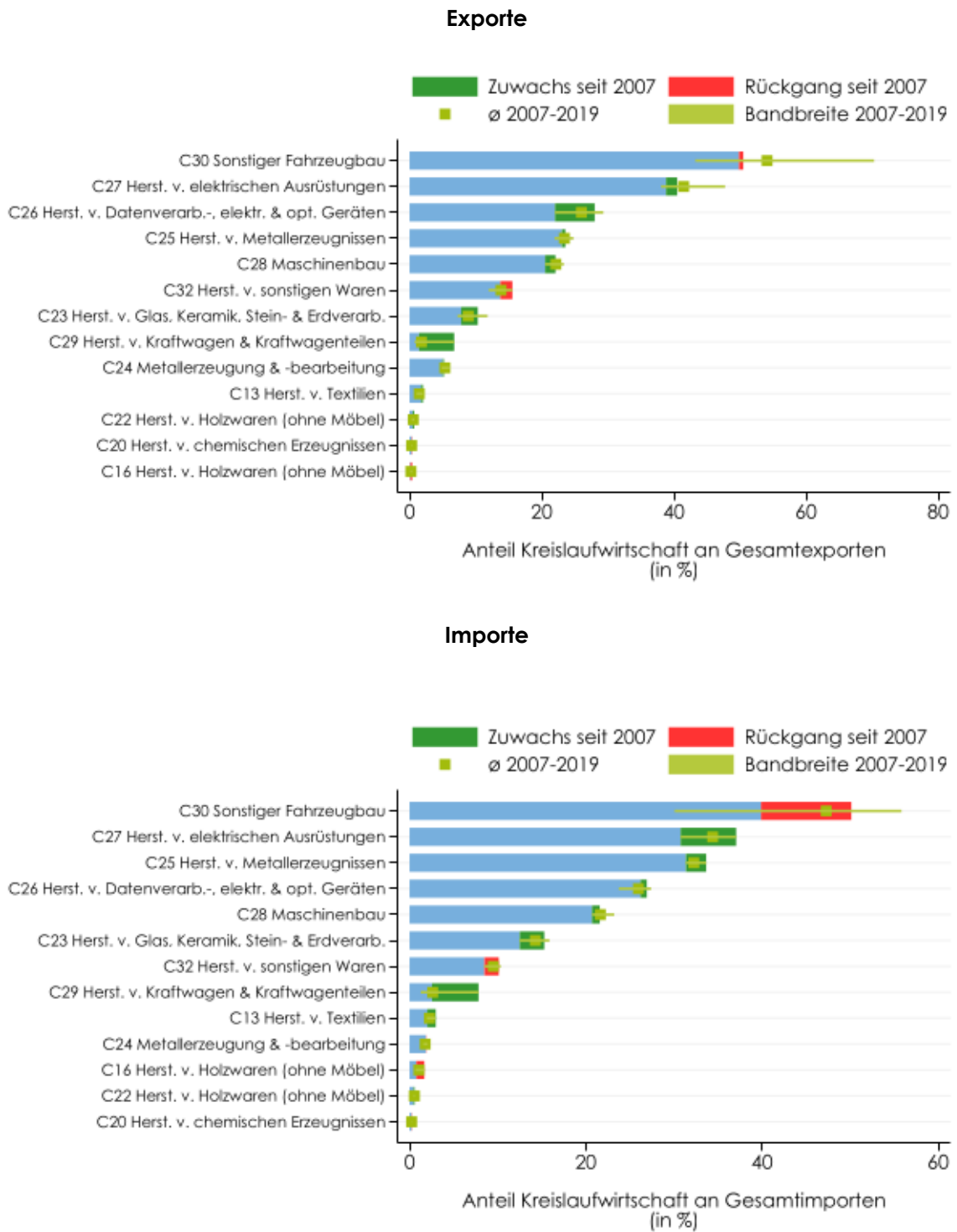
Abbildung 14 stellt die Entwicklung der Exporte und Importe nach Branchen dar.³¹ Die blauen Abschnitte der Balken stellen den Anteil der Exporte und Importe an den Gesamtexporten oder -importen im Ausgangsjahr (2007) dar, während die roten und grünen Teile der Balken Rückgang oder Zuwachs der Werte im Jahr 2019 relativ zum Ausgangsjahr darstellen, während die grünen Linien die Schwankungsbreite im Beobachtungszeitraum abbilden. Die Exporte von kreislaufwirtschaftsrelevanten Waren konzentriert sich auf fünf Branchen. Die Anteile sind in diesen Branchen über die Zeit sehr stabil. Die höchsten Exportanteile sind im sonstigen Fahrzeugbau zu beobachten, gefolgt von der Herstellung elektrischer

³¹ Dabei ist zu beachten, dass die Importe nicht als Importe durch Unternehmen der entsprechenden Branche zu interpretieren sind, sondern sie lediglich der angegebenen Branche zugerechnet werden können.

Ausrüstungen, der Herstellung von Datenverarbeitungsgeräten (IKT), in der Herstellung von Metallerzeugnissen sowie dem Maschinenbau. Diese Reihenfolge spiegelt sich auch bei den Importen wider, wobei 2019 ein starker Rückgang des Importanteils im sonstigen Fahrzeugbau zu beobachten war, der aber im Bereich der mehrjährigen Schwankungsbreite liegt.

Der Handel mit kreislaufwirtschaftsrelevanten Waren ist also in Österreich sehr stark auf eine Reihe von Branchen konzentriert, die sich teilweise mit der branchenmäßigen Verteilung der FFG Fördermittel decken (Maschinenbau, elektrotechnische Industrie, IKT) jedoch insgesamt breiter streuen. Bemerkenswert ist, dass nur ein sehr geringes Fördervolumen der FFG im Bereich der Kreislaufwirtschaft in den sonstigen Fahrzeugbau fließt, obwohl dies die Export- und importstärkste Branche ist.

Abbildung 14: **Entwicklung des Handels mit kreislaufwirtschaftsrelevanten Waren**



Q: BACI/Comtrade Daten; WIFO Auswertungen.

3.3 Schlussfolgerungen

In der vorliegenden Arbeit wurde ein erster Versuch unternommen, Innovationsaktivitäten im Bereich der Kreislaufwirtschaft zu quantifizieren. Dabei ergeben sich in erster Linie zwei wichtige methodische Einschränkungen, die in der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden müssen.

Die erste Einschränkung betrifft den Umstand, dass die Transformation der Wirtschaft auf der Grundlage kreislaufwirtschaftlicher Prinzipien umfangreiche soziale, institutionelle und gesellschaftliche Innovationen, sowie unternehmensübergreifende Innovationen und Investitionen in Infrastrukturen erfordert, die zu Koordinationsversagen führen können und damit öffentliche Eingriffe nötig machen. Auf der Ebene einzelner Unternehmen sind neben technischen Neuerungen auch Neuerungen in Geschäftsmodellen, der Organisation der Logistik und andere Bereiche erforderlich. Neue technologische Innovationen sind in diesem Kontext unerlässlich, doch nicht ausreichend für einen erfolgreichen Transformationsprozess. Die Einschränkung dieser Arbeit auf Forschung und Entwicklung, erfinderische Tätigkeit und den Warenhandel im Bereich kreislaufwirtschaftlicher Technologien und Produkte bietet damit nur ein unvollständiges Bild.

Die zweite Einschränkung betrifft hingegen die genaue statistische Abgrenzung von erfinderischer Tätigkeit und Warenhandel, die kreislaufwirtschaftsrelevanten Technologien zuzuordnen sind. Dies ist einerseits dem Umstand geschuldet, dass es selbst unter Forschenden wie auch Praktizierenden keine eindeutige Definition von „Kreislaufwirtschaft“ gibt. Andererseits decken vorhandene Klassifikationen von Umwelttechnologien und Umweltprodukten auch zentrale, allgemein akzeptierte kreislaufwirtschaftliche Prinzipien ab, wodurch in vielen Fällen Umwelttechnologien und kreislaufwirtschaftsrelevante Technologien zusammenfallen. Für eine präzisere Abgrenzung wären noch wesentlich detailliertere Analysen einzelner Technologieklassen oder Produktkategorien erforderlich.

Unter Berücksichtigung dieser Einschränkungen zeigt dieses Kapitel, dass Innovationstätigkeiten im Bereich kreislaufwirtschaftsrelevanter Technologien sowohl in absoluten und anteilmäßig Zahlen im österreichischen Innovationssystem nur eine untergeordnete Rolle spielen. Betrachtet man die durch die FFG geförderten Gesamtkosten so stellen diese nur einen sehr geringen Prozentanteil an den gesamten durch die FFG geförderten F&E Gesamtkosten dar (zwischen 3 und 4,5%). Ein ähnliches Bild ergibt sich auch bei der Analyse der Patentanmeldungen in den relevanten Technologiefeldern durch österreichische Erfinder. Andererseits zeigt eine Analyse der technologischen und kommerziellen Bedeutung dieser Erfindungen, dass trotz deren geringen Bedeutung im österreichischen Innovationssystem, technologisch und kommerziell relevante Erfindungen in Österreich auf dem Gebiet der Kreislaufwirtschaft, sowie im Bereich unterstützender Technologien (Industrie 4.0; industrielle Biotechnologie) gemacht werden. Dies scheint sich auch im Warenhandel niederzuschlagen, wo ein Handelsbilanzüberschuss im Bereich kreislaufwirtschaftsrelevanter Waren und Güter zu beobachten ist. Ein kausaler Zusammenhang zwischen der Bedeutung der Erfindungen und dem Erfolg im internationalen Handel kann aufgrund der vorliegenden Auswertungen aber nicht hergestellt werden. Dazu wären vertiefende Analysen notwendig.

Im nächsten Kapitel wird anhand eines konkreten Beispiels, Lithium-Ionen-Batterien, gezeigt, welche Schritte bzw. welche strategischen Handlungsfelder der Aufbau eines Kreislaufwirtschaftsansatzes erfordert.

4. Kreislaufwirtschaft und Dekarbonisierung am Beispiel Lithium-Ionen-Batterien

Die Klimaziele von Paris, den durchschnittlichen globalen Temperaturanstieg auf deutlich unter +2°C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu stabilisieren mit Anstrengungen für eine Beschränkung auf +1,5°C, erfordern umfassende, alle Wirtschaftssektoren betreffende Maßnahmen für eine drastische Reduzierung der anthropogenen Treibhausgasemissionen, insbesondere aber einen Umbau des Energiesystems hin zu erneuerbaren Energietechnologien (für Österreich vgl. z.B. Meyer et al., 2020; UBA, 2017). Der weltweite Scheitelpunkt der Treibhausgasemissionen soll so bald wie möglich erreicht werden. In der zweiten Hälfte des Jahrhunderts soll ein Gleichgewicht zwischen Treibhausgasemissionen und deren Abbau durch Senken (Treibhausgasneutralität) erreicht werden (United Nations, 2015). Das aktuelle Regierungsprogramm 2020-2024 der Bundesregierung zielt unter anderem darauf ab, geeignete Maßnahmen zur CO₂-Reduktion im Hinblick auf das Ziel der Klimaneutralität bis spätestens 2040 zu entwickeln und umzusetzen. Als konkrete Beispiele werden auch die Bereiche E-Mobilität und Modelle zur Kreislaufwirtschaft genannt. Im Rahmen der Klima- und Energiestrategie #mission2030 ist der Fokus klar auf die Zero Emission Mobilität im Straßenverkehr ausgerichtet, wobei die Themen Ressourcenverbrauch, Verfügbarkeit kritischer Rohstoffe und Recycling im Rahmen des Kreislaufwirtschaftspaket der Europäischen Kommission aktiv zu berücksichtigen sind.

