

# Ressourceneffiziente Kreislaufsysteme am KIT (REKS@KIT)

Herausforderungen – Forschungsbedarfe – Empfehlungen

**Christoph Hilgers<sup>1</sup> & Volker Schulze<sup>2</sup> (Eds.)**

<sup>1</sup> Institut für Angewandte Geowissenschaften

<sup>2</sup> wbk Institut für Produktionstechnik

**KIT Center Climate, Environment and Resources (CLEAR)**



*This document – excluding parts marked otherwise, the cover, pictures and graphs – is licensed under a Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License (CC BY-SA 4.0): <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/deed.en>*

*Hilgers C, Schulze V 2026 (Eds.). Ressourceneffiziente Kreislaufsysteme: Herausforderungen – Forschungsbedarfe – Empfehlungen. KIT Center Climate, Environment and Resources (CLEAR). 16 S.*

DOI: 10.5445/IR/1000189474

*Karlsruhe, Januar 2026*

## Vorwort des Präsidiums

Das weltweite Wachstum von Bevölkerung und Wohlstand führt trotz technologischer Fortschritte zu einem steigenden Bedarf an Ressourcen und intensiveren Wechselwirkungen mit der Umwelt. Die globalen Herausforderungen, verankert in den 17 Nachhaltigkeitszielen der Vereinten Nationen, erfordern die Reduktion von Stoff- und Energieverlusten sowie von Umweltwirkungen neuer Produkte und Materialien. Dies gelingt nur durch interdisziplinäre Ansätze, nachhaltigere Technologien und naturbasierte Lösungen.

Das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) verfügt über umfassende Expertise in Produktentwicklung, Materialforschung und Umweltanalysen. Mit einem systemübergreifenden Ansatz – von Produkt- und Materialkreisläufen über Umweltinteraktionen bis hin zu Systemdesign und -analyse – entwickelt das KIT innovative Lösungen für eine nachhaltigere Zukunft. Das integrative, ressourceneffiziente Kreislaufsystem umfasst Maschinen- und Anlagenbau, Bauwesen und Bioökonomie sowie deren Interaktionen mit organischen, metallischen und mineralischen Kreisläufen. Die Umwelt dient dabei als Rohstoffquelle und Stoffsenke und interagiert mit Emissionen aus Material- und Produktkreisläufen.

Das Leitprojekt Integrative, ressourceneffiziente Kreislaufsysteme (REKS) des KIT fokussiert auf den Nexus Produkt–Material und deren globale Auswirkungen auf Umwelt und Klima. Der systemübergreifende Ansatz von Umweltinteraktion über Material- und Produktkreisläufe bis zum Systemdesign bildet die Grundlage für innovative Lösungen.

Mit seiner natur-, ingenieur- und gesellschaftswissenschaftlichen Breite bietet das KIT ein einzigartiges Spektrum, um die Kreislaufwirtschaft in Forschung, Lehre und Transfer zu verankern.

Die integrativen ressourceneffizienten Kreislaufsysteme (REKS) wurden vom Präsidium als strategisches Leitprojekt ausgewählt, um die Wechselwirkungen über Systemgrenzen hinaus zu erforschen und Lösungen zu entwickeln.

Professor Dr. Oliver Kraft

Professorin Dr. Kora Kristof

*Vizepräsident Forschung, Lehre und  
Akademische Angelegenheiten*

*Vizepräsidentin Digitalisierung und  
Nachhaltigkeit*

## **Vorwort der Editoren**

Bis Mitte der 2080er Jahre wird die Weltbevölkerung um rund zwei Milliarden Menschen wachsen und der globale Wohlstand weiter steigen. Technologischer Fortschritt mit neuen Materialen und Produkten führt zu einem besseren Leben, aber auch einem zunehmenden Wettbewerb um Ressourcen.

Recycling und Kreislaufwirtschaft sind notwendige Maßnahmen einer Effizienzsteigerung von Material- und Produktkreisläufen, decken den globalen Bedarf aber auch in Zukunft nicht. Internationale Lieferketten machen die Kreislaufwirtschaft zu einer globalen Aufgabe mit weiterhin benötigten primären Rohstoffen.

Neben der effizienteren Gestaltung von Material- und Produktkreisläufen sind die Umweltinteraktionen in Form von anthropogenen Einträgen durch Emissionen, als Funktionalität und Stabilität von Ökosystemen, sowie durch verantwortungsvolle Rohstoffgewinnung, Ressourcenschonung und Abfalllagerung zu bilanzieren und durch neue Methoden zu verringern.

Systemdesign und –analyse bilanzieren Stoff- und Energieströme von nachhaltigen, wirtschaftlichen Material- und Produktkreisläufen unter Berücksichtigung der Umweltinteraktionen, um den ökologischen Fußabdruck zu verringern und die Klimabilanz zu verbessern.

Dieses Konzept der integrativen, ressourceneffizienten Kreislaufsysteme (REKS) wurde in Arbeitskreisen, organisiert vom KIT Center Climate, Environment and Resources (CLEAR), von zahlreichenden Forschenden aus unterschiedlichsten Disziplinen in einem Bottom-up Prozess entwickelt. Durch die Interaktion von Material- und Produktkreisläufen sowie deren Umweltinteraktionen, eingebettet in ein Systemdesign und -analyse, können interdisziplinäre Ansätze in nachhaltigeren technologischen sowie naturbasierten Lösungen münden.

Prof. Dr. Christoph Hilgers & Prof. Dr.-Ing. Volker Schulze

## Die Autoren und Beteiligte

*Editoren:* Christoph Hilgers, Volker Schulze

*Koordination:* Kirsten Hennrich KIT Center Climate, Environment and Resources (CLEAR)

*Autoren:* Matthias Albiez, Frank Dehn, Elisabeth Eiche, Patric Grauberger, Christoph Hilgers, Dirk Holtmann, Corinna Hoose, Anne-Kristin Kaster, Christoph Kirchlechner, Michael Meier, Kersten Rabe, Sven Matthiesen, Frank Schultmann, Volker Schulze, Michael Selzer, Dieter Stapf, Peter Stemmermann, Hans-Henning Stutz, Thomas Ummenhofer, Rebekka Volk, Wolfgang Wilcke

*Weitere an Workshops beteiligte PIs:* Sebastian Beiser, Frank Breitling, Peter Braesicke, Viktoria Falkowski, Reinhard Fischer, Axel Funke, Marcus Geimer, Christina Gerdes, Marco Gleiß, Lucas Greif, Alexander Grünberger, Marius Hägle, Corinna Harmening, Daniel Heinz, Michael Heizmann, Andrea Hille-Reichel, Luise Kärger, Martina Klose, Eva-Maria Knoch, Thomas Längle, Wilfried Liebig, Thomas Meurer, Peter Nick, Sascha Ott, Philipp Röse, Jörg Sauer, Ulrike Scherer, Michael Selzer, Ben Stöhr, Isabelle Südmeier, Olga Suminska-Ebersoldt, Dimosthenis Trimis, Ulrike van der Schaaf, Elke Widmann, Florian Wittemann

# Inhalt

1. Management Summary .....	1
2. Motivation .....	2
3. Vision und Thesen für REKS am KIT .....	3
Vision für ein „Integratives, ressourceneffizientes Kreislaufsystem (REKS)“ .....	3
Produktkreisläufe .....	4
Materialkreisläufe .....	5
Umweltinteraktionen .....	6
Systemdesign und Systemanalyse .....	7
4. Forschungsbedarfe .....	9
Produktkreisläufe .....	9
Materialkreisläufe .....	10
Umweltinteraktionen .....	11
Systemdesign und -analyse .....	13
5. Lehrangebote .....	15
6. Referenzen .....	16

# 1. Management Summary

Der erwartete globale Anstieg der Bevölkerung und des Wohlstands geht, bedingt durch technologische Fortschritte, mit neuen Materialien und Produkten sowie mit einem steigenden Bedarf an Ressourcen und zunehmenden Wechselwirkungen mit der Umwelt einher. Die globalen Herausforderungen, reflektiert in den 17 Nachhaltigkeitszielen der UN, erfordern, die Stoff- und Energieverluste sowie die Umweltwirkungen neuer Produkte und Materialien zu reduzieren und durch Systemdesign und -analyse über globale Lieferketten zu bilanzieren. Dies kann nur durch interdisziplinäre Ansätze sowie die Entwicklung und Umsetzung nachhaltiger technologischer und naturbasiertener Lösungen ermöglicht werden.

