

**BIOVAL**

FROM WASTE TO VALUE



Braunschweig University of Art

Hochschule für Bildende Künste Braunschweig



Hochschule für Bildende Künste Braunschweig  
Institut für Designforschung  
Transformation Design

Masterarbeit zum Thema:

Förderung der Kaskadennutzung in der Bioökonomie  
Ein Pilotprojekt zur digitalen Erfassung von Biomasse

Welche Handlungsansätze lassen sich für die digitale Abbildung von biogenen  
Rest- und Sekundärstoffen und deren ressourceneffiziente Nutzung ableiten?

Zur Erlangung des Grades: Master of Arts

Vorgelegt von:

Lukas Unterholzner

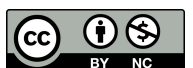
Matrikelnummer: 74767

Fachsemester: 6

Abgabedatum: 20. Juli 2023

Erstgutachter: Dr. Paul Feigelfeld

Zweitgutachterin: Dr. Bianca Herlo





## Geschlechterneutrale Sprache

Um den Anforderungen an eine geschlechterneutrale Sprache gerecht zu werden, wird in der vorliegenden Arbeit nach Möglichkeit geschlechtsneutral formuliert. Sollte dies nicht möglich sein, wird der Doppelpunkt zum Gendern verwendet, was insbesondere den Anforderungen inklusiver Schreibweisen gerecht wird, die unter anderem die Verwendung von E-Readern für Menschen mit Behinderung ermöglicht.

# Abstrakt

Ziel des Transformations Designs ist der Wandel zu einem zukunftsfähigen, gerechten und guten Leben und Wirtschaften für alle. Getragen vom Verständnis für Wechselwirkungen und Abhängigkeiten der diversen Herausforderungen, werden Handlungsansätze entwickelt. Im Zuge seiner Forderung nach der *großen Transformation* betont Uwe Schneidewind dabei die Notwendigkeit eines grundlegenden Werte- und Paradigmenwandels als Prämisse für eine erfolgreiche Transformation. Sieben Kernbereiche der Veränderung – Wohlstand und Konsum, Energie, Mobilität, Ernährung, urbanes Leben, Industrie und Ressourcen – werden als essenzielle Arenen für diese Transformation beschrieben und müssen zusammen gedacht werden.<sup>1</sup>

Die vorliegende Arbeit wendet sich primär der Ressourcen- und Industriewende in Deutschland zu, die sich zu Teilen aus dem Wandel zu einer Kreislaufwirtschaft und Bioökonomie konstituieren. Allerdings reicht diese Veränderung allein aus Gründen des zu hohen Flächenbedarfs zur Produktion der erforderlichen Biomasse nicht aus, um den aktuellen und erst recht den zu erwartenden Ressourcenverbrauch zu decken.<sup>2</sup> Daher müssen Suffizienzbemühungen den Ressourcenverbrauch grundlegend verringern. Darauf bezogen spricht Ulrike Herrmann entgegen dem vorherrschenden Paradigma des “grünen Wachstums” vom *Grünen Schrumpfen*.<sup>3</sup> Es braucht grüne Technologien und Innovationen, bei gleichzeitiger Entmaterialisierung des Konsums, und gezieltem Vermindern des Wirtschaftswachstums. Die bisherigen Entwicklungen haben gezeigt, dass Effizienzgewinne durch Rebound Effekte, global wachsende Bevölkerungszahlen, steigenden Wohlstand und kapitalistische Steigerungsdynamiken zunichtegemacht werden.

Um eine möglichst klimaschonende und umweltverträgliche Wirtschaftsweise zu ermöglichen, stellt die Transformation zu einer biobasierten Kreislaufwirtschaft aktuell eine mögliche Teillösung dar. Dabei gilt es insbesondere Zielkonflikte zu verringern und die Ressourceneffizienz zu maximieren. Dafür müssen im Sinne der Kaskadennutzung Stoffe möglichst lange auf einer möglichst hohen Nutzungsebene geführt werden sowie biogene Rest- und Sekundärstoffe mobilisiert und in Kreisläufe zurückgeführt werden. Hier bestehen oftmals Konflikte zwischen Kosten- und Nachhaltigkeitsfaktoren, welche jeweils andere Nutzungshierarchien und Nutzungspfade ergeben würden. Dafür braucht es gesetzliche Lenkungsmaßnahmen, die ökologischen Gesichtspunkten einen höheren Stellwert geben, den umweltgerechten Umgang mit Rest- und Sekundärstoffen sicherstellen und gleichzeitig den Abbau rechtlicher Hürden und fragmentierter Zuständigkeiten herbeiführen.

---

<sup>1</sup> (Schneidewind, 2018, 476)

<sup>2</sup> (BUND, 2021)

<sup>3</sup> (Herrmann, 2022)