Das Ziel der Klimaneutralität ist mit einer erheblichen Steigerung der Nachfrage nach Ressourcen, insbesondere Metallen verbunden. Nach Berechnungen der Internationalen Energieagentur (IEA, 2021) würde eine weltweit konzertierte Anstrengung zur Erreichung der Pariser Klimaziele eine Vervielfachung des Rohstoffbedarfs für saubere Energietechnologien bis 2040 bedeuten. Photovoltaikanlagen, Windparks, Elektrofahrzeuge und Batteriespeichersysteme benötigen in der Regel weitaus mehr Rohstoffe als ihre auf fossilen Brennstoffen basierenden Pendanten. Ein typisches Elektroauto benötigt demnach sechsmal so viele mineralische Rohstoffe wie ein herkömmliches Auto und eine Onshore-Windkraftanlage benötigt neunmal so viele mineralische Rohstoffe wie ein Gaskraftwerk (IEA, 2021). Die Transformation des Energiesystems geht also mit einer Veränderung der Nachfrage nach Rohstoffen einher - von fossilen Ressourcen hin zu Metallen. Treibhausgasemissionen aus der Gewinnung und Verarbeitung von Primärressourcen für erneuerbare Energiesysteme stellen somit eine Herausforderung für den Klimaschutz dar, denn Rohstoffe für die Energiewende haben eine hohe Emissionsintensität (IEA, 2021). Der Bergbau und die Veredelung von Metallen sind für etwa 8 % des gesamten globalen Primärenergieverbrauchs und der damit verbundenen THG-Emissionen verantwortlich und verursachen vielfältige lokale Umwelt- und Gesundheitsprobleme, von der Wasserentnahme bis zur Freisetzung toxischer Substanzen (IRP, 2015). Hochwertige Erze werden knapper

und erfordern kontinuierlich steigende Mengen an Energie und Wasser, um sie zu gewinnen und zu verarbeiten.

Der Kreislaufwirtschaft mit ihren Ansätzen der Verlängerung der Lebens- und Nutzungsdauer durch Reparatur und Re-Use und der Bereitstellung von Sekundärressourcen durch Recycling kommt eine strategische Bedeutung für den Klimaschutz zu. Wenn beispielsweise ein defektes Gerät repariert wird, anstatt es durch ein neues zu ersetzen, dann spart dies im Verhältnis zu seiner Lebenszeitverlängerung Abbau- und Veredelungsaktivitäten von Rohstoffen, viele Herstellungsschritte, den damit verbundenen Energieverbrauch und letztlich Treibhausgasemissionen. Die Ermittlung von Energie-/THG-Emissionseinsparungen auf Systemebene erfordert eine profunde Kenntnis der sektor- und produktspezifischen Prozesse sowie der Stoff- und Energieflüsse auf gesamtwirtschaftlicher Ebene. Generell kann jedoch festgestellt werden, dass die Gewinnung von Sekundärrohstoffen, insbesondere von Metallen, durch Recycling oft weniger als halb so viel Energie und damit CO₂-Emissionen erfordert, wie die Umwandlung und Veredelung der Erze (IEA, 2021). Die Rückgewinnung von Ressourcen aus Abfallströmen entlastet somit die Versorgung mit Primärressourcen. Für Massenmetalle wie Stahl und Aluminium sind Recyclingtechnologien gut etabliert, für viele energetische Übergangsmetalle wie Lithium und Seltene Erden ist dies jedoch noch nicht der Fall (IEA, 2021).

Die Synergien und Wechselwirkungen zwischen Kreislaufwirtschaft und Klimaschutz sind Gegenstand einer wachsenden Anzahl von wissenschaftlichen Untersuchungen (EMF – Material Economics, 2021; Material Economics, 2018; Circle Economy, 2021, Cantzler et al., 2020, Deloitte, 2016), die auch die mit der Kreislaufwirtschaft, oder mit einzelnen Elementen der Kreislaufwirtschaft, verbundenen ökonomischen Effekte auf die Volkswirtschaft analysieren (OECD, 2020; für Österreich vgl. Sommer et al., 2021, Meyer und Sommer, 2021).

4.1 Kreislaufwirtschaft und Ressourcensicherheit

Eine zuverlässige Versorgung mit den für eine Energiewende benötigten Rohstoffen ist eine wesentliche Voraussetzung für eine erfolgreiche Klimaschutzstrategie. Die wichtigsten Rohstoffe bzw. Materialien für erneuerbare Energiesysteme sind Kupfer, Kobalt, Nickel, Lithium, Graphit, Aluminium, Stahl und Seltene Erden wie Dysprosium, Neodym und Praseodym. Diese Ressourcen werden zumeist importiert und die Recyclingraten einiger strategischer Metalle wie Seltene Erden oder Lithium sind sehr niedrig. Der Klimaschutz ist somit mit Fragen der Energie- und Ressourcensicherheit verbunden, wie verschiedene internationale Gremien darlegen (IEA, 2021, Weltbank, 2020, European Commission, 2020c). Der wachsende Wettbewerb um die Versorgung mit Rohstoffen und kritischen Funktionsmaterialien für die Herstellung „sauberer“ Energie, die Instabilität der globalen Lieferketten und die zunehmende globale Konkurrenz, u.a. aus der VR China, haben ein Umdenken in Bezug auf die Widerstandsfähigkeit globaler Lieferketten hervorgerufen und ein Überdenken von nationalen und supranationalen Strategien zur Bewältigung von Versorgungsrisiken bei strategischen Materialien bewirkt (Nakano, 2021, European Commission, 2020c). Im Folgenden werden einige Beispiele für Risiken in der Versorgungssicherheit bei einzelnen Rohstoffen aufgeführt (z. B. Nakano, 2021).

- Bei Lithium, das in Lithium-Ionen-Batterien (LIB) zum Antrieb von Elektrofahrzeugen und zur Speicherung von Energie aus volatilen Quellen wie Photovoltaik und Windkraft verwendet wird, bestehen in naher Zukunft weniger Risiken bezüglich der Versorgungssicherheit, mittelfristig sind jedoch große Investitionen erforderlich, um ein erhebliches Marktdefizit nach 2025 zu vermeiden. Allerdings gibt es nur fünf Länder, die Lithium produzieren. 60 % der weltweiten Lithium-Raffineriekapazität konzentriert sich auf die VR China. Engpässe für die EU bestehen bei den Rohstoffen und bei der Produktion von Lithium-Ionen-Zellen. Derzeit liefert die EU weniger als 1 % der Li-Zellen (European Commission, 2020c).
- Bei Kobalt wird die Konzentration des Angebots in der Demokratischen Republik Kongo aufgrund des großen Anteils des Landes an der weltweiten Förderung weiterhin als Risiko eingestuft (European Commission, 2020c).
- Bei den Seltenen Erden hält die VR China eine dominante Marktposition, die die entsprechenden Wertschöpfungsketten anfällig macht (Nakano, 2021).

Die wachsende strategische Rolle der VR China für den globalen Handel mit Technologien für erneuerbare Energien, z. B. als Hauptproduzent hochwertiger Batteriezellen oder Solarmodule, und ihre potenziellen Auswirkungen auf wichtige globale Wertschöpfungsketten gaben u.a. Anlass, über ein Re-Shoring von strategischen Wertschöpfungsketten, etwa im Bereich der Batteriezellproduktion nachzudenken (siehe z. B. Deloitte, 2020).

Im Zusammenhang mit dem Klimaschutz und der Ressourcensicherheit hat sich die Kreislaufwirtschaft als ein Wirtschaftsparadigma positioniert, das Vorteile für die lokale Beschäftigung, die Wertschöpfung und die Umwelt und insbesondere für das Klima verspricht. So ist die Transformation hin zu einer Kreislaufwirtschaft zu einem strategischen Bestandteil aktueller politischer Agenden geworden, sowohl auf europäischer als auch auf nationaler Ebene (vgl. Green Deal und Kreislaufwirtschaftspaket). Darüber hinaus hat die Entscheidung für eine stärker kreislauforientierte Wirtschaft Eingang in die Industriestrategie der Europäischen Union gefunden (European Commission, 2020d).

4.2 Fallbeispiel Recycling von Lithium-Ionen-Batterien

Batterien sind die am schnellsten wachsende Speichertechnologie und spielen eine Schlüsselrolle bei der Erfüllung des EU-Ziels, die Treibhausgasemissionen bis 2030 um 55 % gegenüber 1990 zu senken. Neben dem Energiesystem spielen Batterien vor allen Dingen im Transportsystem eine entscheidende Rolle bei der Elektrifizierung des motorisierten Individualverkehrs sowie, in Teilen, des Güterverkehrs auf der Straße. Unterschiedliche Szenarien weisen darauf hin, dass der Anteil der batteriebetriebenen Fahrzeuge exponentiell steigen wird. Der breite Einsatz von Elektrofahrzeugen stellt eine bedeutende wirtschaftliche Chance für die Batterieindustrie dar. Gerade im Bereich der Produktion von Lithium-Ionen Batterien (LIB) ist die Wertschöpfung im Bereich eines Elektroautos prozentual am höchsten (Fraunhofer Austria et al., 2020). Aus der Wettbewerbsperspektive ist die Batterieproduktion von zunehmend strategischem Interesse für die europäische Wirtschaft (European Commission, 2021). Allerdings waren bis vor kurzem nur

wenige europäische Unternehmen in Nischenmärkten für LIB (z. B. Saft (Frankreich) und VARTA (Deutschland) u.a. in Raumfahrtanwendungen und für Hörgeräte) tätig. Kein europäisches Unternehmen produziert bisher Lithium-Ionen-Batterien für den Massenmarkt, es werden jedoch Fabriken für die LIB Herstellung in Europa errichtet, darunter Northvolt (Schweden) sowie Autohersteller wie Volkswagen. In Österreich spielt die Produktion von LIB derzeit keine Rolle. Vielmehr setzen asiatische Unternehmen und das US-Unternehmen Tesla mit seinen Gigafabrik-Projekten weiterhin auf die Zellproduktion in verschiedenen EU-Ländern.

Die Europäische Kommission anerkennt die strategische industriepolitische Bedeutung der Batterie- und Zellfertigung in Europa und fördert durch verschiedene industriepolitische Maßnahmen, wie etwa Allianzen und Plattformen die Entwicklung einer europäischen Wertschöpfungskette für die Batterie- und Zellproduktion. So wurde in Zusammenarbeit mit den EU-Ländern, der Industrie und der Wissenschaft die „European Battery Alliance“ (2017) gegründet und die Technologie- und Innovationsplattform „Batteries Europe“ (2019) als zentrale Plattform für die gesamte batteriebezogene Forschung in Europa entwickelt. Ziel ist es, eine grenzüberschreitende und integrierte europäische Wertschöpfungskette für das gesamte Batteriesystem zu etablieren, beginnend mit der Gewinnung und Verarbeitung von Rohstoffen, der Entwicklungs- und Herstellungsphase von Batteriezellen und Batteriepacks sowie deren Verwendung, Zweitverwendung, Recycling und Entsorgung im Rahmen einer Kreislaufwirtschaft (European Commission, 2018).

Das rasante Wachstum in der Batteriefertigung führt über die ressourcenintensive Wertschöpfungskette zu erheblichen Materialflüssen. So wird für die Herstellung von Energiespeichern für die Elektromobilität, insbesondere für die Produktion von LIB, eine exponentiell steigende Nachfrage u.a. nach den Funktionsmaterialien Lithium, Kobalt und Nickel prognostiziert (World Bank, 2020; IEA, 2021). Die ungleiche globale Verteilung dieser kritischen Funktionsmaterialien sowie die Konzentration einiger kritischer Rohstoffe in wenigen Ländern bedeuten Risiken in der Versorgungssicherheit, die sich aufgrund von geopolitischen Verwerfungen oder volatilen Rohstoffpreisen ergeben können.

Die Substitution von Primär- durch Sekundärrohstoffe gilt mittel- bis langfristig als Strategie gegen hohe Förderkosten für Primärrohstoffe, Kapazitätsengpässe bei der Materialförderung sowie steigende Rohstoffpreise und kann helfen Abhängigkeiten in den Lieferketten zu reduzieren. Der Energie- und Hilfsmiteleininsatz für die Produktion von Sekundärrohstoffen ist deutlich geringer als bei der Primärproduktion, so dass Treibhausgas- und andere Emissionen durch das Recycling gesenkt werden können (SRU, 2020).³² Der Ausbau des Recyclings von LIB bzw. allgemein von erneuerbaren Energietechnologien gilt daher auch als Baustein zur Dekarbonisierung der Metallindustrie (Bloodworth et al., 2019).