Das KIT adressiert mit seiner Forschung gesellschaftliche und umweltliche Herausforderungen und hat die Kreislaufwirtschaft als eine wesentliche Aufgabe erkannt, derer es sich annehmen will. Es kann mit seiner breiten Expertise in der Entwicklung und Herstellung von Produkten, in Materialien und in Umwelthämen mit einem systemübergreifenden Ansatz von Produkt und Materialkreisläufen über Umweltinteraktionen bis zu Systemdesign und -analyse Zusammenhänge erforschen, um innovative Lösungen zur Zukunftssicherung durch Nachhaltigkeit zu entwickeln. Dieses **Integrative ressourceneffiziente Kreislaufsystem** adressiert Produkte und Prozesse des Maschinen- und Anlagenbaus, des Bauens und der Bioökonomie in den Produkt-kreisläufen, die mit den organischen, metallischen und mineralischen Materialkreisläufen interagieren. Die Umwelt mit Atmosphäre, Boden, Wasser und Untergrund liefert Rohstoffe, dient als Stoff-Senke und interagiert mit Emissionen von Material- und Produktkreisläufen. Der systemübergreifende Ansatz des Integrativen, ressourceneffizienten Kreislaufsystems liefert einen wichtigen Beitrag zur Nachhaltigkeit, weil Produkte und Materialien im Hinblick auf vorhandene Stoff-, Energieverluste und Umweltwirkungen erforscht, entwickelt und durch Systemdesign und –analyse bilanziert, quantifiziert und gestaltet werden. Dabei werden auch primäre Rohstoffe, Energie und Abfallstoffe berücksichtigt. Eine globale Bewertung von Linear- und Kreislaufwirtschaft zeigt die ökologischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Herausforderungen auf, die Grundlage gesellschaftlicher Entscheidungsprozesse für eine nachhaltigere Zukunft bei besserer Ressourceneffizienz sind.

Als Fazit ergeben sich für das KIT die vier Bereiche Produktkreisläufe, Materialkreisläufe, Umweltinteraktionen sowie Systemdesign und -analyse als wesentliche Themenfelder, die im Folgenden mit Thesen und insbesondere für das KIT relevanten Maßnahmen vorgestellt werden sollen.

Das KIT bündelt am KIT Center Climate, Environment and Resources (CLEAR) im Topic "Integrative ressourceneffiziente Kreislaufsysteme und Umwelttechnologien" vorhandene Expertise in den genannten Feldern. In der Forschung stehen die Bilanzierung von Umweltinteraktionen und ingenieurtechnische Neuentwicklungen und Anpassungen von Produkt- und Materialkreisläufen auf der Agenda. In der Lehre werden spezifische Lehrveranstaltungen, die überfachliche Bildung von Studierenden am KIT und berufsbegleitende Weiterbildungsmaßnahmen das Angebot hinsichtlich der Ressourceneffizienz erweitern. Basierend auf diesem Papier soll der Dialog mit Politik, Wissenschaftsorganisationen, Wirtschaft und Gesellschaft intensiviert werden, um die Transferaktivitäten des KIT mit Blick auf Integrative ressourceneffiziente Kreislaufsysteme weiter zu stärken. Hierzu werden die Forschungsergebnisse gemeinsam mit der breit gefächerten Industrie in der Region, in Deutschland und in Europa in die Umsetzung gebracht.

## 2. Motivation

Bis Mitte 2080 wird sowohl die Weltbevölkerung um etwa 2 Milliarden Menschen ansteigen, begleitet von einem deutlichen Anwachsen des globalen Wohlstands (UN 2024, GDP 2024, OECD 2024). Auch bei nachhaltigem Konsum und Produktion entsprechend der Nachhaltigkeitsziele der United Nations (SDG - Sustainable Development Goals) führt dies zu einer verstärkten Nutzung von Naturraum, Rohstoffen und Energie (SDG 12) sowie einem steigenden Wettbewerb um diese (UN 2015). Der Mensch als gestaltender Faktor der Umwelt nutzt die Geosphäre, um seine grundlegenden Bedürfnisse zu sichern (SDG 2 kein Hunger, SDG 6 sauberes Wasser & Sanitäreinrichtungen, SDG 7 bezahlbare und saubere Energie u.a.). Er entwickelt die Technosphäre, d.h. er gestaltet durch Produkte des Maschinen- und Anlagenbaus, des Bauwesens und der Bioökonomie seinen Lebensraum. Zudem beeinflusst er durch deren Produktion nicht nur lokale, sondern auch globale Lebensräume und Materialkreisläufe.

Der zunehmende Bedarf an Produkten des Maschinen- und Anlagenbaus, des Bauwesens und der Bioökonomie erfordert zukünftig eine konsequente Kreislaufführung und eine wesentlich höhere Ressourceneffizienz. Dies bedingt bei minimaler Umweltnutzung einen möglichst vernachlässigbaren ökologischen Fußabdruck sowie eine bessere Stoff-, Exergie- und Klimabilanz, als Beitrag zur Erreichung der SDG. Durch internationale Lieferketten wirkt die Kreislaufwirtschaft global. Nur durch eine holistische Analyse interagierender Kreisläufe können neue Produkte mit neuen Materialien entwickelt, ihre Wechselwirkung mit der Geosphäre reduziert und die Kreislaufführung verbessert werden.

Unter dem Titel „**Integrative ressourceneffiziente Kreislaufsysteme (REKS)**“ fokussiert das KIT mit seiner ausgewiesenen internationalen Expertise in Schlüsselfeldern der Kreislaufwirtschaft, die insbesondere in den R-Technologien (Potting *et al.* 2017) sowie Ressourceneffizienz und Digitalisierung liegen, auf den Nexus Produkt – Material mit Auswirkungen auf Umwelt und Klima. Dadurch können systemübergreifend Lösungen für eine weitreichende Kreislaufführung auch mit Blick auf die 17 SDGs der UN entwickelt werden. Diesen systemübergreifenden Ansatz von Umweltinteraktion über Material- und Produktkreisläufe zu einem auf Systemanalysen basierenden Systemdesign bezeichnen wir als **integratives ressourcen-effizientes Kreislaufsystem**.

Das KIT weist mit seiner Kompetenz im Bereich Klima & Umwelt, der natur- und ingenieurwissenschaftlichen Fachbreite und der gesellschaftswissenschaftlichen Forschung ein einzigartiges Spektrum auf, um dieses integrative ressourceneffiziente Kreislaufsystem zu erforschen und damit innovative Lösungen zur Zukunftssicherung durch Nachhaltigkeit anzubieten. Das hier vorgelegte White Paper beschreibt auf Grundlage von 14 Thesen zu Aspekten des integrativen ressourceneffizienten Kreislaufsystems die Forschungsbedarfe, dessen Verankerung in den Leistungsdimensionen Forschung, Lehre und Transfer sowie Maßnahmen, die am KIT strategisch ausgebaut werden sollen.