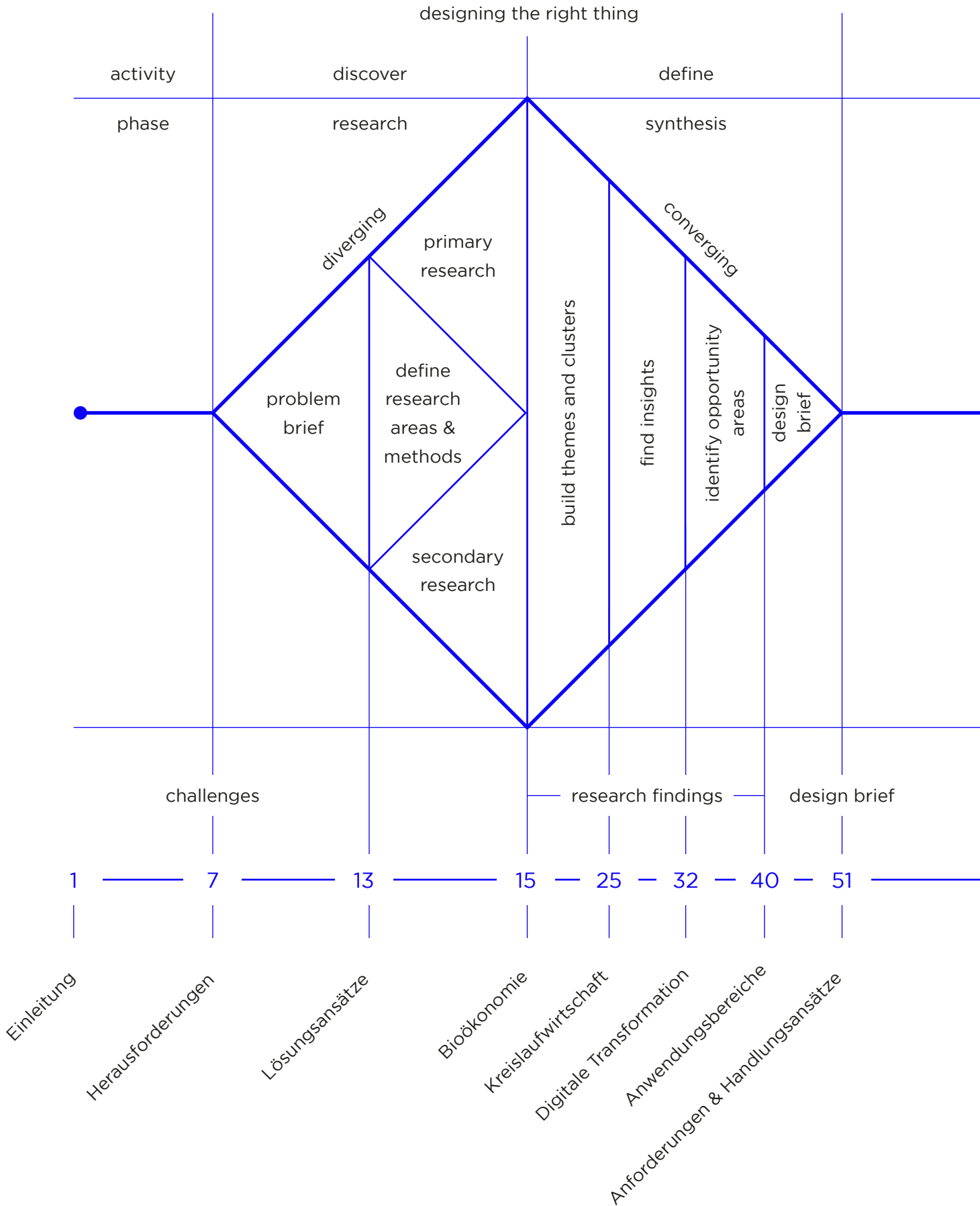
Zur Erfassung, Darstellung und Koordination der komplexen Stoffströme ist eine umfassende Informations- und Datengrundlage notwendig. Eine vielversprechende Möglichkeit, diese zu schaffen, stellen Materialpässe in Form von digitalen Zwillingen dar. Dabei werden etwa Gebäude, Produkte und Materialien in Form von Informations- und Funktionsmodellen abgebildet. Auf Basis von digitalen Zwillingen können den physischen Wirtschaftsgütern digitale Abbilder zugeordnet werden, die umfassende Informationen zu Materialität, Wert, Servicer- und Reparierbarkeit sowie Recyclebarkeit enthalten. Auch technische Informationen, Dokumentationen, Lebenszyklusinformationen und sogenannte Carbon Footprint Modelle können angefügt werden. Überdies können digitale Zwillinge auch für Simulationen, Monitoring und Vorhersagen verwendet werden. Dies kann beispielsweise durch Materialflussanalysen erfolgen und ermöglicht die Steuerung und Optimierung von Stoffströmen sowie die Verbesserung der Ressourcenverfügbarkeiten in der Bioökonomie. Eine große Herausforderung, die dafür notwendigen Daten zu sammeln und zwischen unterschiedlichen Unternehmen aus unterschiedlichen Branchen und Ländern auszutauschen, stellt die Heterogenität der Daten dar. Die Industrie 4.0 bietet hier Potenziale für interoperable Vernetzung und Datenaustausch durch standardisierte Datencontainer, sogenannte Verwaltungsschalen, die Informationen zu physischen Assets enthalten.