Langfristig ist davon auszugehen, dass die Konkurrenz um LIB-basierte Rohstoffe Anreize erzeugen wird, neue Batterietechnologien zu entwickeln, die mit alternativen Elektrodenmaterialien

³² Das Aluminiumrecycling spart gegenüber der Primärproduktion von Aluminium ca. 90 bis 97% des Energieeinsatzes, bei Stahl sind es ca. 60 bis 75% (UNEP, 2013).

oder alternativer Batteriechemie operieren. In den nächsten 1-2 Dekaden wird jedoch mit einem wachsenden Strom an EoL-LIB in der Abfallwirtschaft gerechnet. Das Recycling von LIB stellt vor diesem Hintergrund einen erfolgversprechenden umweltökonomischen Ansatz dar, den Druck, den die steigende Nachfrage auf die Primärressourcen, die Ressourcenpreise und die Umwelt ausübt, ebenso wie die geopolitischen Abhängigkeiten in den Lieferketten reduzieren zu helfen. Das Recycling von LIB trägt dazu bei, die Entwicklung einer Kreislaufwirtschaft im Bereich der Batterietechnologie zu etablieren. Auch der Wiederverwendung (Second-Use) von LIB (u.a. im Bereich lokaler Energiespeichersysteme) wird diesbezüglich eine Bedeutung beigemessen (Hill et al., 2019).

Im Rahmen der Studie „Entwicklung einer Wertschöpfungskette für das Recycling von Lithium-Ionen-Batterien (LIB) in Österreich“ (Beigl et al., 2021) wurden Expertinnen und Experten aus Wissenschaft, Verwaltung und Praxis zu den wirtschaftlichen, technischen und institutionellen Herausforderungen und Chancen der Etablierung einer Wertschöpfungskette für das Recycling von LIB befragt. ‚Lokales‘ Wissen sollte auf diese Weise für die Entwicklung einer Roadmap für das Recycling von LIB in Österreich bzw. der EU verfügbar gemacht werden. Dabei sollten Engpässe und Herausforderungen markiert und Ideen und Ansätze zur Überwindung möglicher Barrieren auf diesem Weg erforscht werden, die gegenwärtig das Recycling von LIB kennzeichnen. Im Folgenden werden zentrale Handlungsfelder aus der Studie aufgegriffen und zitiert (Beigl et al., 2021).

4.2.1 Den Rücklauf von Batterien sicherstellen

„Die Stakeholder vertraten überwiegend die Meinung, dass es wichtig sei, die Batterien in Europa zu halten und Abflüsse ins Ausland zu vermeiden, etwa durch den Export von Gebrauchtwagen, einerseits aus ökonomischen Gründen sowie andererseits, um einer Abhängigkeit von Rohstoffimporten aus dem Ausland entgegenzuwirken. Es sei nicht sinnvoll, die Seltenen Erden für Neufahrzeuge hochpreisig im Ausland einzukaufen, die Altbatterien hingegen günstig zu exportieren, um die Rohstoffe für Neubatterien schließlich wieder teuer im Ausland einzukaufen. Mehrere Interviewpartner äußerten die Meinung, dass sogenannte Product-Service-Systems, bei denen die Produzenten im Eigentum der Batterien sind, sinnvoll seien, um möglichst hohe Recyclingquoten bzw. ein Second-Life sicherzustellen, dass die Hersteller bisher jedoch nicht bereit dafür seien und es viel Forschungsbedarf auf diesem Gebiet gebe. Durch B2B-Modelle (business-to-business) könnten klare Besitzverhältnisse an den Batterien sowie eine Stoffstromverfolgung sichergestellt werden. Die Daten über den Lebenszyklus der Batterien wären so problemlos auszulesen und die optimale Lebensdauer der Batterien (etwa eine Entnahme bei 85 oder 90% der Kapazität) präzise zu steuern. Die Einführung von Product-Service-Systems bleibe allerdings eine Unternehmensentscheidung und könne nicht politisch vorgeschrieben werden. Product-Service-Systems würden sich nur durchsetzen, wenn die Hersteller davon überzeugt seien, dass es Vorteile habe. Die Kreislaufwirtschaft allein werde als Anreiz für die Einführung solcher Systeme nicht ausreichen, es sei denn, die gesetzlichen Vorgaben für Recyclingquoten seien hoch genug. Eine Frage in diesem Zusammenhang betreffe die

Entwicklung der E-Mobilität in 10-15 Jahren, konkret, ob die Entwicklung eher in Richtung Austausch von Diesel- und Benzin-Fahrzeugen oder in Richtung Sharing oder Flotten-Modelle gehe. Letzteres wäre von der Kostenseite, der Ressourceneffizienzseite und auch bezüglich einer klimagerechten Raumentwicklung sinnvoller. In Kombination mit Entwicklungen im autonomen Fahren (Digitalisierung) bzw. im Bereich „Mobility-as-Service“ könne das einen höheren Anteil an Flottenfahrzeugen bedeuten. Es wäre dann zu klären, wer diese Flotten betreibe, Automobilhersteller oder spezialisierte Flottenbetreiber wie z.B. Sixt o.ä. Damit wäre man im B2B-Bereich und es entstünden Synergien in der Kreislaufschließung. Für Automobilhersteller würden diese Systeme es erleichtern, die Rohstoffversorgung in bestimmten Bereichen zu sichern und etwa den Nachweis über „Responsible Sourcing“ Praktiken zu erbringen, denn es wäre bekannt, wo recycelt und in welchem Ausmaß recycelt werde und auch die Rechnung über die CO₂-Einspareffekte im Bereich Recycling versus Mining wäre klar positiv. Solche Modelle könnten also attraktiv sein.

Es würde aber eine komplette Umstrukturierung des Geschäfts inklusive Bilanzkennzahlen bedeuten, denn die gesamte Produktion bliebe über 15 Jahre in den Büchern stehen.

Leasing und Pfandmodelle seien eine Option, eine ausreichend hohe Sammelquote sicherzustellen. Solche Modelle müssten gut am Produkt durchdacht sein, etwa müsse die Frage geklärt werden, ob einzelherstellergetriebene oder gepoolte Pfandmodelle implementiert würden. Es wurde auch in diesem Zusammenhang auf die lange Dauer der Pfandleihgabe verwiesen. Leasingmodelle seien in der Automobilindustrie erfunden oder zumindest stark ausgedehnt und gut etabliert und erfolgreich. Attraktiv ausgestaltet sei Leasing eine Möglichkeit, Fahrzeuge und Batterien wieder zurückzubekommen. Dies könne auch ein Ansatz sein, den Abfluss aus Europa einzudämmen. Es solle evaluiert werden, ob Pfandsysteme für Batterien (Batterieleasing) positive Auswirkungen auf die Sammelquoten hätten. Eine dezentrale Batterieannahme und Demontage könne Sammelkosten verringern und Rücklaufquoten erhöhen. Weiters solle die Herstellerverantwortung so weit ausgedehnt werden, dass das Bewusstsein auch bei Herstellern für höhere Rücklaufquoten da sein solle.“

4.2.2 Eco-Design als Chance für eine effiziente Nutzung und Verwertung

„Das Öko-Design von LIB beinhaltet Möglichkeiten für Design for Re-Use und Design for Recycling (DfR). Für beide Varianten ist eine zerstörungsfreie und weitestgehend automatisierte Demontage, also Design for Disassembly eine wichtige Voraussetzung. Die Batterien der ersten und der zweiten Generationen seien noch nicht „recyclingfreundlich“ gestaltet. Der Aufwand beim Zerlegen ist sehr hoch, da der Aufbau der LIB sehr stark variiert.

Die Demontagetiefe sei derzeit mindestens die Modulebene. Ein Zugriff auf die einzelnen Zellen sei meist nicht möglich, da die Zellen miteinander verschweißt seien. Außerdem sei es auf Zellebene zu komplex und insgesamt zu zeitaufwendig. Eine Hochvolt-Fachkraft könne die Zerlegung bis auf Modulgröße vornehmen. Personal mit Erfahrung könne den Demontage-Prozess durchführen. Die Demontagezeit für ein großes Pack betrage 15 bis 45 Minuten, je nach Größe (50 -500 kg) und Grad der Komplexität. Aufgrund der Vielfalt der Batterien sei keine Roboterunterstützung möglich. Alles was nicht zum Modul gehöre (Kühlkanäle, Elektronik, Kabel, ...) werde

entfernt. Demontierte Bauteile würden in Metalle, Elektronikschrott etc. getrennt. Eine weitere Zerlegung der Module finde derzeit nicht statt, da Module so sicherer für die weiteren Schritte (thermische Behandlung) seien.

Wesentlicher Punkt beim Design for Disassembly seien die Verbindungstechnologien. Hier sollen einheitliche Materialien verwendet werden oder gänzlich auf das Verkleben von Bauteilen verzichtet werden (verschraubt und nicht verklebt oder verschweißt). Das Design solle so gestaltet sein, dass die unterschiedlichen Teile gut voneinander lösbar seien z.B. durch Verschrauben und die Verbindungen (z.B. Schrauben) auch für die Demontage gut platziert werden (Demontagerichtung oben/unten; kein Drehen). Verbindung an schwer zugänglichen Stellen solle verhindert werden, sowie wenn die Batterie nur mit zerstörenden Methoden zu öffnen sei. So werde die Arbeitszeit verringert und es entstünden saubere Nebenfraktionen. Viele Wertstoffe fielen daher bei der Demontage an. Dies sei auch der Grund, dass viele OEMs selbst die Batterie zurücknehmen und dass eher nur die Module in der Recyclinganlage landen. Eine modulare Bauweise wäre positiv und solle forciert werden.

Design for Disassembly würde eine zerstörungsfreie und weitestgehend automatisierte Demontage ermöglichen und damit ökonomisch auch in Hochlohnländern realisierbar machen. Eine Demontage sei sinnvoll bei größeren Batterie-Packs, die unterschiedliche Bauteile (Gehäuse, Kabel, Elektronik, ...) verbaut haben, da diese einen anderen Recyclingweg gehen als die Zellen selbst.

Aus der Sicht der Batterie-Pack-Hersteller seien bis jetzt noch keine konkreten Anfragen oder Anforderungen seitens der Kunden bezüglich DfR gekommen. Auch das Interesse der Automobilhersteller daran sei gering und Design for Recycling werde noch nicht mitgedacht.

Je nach Applikation kommen unterschiedliche Zellkonfigurationen und Zellchemien zur Anwendung, daher sei auch ein standardisierter Zellaufbau nicht möglich. Welche Zellen in den Packs verbaut werden, ist jedoch oft nicht bekannt. Bei E-Bikes werden die Batterien teilweise im Rahmen eingebaut, da sei die Trennbarkeit bei der Sammlung nicht mehr gegeben.“

4.2.3 Die Bedeutung des Re-Use von EoL-LIB

„Die Einschätzung der Stakeholder zu der Bedeutung des Second Life von LIB war uneinheitlich und überwiegend verhalten, was die industrienahen Stakeholder betrifft. Während einige Interviewpartner davon überzeugt sind, dass die Wiederverwendung von LIB hohe Bedeutung einnehmen könne und dessen Potenziale genutzt werden sollen, ordnen andere dem Re-Use eine eher untergeordnete Nischenrolle zu. Viele waren sich aber einig, dass Second Life für die Zukunft nicht ausgeschlossen sei. Der Marktanteil von Second-Life-LIB vor allem in stationären Anwendungen könne steigen. Second Life von LIB sei definitiv ein Thema, welches inspiriert, aber es sei generell noch zu früh, um wissenschaftliche Aussagen zum Thema State of Health (SoH) und Sicherheit treffen zu können. Insgesamt werde aber der Anteil an Second-Life-Batterien aufgrund unterschiedlicher Aspekte eher gering ausfallen.“

„So müssten die Batterien getestet werden und sicher sein, bevor sie einem Re-Use zugeführt werden. Der Umbau und die Feststellung des SoH seien zeit- und damit kostenintensiv. BMS, Kühlsystem, Ladeinfrastruktur, all dies müsse zusammenspielen. Technisch mache die