### 3. Vision und Thesen für REKS am KIT

#### **Vision für ein „Integratives, ressourceneffizientes Kreislaufsystem (REKS)“**

Das KIT betreibt Forschung, Lehre und Transfer zu allen oben bereits angesprochenen Aspekten der **Kreislaufwirtschaft** mit dem Ziel, ihre Umsetzung in die Gesellschaft und Wirtschaft durch neue Konzepte und Technologien maßgeblich voranzutreiben. Damit werden substanzielle Beiträge zur Ressourceneffizienz geleistet und Optionen für die Gestaltung der politischen Rahmenbedingungen aufgezeigt. Dabei verfolgt das KIT einen technologieorientierten und ergebnisoffenen Ansatz der **Systemforschung für eine integrative ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft**, indem die Material- und Produktkreisläufe in ihrem Zusammenspiel sowie deren Umweltinteraktionen betrachtet werden.

Den Rahmen dieser Systemforschung für eine integrative, ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft bilden **Systemdesign und -analyse** von nachhaltigen, wirtschaftlichen Material- und Produkt-kreisläufen mit der gemeinsamen Bilanzierung und Bewertung von Stoff- und Energieströmen. Darin eingebettet sind die **Umweltinteraktionen** in Form von anthropogenen Einträgen durch Emissionen in die Umweltbereiche Boden, Wasser und Atmosphäre, die Bewertung von Funktionalität und Stabilität von Ökosystemen, sowie die verantwortungsvolle Rohstoffgewinnung, die Ressourcenschonung und die optimierte Abfalllagerung. **Materialkreisläufe** werden vom ressourcenschonenden und zirkulären Produktdesign, über die Materialauswahl und die (Mehrfach-)Nutzung bis hin zum Recycling optimiert. Im Kern dieses Ansatzes stehen innovative **Produktkreisläufe**, mit denen an Produkten und Prozessen des Maschinen- und Anlagenbaus, des Bauens und der Bioökonomie mit unterschiedlichen Produktionsformen neue, innovative Konzepte entwickelt werden.

Das KIT ist in allen seinen Aktivitäten – Forschung, Lehre und Transfer – auf den für die Kreislaufwirtschaft wesentlichen und relevanten Gebieten wie Natur- und Ingenieurwissenschaften, Informatik, Wirtschaftswissenschaften und Technikfolgenabschätzung sehr gut aufgestellt. Es beschäftigt sich sowohl auf Material- und Produktebene mit der Kreislaufwirtschaft als auch mit Umweltauswirkungen, Recyclingtechnologien und Bioökonomie. Durch bereits heute vielfältige Industriekooperationen des KIT in zahlreichen Branchen ist die Spiegelung der Arbeiten an technischer Relevanz sichergestellt und der Transfer integraler Bestandteil der Arbeiten am KIT.

Unter dem Titel **integrative ressourceneffiziente Kreislaufsysteme** wird das KIT in diesem Feld eine führende Position in Europa einzunehmen und damit essenzielle und umfassende Beiträge für innovative, technische Lösungen in vielfältigen Feldern der Zukunftssicherung durch Nachhaltigkeit leisten. Die sich daraus ergebenden vier Themenfelder sind in Abb. 1. dargestellt. Diese werden im Folgenden vorgestellt und mit Thesen hinterlegt.

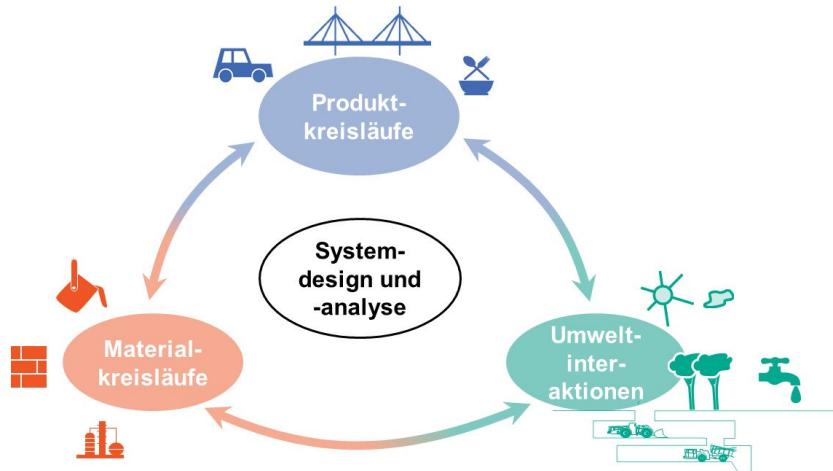


Abb. 1. Kern des integrativen, ressourceneffizienten Kreislaufsystems sind ausgewählte Produkte und Prozesse des Maschinen- und Anlagenbaus, des Bauens und der Bioökonomie (blau). Die Produktkreisläufe interagieren mit den Materialkreisläufen für Baustoffe, Metalle und organische Grundstoffe (orange). Produkt- und Materialkreisläufe interagieren mit der natürlichen und genutzten Umwelt (grün), die sowohl Nahrung und Rohstoffe liefert als auch Emissionen und Abfälle aufnimmt. Systemdesign und -analyse erlauben eine umfassende Bilanzierung und Bewertung der globalen Stoff- und Energieströme.

## Produktkreisläufe

Im Themenfeld Produktkreisläufe stehen Produkte als vom Menschen geschaffene Systeme und deren Herstellprozesse im Mittelpunkt, die durch ihre spezifische Funktion über reine Materialeigenschaften hinausgehen. Am KIT werden schwerpunktmäßig **Produkte und Prozesse des Maschinen- und Anlagenbaus, des Bauwesens und der Bioökonomie** im Sinne der Kreislaufwirtschaft beforscht. Dabei decken die Forschungsarbeiten unterschiedlichste **Größenskalen** vom Nanometerbereich bei Produkten der Bioökonomie bis in den Kilometerbereich bei Bauwerken im Infraukturbereich ab. Auch die **Zeitskalen** hinsichtlich der Nutzungsdauer der beforschten Produkte erstrecken sich von Tagen bei Lebensmitteln bis zu mehr als hundert Jahren bei Bauwerken.

Bei allen Produktkategorien stehen die ressourcenschonende Produktion, die Erfüllung funktionaler Anforderungen und die Integration vorhandener Stoff- und Komponentenströme in der Herstellung im Mittelpunkt. Das KIT zielt auf eine Transformation von einer linearen zu einer zirkulär geprägten Produktion ab, in der die Wertschöpfung, die in das Produkt geflossen ist, möglichst vollständig und langfristig erhalten bleibt. Wesentlicher Baustein der interdisziplinären Forschung am KIT ist hier der SFB 1574 „Kreislauffabrik für das ewige innovative Produkt“ (Grauberger *et al.* 2024). Ein Ansatz, um dieses Ziel zu erreichen, ist das Design for Circular Economy (Design für Kreislaufwirtschaft), welches bereits bei der Entwicklung von Produkten ihre Wieder- und Weiterverwendung unter besonderer Berücksichtigung der Interaktion von Systemen betrachtet. Dazu werden die Zustände der aus dem Markt zurückkehrenden Produkte analysiert: Es wird einerseits erforscht, wie möglichst hochwertige Systemkomponenten wiederverwendet werden können, um die Wertschöpfung, die in ihre Herstellung geflossen ist, zu erhalten. Andererseits wird untersucht, wie eine Wiederverwendung von Produktkomponenten in technologisch aktuellen Produkten der neuesten Generation erfolgen kann.