Das Konzept der digitalen Zwillinge von Materialien und Produkten findet sich auch auf der politischen Agenda. Am 30. März 2022 hat die Europäische Kommission im Rahmen der Sustainable Product Initiative einen Entwurf für eine neue Ökodesign-Verordnung präsentiert.<sup>4</sup> Teil dieser Verordnung ist die Einführung eines digitalen Produktpasses, der dabei helfen soll, Stoffkreisläufe zu schließen und produktspezifische Informationen entlang der Wertschöpfungskette bereitzustellen. Damit soll ein rechtlicher Rahmen für den europäischen Binnenmarkt geschaffen werden, um ein verpflichtendes Informationssystem für die Kreislaufwirtschaft und insbesondere ökologische Produkte zu etablieren. Gekoppelt mit zusätzlichen Informationen zu Verwertungsmöglichkeiten der einzelnen Produkte oder Materialien und der Priorisierung ökologischer Gesichtspunkte ergibt sich ein großes Potenzial für nachhaltige Wertschöpfung. Des Weiteren soll damit die Regionalisierung, Dekarbonisierung und Ressourceneffizienz verbessert werden. Auch der digitale Produktpass könnte über Verwaltungsschalen abgebildet werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Konzept für die Erstellung von digitalen Zwillingen entwickelt, um Schnittstellen für verschiedene Anwendungen bereitzustellen. Damit soll die Grundlage für die datenbasierte Kreislaufwirtschaft und Bioökonomie geliefert werden. Herausforderungen der Bioökonomie, Kreislaufwirtschaft und Digitalisierung werden dargestellt und Lösungsansätze sowie Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Biomasse und speziell mit biogenen Rest- und Sekundärstoffen und deren digitale Erfassung erarbeitet.

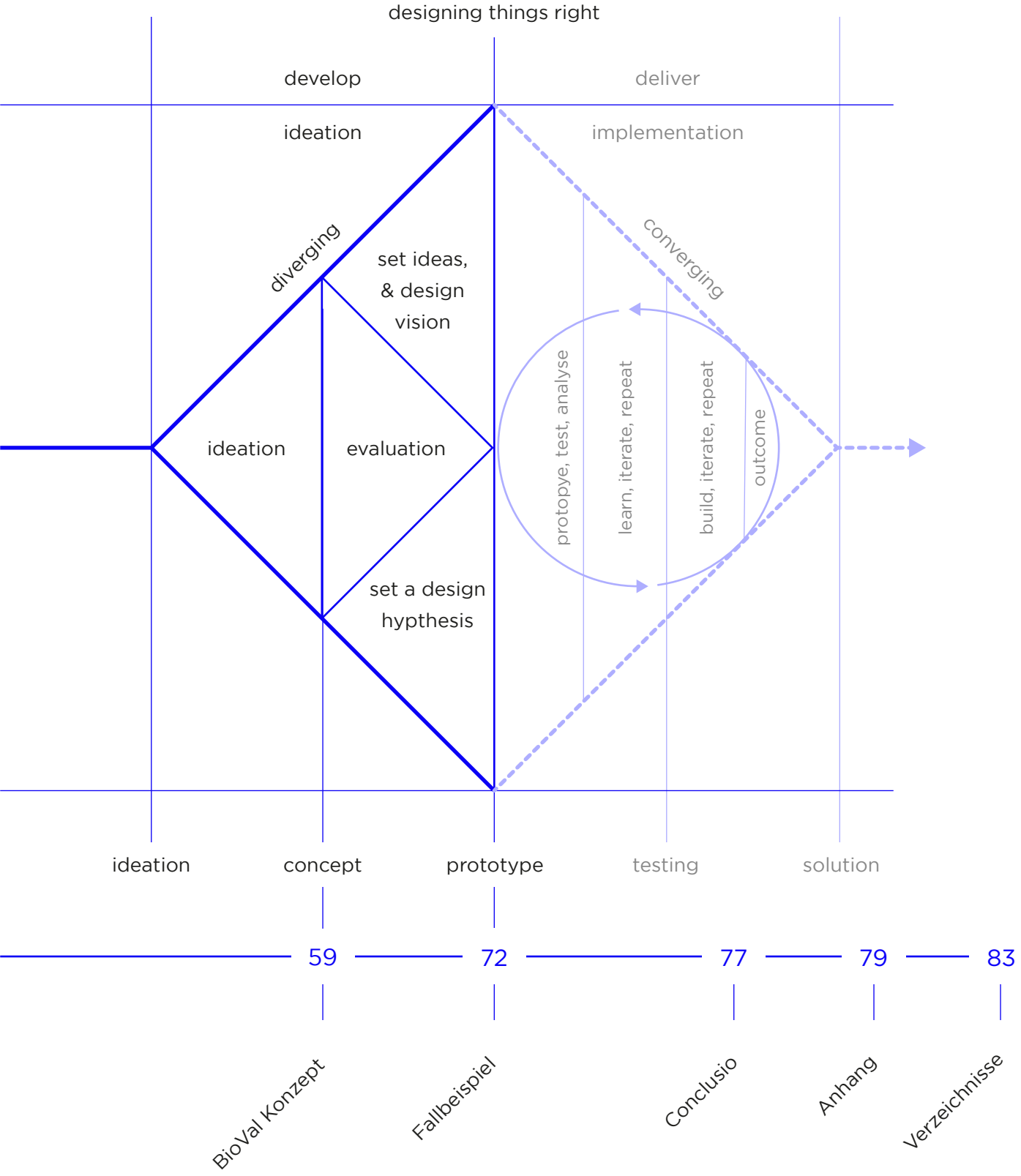
---

<sup>4</sup> (Europäische Kommission, 2022)

# Übersicht & Prozess







01. Abb.: Übersicht und Entwurfsprozess basierend auf dem Double Diamond Modell (eigene Darstellung basierend auf Nessler & Hinderling, 2017 und British Design Council, 2005)