Wiederverwendung vor allem von Traktionsbatterien Sinn. Das Potenzial zur weiteren Nutzung von Traktionsbatterien scheint auch aufgrund der Masse und dem damit verbundenen Wert ökologisch und ökonomisch möglich. Die größten Herausforderungen seien aber die Feststellung und Bewertung der Restkapazität (vor allem des State of Health), den SoH im laufenden Betrieb zu bestimmen, sei nicht das Problem, vielmehr sei es schwierig den SoH nach der Nutzung zu bestimmen. Hier gäbe es großen Forschungsbedarf. Alterungsmodelle hätten keinen stetigen Verlauf („irregular cell death“ oder auch „sudden death“ Mechanismen). Zellen sind derzeit für eine Lebensdauer von bis zu 30 % Kapazitätsverlust getestet und freigegeben. Fragen zur Sicherheit, Garantie, Produkthaftung und Übertragung der Recyclingpflicht müssten geklärt werden. Angesichts der großen Bandbreite an unterschiedlicher Zellchemie sei es keine einfache Aufgabe, ein entsprechendes Risikomanagement zu etablieren. Damit ergeben sich hohe Risiken für Vertreiber von Second Life-Batterien (Kostenrisiko, volatile Batteriepreisentwicklung, niedrige Zahlungsbereitschaft durch geringe Akzeptanz für gebrauchte Produkte) und auch für den Nutzer/Endkunden (Sicherheit, Qualität, Garantie, Performance, Kosten, Updatefähigkeit der Software, Restnutzungsdauer).“

„Die Interviewpartner sind sich jedoch einig: Solange die Batteriekosten weiter sinken und die Kosten für die Vorbereitung zur Wiederverwendung von Batterien so hoch sind, mache Second Life ökonomisch betrachtet, wenig Sinn. Der Preis einer Second Life-Batterie müsse unter dem Preis einer Primär-Batterie liegen. Neue Batterien werden aber nach einer Regelnutzungsdauer der LIB von ca. zehn Jahren preisgünstiger sein. Dies sei für das Etablieren von Second Life-Anwendungen zu berücksichtigen. Hinzu komme, dass Batterien sehr vielfältig und komplex sind, was eine industrielle Perspektive im Bezug einer Aufbereitung für eine Wiederverwendung erschwere. Dass es derzeit keine automatisierte Demontage gebe, sei auf zu wenig standardisierte Batteriesysteme zurück zu führen. Wenn Second Life angewendet werden solle, dann müsse gefördert werden bzw. bedürfe es Anreize seitens der Politik.“

„Einen gewissen Markt für Second-Life Anwendungen sehen manche Stakeholder in der Verwendung von Batterieersatzteilen (Modulen) aus Altbatterien zur Ertüchtigung von gebrauchten Altbatterien (Refurbishment). Wenn jemand ein zehn Jahre altes E-Auto habe, brauche er vermutlich keine nagelneue Batterie mehr und werde sich mit einer aufbereiteten Batterie zufriedengeben. Dies stelle aber kein riesiges Marktpotenzial dar.“

„Ein Stakeholder war der Auffassung, dass es am nachhaltigsten sei, das Auto so lange wie irgend möglich zu fahren und somit die LIB für den Automobilbereich zu verwenden.“

Die Vertreter aus der Recyclingindustrie äußerten sich skeptisch bezüglich des hohen Kobaltgehaltes von NMC-Batterien, der im Laufe der Zeit abnehmen werde. Die Frage sei, ob ein Re-Use dieser Batterien sinnvoll sei, weil damit der hohe Kobaltanteil der Altbatterien blockiert und die Produktion mehrerer neuer Batterien auf Basis des Kobaltgehalts einer Altbatterie blockiert werde.“

„Sollte also ein Second-Life etabliert werden, dann müssten auch neue Geschäftsmodelle aufgesetzt werden z.B. Product-Service Systems, bei denen Auto- oder Batteriehersteller das Eigentum an den Batterien behalten (wie z.B. bei Renault über Leasing Modelle geschehen) und auch gesetzliche Anreize geschaffen werden, um die Bedeutung an Re-Use für LIB zu erhöhen, sonst bleibe das Second Life ein Nischengeschäft für Bastler. Wenn man Second Life möchte,

dann müsse man auch gefördert werden. Weiters könnten gesetzliche Anreize die Bedeutung von Re-Use für LIB nochmals steigern. Außerdem brauche es bewusstseinsbildende Maßnahmen, um die Vorteile von Second-Life-Batterien gegenüber neuen Batterien (Ressourcenschonung und Klimaschutz) aufzuzeigen. OEMs sollten unkritische Daten insbesondere zur Bestimmung des SoH der Batterien und zum Nutzungsverhalten sammeln und bereitstellen, um die restliche Lebensdauer besser abschätzen zu können. Zusätzlich müssten Schnelltests für die Alterungsmessung entwickelt werden.“

4.2.4 Wirtschaftspolitische Instrumente und Rahmenbedingungen für ein wettbewerbsfähiges Recycling in Europa

„Das erhöhte Aufkommen an Altbatterien in der EU bietet auch die Chance durch ein nachhaltiges Recycling die Rohstoffversorgung zu sichern und klimaschonend zu agieren. Positive Effekte seien die Verringerung der Importabhängigkeit, die Milderung von Preisschwankungen, eine Steigerung der Wertschöpfung und Beschäftigung sowie eine Reduktion der mit der Primärextraktion verbundenen negativen Umweltauswirkungen.

Es sei sinnvoll, wie jetzt mit der neuen EU-Batterieverordnung anvisiert werde, Vorgaben für Recyclingquoten für kritische Elemente bzw. Funktionsmaterialien vorzugeben, die z.B. einen hohen CO₂-Fußabdruck aufwiesen oder anderweitig umweltschädlich oder kritisch im Sinne von knapp seien. Es sei wichtig, dass man von unspezifischen massenbezogenen Recyclingquoten wie bisher gesetzt wegkomme. Die neue EU-Batterie Verordnung gehe daher in die richtige Richtung.

„Öko-Design Standards seien generell zu begrüßen, allerdings sei es fraglich, ob sie relevant seien, da man beobachten könne, dass die neueren Batteriegenerationen ohnehin relativ recycling-gerecht konstruiert seien. Die Hersteller haben gerade deshalb, weil sie für die Kosten des Recyclings verantwortlich seien, ein Eigeninteresse daran, dass die Produkte gut recycelbar seien. Denn wenn die Batterien nicht vernünftig demontierbar seien und jemand müsse die Batterie aufwendig zerlegen, wären das Kosten, an denen niemand Interesse habe.“

CO₂-Steuern wurden als Schlüssel in der Klimaproblematik bezeichnet, spielten aber bei der Einschätzung der Stakeholder zu den wirtschaftspolitischen Rahmenbedingungen für das Recycling von LIB ebenso wie Ressourcensteuern keine wesentliche Rolle. Vielmehr wurde generell die zentrale Bedeutung von Verordnungen, Vorgaben und Quoten betont. Lücken gebe es im Bereich der Eco-Design Vorgaben für LIB, das zentral für das Recycling sei. Ein Stakeholder war der Auffassung, dass Eco-Design Vorgaben auch maßgeblich in die Zulassung von Batterien einfließen sollten.“

„Befragt zu der Rolle von Sekundärrohstoffpreisen für ein wettbewerbsfähiges Recycling, bemerkte ein Stakeholder, dass der Sekundärmaterialprozess – zumindest sobald das Batteriesystem demontiert sei – schon jetzt preisgünstiger sei als der Primärmaterialprozess und dass das Recycling von LIB daher wirtschaftlich ein gutes Potenzial biete. Die Herausforderung sei derzeit der Aufwand bei der Demontage, die noch wenig automatisiert sei und in der noch viele Kosten steckten. Wenn man das besser hinbekomme, sei schon per se die Wirtschaftlichkeit höher als das beim Einsatz von Primärmaterialien. Hier gebe es aber noch große Fragezeichen. Darüber hinaus würden aber die EU Battery Directive und entsprechende nationale Verordnungen

auch dafür sorgen, dass die hohen Rückfuhr- bzw. Recyclingquoten gesetzlich vorgeschrieben seien, auch wenn es dadurch teurer werde. Irgendwann werden auch die natürlichen Ressourcen knapper und die Materialpreise steigen, daher werde sich die Preisdifferenz ohnehin nivellieren. Wenn es wie heute teilweise noch teurer sei, weil die Massen-Recyclingwege noch nicht so erschlossen seien, dann sei eher die Frage, wer das Recycling bezahle. Daher gebe es durchaus die Vorschriften, dass die Fahrzeughersteller verpflichtet seien, die LIB wieder zurückzunehmen (Produzentenverantwortung).“

4.2.5 Förderung von Forschung und Entwicklung für LIB

Die Abschnitte zu Rücklauf, Öko-Design und Wiederverwendung von LIB zeigen bereits zahlreiche FTI-Bedarfe in unterschiedlichen Disziplinen auf:

- Zunächst können **Foresight**-Analysen hilfreich sein, z.B. zur Abschätzung der Frage, in welche Richtung sich etwa batterieabnehmende Branchen wie die Automobilbranche entwickeln, in Richtung Sharing-Flotten, oder einfach in elektrifizierte individuelle Mobilität? Daraus ergeben sich wichtige Implikationen für das Recycling von LIB.
- Wesentlich für eine Forcierung von LIB-Recycling sind auch **betriebswirtschaftliche** Analysen und Forschung zu neuen Geschäftsmodellen³³ – Stichwort „Product-as-Service“, mit Implikationen auch für Pfandleihsysteme und die buchhalterische Erfassung in den Unternehmen, wenn Batterien etwa für ihre Lebenszeit beim Hersteller verbleiben, statt in das Eigentum des Kunden überzugehen; auch die Praktikabilität unterschiedlicher Batteriepfandsysteme kann betriebswirtschaftlich untersucht werden.
- **Technologischer** Forschungs- und Entwicklungsbedarf entsteht vor allem beim Design for Recycling und wenn eine Steigerung der Wiederverwendung von LIB angestrebt wird:
 - Das Design for Recycling, also für die Rückgewinnung der Materialien nach der Erstnutzung, würde etwa von neuen Verbindungstechnologien profitieren, die eine leichte bzw. weniger aufwändige Demontage nach der Erstnutzung ermöglichen, sowie generell von einer Modulbauweise und einer deutlich erhöhten Standardisierung.
 - Die größten Herausforderungen für eine Steigerung der Wiederverwendung von Batterien nach der Erstnutzung sind die Feststellung und Bewertung der Restkapazität (vor allem des State of Health) nach der Nutzung. Auch hier spielt leichte Demontage eine Rolle, denn sie würde gebrauchte Batterien günstiger machen. Aufgrund der Preisvorteile neuer Batterien benötige die Forcierung der Wiederverwendung besondere politische Anreize und Förderung, auch das Zusammenspiel mit Geschäftsmodellen, product-as-service, mit erforderlichen Haftungsregelungen und Bewusstseinsbildung für die Bedeutung von second-hand-Batterien für den Umweltschutz.

³³ Die Europäische Umweltagentur hat zum Thema „Business Models in a Circular Economy“ einen Bericht mit einem Fallbeispiel für die Textilwirtschaft vorgelegt (EEA, 2021).

- **Mögliche Fördermodelle** für FTI zum LIB-Recycling (siehe nachfolgend die Statements der Stakeholder) weisen neben klassischen Programmförderungen etwa für angewandte Forschung, die im FFG-Portfolio aber noch einen zu geringen Schwerpunkt aufwiesen, umfassen Pilotanlagen, Forschungsinfrastruktur und v.a. Kooperationsmodelle zwischen Wissenschaft und Wirtschaft, die auch gezielt Förderanträge einreichen könnten.
- Flankierend zu FTI sei auch eine Stärkung der einschlägigen **Ausbildung** in Österreich notwendig, die noch zu wenig in den Lehrplänen verankert sei.

Im Nachfolgenden die Statements der Stakeholder zu F&E-Förderung von LIB:

„Förderungen für R&D-Modellvorhaben bzw. für die R&D-Infrastruktur wurden in der ersten Phase der Implementierung einer Recyclingkette am wichtigsten erachtet, um das Know-How aufzubauen und voranzutreiben und um Pilotanlagen zu etablieren, in denen ordentlich geforscht werden könne, in Österreich z.B. in Leoben. Zu überlegen sei, inwieweit das im Schulterschluss mit der Industrie erfolgen solle. Es wurde beispielhaft auf eine spezielle Unternehmensform eines Industrieclusters in der pharmazeutischen Industrie in Österreich verwiesen, nämlich das Research Center Pharmaceutical Engineering GmbH (RCPE), das halb industriell, halb wissenschaftlich agiere. So ein Format mit einer engen industriell-wissenschaftlichen Kooperation, mit dem auch Förderungsanträge bei der Regierung gestellt werden können, sei, wenn man das für das Recycling aufbauen würde, wertvoll.