Als Leitplanken werden die folgenden drei Thesen aufgestellt:

**These 1** „Wertschöpfungserhalt“: Systembestandteile von Produkten des Maschinen- und Anlagenbaus, des Bauwesens und der Bioökonomie können durch Befundung ihrer verbliebenen Fähigkeit zur Funktionserfüllung unter größtmöglichem Erhalt ihrer Wertschöpfung ressourcenschonend im Kreislauf gehalten werden.

**These 2** „Attraktivität“: Produkte der Kreislaufwirtschaft sind hinsichtlich technischer Leistungsmerkmale und wirtschaftlich attraktiv und erfüllen im besonderen Maße die Nachhaltigkeitsziele der UN.

**These 3** „Design für Kreislaufwirtschaft“: Produkte lassen sich so entwerfen, dass ihre Herstellung ressourcenschonend möglich ist, dass sie möglichst ganzheitig wiederverwendet werden können und dass ein maximaler Anteil zirkulärer Produktion im Produkt- und auch Materialkreislauf möglich ist.

## **Materialkreisläufe**

Das Schließen der Materialkreisläufe ist zentraler Bestandteil der nachhaltigen Transformation hin zu einer klimaneutralen, ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft. Forschungsschwerpunkte am KIT sind ein intelligentes Materialdesign, die ressourcen- und energieeffiziente Materialbereitstellung und -verarbeitung sowie die hochwertige Materialrückgewinnung für unterschiedliche Materialklassen wie Metalle und ihre Legierungen, Polymere, Kunststoffe und Industriemineralien. Methodische Werkzeuge zur Analyse von Stoff- und Energieflüssen unterstützen diesen Ansatz.

Die Herausforderungen bei der Schließung der Materialkreisläufe und damit verbunden die dafür notwendigen Technologien sind stark von den jeweiligen Materialklassen abhängig. Am KIT werden insbesondere die Polymere interdisziplinär im Helmholtz-Programm „Materials and Technologies for the Energy Transition“ (MTET) mit dem Topic 5 „Ressource and Energy Efficiency“ beforscht (KIT MTET5). Daher ist es unerlässlich, langfristig ein interagierendes System aus verschiedenen Unterkreisläufen aufzubauen.

Als Leitplanken werden die folgenden drei Thesen aufgestellt:

**These 1** „Materialdesign erfolgt auf Basis von Struktur – Eigenschafts- – Nachhaltigkeitsprinzipien“: Variable Funktionalisierungen von Materialien ermöglichen die gezielte Einstellung von Eigenschaften und Lebensdauer und die Reduktion der Materialvielfalt.

**These 2** „Materialien werden in der Kreislaufwirtschaft auf nachhaltiger Rohstoffbasis bereitgestellt“: Verluste bei Energie- und Stoffströmen sowie Reststoffe, Umweltnutzung und Emissionen können für den Lebenszyklus von Materialien bilanziert, reduziert und die Materialnutzung optimiert werden. Dies beinhaltet die Geosphäre als Stoffquelle und -senke inklusive nachwachsender Rohstoffe als ökologische Rohstoffbasis und CO<sub>2</sub> als Kohlenstoffquelle.

**These 3** „Stoff- und energieeffiziente Recycling-Technologien sind der Schlüssel zu einer Etablierung der Kreislaufführung“: Verbesserte physikalische Trennprozesse und chemische, stoffumwandelnde Recyclingverfahren sowie kleinteilige bzw. lokale Kreislaufführungen ermöglichen ein Upcycling und die Störstoffentfrachtung der Produkt- und Materialkreisläufe ebenso wie die Begrenzung des erneuerbaren Energieaufwandes zur Kreislaufführung. Der Zuschlag von Primärrohstoffen zum Erhalt der Materialgüte und der Energieaufwand zur Kreislaufführung können reduziert werden.

## Umweltinteraktionen

Auch integrative ressourceneffiziente Kreislaufsysteme kommen nicht ohne beträchtliche Umweltinteraktionen, intensive Nutzung natürlicher Ressourcen und geordnete Lagerung bzw. Entsorgung von Abfällen aus. Des Weiteren wird der globale Bedarf an primären und sekundären Rohstoffen und Energie sowie die Nutzung von Land und Gewässern steigen. Damit nimmt die Bedeutung der Geosphäre als Stoffquelle und -senke für Material- und Produktkreisläufe in Zukunft noch weiter zu. Gleichzeitig sind die Ökosystemleistungen, etwa die Bestäubung durch Insekten, die Kohlenstoffspeicherung in natürlichen Ökosystemen und die Filterfunktion von Böden für Wasser von zentraler Bedeutung. Entsprechend reichen die Umweltinteraktionen von der Rohstoffgewinnung über die Herstellung, Verwendung und Entsorgung von Materialien und Produkten bis hin zu Beeinträchtigungen von Ökosystemleistungen.

Sowohl in Material- wie auch in den Produktkreisläufen werden zahlreiche Stoffe mobilisiert oder in die Umwelt eingetragen. Viele dieser Stoffe sind bezüglich ihres Verhaltens in natürlichen und anthropogen beeinflussten Kreisläufen bisher nur unzureichend untersucht. Für eine Prognose hinsichtlich des Umweltverhaltens müssen die wichtigsten Prozesse jedoch bekannt sein.

Ziel ist es, die unvermeidbaren Umweltinteraktionen zu erfassen, um bislang unbekannte Wirkmechanismen zu erkennen, zu verstehen und zu minimieren. Zudem kann die Effizienz der Nutzung natürlicher Ressourcen und Rohstoffgewinnung durch technologische und biotechnologische sowie naturbasierte Entwicklungen weiter erhöht werden, um Ressourcenschonung und den Umweltschutz zu verbessern und Kreisläufe zu schließen.

Als Leitplanken werden die folgenden drei Thesen aufgestellt:

**These 1** „Umweltinteraktionen quantifizieren und verstehen“: Auf Grundlage innovativer Messtechniken können Umweltinteraktionen quantifiziert, Transportpfade und biophysikochemische Anreicherung & Wirkmechanismen von Stoffeinträgen in die Umwelt sowie die Auswirkungen auf Ökosystemfunktionen und -dienstleistungen, Luft-/Wasserqualität und Klima abgeleitet und mit Umweltsimulationen prognostiziert und bilanziert werden.

**These 2** „Ressourcen nutzen“: Innovative und integrierte Konzepte zur Gewinnung fester, flüssiger und gasförmiger mineralischer, metallischer und organischer Rohstoffe reduzieren die Umweltinteraktion, ihre Speicherung und Kreislaufführung erhöht die Ressourceneffizienz und ermöglicht die Schließung von Kreisläufen. Naturnahe Mechanismen können in diesem Zusammenhang dazu genutzt werden, z.B. Reststoffentsorgung (fest, flüssig, gasförmig z.B. CO<sub>2</sub>) mit Rohstoff-gewinnung über / unter Tage zu koppeln, Schadstoffe zu Rohstoffen zu transformieren (z.B. CO<sub>2</sub>, Bioremediation) und Reststoffe bei gleichzeitigem Erhalt eines zukünftigen Rohstoffpotentials zu verwahren.