# Inhaltsverzeichnis

<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
Aufbau und Methodik	1
Zielsetzung	2
Relevanz für das Transformation Design	3
Einordnung	4
<b>Herausforderungen</b>	<b>7</b>
Systemische Verflechtungen	7
Ressourcenverbrauch	8
Globale Gerechtigkeit	10
Überschreitung planetarer Grenzen	11
Ausbleibende Entkopplungseffekte	12
<b>Lösungsansätze</b>	<b>13</b>
<b>Bioökonomie</b>	<b>15</b>
Definition	15
Anwendungsfelder	16
Ziele	17
Entwicklungen	18
Datenlage zu Biomasse	19
Biogene Rest- und Sekundärstoffe	20
Herausforderungen	22
<b>Kreislaufwirtschaft</b>	<b>25</b>
Prinzipien der Kreislaufwirtschaft	26
Ziele der Kreislaufwirtschaft	27
Kaskadennutzung	28
<b>Digitale Transformation</b>	<b>32</b>
Digitale zirkuläre Bioökonomie	33
Multilevel-Perspektive	34
Industrie 4.0	35
Digitale Zwillinge	37

<b>Anwendungsbereiche</b>	<b>40</b>
Prozesskontrolle und -optimierung	40
Materialflussanalysen	40
Abfallwirtschaft und Recycling	41
Optimierung von Verwertungspfaden und Ressourceneffizienz	42
Digitale Produkt- und Materialpässe	44
<b>Anforderungen und Handlungsansätze</b>	<b>51</b>
Bioökonomie, biogene Materialien und Reststoffe	52
Kreislaufwirtschaft und Kaskadennutzung	53
Industrie 4.0, digitale Zwillinge, Materialpässe	54
Niedrigschwelligkeit	55
Datenschutz & Datensouveränität	55
Integrierte Datensysteme	56
Open Data	56
Nachhaltigkeit	57
Wissenschaft	57
Politik	58
<b>BioVal Konzept</b>	<b>59</b>
Digitale Erfassung von Biomasse	60
<b>Fallbeispiel</b>	<b>68</b>
Gärrest	68
Mikroalgen	69
Datenstruktur BioVal Sub Model	71
Überführung in die Verwaltungsschale	72
Vermittlungsprozess	75
<b>Conclusio</b>	<b>77</b>
<b>Anhang</b>	<b>79</b>
I. Reststoffkategorien	79
II. Properties verschiedener Sub Models	80
<b>Verzeichnisse</b>	<b>83</b>
Abbildungsverzeichnis	83
Literaturverzeichnis	85

# Einleitung

## Aufbau und Methodik

Der Aufbau und der Prozess der vorliegenden Arbeit basiert auf dem Double Diamond Modell des British Design Council.<sup>5</sup> Dieses Modell sieht grundsätzlich vier Phasen eines Gestaltungsprozesses vor. Die Research-, Synthese-, Entwicklungs- und Implementierungs- oder Umsetzungsphase. Die doppelte Diamantenform soll dabei jeweils das geforderte divergierende und konvergierende Denken bezogen auf den Problem- und Lösungsraum veranschaulichen (siehe Abb. 1: Übersicht und Prozess).

Vorab erfolgt die Einordnung des Projekts und eine Darstellung des Projektkontexts. Im Research Teil wird eine Analyse der gegenwärtigen Herausforderungen und ihrer Interdependenzen und eine allgemeine Problemformulierung vorgenommen. Anschließend werden Lösungsstrategien und Ansätze definiert und die Researchfelder Bioökonomie, Kreislaufwirtschaft und Digitalisierung/Industrie 4.0 festgelegt. Ergänzend zum Praxisbezug im Rahmen der Projektarbeit bei der Green-Tech Investment AG wird mit der Methodik der Literaturrecherche versucht, das implizite Erfahrungswissen mit wissenschaftlichen Quellen zu ergänzen. So soll ein Überblick über die unterschiedlichen Themenfelder und den Stand des Wissens und der Technik gewonnen werden. Dabei werden Betrachtungsweisen des Transformation Design auf die gewählten Forschungsfelder angewandt, um sowohl theoretische als auch praktische Einsichten in die Dynamiken und Möglichkeiten einer digital organisierten kreislaforientierten Bioökonomie zu gewähren und kritisch zu reflektieren.

Im Kern soll veranschaulicht werden, welche Möglichkeiten sich durch digitale Anwendungen, insbesondere digitale Materialpässe und die Industrie 4.0, in den Bereichen der Bioökonomie und Kreislaufwirtschaft ergeben. Als Barriere, diese zu implementieren, wird das Fehlen eines zentralen standardisierten interoperablen Datencontainers zu den einzelnen Biomassechargen identifiziert und daraus eine konkrete Gestaltungsaufgabe für einen digitalen Materialpass in Form einer Verwaltungsschale abgeleitet. Außerdem werden allgemeine Handlungsempfehlungen für diese Felder formuliert und Anforderungen an ein Konzept zur Digitalisierung von Biomasse formuliert. Darauf basierend wird ein Konzept zur Digitalisierung von Biomasse entwickelt und durch ein Fallbeispiel veranschaulicht. Nach dem Double Diamond Modell würden anschließend erste Prototypen iterierend abgetestet, angepasst und weiterentwickelt werden. Dieser Teil des Prozesses wird von der vorliegenden Arbeit nicht abgedeckt, erfolgt jedoch in den nächsten Monaten. In der Conclusio werden die Erkenntnisse zusammengefasst und kritisch reflektiert.