Ein deutscher Interview-Partner gab zu Protokoll, dass in Deutschland in den letzten 10 Jahren durchgängig und weithin gefördert wurde. Es gab Lob für die deutsche Industriepolitik in diesem Bereich, denn man habe vor dem großen Rücklauf von LIB in die Abfallwirtschaft gefördert. Es waren sehr erfolgreiche und sinnvolle Programme dabei, die zu einem großen Teil Eingang in die industrielle Praxis fanden, wie z.B. Projekte bei Duesenfeld, verschiedene Projekte der RWT Aachen und Accurec, Umicore Projekte etc. Das Modell von Verbundforschungsvorhaben aus Universitäten und Industrie sei ein gutes Modell, weil die Forschung an den Universitäten mit den industriellen Realitäten gekoppelt werde. Über diese Schiene werde entsprechend Nachwuchs ausgebildet anhand von Promotionen, Master- und Bachelorarbeiten. Letztlich finden diese Erkenntnisse Eingang in die Lehre in diesen Bereichen. Eine weitere Förderung sei durchaus sinnvoll, gerade bezüglich der zukünftigen Batteriegenerationen, weil sich LIB stark verändern werden.

Ein Stakeholder gab zu Protokoll, dass er in Österreich ein gut aufgesetztes Fördersystem sehe, mit Unternehmensförderungen als auch kooperativen Projekten mit Universitäten. Es gebe FFG Basisprogramme, in denen eher Single-Firm Projekte gefördert werden und es gebe Investitions-Umweltförderungen. Alle diese Förderschienen seien wichtig. Vielleicht gebe es noch einen zu geringen Schwerpunkt im Bereich Batterien, das könne noch mit Expert*innen diskutiert werden.

Ein Stakeholder erklärt, dass es schwierig sein, Know-How Träger im Bereich der LIB-Technologie in Österreich zu rekrutieren. Österreich sei zwar ein Innovationsland, aus der Industrie vernehme man jedoch, dass es Probleme gebe, Fachkräfte im Bereich LIB zu rekrutieren. Arbeitskräfte mit Wissen im Bereich LIB gebe es fast gar nicht und wenn, werde das Wissen vor Ort aufgebaut.

Auch die Unis, FHs und Lehrberufe seien nicht für den LIB Bereich ausgelegt, der Lehrplan wurde noch nicht spezifisch auf Batterien angepasst.“

4.3 Schlussfolgerungen

Die Analyse strategischer Handlungsfelder für den Aufbau einer Wertschöpfungskette für das Recycling von LIB lässt folgende Schlussfolgerungen zu:

- Die Etablierung einer zirkulären Wertschöpfungskette erfordert wirtschaftspolitische Rahmenbedingungen hinsichtlich der angestrebten Recyclingquoten. Die Recyclingquoten sollten möglichst präzise definiert werden und auf einzelne Funktionsmaterialien abstellen, wie es in der Novellierung der EU-Batterie-Verordnung (Europäische Kommission 2020) vorgeschlagen wird, um ein Downcycling zu verhindern und qualitativ hochwertige Sekundärressourcen zu produzieren.
- Standardisierte Vorgaben für ein Öko-Design von LIB gelten als Voraussetzung für eine automatisierte und kosteneffiziente Demontage und Recyclierbarkeit von LIB in Hochlohnländern.
- Neue Geschäftsmodelle wie Product-Service-Systems, aber auch Pfand- und Leasingmodelle, können den Rücklauf von LIB und somit ein wettbewerbsfähiges Recycling sicherstellen.
- Die Entwicklung von zirkulären Wertschöpfungsketten ist produkt- bzw. stoffstromspezifisch und erfordert sektorspezifische Handlungsansätze.
- Forschung und Entwicklung sowie öffentliche Fördersysteme hinsichtlich von Pilotanlagen sowie wissenschaftlich-industrielle Forschungsk Kooperationen werden als notwendig erachtet, um zirkuläre Wertschöpfungsketten zu entwickeln.

Das Beispiel des Recyclings von LIB illustriert damit modellhaft die wirtschafts- und FTI-politischen Herausforderungen, die mit einer Transformation in Richtung Kreislaufwirtschaft einhergehen: einzelne Instrumente einführen, bzw. an einzelnen Schrauben drehen, wie etwa nur eine höhere CO₂-Steuer zu etablieren, oder nur ein allgemeines F&E-Förderprogramm für Kreislaufwirtschaft aufsetzen, reicht nicht aus, um die Transformation voranzutreiben. Ein umfassendes, auf einzelne Branchen oder Stoffströme abgestimmtes Set an Maßnahmen ist notwendig, um die Kreislaufwirtschaft zu forcieren, darunter regulatorische Vorgaben, F&E, neue Geschäftsmodelle, Bewusstseinsbildung, Ausbildung etc. Zudem müssen die europäischen Rahmenbedingungen mitbedacht werden.

5. Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse und FTI-politische Schlussfolgerungen

Die Bedeutung und das Interesse an Kreislaufwirtschaftskonzepten liegen vor allem darin begründet, dass sich auf deren Grundlage Lösungen für umwelt- und klimapolitische Anliegen entwickeln lassen, die auch neue wirtschaftliche Spielräume eröffnen und zentrale marktwirtschaftliche Grundsätze, wie etwa die effiziente Nutzung von Ressourcen, in den Vordergrund stellen. Durch Kreislaufwirtschaft gesteigerte Ressourceneffizienz bedeutet im Wesentlichen, das Streben nach einer höheren Wertschöpfung bei geringerem Einsatz natürlicher Ressourcen. Die Transformation der Wirtschaft nach kreislaufwirtschaftlichen Prinzipien wird somit als ein Streben nach einem nachhaltigen Wirtschaftswachstum wahrgenommen.

Drei zentrale Säulen der Transformation hin zu einer Kreislaufwirtschaft sind die **effizientere Nutzung von Ressourcen, die Verlängerung von Produktlebenszyklen und die Verringerung des Produktionsausstoßes sowie Abfallminimierung**. Der Versuch einer Quantifizierung diesbezüglich relevanter Innovationsanstrengungen für Österreich zeigt, dass kreislauforientierte Innovationstätigkeiten sowohl in absoluten Zahlen und anteilmäßig im österreichischen Innovationssystem bislang nur eine untergeordnete Rolle spielen. Die durch die FFG geförderten Gesamtkosten an F&E Projekten im Bereich der Kreislaufwirtschaft stellen nur einen sehr geringen Prozentanteil an den gesamten durch die FFG geförderten F&E Gesamtkosten dar (zwischen 3 und 4,5%). Die Analyse der technologischen und kommerziellen Bedeutung dieser Erfindungen zeigt jedoch, dass trotz deren geringer Bedeutung im österreichischen Innovationssystem, technologisch und kommerziell relevante Erfindungen in Österreich auf dem Gebiet der Kreislaufwirtschaft, sowie im Bereich unterstützender Technologien (Industrie 4.0; industrielle Biotechnologie) gemacht werden. Dies dürfte sich auch im Warenhandel niederschlagen, wo im Bereich kreislaufwirtschaftsrelevanter Waren und Güter ein Handelsbilanzüberschuss erzielt wird.

Wie kann die Transformation zur Kreislaufwirtschaft in Österreich forciert werden? Auf einer allgemeinen industriepolitischen Ebene erfordert der Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft umfangreiche Innovationsaktivitäten sowohl in der Adoption als auch in der Entwicklung geeigneter Technologien und neuer Geschäftsmodelle, aber auch regulatorische Weiterentwicklungen und gesellschaftliche Bewusstseinsbildung sowie Ausbildungsmaßnahmen. Dies ist für Unternehmen und Gesellschaft sowohl eine Herausforderung als auch eine große Chance. Die Europäische Union setzt daher im Grünen Deal beim Thema Kreislaufwirtschaft auf eine enge Verzahnung mit der Industriepolitik, die als eine breit angelegte Strategie zu verstehen ist, die Initiativen zur Stärkung von für die Kreislaufwirtschaft notwendiger

- Forschung und technologischer Entwicklungen,
- Qualifikation und Humankapital,
- Öffentliche Nachfrage,
- Transparenz und Information sowie

- Awareness bei Unternehmen und KonsumentInnen,

unterstützt. Im Unterschied zur Europäischen Union fehlt in Österreich eine eigenständige industriepolitische Strategie, weshalb diese auch nicht direkt mit den Zielsetzungen der Kreislaufwirtschaft verzahnt ist.

Das konkrete Fallbeispiel der Herausforderungen für die Etablierung einer zirkulären Wertschöpfungskette im Bereich von LIB illustriert modellhaft die breiten wirtschafts-, gesellschafts- und FTI-politischen Ansätze, die für eine Transformation in Richtung Kreislaufwirtschaft notwendig sind: einzelne Instrumente einführen, bzw. an einzelnen Schrauben drehen, wie etwa nur eine höhere CO₂-Steuer zu etablieren, oder nur ein allgemeines F&E-Förderprogramm für Kreislaufwirtschaft aufsetzen, reicht nicht aus, um die Transformation voranzutreiben. Ein umfassendes, auf einzelne Branchen bzw. Stoffströme abgestimmtes Set an Maßnahmen ist notwendig, darunter regulatorische Vorgaben, F&E-Förderung, neue Geschäftsmodelle, Ausbildungsschienen, Bewusstseinsbildung etc. Zudem müssen die europäischen Rahmenbedingungen mitbedacht werden. Anstrengungen in diesem Bereich sind für die Erreichung der Klimaziele besonders wichtig, da eine weltweit konzertierte Anstrengung zur Erreichung der Pariser Klimaziele eine Vervierfachung des Rohstoffbedarfs für saubere Energietechnologien bis 2040 bedeuten. Batteriespeichersysteme benötigen in der Regel weitaus mehr Rohstoffe als ihre auf fossilen Brennstoffen basierenden Pendanten. Ein typisches Elektroauto benötigt demnach etwa sechsmal so viele mineralische Rohstoffe wie ein herkömmliches Auto. Die Transformation des Energiesystems geht also mit einer Veränderung der Nachfrage nach Rohstoffen einher - von fossilen Ressourcen hin zu Metallen.

Welche konkreten Implikationen ergeben sich für die österreichische FTI-Politik?

Erstens, FTI-Politik kann nur ein Aspekt bei der Transformation Richtung Kreislaufwirtschaft sein. Dies erfordert einen „whole of government“-Ansatz, d.h. die verstärkte Koordination unterschiedlicher Akteure, etwa Stakeholder oder Ministerien mit unterschiedlichen Aufgabengebieten, um abgestimmt effektive Maßnahmen setzen zu können, nicht nur innerhalb Österreichs, sondern auch bezüglich der europäischen Aktivitäten. Transformation benötigt Koordination. Ein Beispiel ist die Einbettung eines thematischen Förderprogramms für Kreislaufwirtschaft in ein breiteres Konzept, das auch Foresight, Geschäftsmodelle, Regulierung, Bewusstseinsbildung etc. mitberücksichtigt und im Idealfall auch sektoral spezifisch vorgeht, nachdem die Herausforderungen, wie das LIB Beispiel gezeigt hat, sich je nach Branche bzw. Produkt unterscheiden können. Hier gilt es für jede Branche, für unterschiedliche Wertschöpfungsketten oder für spezifische ortsgebundene Systeme, wie etwa urbane Räume, die wichtigsten Hebel der Transformation zu identifizieren, Maßnahmen zu entwickeln, die an diesen Hebeln ansetzen. Dabei muss es sich nicht immer um rein technologische Probleme handeln. Regeln oder Bestimmungen, Marktstrukturen, Produktionstechnologien, Finanzierungsprobleme oder etablierte Handlungsnormen können ebenso einer Transformation im Wege stehen.

Wichtig ist auch die Koordination mit anderen strukturpolitischen Maßnahmen. Kreislaufwirtschaft erfordert spezifische unterstützende Infrastruktur, die von einzelnen Unternehmen nicht

profitabel breitgestellt werden kann und damit zu Koordinationsversagen führt. Ein Beispiel hierfür sind digitale Netzwerke mit hohen Sicherheitsstandards und Kommunikationstechnologien. Die Nachverfolgung von Bauteilen, Materialien und Produkten stellen einen wichtigen Bestandteil kreislaufwirtschaftlicher Technologien und der Etablierung neuer Geschäftsmodelle dar. Hier bestehen also Überschneidungen zu strukturpolitischen Handlungsfeldern, wie etwa die Förderung von Industrie 4.0 Technologien und der entsprechenden unterstützenden Infrastruktur.