**These 3** „Umweltschutz und Ressourcenschonung“: Für kreislaufgerechte Ressourcenschonung müssen die stoffliche Nutzung, Energie/Entropie und Wechselwirkungen in der Umwelt umfassend bewertet werden. Daraus lassen sich kritische Konzentrationen für Gesundheit, landwirtschaftliche Produktivität und Biodiversität, sowie Normen für Umweltverträglichkeitsprüfungen ableiten.

## Systemdesign und Systemanalyse

Im Themenfeld Systemdesign und Systemanalyse werden die Material- und Produktkreisläufe über ihre Lebenszyklen hinweg untersucht und mit ihren zugrundeliegenden, teils wechselseitigen Stoff- und Energieströmen sowie ihren Umweltinteraktionen wie bspw. auf Ökosysteme verknüpft. Zudem werden die Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Kreisläufen detailliert untersucht. Dies betrifft nicht nur existierende Wertschöpfungsketten, sondern insbesondere auch zukünftige kaskadierende, interagierende und neue Wertschöpfungsnetzwerke und -kreisläufe. Diese Systeme unterschiedlichster Art sind zunächst zu verstehen und dann modellhaft physikalisch und/oder datenbasiert abzubilden, um eine Analyse und eine Optimierung bzw. ein Design zu ermöglichen. Dabei fehlen oft unterschiedlichste Informationen, um das System bzw. alle Zusammenhänge darin ausreichend abzubilden wie beispielsweise ein Inventar/Kataster der vorhandenen Ressourcen an einem Ort oder Daten zu neuen Produktions- oder Recyclingprozessen.

Das KIT bietet die einzigartige Möglichkeit, dieses Themenfeld nicht separat und ausschließlich konzeptionell zu bearbeiten, sondern gemeinsam mit mindestens einem anderen der in diesem Papier vorgestellten Themenfelder interdisziplinär in Kombination mit systemischer Betrachtung unter dem Dach der Nachhaltigkeit zu bearbeiten. Dies hat den Vorteil, an einem konkreten Produkt, Material oder Prozess, einer Technologie oder einer Wertschöpfungskette die Analyse-, Bewertungs- und Rückkopplungsergebnisse aus Systemsicht zu erarbeiten und Design- und Optimierungspotentiale bereits in der Forschung und Entwicklung zu heben. Mit der Forschungsdateninfrastruktur Kadi verfügt das KIT bereits über eine Plattform, die unter Beachtung der FAIR-Prinzipien die Verwaltung und den Austausch von Daten ebenso wie deren Analyse, Visualisierung und Transformation langfristig sicherstellt und die Anbindung modernster KI-Methoden für weitergehende Analysen erlaubt (KadiAI, CIDS).

Als Leitplanken werden die folgenden drei Thesen aufgestellt:

**These 1** „Kreislaufsystem erfassen und bewerten“: Vorhandener Datenbestand und bestehende Modelle sind lückenhaft und häufig nicht kompatibel bzw. vergleichbar. Zur Abbildung des Status quo müssen bestehende Methoden weiterentwickelt und neue Daten, Methoden und Modelle in interdisziplinärer und transdisziplinärer Zusammenarbeit gewonnen, verknüpft und systemisch vergleichend und mit ihren Folgen bewertet werden. Die Bewertung erfolgt multikriteriell mit variabler Gewichtung von beispielsweise Stoff- und Energiebilanzen, Kosten, Rohstoffkritikalität und Nachhaltigkeitsfaktoren wie Umweltschäden oder Klimafolgen.

**These 2** „Ziele für das integrative ressourceneffiziente Kreislaufsystem gestalten“: Die Verknüpfung von existierenden Wertschöpfungsketten und Kreisläufen mit neuen Technologien über die Disziplinen und Stakeholder kann unter Berücksichtigung nationaler und globaler Gesichtspunkte die Ressourceneffizienz steigern und/oder die Umweltwirkungen reduzieren und somit die vorteilhafte Kopplung einzelner Teilsysteme ermöglichen. Dazu werden Material- und Produktkreisläufe sowie Stoff- und Energieströme skalenübergreifend so gestaltet, dass verschiedene Designs für variable Gewichtungen von Prioritäten (bspw. Minimierung von CO<sub>2</sub>-Emissionen, Minimierung von Kosten oder beides) möglich sind.

**These 3** „Optimierung des Kreislaufsystems begleiten“: Die Systemmodellierung und -optimierung erlaubt es, anhand technischen und wirtschaftlichen Nachhaltigkeitsindikatoren

optimierte Ansätze zur Transformation ausgehend vom existierenden System mit dem Ziel einer integrativen ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft zu entwickeln. Dazu werden bestehende Systeme analysiert und hinsichtlich ihrer Umweltinteraktion bzw. Zirkularität optimiert sowie Empfehlungen zur Setzung der notwendigen Rahmenbedingungen erarbeitet. Dabei können auch handlungsleitende Entscheidungsunterstützungen und Empfehlungen abgeleitet werden.

## 4. Forschungsbedarfe

### Produktkreisläufe

Zur These 1 „Wertschöpfungserhalt“ besteht Forschungsbedarf in mindestens folgenden Bereichen:

- Konzepte zum Wertschöpfungserhalt machen umfassendes Wissen über die zu erhaltenden Produkte aus Produktion und Nutzung in Form von digitalen Zwillingen erforderlich, um mit den individuell abgenutzten, gebrauchten Produkten aus einer zu entwickelnden Strategie für eine Logistik zum Erhalt aus dem Gebrauchsmarkt umgehen zu können. Im Rahmen der Demontage braucht es auf Großserienanwendungen anwendbare skalierte Methoden für die hochflexibel und individuelle Befundung in Form von Sensorik, automatisierte Handhabungstechnik und die Überarbeitung der im Kreislauf geführten Produkte und deren Teilsysteme. Nur so wird eine kombiniert lineare und zirkulare Produktion gelingen können. Dies soll an exemplarischen Produkten des Maschinen- und Anlagenbaus, des Bauwesens und der Bioökonomie erfolgen.
- Für das zirkulare Bauen mit urban mining bzw. das serielle bzw. modulare Bauen mit nach Befundung und Bewertung weiterverwendbaren Komponenten muss eine umfassende Dokumentation im Sinne eines Gebäudepasses entwickelt werden.
- Die Kopplung von natürlichen biologischen Kreisläufen mit industriellen Produktionskreisläufen zur Erzeugung und Weiterverwendung bioökonomischer Produkte ermöglicht die die hybride Nutzung von agrartechnisch kultivierten Pflanzen als Nahrungsmittel, für die technische Verwendung, für die Verwertung in bioverfahrenstechnischen Prozessen und umgekehrt die industrielle Herstellung von Lebensmitteln auf Basis bioverfahrenstechnischer Prozesse („New Food“).

Zu These 2 „Attraktivität“ von Produkten im Markt besteht Forschungsbedarf in mindestens folgenden Bereichen:

- Die gesellschaftliche Akzeptanz von Kreislaufprodukten abseits von Marktnischen muss auf wirtschaftlicher Basis durch Anschluss der technischen Attraktivität an Neuprodukte aktueller Generation sichergestellt werden. Dies darf weder in der Funktion noch in der Ästhetik mit Abstrichen einhergehen.
- Ein Schlüssel zum Erfolg wird im Austarieren von Individualisierungsbedürfnissen der Kunden und der Vereinheitlichung zwecks industrieller Produktion zu finden sein. Daher muss die Veränderung der Produktion hin zur individuellen, automatisierten Aufbereitung erforscht werden.
- Regeln, wie Kommunikation und Marketing erfolgreich auf nachhaltige Produkte angepasst werden können, müssen erarbeitet und dokumentiert werden.