---

<sup>5</sup> (British Design Council, 2005)

## Zielsetzung

In dieser Arbeit wird das Konzept der digital koordinierten zirkulären Bioökonomie aufgegriffen und beschrieben. Um die Datengrundlage dafür zu schaffen, wird ein Prozess zur Erfassung von Biomasse, insbesondere von bislang weniger genutzten Rest- und Sekundärstoffen entwickelt, der es ermöglicht, diese Stoffe zu charakterisieren und intelligenter zu verwenden. Biomasse soll erfasst und als digitaler Zwilling mit den jeweiligen Stoffeigenschaften abgebildet werden. Bei der Erfassung sollen nicht nur grundlegende Eigenschaften wie Herkunft, Qualität und biochemische Aspekte sowie die daraus resultierende stoffliche Verwertbarkeit berücksichtigt werden, sondern darüber hinaus eine Bewertung zu Klimaeffekt, Energieumwandlung und Schadstofffrachten ermöglicht werden. Die ganzheitliche digitale Abbildung in einem standardisierten Datencontainer soll die Basis für die diversen digitalen Anwendungen zur Optimierung einer ökologischen, kreislauforientierten Bioökonomie bieten.

Das zentrale Erkenntnisinteresse der Arbeit liegt darin, zu verstehen, wo durch die Digitalisierung ermöglichte Hebelpunkte zur Förderung einer kreislauf- und kaskadenoptimierten Bioökonomie liegen und welche Aspekte den Transformationsprozess behindern. Im Zug der Arbeit sollen die Eignung von digitalen Zwillingen in Form von Verwaltungsschalen nach dem Konzept der Industrie 4.0 als interoperabler Datencontainer für Biomasse erforscht werden. Dabei besteht nicht der Anspruch, ein universelles Konzept zu entwickeln, sondern erste Ansätze im Bereich der digitalen Erfassung von Biomasse in Verwaltungsschalen zu erarbeiten. Damit sollen Impulse für den weiteren Diskurs mit verschiedensten Akteur:innen geliefert werden, denn es müssen vielseitige Interessen und Anforderungen in multidimensionalen Wertschöpfungsnetzwerken berücksichtigt und abgestimmt werden.

## Relevanz für das Transformation Design

Nach der Beschreibung des Instituts für Designforschung an der HBK in Braunschweig liegt der Fokus des Transformation Designs auf der Nachhaltigkeit und Zukunftsfähigkeit von Gesellschaften bei gleichzeitiger Beachtung der ökonomischen Rahmenbedingungen. Um Veränderungsprozesse mitzugestalten, sollte zuerst ein tiefgreifendes Verständnis für die gegenwärtige Situation und die Wechselwirkungen, Abhängigkeiten und Kausalitäten komplexer Problematiken erlangt werden. Auf Basis dieser Sensibilisierung werden multiperspektivisch, transdisziplinär durch kritisch-experimentelle, forschungsbasierte Designmethoden Visionen entwickelt und konkrete Lösungs- bzw. Handlungsansätze abgeleitet. Diese sollen kritisch reflektiert und gesellschaftlich debattiert und verhandelt werden. Prozesse, Zusammenhänge und Interaktionen mit anderen Akteur:innen, Disziplinen, Institutionen und Gesellschaft sollen stets mitgedacht werden.<sup>6</sup> Mit den Prinzipien des Designs werden konzeptuelle Entwürfe und innovative Systeme entwickelt, so auch in der vorliegenden Arbeit. Diese soll einen Beitrag zu einer nachhaltigeren, kreislauforientierten und biobasierten Wirtschaftsweise leisten. Dabei werden globale Entwicklungen und Herausforderungen adressiert und potenzielle Teillösungen identifiziert. Aus dem Praxisbezug und einer umfassenden Literaturrecherche werden Hindernisse für den Transformationsprozess dargestellt und Handlungsempfehlungen formuliert. Die vorliegende Arbeit soll exemplarisch zeigen, dass das Transformation Design nicht nur Visionen entwickeln und Handlungsansätze liefern, sondern auch konkrete Beiträge in Unternehmen liefern und Umsetzungskompetenz beweisen kann.

---

<sup>6</sup> (Hochschule für Bildende Künste Braunschweig, 2023)

## Einordnung



02. Abb.: Fotorealistische Darstellung des geplanten Bioökonomiecampus in Hebertshausen  
(Quelle: Maier Neuberger Architekten GmbH, 2022)

Die vorliegende Arbeit wurde aus dem Kontext einer Anstellung bei der Green-Tech Investment AG mit Sitz in München verfasst. Die Green-Tech Investment AG (GTI) bekam im Jahr 2021 die Möglichkeit, im Umland von München das Areal einer ehemaligen Kartonfabrik umzunutzen. Dabei handelt es sich um mehrere Industriehallen mit einer Fläche von über 85.000 m<sup>2</sup> und einem großen Freigelände. Die GTI entwickelte dafür das Clusterprojekt VIRIDIS (lat. für grün, grünlich). Dieses besteht aus den drei Teilbereichen PHYSICAL HUB, INVEST HUB und PROJECT HUB. Dabei soll in einem ersten Schritt das Areal in mehreren Ausbaustufen zu einem Bioökonomie- und Green-Tech-Campus erweitert werden (PHYSICAL HUB) (siehe Abb. 2). Im Sinn des Clusterkonzepts sollen hier Forschungs- und Entwicklungseinrichtungen, Finanzintermediäre, Start-ups, Unternehmen und Institutionen aus den Bereichen der biobasierten Wirtschaft und der grünen Technologien angesiedelt werden. So sollen Synergien geschaffen, die Kollaboration intensiviert, Barrieren abgebaut, das Teilen von Wissen und Ressourcen gefördert und somit die Innovationskraft aller Akteur:innen des Standorts verbessert werden.<sup>7</sup> Die GTI tritt hier als Hauptmieter und Betreiber auf. In einem weiteren Schritt soll eine digitale Plattform entwickelt werden, die den hochkomplexen, dynamischen und dezentralen Ansprüchen für Kollaboration und Austausch zwischen den einzelnen Akteur:innen gerecht wird (PROJECT HUB). Ebenso beteiligt sich