Es ist also wichtig Portfolios von Maßnahmen, die unterschiedliche strukturpolitische Bereiche umfassen zu entwickeln und deren Umsetzung zu koordinieren. Der Rat für FTE könnte ein Koordinationsakteur sein, der diesbezüglich beiträgt, unterschiedliche Akteure zu vernetzen oder auf Vernetzungspotenzial zumindest aktiv hinweist. Dies könnte gerade für den Bereich Intelligence effektiv sein – das Beispiel LIB illustriert, dass jede Branche unterschiedliche Anforderungen hat. Der Beitrag zur Erarbeitung abgestimmter „Masterpläne“ für die Forcierung der Transformation in unterschiedlichen Branchen könnte seitens des Rats etwa in der Koordination der notwendigen Abstimmungsprozesse zwischen Stakeholdern in der Planungsphase, aber auch zur Finanzierung vernetzter Analysen und Studien bestehen – ein Analyseprogramm für die nächsten Jahre könnte eine Richtschnur für konkrete Aktivitäten zur Transformation Richtung KLW bieten.

Zweitens, wie die Analyse zeigte, sind die FTI-Aktivitäten sowohl förderungs- als auch leistungsseitig ausbaufähig, womit eine höhere finanzielle Dotation, eine Schwerpunktsetzung einhergehen würde. Dies zeigt sich sowohl allgemein für Kreislaufwirtschaftsaktivitäten als auch spezifisch für LIB, bei denen der österreichische Wertschöpfungsanteil etwa im Automobilbereich besonders hoch ist und wo deshalb auch industriepolitisch eine Schwerpunktsetzung zu überlegen wäre. „Picking the winner“-Risiken sind hier reduziert, weil es nicht darum geht, einzelne Unternehmen zu stärken, sondern Probleme zu lösen, auf der Basis der besten Anträge.

Drittens, herkömmliche thematische Förderansätze in Österreich beruhen in der Regel auf einem bottom-up Ansatz – unter einem Oberthema können etwa Unternehmen frei ihre Anträge einreichen. Es wäre zu überlegen, im Einklang mit den Überlegungen zur Umsetzung von Missionen, spezifische Ziele für Förderaktivitäten zu setzen und dazu pro-aktiv mögliche Fördernehmer anzusprechen und zu vernetzen, um konkrete Fortschritte bezüglich definierter technologischer Ziele zu erreichen. Ein Beispiel wäre die Verbesserung von Design for Recycling von LIB, oder des SoH von LIB (welche Schritte braucht es, um...). Dies entspricht auch dem Trend der „ARPA“-orientierten Förderagenturen, wie dem European Innovation Council, oder dem Wellcome Leap-Fund. Dabei muss das kleinere österreichische Umfeld mitbedacht werden, im Sinn einer Prüfung, ob es im Land selbst genug Potenzial gibt, wirklich technologische Fortschritte bezüglich eines Ziels zu setzen, oder ob von vornherein diese Aktivität auf europäischer Ebene besser angesiedelt wäre. Dies erfordert jedenfalls ein Umdenken bei österreichischen Förderagenturen, mit einer stärker pro-aktiven Rolle des Programmmanagements.

Viertens, in Bezug auf Fördermodelle illustriert das Beispiel LIB das mögliche Potenzial von Kooperationen zwischen Wissenschaft und Wirtschaft. In Österreich werden COMET-Zentren themenoffen gefördert. Eine Überlegung wäre, in Zukunft COMET-Zentren bewusst zur Lösung

spezifizierter wissenschaftlich-technologischer Herausforderungen einzurichten, etwa zur Bestimmung des SoH von Batterien. Solche Überlegungen müssen sich aber – wie bisher in COMET gehandhabt - nach österreichischen Stärkefeldern richten, es müssen Kompetenzen vorhanden sein, die Forschung und Entwicklung zumindest auf EU-Niveau ermöglichen.

Literaturverzeichnis

- Beigl, P., Scherhauer, S., Jandric, A., Salhofer, S., Nigl, T., Altendorfer, M., Rutrecht, B., Pomberger, R., Meyer, I., Sommer, M. (2021). Entwicklung einer Wertschöpfungskette für des Recycling von Lithium-Ionen-Batterien (LIB) in Österreich, Endbericht, Studie gefördert durch den Klima- und Energiefonds, Wien. https://www.wifo.ac.at/jart/prj3/wifo/resources/person_dokument/person_dokument.jart?publikationsid=67942&mime_type=application/pdf
- Blomsma, F., Pieroni, M., Kravchenko, M., Pigosso, D.C.A., Hildenband, J., Krstinsdottir, A.R., Kristoffersen, E., Shabazi, S., Nielsen, K.D., Jönbrink, A.-K., Li, J., Wiik, C., McAloone, T.C. (2019). Developing a circular strategies framework for manufacturing companies to support circular economy-oriented innovation. *Journal of Cleaner Production* 241, 118271, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118271>
- Bloodworth, A., Petavratzi, E., Gunn, G. (2019). Metals and Decarbonisation: A Geological Perspective, Science Briefing Paper July 2019, BGS (British Geological Service), <https://www.bgs.ac.uk/download/science-briefing-paper-metals-and-decarbonisation> (21.04.2021).
- BMK (2021). Die österreichische Kreislaufwirtschaft. Österreich auf dem Weg zu einer nachhaltigen und zirkulären Gesellschaft, Wien: BMK.
- Cantzler, J., Creutzig, F., Ayargarnchanakul, E., Javaid, A., Wong, L., Haas, W. (2020). Saving resources and the climate? A systematic review of the circular economy and its mitigation potential. *Environmental Research Letters* 15, 123001, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abbab7>
- Circle Economy (2021). The Circularity Gap Report 2021, <https://drive.google.com/file/d/1MP7EhRU-N8n1S3zpqzshNWxqFR2hznd/edit>
- Clausen, J., Niebel, T., Hintemann, R., Schramm, S., Axenbeck, J., Iffländer, S., (2022). Klimaschutz durch digitale Transformation: Realistische Perspektive oder Mythos?, Berlin: Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit (in Kooperation mit ZEW und KDO).
- De Jesus, A., Antunes, P., Santos, R., Mendoca, S. (2018). Eco-innovation in the transition to a circular economy: An analytical literature review. *Journal of Cleaner Production* 172, S. 2999-3018.
- Deloitte (2016). Circular economy potential for climate change mitigation. Deloitte.
- Deloitte (2020). Covid-19. Managing supply chain risk and disruption. Deloitte Canada.
- Die neue Volkspartei, Die Grünen – Die Grüne Alternative (2020). Aus Verantwortung für Österreich. Regierungsprogramm 2020-2024, Wien.
- EEA (2021). Business Models in a Circular Economy, Eionet Report – ETC/WMGE 2021/2, European Environment Agency, European Topic Centre on Waste and Materials in a Green Economy.
- EMF (Ellen MacArthur Foundation), Material Economics (2021). Completing the Picture. How the circular economy tackles climate change. <https://emf.thirdlight.com/link/w750u7vysuy1-5a5i6n/@/preview/1?o>
- EMF (Ellen MacArthur Foundation), (2013). Towards the Circular Economy: Opportunities for the consumer goods sector. Ellen MacArthur Foundation, 1–112. <https://doi.org/10.1162/108819806775545321>
- EMF (Ellen MacArthur Foundation), (2022). What is a Circular Economy? <https://ellenmacarthurfoundation.org/topics/circular-economy-introduction/overview>
- Europäische Kommission (2015). Den Kreislauf schließen – Ein Aktionsplan der EU für die Kreislaufwirtschaft. Mitteilung der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen über die Umsetzung des Aktionsplans für die Kreislaufwirtschaft. COM(2015) 614 Final, Brüssel.
- Europäische Kommission (2017). Bericht der Kommission an das Europäische Parlament, den Rat, den Europäischen Wirtschafts- und Sozialausschuss und den Ausschuss der Regionen über die Umsetzung des Aktionsplans für die Kreislaufwirtschaft. COM(2017) 33 Final, Brüssel.
- Europäische Kommission (2019). Der europäische Grüne Deal, COM(2019) 640, Brüssel: Europäische Kommission.
- Europäische Kommission (2020). Anhänge des Vorschlags für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates über Batterien und Altbatterien zur Änderung der Verordnung (EU) 2019/1020 und zur Aufhebung der Richtlinie 2006/66/EG, COM(2020)798final, Brüssel, den 10.12.2020.