Zu These 3 „Design für Kreislaufwirtschaft“ besteht Forschungsbedarf in mindestens folgenden Bereichen:

- Entwicklungsmethoden müssen so erforscht und verändert werden, dass sie die in der Systemgenerationsentwicklung (SGE) über mehrere System- bzw. Produktgenerationen vorzudenkenden Produkteigenschaften berücksichtigen. Hierzu braucht es auch

Zielgrößen und Tools für die Unterstützung von kreislaufgerechten Designentscheidungen bspw. hinsichtlich der Modularisierung. Dies schließt Zulassungsfragen zur Gewährleistung für Produkte und auch Geschäftsmodelle einschließlich der zielführenden Verteilung des anfänglichen Invests aus mehrere Produktlebenszyklen ein. In diesem Rahmen muss ein Produkt-Produktions-Co-Design einschließlich Simulations- und Optimierungs-methoden erforscht werden, da sich mit der Produktentwicklung auch die Produktion einschließlich der Demontage anpassen muss. Die Generierung von Wissen aus den vielfältigen Daten von Sensorik in der Produktion, im Produkteinsatz und bei der Befundung in der Produktionsstätte bei der Montage und Demontage ist Basis für ein erfolgreiches Design für Kreislaufwirtschaft.

- Das Urban Mining muss vertieft erforscht und entwickelt werden. Dabei sind Verfügbarkeit von Daten, Qualifizierung des Zustands und Demontierbarkeit rückzubauender Gebäude für ressourcenschonende Sanierungskonzepte essenziell. Neue Regulierungsinstrumente für das Bauwesen müssen entwickelt werden, die die Emissionsvermeidung in den Entwurfsphasen einschließen, rückbaubare Sekundärmaterialien bzw. sortenreine, biologische Baumaterialien wettbewerbsfähig gegenüber Primärmaterialien machen und diese bestenfalls vollständig ersetzen.
- Entsprechende Konzepte müssen für die ressourcenschonende Produktion von Lebensmitteln analysiert und entwickelt werden, um bestehende Ansätze in der Lebensmittelindustrie erweitern zu und z.B. auf weitere und neue Rohstoffe und Stoffströme übertragen zu können.

## **Materialkreisläufe**

Zu These 1 „Materialdesign erfolgt auf Basis von Struktur – Eigenschafts- – Nachhaltigkeitsprinzipien“ besteht Forschungsbedarf in mindestens folgenden Bereichen:

- Bereits jetzt gehört das KIT im Bereich der Struktur-Eigenschaften-Korrelation von Struktur- und Funktionswerkstoffen, sowie beim gezielten Design der Mikrostruktur zur Eigenschaftseinstellung zu den international führenden Institutionen. Die vorhandene Charakterisierungsexpertise muss für Anwendungen in der Kreislaufwirtschaft in Bezug auf Durchsatz signifikant gestärkt und durch einen skalenübergreifenden digitalen Zwilling auf der atomaren Ebene komplementiert werden. Auf experimenteller Seite braucht es hierfür Anstrengungen, um bspw. die Anreicherung von Verunreinigungen im Metallrecycling durch angepasste Zusammensetzungen und thermomechanische Prozessierung ausgewählter Werkstoffgruppen auch großtechnisch beherrschbar zu machen.
- Die enge Verzahnung der Materialherstellung, Fertigungstechnik und der Materialwissenschaften in der KIT-Fakultät für Maschinenbau erlaubt bereits jetzt eine gezielte Einstellung von Materialeigenschaften, wodurch die fachliche Basis für die Reduktion der Materialvielfalt gegeben ist. Die Sichtbarkeit und der Einfluss des KIT bei regulatorischen Behörden ist bis dato jedoch unterkritisch, sodass die Diskussion (z.B. bei DIN) tendenziell eher durch wirtschaftliche Aspekte der heimischen Industrie als durch die Rahmenbedingungen der Kreislaufwirtschaft dominiert wird.
- In diesem Kontext kann die Entwicklung von ressourceneffizienten und prozessierbaren Substitutionsmaterialien bspw. neuen, recyclingfähigen Werkstoffen Gegenstand von Untersuchungen sein. Neue alterations- und korrosionsbeständige Materialien und Prozesse sind für die Abscheidung und den Transport von CO<sub>2</sub> (CCS) sowie die Gewinnung und den Transport von Wasserstoff notwendig.

Zu These 2 „Materialien werden in der Kreislaufwirtschaft auf nachhaltiger Rohstoffbasis bereitgestellt“ besteht Forschungsbedarf in mindestens folgenden Bereichen:

- Die Entwicklung von Kunststoffen aus nachwachsenden Rohstoffen und deren ressourcen- und energieeffiziente Herstellung mittels geeigneter Prozesstechnologien muss ausgebaut werden, um zur Skalierung bis hin zu Innovationen zu kommen.
- Dies gilt auch für effiziente thermochemische, chemisch-katalytische, elektrochemische oder elektrobiologische Stoffumwandlungsprozesse, die für technische Anwendungen und in bioökonomischen Verfahren sowie bei der Lebensmittelherstellung von Bedeutung sind.

Zu These 3 „Stoff- und energieeffiziente Recycling-Technologien sind der Schlüssel zu einer Etablierung der Kreislaufführung“ besteht Forschungsbedarf in mindestens folgenden Bereichen:

- In den Energiewendetechnologien werden hochwertige Materialien eingesetzt, deren Rückgewinnung am End-of-Life noch kaum gelingt. Hier braucht es erhebliche Forschungsanstrengungen, um Methoden und Technologien zu entwickeln, die komplexe Materialverbünde ganzheitlich einem hochwertigen Recycling zuführen.
- Eine Forschungs-, Entwicklungs- und Transferplattform für die Logistik, Aufbereitung und das Recycling von Sekundärstoffen wie Baustoffen, Kunststoffen, Metallen und biogenen Materialien im urbanen Raum ist erforderlich.
- Der Trennungsgrad beim Recycling muss eng mit den produktabhängigen Verunreinigungstoleranzen abgestimmt werden. Durch die Betrachtung der physikalischen Grundlagen, der Herstellung und der anwendungsbezogenen Charakterisierung am KIT kann der für eine angestrebte Performance notwendige Trennungsgrad besser abgeschätzt werden, wodurch zielgerichtete Trennverfahren entwickelt werden können.

## **Umweltinteraktionen**

Zu These 1 „Umweltinteraktionen quantifizieren und verstehen“ besteht Forschungsbedarf in mindestens folgenden Bereichen:

- Schadstoffe und deren Einfluss auf Boden-, Wasser- und Luftqualität müssen messtechnisch erfasst werden, um deren raum-zeitliche Variation, Ausbreitung und die damit verbundene Gefährdung zu verstehen. Dies beinhaltet die Entwicklung wegweisender Messtechnik und Sensorik vom Mikro- bis zum satellitengestützten Maßstab, entsprechende numerische Modelle und digitale Zwillinge.
- Komplexe bio-physiko-chemische Prozesse im mesoskaligen Maßstab zwischen Labor und Naturraum müssen erfasst werden, um Wirkmechanismen und Transportpfade zwischen Material- und Produktkreisläufen sowie Umwelt zu verstehen sowie Anreicherungen und funktionale Auswirkungen im Erdsystem abzuschätzen.
- Eine vollständige Bilanz von Emissionen aus dem Material- und Produktkreislauf in die Umwelt und deren Auswirkungen auf Ökosysteme, Wetter und Klima ist als Grundlage für eine Systemanalyse notwendig.
- Die Änderung der Einflüsse auf Wolken, Niederschlag, Strahlung und Klima, durch die Nutzung von alternativen Energiequellen und geänderte Aerosolemissionen mit gekoppelten Erdsystemmodellen wie ICON-ART müssen erfasst werden.