---

<sup>7</sup> (Wübbenhorst, 2018)

die GTI an Start-ups und stellt erleichterte Gründungsbedingungen in Form einer Inkubator-Umgebung zur Verfügung (INVEST HUB). Inkubatoren sind Einrichtungen, die für Start-ups umfassende Unterstützung bei der Gründung bieten. Dafür werden unter anderem Infrastrukturen, Wissen sowie bereits etablierte Netzwerke zur Verfügung gestellt und bieten somit ein förderliches Ökosystem.<sup>8</sup>

## BioVal



03. Abb.: Logo BioVal (Quelle: eigene Darstellung)

Als Hybrid aus PROJECT HUB und INVEST HUB entwickelt die GTI mit BioVal auch eigene Projekte. BioVal soll sowohl exemplarisch eines der ersten Projekte im Bereich des PROJECT HUBS sein, als auch die erste Beteiligung der GTI, mit der Option in weiterer Folge ein Spin-off, also ein eigenständiges Unternehmen hervorzubringen. Außerdem sollen mit BioVal in Form eines Demonstrator Projektes die Stoffströme zwischen den einzelnen Akteur:innen digitalisiert, ausgewertet und optimiert werden. Das BioVal Projekt stellt den Kern der vorliegenden Arbeit dar und soll im Folgenden kurz vorgestellt werden (Logo siehe Abbildung 3). Der Name stellt eine Zusammenführung von *biogen* und *value* dar. Wobei biogen aus dem altgriechischen Wort βίος *bios* „Leben“ und -genese gebildet wird, was „biologischen oder organischen Ursprungs“ bedeutet.<sup>9</sup> Das englische Wort Value steht für stofflichen wie auch finanziellen Wert, der in diesen biogenen Stoffen steckt. Im Grunde beschäftigt sich BioVal also mit der Erfassung und Bewertung von biogenen Stoffen, insbesondere Rest- und Sekundärstoffen. Durch die ganzheitliche stoffliche Charakterisierung sollen verschiedene Verwertungs- und Optionen für Nutzungspfade dargestellt, und der stoffliche wie auch finanzielle Wert der jeweiligen Stoffe aufgezeigt werden. Ziel ist es, damit die digitale, kreislauforientierte Bioökonomie zu fördern und somit durch regionale, nachwachsende und umweltschonende Rohstoffquellen Alternativen zu fossilen Rohstoffen und Energieträgern zu finden. Dies bezieht sich auf Material pflanzlicher wie auch tierischer Herkunft.

---

<sup>8</sup> (Achleitner, 2018)

<sup>9</sup> (Duden Online, 2023)



## Team & Projektpartner

### BioVal

Das transdisziplinäre BioVal Team setzt sich aus dem Projektleiter und unternehmensseitigen Betreuer dieser Arbeit Josef Hirte (Physiker und IT-Experte) sowie dem Bachelor Studenten im Bereich soziale Innovation Michael Hopf und dem Autor, Lukas Unterholzner zusammen. Michael Hopf verfasst seine Abschlussarbeit ebenfalls mit Projektbezug, allerdings werden dabei die marktseitigen Anforderungen an BioVal untersucht sowie Interviews mit potenziellen Nutzer:innen durchgeführt.

### objective partner AG

Josef Hirte, MSc Physik, ist bei der objective partner AG angestellt und ist dort Spezialist für digitale Zwillinge und die Programmierung verschiedener Schnittstellen. Die objective partner AG stellt im Rahmen dieser Arbeit ihre eigene Software auf Basis von Eclipse BaSyx zur Erstellung von digitalen Zwillingen zur Verfügung.<sup>10</sup> An dieser Stelle sei erwähnt, dass es dafür auch frei zugängliche, nicht proprietäre Softwarelösungen etwa der Industrial Digital Twin Association e. V. gibt.<sup>11</sup>

### AlgaeRithm

Dr. Johannes Martin beschäftigt sich mit seinem Start-up AlgaeRithm mit Automatisierung von Mikroalgenzuchtssystemen. Er ist Experte für die Kultivierung von Mikroalgen. Diese sind hervorragende Verwerter von biogenen Reststoffen und können zu verschiedenen hochwertigen Produkten weiterverarbeitet werden. AlgaeRithm hat als externer Projektpartner Interesse an den Potenzialen von digitalen Zwillingen unterschiedlicher Substrate und deren Einbindung in den automatisierten Zuchtprozess und stellt somit exemplarisch einen möglichen Abnehmer von biogenen Reststoffen mit Interesse an deren digitalen Abbildern dar.

### VCG.ai

Jon Goriup, CEO der UWAZI Tech GmbH entwickelt mit dem Value Chain Generator eine Software, die Verwertungspfade für verschiedene Reststoffe inklusive den dafür notwendigen Prozessschritten aufzeigt.<sup>12</sup> BioVal stellt als Middleware eine vielversprechende Schnittstelle für vcg.ai dar, weil die benötigten individuellen Unternehmensdaten zu Stoffströmen standardisiert an einem zentralen Ort vorliegen. Ziel ist es, biogene Reststoffe digital zu erfassen, und in einem weiteren Schritt je nach Beschaffenheit und Eigenschaften an andere Akteure zu vermitteln.