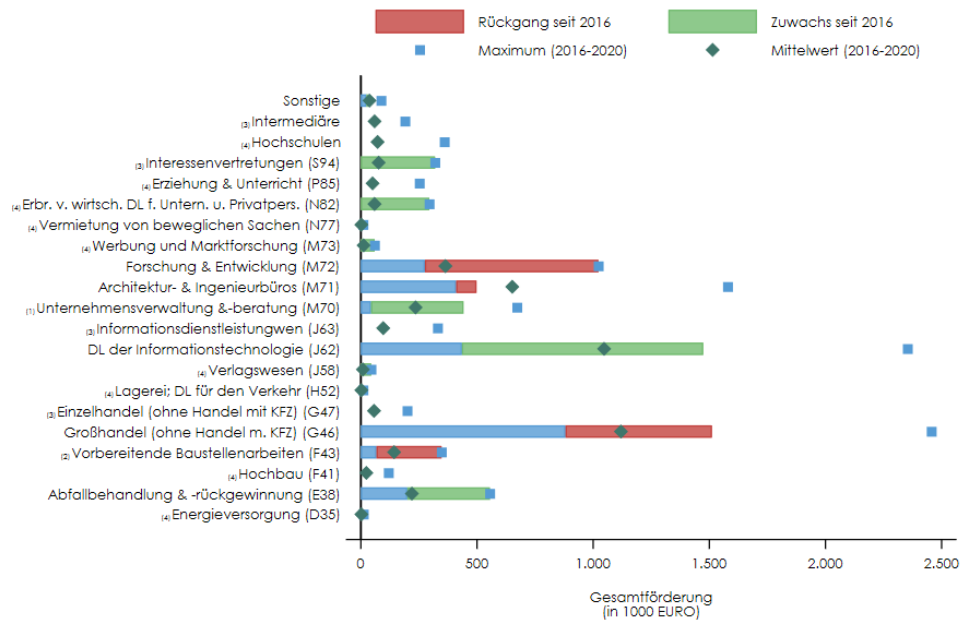
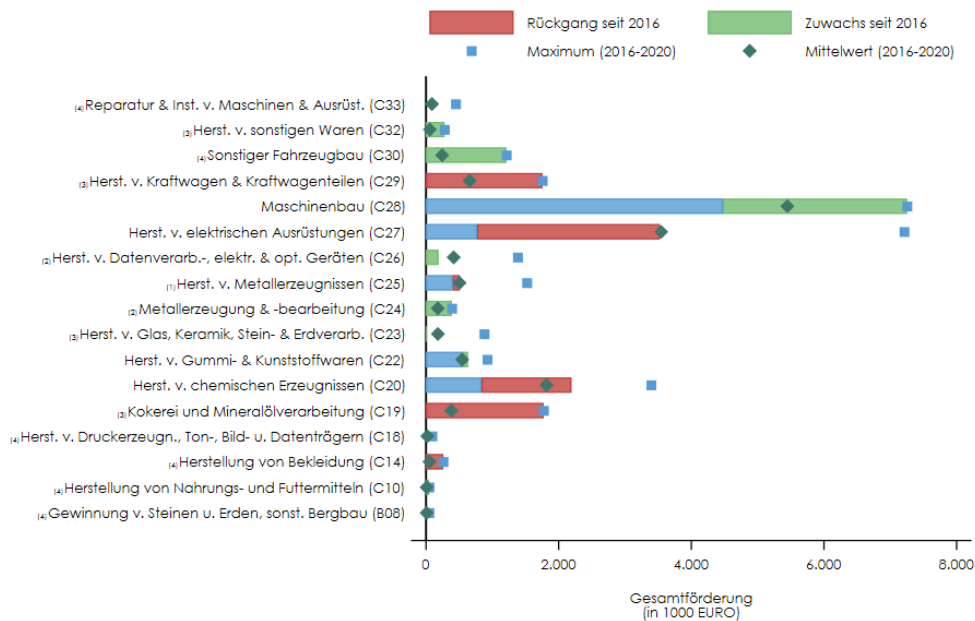
- Europäische Kommission, (2021). Kriterien für die Würdigung der Vereinbarkeit von staatlichen Beihilfen zur Förderung wichtiger Vorhaben von gemeinsamem europäischem Interesse mit dem Binnenmarkt, Brüssel: Europäische Kommission.
- European Commission (2018). Annex to the Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions, Europe on the Move, Sustainable Mobility for Europe: safe, connected and clean, Annex 2, COM(2018) 293 final, Brussels, 17.05.2018.
- European Commission (2020a). A New Industrial Strategy for Europe, COM(2020) 102, Brussels: European Commission.
- European Commission, (2020b). A new Circular Economy Action Plan For a Cleaner and More Competitive Europe, Brussels: European Commission.
- European Commission (2020c). Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU. A Foresight Study. European Commission, Joint Research Centre, Luxembourg.
- European Commission (2020d). A New Industrial Strategy for Europe. European Commission, COM(2020) 102 final, Brussels.
- European Commission (2021). In focus: Batteries – a key enabler of a low-carbon economy, News, 15 March 2021, Brussels, https://ec.europa.eu/info/news/focus-batteries-key-enabler-low-carbon-economy-2021-march-15_en?pk_campaign=ENER%20Newsletter%20March%202021
- Europäisches Patentamt (2017). Patents and the fourth industrial revolution. The inventions behind digital transformation. München.
- Europäisches Patentamt (2020). Innovation in batteries and electricity storage. A global analysis based on patent data. München.
- Europäisches Patentamt (2021). Patents and the energy transition: Global trends in clean energy technology innovation. München.
- Eurostat (2009). The environmental goods and services sector- Eurostat Luxembourg.
- Fraunhofer Austria, TU Wien, Smart Mobility Power (2020). E-MAPP 2, E-Mobility – Austrian Production Potential, Qualification and Training needs, Studie im Auftrag des Klima- und Energiefonds.
- Garsous, G. (2019). Trends in policy indicators on trade and environment. OECD Trade and Environment Working Papers 2019/01
- Gaulier, G., Zignago, S. (2010). BACI: International Trade Database at the Product-Level. CEPII Working Paper 2010-23, <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1994500>
- Goldschlag, N., Lybbert, T., Zolas, N. (2019). An 'Algorithmic Links with Probabilities' Crosswalk for USPC and CPC Patent Classifications with an Application Towards Industrial Technology Composition, Economics of Innovation and New Technology 1, S. 1-21
- Guellec, D., van Pottelsberghe de la Potterie, B. (2007). The economics of the European patent system. Oxford University Press, Oxford.
- Hall, B. H., Jaffe, A., Trajtenberg, M. (2005). Market value and patent citations. RAND Journal of Economics, 36(1), S. 16–38.
- Hanemaaijer, A., Potting, J., Delhaye, R., Gazevles, J., Hoekstra, R., Lijzen, J. (2018). Circular economy: what we want to know and can measure. Framework and baseline assessment for monitoring the progress of the circular economy in the Netherlands. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, Den Haag
- Higham, K., de Rassenfosse, G., Jaffe, A. (2020). Patent Quality: Towards a Systematic Framework for Analysis and Measurement, NBER Working Paper No. 27598 https://www.nber.org/system/files/working_papers/w27598/w27598.pdf
- Hill, N., Clarke, D., Blair, L. and Menadue, H. (2019). Circular Economy Perspectives for the Management of Batteries used in Electric Vehicles, Publications Office of the European Union, Luxembourg. ISBN 978-92-76-10938-9, doi:10.2760/608912, JRC117790.
- IEA (2021). The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transition. International Energy Agency, Paris.
- IRP (2015). 10 Key Messages on Climate Change. International Resource Panel.

- IRP (2020). Resource Efficiency and Climate Change: Material Efficiency Strategies for a Low-Carbon Future. Hertwich, E., Lifset, R., Pauliuk, S., & Heeren, N. A report of the International Resource Panel. United Nations Environment Programme, Nairobi, Kenya.
- Kemp, R. (2010). Eco-innovation: definition, measurement and open research issues. *Economia politica*, issue 3, p. 397-420.
- Kirchherr, J., Reike, D., Hekkert, M. (2017). Conceptualizing the circular economy: an analysis of 114 definitions. *Resources, conservation and recycling*, 127, 221-232.. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>.
- Kristoffersen, E., Blomsma, F., Mikalef, P., Li J. (2020). The smart circular economy: A digital-enabled circular strategies framework for manufacturing companies. *Journal of Business Research* 120, S. 241-261
- Lacy, P., Long, J., Spindler, W. (2020). *The Circular Economy Handbook*. London: Palgrave MacMillan.
- Lazarevic, D., Brandao, M. (2020). The circular economy: a strategy to reconcile economic and environmental objectives? in: Brandao M., Lazarevic D., & Finnveden G., *Handbook of the Circular Economy*, Edward Elgar, Cheltenham.
- Leflaive, X., Kriebler, B., Smythe, H. (2020). Trends in water-related technological innovation. Insights from Patent Data. OECD Environment Working Paper ENV/WKP(2020)8.
- Lybbert, T., Zolas, N. (2014). Getting patents and economic data to speak to each other: An 'algorithmic links with probabilities' approach for joint analyses of patenting and economic activity. *Research Policy*, 43.3 (2014): 530-542.
- MacArthur, E., & Morlet, A. (2020). Foreword in: *The circular economy handbook (2020)* by P. Lacy. *The Circular Economy Handbook*.
- Material Economics (2018). *The Circular Economy, A Powerful Force for Climate Mitigation, Transformative innovation for prosperous and low-carbon industry*. Material Economics Sverige AB, Stockholm.
- McDonough, W., Braungart, M., (2002). *Cradle to cradle: remaking the way we make things*. London: Vintage.
- Meyer, I., Sommer, M. (2021). Recycling von Lithium-Ionen-Batterien. Ökonomische Effekte im Kontext von Klimaschutz und Ressourcenschonung, *WIFO-Monatsberichte*, 94(12). S. 899-909-
- Meyer, I., Sommer, M., Kratena, K. (2020). How to reach Paris: a comprehensive long-term energy-economy scenario for Austria, in: Theodoros Zachariadis, Janet E. Milne, Mikael S. Andersen, Hope Ashiabor, *Economic Instruments for a Low-carbon Future Critical Issues in Environmental Taxation*, 2020, S.127-140, <https://www.elgar-online.com/view/edcoll/9781839109904/9781839109904.00023.xml>
- Moser, P., Ohmstedt, J., Rhode, P. W. (2018). Patent citations—an analysis of quality differences and citing practices in hybrid corn. *Management Science*, 64(4), S.1926–1940.
- Nakano, J. (2021). *The Geopolitics of Critical Minerals Supply Chains. A Report of the CSIS Energy Security and Climate Change Program*, Center for Strategic & International Studies.
- OECD (2020). *Labour Market Consequences of a Transition to a Circular Economy: A Review Paper*. Environment Working Paper No. 162, ENV/WKP(2020)9. Laubinger, F., Lanzi, E., & Chateau, J., OECD, Paris.
- Peneder, M. (2017). Competitiveness and Industrial Policy: From Rationalities of Failure Towards the Ability to Evolve, *Cambridge Journal of Economics* 41, 829–858.
- Peneder, M., Arvanitis S., Rammer C., Stucki T., Wörter M. (2021). Policy Instruments and Self-reported Impacts of the Adoption of Energy Saving Technologies in the DACH Region, *Empirica*, DOI 10.1007/s10663-021-09517- Link: <https://rdcu.be/csBnA>
- Peneder, T. (2021). *Circular Economy in Fast Fashion*, Master thesis in International Management/CEMS, Vienna: Vienna University of Economics and Business.
- Polt, W., Linshalm, E., Peneder, M., (2021). *IPCEI im Kontext der österreichischen FTI-, Industrie- und Umweltpolitik*, Studie im Auftrag des BMK, Wien: Joanneum Research.
- Polt, W., Peneder, M., Prem, E. (2021). *Neue europäische Industrie-, Innovations- und Technologiepolitik (NIIT). Eine Diskussion zentraler Aspekte mit Blick auf Österreich*, Studie im Auftrag des Rats für Forschung und Technologieentwicklung, Wien: Joanneum Research – WIFO – eutema, https://www.rat-fte.at/files/rat-fte-pdf/publikationen/2021/2106_Endbericht%20NIIT.pdf

- Rat für Forschung und Technologieentwicklung (2021). Ratsempfehlung für eine Neuausrichtung der österreichischen Industriepolitik, Wien: RFTE, https://www.rat-fte.at/files/rat-fte-pdf/einzelempfehlungen/2021/211020_Empfehlung_Industriepolitik.pdf
- Reinstaller, A. (2008). The technological transition to chlorine free pulp bleaching technologies: Lessons for transition policies. *Journal of Cleaner Production* 16(1S1), S.S133-S147.
- Reinstaller, A., Reschenhofer, P. (2017). Using PageRank in the analysis of technological progress through patents: an illustration for biotechnological inventions. *Scientometrics* 113, 1407–1438 (2017). <https://doi.org/10.1007/s11192-017-2549-x>
- Saidani, M., Yannou, B., Leroy, Y., Cluzel, F., Kendall, A. (2019). A taxonomy of circular economy indicators. *Journal of Cleaner Production* 207, S.542-559.
- Sauvage, J. (2014). The stringency of environmental regulations and trade in environmental goods. Joint Working Party on Trade and Environment, OECD COM/TAD/ENV/JWPTE(2013)33/FINAL
- Schoenaker, N., Delahaye, R. (2017). Extensions of the environmental Goods and Services Sector with Circular economy activities. Project Report by European Union Project Directorate E, Eurostat, European Commission. Statistics Netherlands (CBS), Heerlen, Netherlands
- Šebo, J., Šebová, M., Palcic, I. (2021). Implementation of Circular Economy Technologies: An Empirical Study of Slovak and Slovenian Manufacturing Companies. *Sustainability* 13, 12518. <https://doi.org/10.3390/su132212518>
- Sommer, M., Meyer, I., Scherhauser, S., Part, F., Beigl, P. (2021). The Role of Secondary Resources in the Austrian Energy Transition (ROSE-Trans), WIFO Monographie, Dezember 2021.
- SRU (2020). Umweltgutachten 2020: Für eine entschlossene Umweltpolitik in Deutschland und Europa, Kapitel 3: Kreislaufwirtschaft: Von der Rhetorik zur Praxis, Sachverständigenrat für Umweltfragen, Berlin.
- Stahel, W.R., Reday, G. (1976). The potential for substituting manpower for energy. Report to the Commission of the European Communities; London: Vantage (reprint 1981).
- Stahel, W.R. (2016). The circular economy. *Nature*, 531(7595), 435–438. <https://doi.org/10.1038/531435a>
- Stucki, T., Wörter, M., Arvanitis, S., Peneder, M., Rammer, C. (2018). How Different Policy Instruments Affect the Creation of Green Energy Innovation: A Differentiated Perspective, *Energy Policy* 114, 245-858.
- UBA, (2017). Energie- und Treibhausgasszenarien im Hinblick auf 2030 und 2050, Synthesebericht 2017, Report REP-0628, Umweltbundesamt, Wien.
- UNEP (2013). Metal Recycling, Opportunities, Limits, Infrastructure, Report of the Working Group on the Global Metal Flows to the International Resource Panel. Nairobi: UNEP.
- United Nations (2015). Pariser Klimaschutzübereinkommen, http://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/english_paris_agreement.pdf
- Wörter, M., Stucki, T. (2021). Statusbericht der Schweizer Kreislaufwirtschaft. Erste repräsentative Studie zur Umsetzung der Kreislaufwirtschaft auf Unternehmensebene. Studie im Auftrag des Bundesamts für Umwelt und Circular Economy Switzerland, Berner Fachhochschule Wirtschaft, ETH Zürich, KOF Konjunkturforschungsstelle.
- World Bank (2020). Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition. Climate-Smart Mining Facility, Washington, DC.