- Die Entwicklung und Verbesserung von ortsaufgelösten Multiparametremessmethoden auf verschiedenen Skalen ermöglichen eine spezifische und geringinvasive Identifikation von Roh- und Schadstoffen sowie eine Kontrolle des Abbaus und der langfristig sicheren Ablagerung von Reststoffen.

Zu These 2 „Ressourcen nutzen“ besteht Forschungsbedarf in mindestens folgenden Bereichen:

- Die Nutzung von Abwässern aus Haushalten, Industrie- sowie Grubenwasser und Geothermalwasser als Ressource zur effizienten (Rück-)Gewinnung und somit der Kreislaufführung von Nährstoffen (Phosphor, Stickstoff) für Düngemittel, Energie (z.B. Wärme) und Rohstoffen (z.B. für die Produktion von Bioplastik, kritische Metalle wie z.B. Lithium) sollen mit wettbewerbsfähigen Technologien verbessert werden.
- Neue Explorationsmodelle und -techniken, wie satelliten- und drohnenbasierte Aufsuchung und neue maschinelle, mikroinvasive Technologien, sollen zur Rohstoffsicherung eingesetzt werden. Innovative Sensorik sowie Sortier- und Trennverfahren erlauben die ortsaufgelöste Identifikation eines Rohstoffs in der Lagerstätte bzw. Aufbereitung.
- Neue Technologien für die effiziente CO<sub>2</sub>-Abscheidung insbesondere von Großemittenten, den Transport und die Erschließung des Untergrunds (für CCS und H<sub>2</sub>-Speicher, Geothermalwässer) entwickelt und erforscht werden.
- CO<sub>2</sub> soll effizient durch geeignete Mikroorganismen genutzt werden, um Schadstoffe basierend auf integrierten Modellen von bio-physiko-chemischen Fluid- Feststoff- wechselwirkungen zu Rohstoffen wie Wasserstoff, Methan und anderen zu wandeln. Damit wird der großvolumige Untergrund als Speicher und als möglicher Bio-Geo- Reaktor zugänglich.
- Pflanzen und Mikroorganismen sollen spezifisch auf Schadstoffe in Altlasten angepasst vor einem Freilandversuch getestet werden und somit eine naturnahe Bodensanierung ermöglichen.
- Eine umfängliche Lebenszyklusanalyse einer Kreislaufwirtschaft soll im Hinblick auf Umweltinteraktionen den Energie- und stofflichen Bedarf der verschiedenen Verfahren der Aufsuchung und Gewinnung und des Recyclings aufzeigen. Damit wäre eine standardisierte, vergleichbare Kennzahlengrundlage für ressourcenschonende Pfade möglich.

Zu These 3 „Umweltschutz und Ressourcenschonung“ besteht Forschungsbedarf in mindestens folgenden Bereichen:

- Zahlreiche Stoffeinträge benötigen wirkungsorientierte, bislang fehlende Grenzwerte und Normen, die sowohl kritische Eintragswerte als auch kritische Konzentrationen berücksichtigen. Für die Abschätzung der Umweltverträglichkeit vieler neuartiger Produkte fehlen entsprechende Normen.
- Reststoffe wie Klärschlamm, Biomüll, Grünschnitt, organische Industrieabfälle, Müllverbrennungsasche u.v.a.m. können bei ihrer Verwertung zur Bodenverbesserung, als Grundstoffe für Recyclingdünger, als Kohlenstoffzuschläge zu nachhaltigen Baustoffen, als Grundstoffe für Biogas und durch Aufbereitung zur Gewinnung von Spurenmetallen u.a. weitestgehend im Kreislauf geführt werden.
- Aktuell nicht verwertbare Reststoffe müssen einer sicheren Deponierung über oder unter Tage zugeführt werden, ohne eine zukünftige Nutzung auszuschließen. Dazu

sollten Daten erhoben, langfristig gespeichert und für eine potenzielle, zukünftige Verwertung in mehreren Jahrzehnten den Nutzenden zur Verfügung stehen (urban mining).

- Negative Emissionen durch CCU und CCS sind im Hinblick auf einen tatsächlichen Klima- und Umweltschutz global zu bewerten, um einen Export von potenziellen Klima- und Umweltschäden mit zu berücksichtigen.
- Um die für Menschen essenzielle Ressource Wasser in ausreichender Menge und Qualität zur Verfügung zu stellen, muss der Zusammenhang zwischen Wetter, Boden und Landnutzung verstanden und entsprechende Monitoring und Frühwarnsysteme für Wasserwerke erarbeitet werden.

### **Systemdesign und -analyse**

Zu These 1 „Kreislaufsystem erfassen und bewerten“ bestehen Forschungsbedarfe in mindestens folgenden Bereichen:

- Kreisläufe unterscheiden sich je nach geografischer Lage erheblich zwischen ländlichen und städtischen Gebieten sowie in verschiedenen Regionen der Erde. Es ist daher notwendig, eine detaillierte Analyse der verfügbaren und insbesondere auch der sekundären Rohstoffe in geografisch hoch aufgelöster Form durchzuführen. Gleichzeitig müssen Abfallströme und ihre Umweltinteraktionen erfasst werden. Um bestehende Kreislaufsysteme über verschiedene Skalen hinweg abzubilden, ist die Entwicklung und Bereitstellung von Modellen sowie von Schnittstellen erforderlich, die die Integration von Daten und Informationen sowie die skalenübergreifende Verknüpfung der Modelle ermöglichen.
- In Bezug auf Umweltwirkungen und Zirkularität besitzen verschiedene Materialien, Produkte und Wertschöpfungsketten eine unterschiedliche, erst durch holistische Betrachtung sichtbare Relevanz. Daten und Modelle mit unterschiedlicher Granularität einschließlich digitaler Zwillinge und Echtzeitdaten müssen daher in die Systemanalyse des Kreislaufsystems integriert und mit spezifischen Detailmodellen verknüpfbar werden.
- Wesentliche Informationen über Produkte und Materialien in zirkulären Wertschöpfungsketten müssen effizient gesammelt, verarbeitet und sinnvoll genutzt werden. Hierbei ist insbesondere auf methodische Transparenz für die Nutzenden zu achten, unabhängig davon, ob diese privat als Endkunden oder industriell an einer Position der Lieferkette platziert sind. Dazu sind geeignete Sensor- und KI-Technologien zu identifizieren, die eine zukünftige optimale Kreislaufwirtschaft unterstützen können.

Zu These 2 „Ziele für das integrative ressourceneffiziente Kreislaufsystem gestalten“ bestehen Forschungsbedarfe in mindestens folgenden Bereichen:

- Neue Produkte und Technologien müssen so gestaltet werden, dass sie zur Kreislaufführung von Materialien beitragen. Dies erfordert eine ökonomische und ökologische Bewertung des Produktdesigns und der Kreislaufführung von energie- und emissionsintensiven Materialien sowie von neuen oder komplexen Stoff- und Produktsystemen im Closed-Loop-Recycling im Hinblick auf Nachhaltigkeit.