---

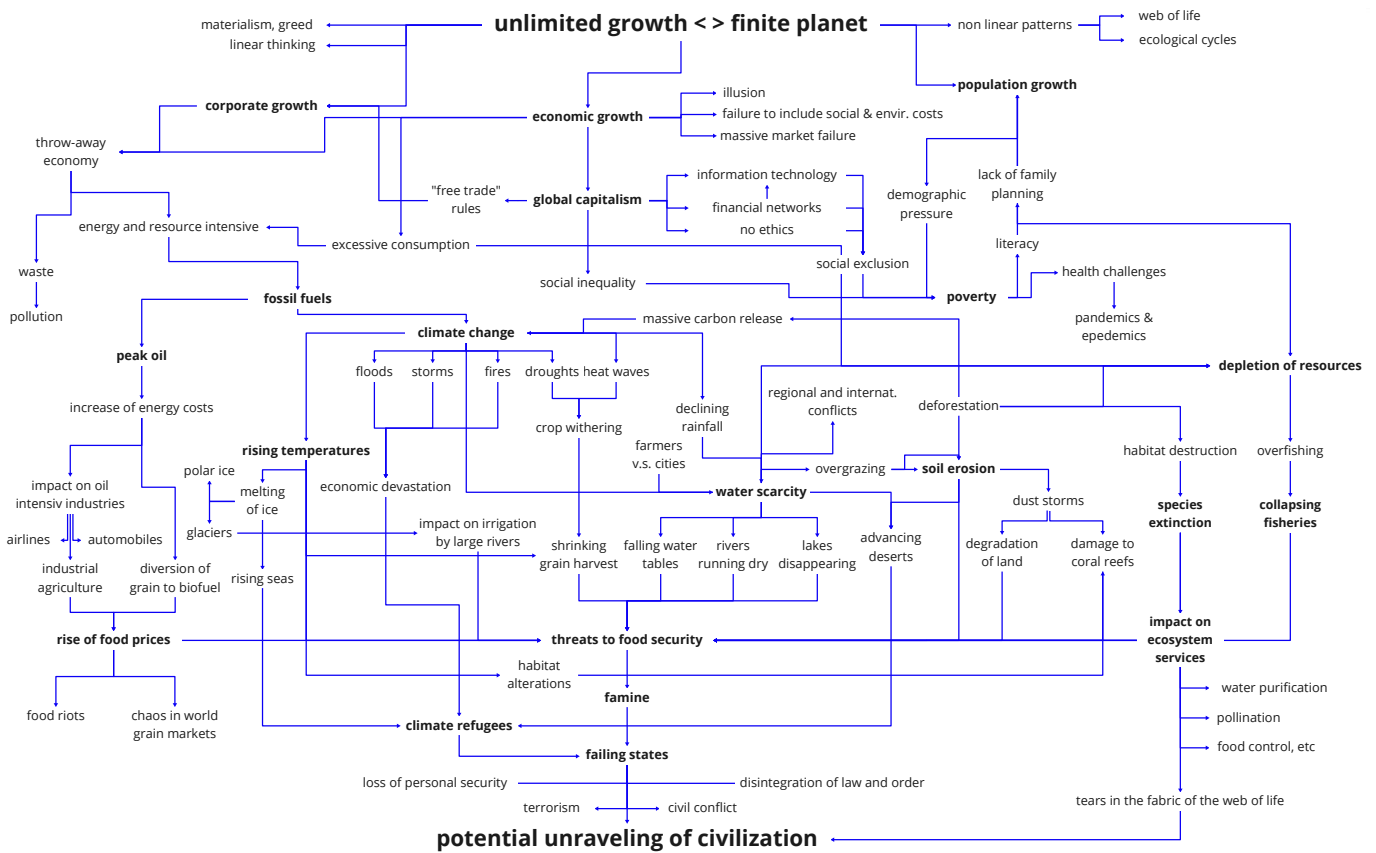
<sup>10</sup> (Eclipse Foundation, 2023)

<sup>11</sup> (Industrial Digital Twin Association e.V., 2023)

<sup>12</sup> (vcg.ai, 2023)