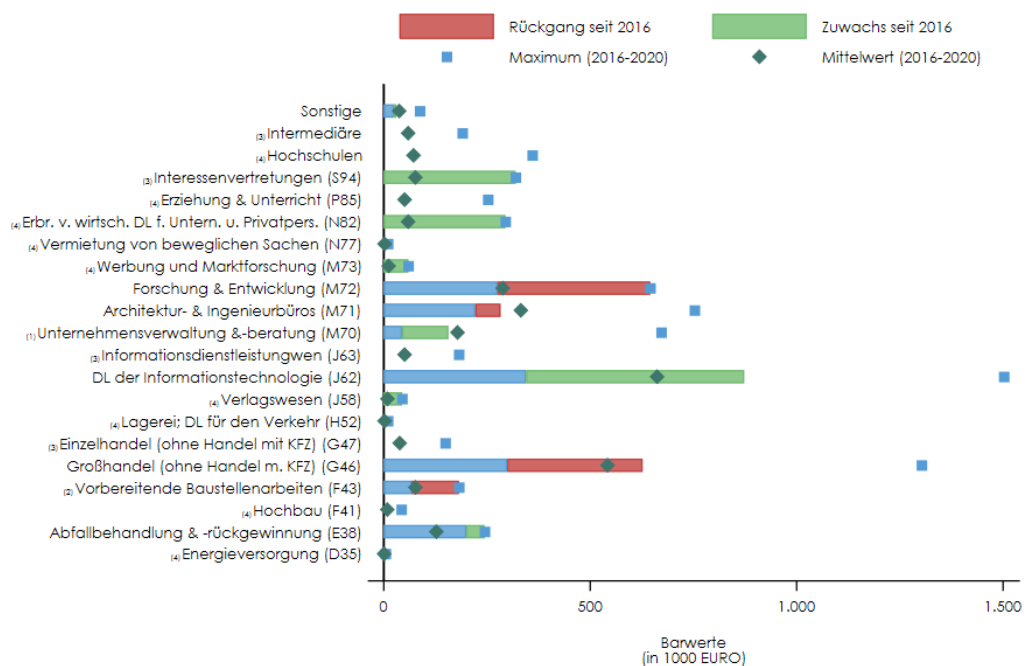
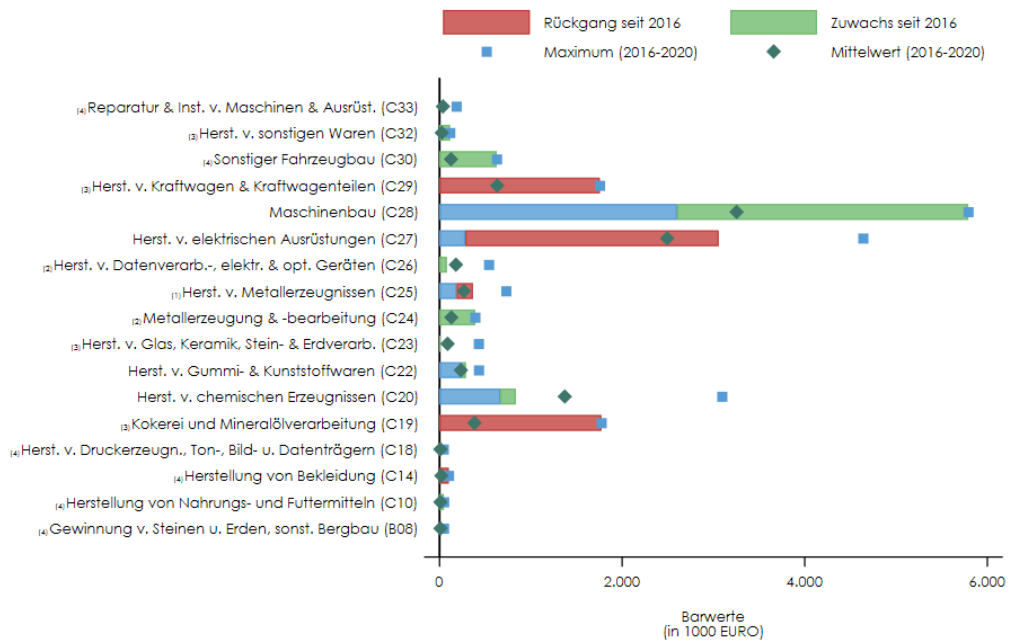
Anhänge

Abbildung 15: **Gesamtförderung nach Branchen; Entwicklung 2016-2020**



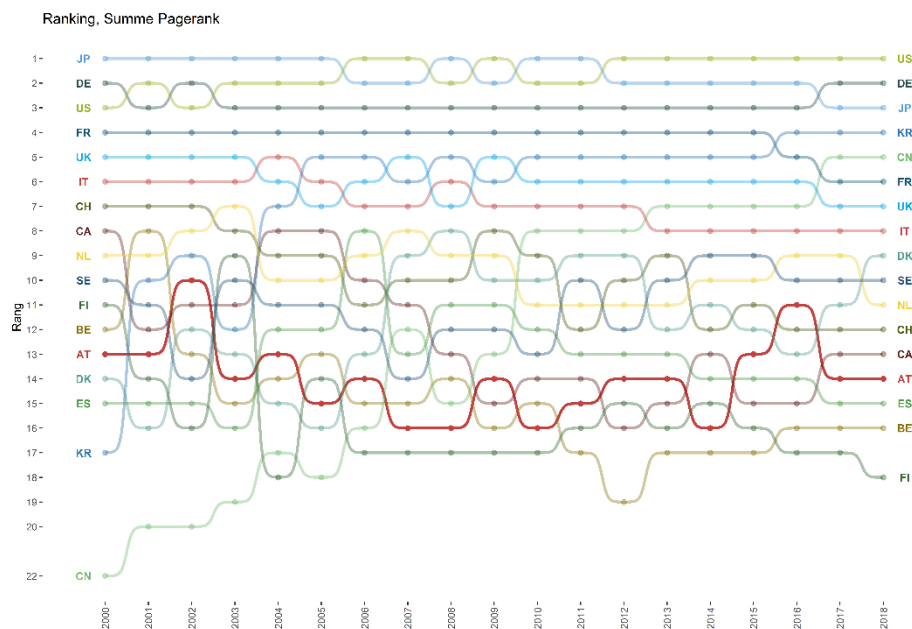
Q: FFG Daten; WIFO Auswertung. Anmerkungen, siehe Abbildung 4

Abbildung 16: Förderbarwerte nach Branchen; Entwicklung 2016-2020



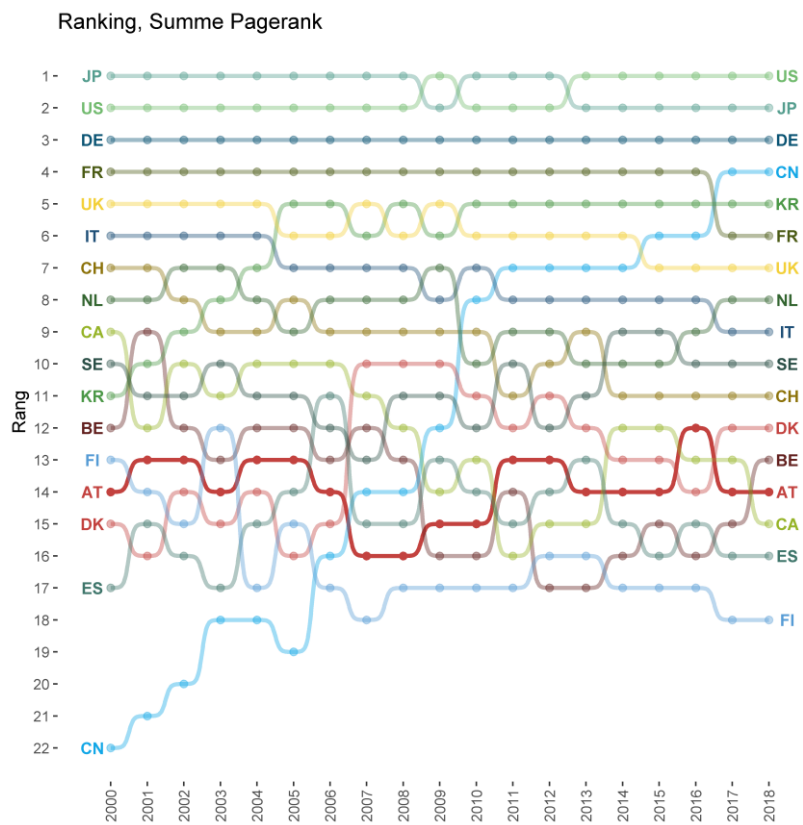
Q: FFG Daten; WIFO Auswertung. Anmerkungen, siehe Abbildung 4.

Abbildung 17: Internationales Ranking der Patentanmeldungen für kreislaufwirtschaftsrelevante Erfindungen; PageRank Scores



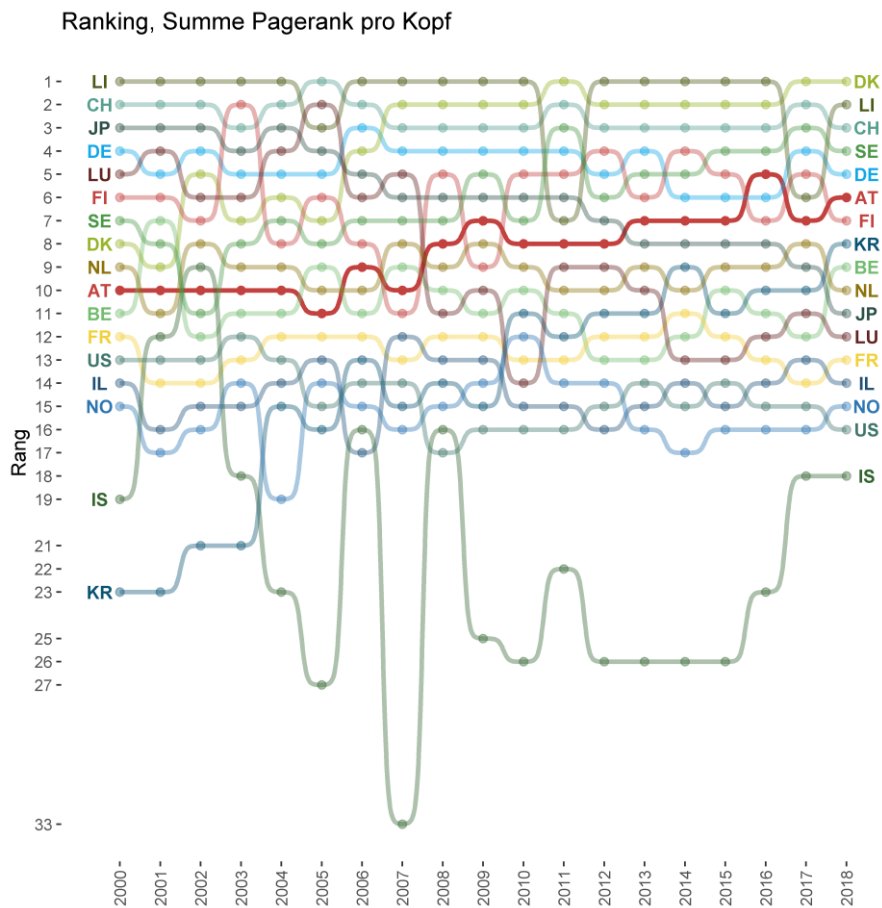
Q: Europäisches Patentamt PatStat. WIFO Berechnungen. Patentanmeldungen beim Europäischen Patentamt mit (anteiligen) Erfindern der abgebildeten Länder.

Abbildung 18: Internationales Ranking der Patentanmeldungen für Technologien zur Speicherung von Elektrizität; PageRank Scores (gesamt)



Q: Europäisches Patentamt PatStat. WIFO Berechnungen. Patentanmeldungen beim Europäischen Patentamt mit (anteiligen) Erfindern der abgebildeten Länder.

Abbildung 19: Internationales Ranking der Patentanmeldungen für Technologien zur Speicherung von Elektrizität; PageRank Scores (per capita)



Q: Europäisches Patentamt PatStat. WIFO Berechnungen. Patentanmeldungen beim Europäischen Patentamt mit (anteiligen) Erfindern der abgebildeten Länder.