- Kreislauffähige Materialien und Produktsysteme, Wertschöpfungsketten und Kaskadennutzungen müssen datenbasiert analysiert, re-designed und optimiert werden. Potentiale und Effekte von Stör- und Schadstoffen, die konsequent ausgeschleust bzw. eliminiert werden müssen, werden von den Materialkreisläufen geliefert.
- Die Bioökonomie spielt in der zukünftigen Kreislaufwirtschaft eine entscheidende Rolle. Es gilt, kreislauffähige biobasierte Material- und Produktsysteme zu designen, zu analysieren und zu optimieren sowie das Potenzial für nachhaltiges Kohlenstoffmanagement daten- und modellbasiert zu ermitteln, mit konventionellen Material- und Produktsystemen sowie Prozessen in der Natur zu vergleichen und entsprechende Strategien zu bewerten.
- Kreislaufwirtschaft und Energiewirtschaft sind eng verknüpft. Es ist dringend notwendig, Abhängigkeiten und wechselseitige Einflüsse von Stoff- und Energieflüssen zu analysieren, insbesondere im Hinblick auf die Transformationsansätze für die heutige europäische Industrielandschaft.
- Internationale Rohstoffquellen und -märkte haben wechselseitige Einflüsse auf die deutsche und europäische Kreislaufwirtschaft. Diese müssen analysiert und bewertet werden, um (internationale) Lieferketten im Kontext einer Kreislaufwirtschaft potenziell neu zu gestalten und ihre Resilienz gegenüber Naturkatastrophen, politischen Einflüssen und Machtverschiebungen zu gewährleisten.
- Die fehlende rechtlich-organisatorische Umsetzbarkeit von Elementen der Kreislaufwirtschaft stellt ein wichtiges Innovationshindernis dar. Für ein systemisches Verständnis sind die aktuelle Gesetzgebung, Normen und ihre Vergleichbarkeit mit internationalen Märkten zu analysieren und bewerten.
- Ein weiteres wichtiges Element ist die Analyse von Anreizen für Zirkularität, Recycling und Ressourcenschonung im Kontext einer nachhaltigen Finanzwirtschaft und unter Betrachtung der EU-Taxonomie für im Kreislauf geführte Produkte.

Zu These 3 „Optimierung des Kreislaufsystems begleiten“ bestehen Forschungsfragen in mindestens folgenden Bereichen:

- Die Transformation der Abfallwirtschaft hin zu einer Recyclingwirtschaft erfordert das Design, die Analyse und die Optimierung von Recyclingnetzwerken, vernetzten Wertschöpfungsketten und interagierenden Kreisläufen. Dabei müssen Projektionen in die Zukunft sowie Foresight-Szenarien entwickelt werden, die verschiedene Ziele, Zielgewichtungen und mögliche politische, wirtschaftliche und regulatorische Rahmenbedingungen berücksichtigen.
- Das Ressourcensystemdesign, mit dem konkreten Ziel der Entwicklung von Technologie-Roadmaps, ist ein zentrales Forschungsgebiet der Kreislaufwirtschaft. Es spielt bei der Umsetzung der nationalen Carbon Management Strategie und der Kreislaufwirtschaftsstrategie eine entscheidende Rolle.

Abschließend ist festzuhalten, dass nur die gemeinsame integrierte Betrachtung der vier Themenfelder Produktkreisläufe, Materialkreisläufe, Umweltinteraktionen und Systemdesign und -analyse am KIT im Rahmen von integrativen ressourceneffizienten Kreislaufsystemen essentielle Beiträge zur Kreislaufwirtschaft und damit zur nachhaltigen gesellschaftlichen und ökonomischen Leistungsfähigkeit Deutschlands in Europa ermöglichen wird.

## 5. Lehrangebote

Für eine wirksame Verankerung der integrativen ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft in den Lehrangeboten des KIT bedarf es neuer Komponenten auf unterschiedlichen Ebenen. Diese werden wie in den Forschungsfragen zunächst mit Thesen motiviert:

**These 1 „Bedarf“:** Es besteht ein hoher Bedarf an exzellent ausgebildeten Expertinnen und Experten in den Ingenieur-, Natur- und Wirtschaftswissenschaften, die die Kreislaufwirtschaft ganzheitlich bewerten und aktiv gestalten können. Dies erfordert eine fundierte akademische Qualifizierung als auch kontinuierliche Weiterbildungsmaßnahmen im Sinne von Life-long-learning.

**These 2 „Nachfrage“:** Es besteht ein großes Interesse von Studieninteressierten und Studierenden an Lehrveranstaltungen zur Kreislaufwirtschaft, insbesondere im Hinblick auf integrative ressourceneffiziente Kreislaufsysteme (REKS).

Die beiden Thesen zu **Lehrangeboten** müssen in unterschiedlichen Stufen angegangen werden: Im niederschweligen Bereich soll das Konzept „Bildung für Nachhaltige Entwicklung“ (BNE) mit weiteren Lehrveranstaltungen gestärkt und in unterschiedliche Studiengänge integriert werden. Um den Bedarfen der Wirtschaft an hervorragend ausgebildeten Fachkräften mit Fokus auf integrative ressourceneffiziente Kreislaufsysteme zu begegnen und Studieninteressierten zugleich einen attraktiven Einstiegspunkt dafür zu bieten braucht es neue Studiengänge, in denen die heute überfachlichen Kompetenzen gebündelt vermittelt werden.

Für die vielen Promovierenden, die sich mit unterschiedlichen Aspekten der Kreislaufwirtschaft befassen, soll eine **Graduiertenschule** mit dem Schwerpunkt „Ressourceneffiziente Kreislaufsysteme“ etabliert werden, sodass sie Zugang zu promotionsbegleitenden Veranstaltungen zu erhalten.

Als weitere wesentliche Komponente der Bildungsangebote werden berufsbegleitende **Weiterbildungsmaßnahmen** in Form von einzelnen kleinteiligen Modulen, wie sie in anderen Themenfeldern an der HECTOR-School bereits etabliert sind, entwickelt und einzeln oder gebündelt angeboten.

## 6. Referenzen

GDP (2024): Global fertility in 204 countries and territories, 1950 – 2021, with forecasts to 2100: a comprehensive demographic analysis for the global burden of disease study 2011. *The Lancet*, 403, 2057 – 2099, <https://doi.org/10.1016/>

Grauberger, P.; Dörr, M.; Lanza, G.; Kaiser, J.; Albers, A.; Düser, T.; Tusch, L.; Seidler, M.; Dietrich, S.; Schulze, V.; Matthiesen, S. (2024). Enabling the Vision of a Perpetual Innovative Product - Predicting Function Fulfillment of New Product Generations in a Circular Factory. *at - Automatisierungstechnik*, vol. 72, no. 9, 2024, pp. 815-828. <https://doi.org/10.1515/auto-2024-0010>

KIT MTET5 <https://www.mtet.kit.edu/59.php>, Zugriff am 15.9.2025

OECD 2024: Real GDP long-term forecast. <https://www.oecd.org/en/data/indicators/real-gdp-long-term-forecast.html> Zugriff 27.8.2024.

Potting, José; Hekkert, M.P.; Worrell, E.; Hanemaaijer, Aldert (2017) Planbureau voor de Leefomgeving, issue 2544 (Report)

UN 2024: World population prospects. Zugriff 24.9.2024, <https://population.un.org/wpp/>

United Nations (2015): Sustainable development goals. Online verfügbar unter <https://sdgs.un.org/goals>, zuletzt geprüft am 14.05.2024.

UN 2024: World population prospects, <https://population.un.org/wpp/>, Zugriff am 24.9.2024