# Herausforderungen

## Systemische Verflechtungen

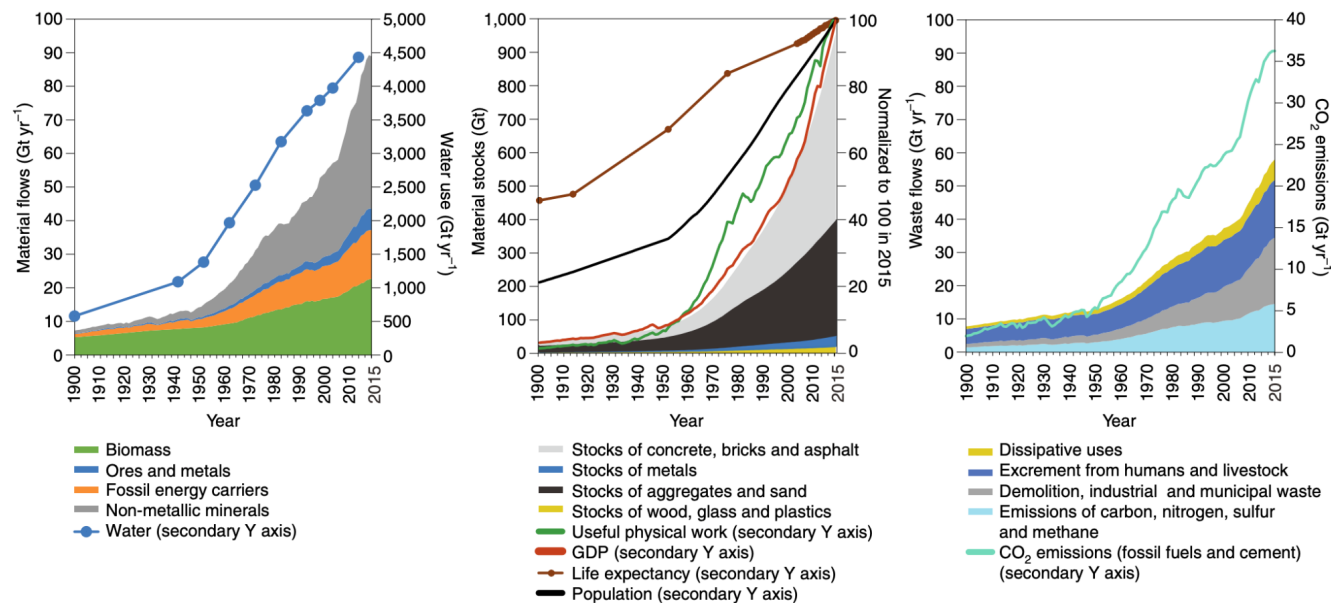


04. Abb.: Verflechtung von globalen Problemen (adaptiert von Capra & Luisi, 2014, 362)

Die Weltgemeinschaft ist gegenwärtig mit einer Vielzahl globaler Probleme und Herausforderungen und deren Auswirkungen konfrontiert. Diese stehen in Wechselwirkungen und gegenseitigen Abhängigkeiten zueinander und erfordern ganzheitliche systemische Veränderungsprozesse. In Abbildung 4 wird versucht, Zusammenhänge und Verflechtungen darzustellen sowie Ursachen- und Wirkungsbeziehungen zu veranschaulichen.<sup>13</sup> Als Ausgangspunkt ist das grenzenlose Wachstum, genauer gesagt die Expansionsdynamiken der Moderne auf einem Planeten mit begrenzter Kapazität und Regenerationsfähigkeit zu erkennen. Die Anerkennung dieses Widerspruchs und der komplexen Zusammenhänge liegt dieser Arbeit zugrunde. Mit den Ansätzen einer digitalisierten, zirkulären Bioökonomie kann die Potenzierung der durch das inhärent Wachstums-getriebene kapitalistische Wirtschaftssystem verursachten Probleme abgeschwächt werden. Es bleibt die Notwendigkeit, das Wirtschaftssystem, den Zweck von Wirtschaft und das Wachstumsparadigma grundlegend neu zu denken. Die Herausforderungen müssen in globalen Zusammenhängen gedacht und gelöst werden. Bioökonomie und Kreislaufwirtschaft liefern dafür erste Ansätze.

<sup>13</sup> (Capra & Luisi, 2014, 362)

## Ressourcenverbrauch



05. Abb.: Ausmaß und Dynamik des globalen Metabolismus im Anthropozän (Quelle: Haberl et al., 2019, 178)

Die Nutzung fossiler Ressourcen, der steigende Ressourcenverbrauch und das auf Wachstum basierende Wirtschaftssystem bringen verschiedene negative Entwicklungen mit sich. 50 % der gesamten Treibhausgasemissionen und über 90 % Prozent des Verlusts an biologischer Vielfalt und der Wasserknappheit stehen in Zusammenhang mit der Gewinnung und Verarbeitung von Ressourcen.<sup>14</sup> Der weltweite Verbrauch von Materialien wie Biomasse, fossile Brennstoffe, Metalle und Mineralien wächst exponentiell. Von 1970 bis 2017 wurde ein Anstieg des globalen Ressourcenverbrauchs von 240 % berechnet<sup>15</sup>. Damit lag der weltweite Ressourcenverbrauch 2017 bei rund 85 Milliarden Tonnen. Dieser wird sich in den nächsten vier Jahrzehnten voraussichtlich nochmals verdoppeln.<sup>16</sup> Gleichzeitig nimmt der Recyclinganteil im Verhältnis zum Neumaterialinput sogar ab, von 8,6 % im Jahr 2021 auf 7,2 % im Jahr 2023.<sup>17</sup> Gegenwärtige Entwicklungen werden weiter verstärkt und werden zu massiven Ressourcenknappheiten und Preisanstiegen führen, wodurch soziale Ungleichheiten weiter verschärft werden könnten. Gleichzeitig soll das jährliche Abfallaufkommen bis 2050 um voraussichtlich 70 % steigen. In Abbildung 5 werden die systemischen Zusammenhänge zwischen Ressourcennutzung, sozioökonomischer Dynamik und den daraus resultierenden Abfällen und Emissionen zwischen 1900 und 2015 verdeutlicht.<sup>18</sup> Allein der Ressourcenverbrauch der letzten sechs Jahre übersteigt den des gesamten 20. Jahrhunderts.<sup>19</sup> Auf Seite 9 sind die globalen Materialflüsse und gesellschaftlichen Bedürfnisse in Abbildung 6 dargestellt.

<sup>14</sup> (Dost et al., 2022, 39)

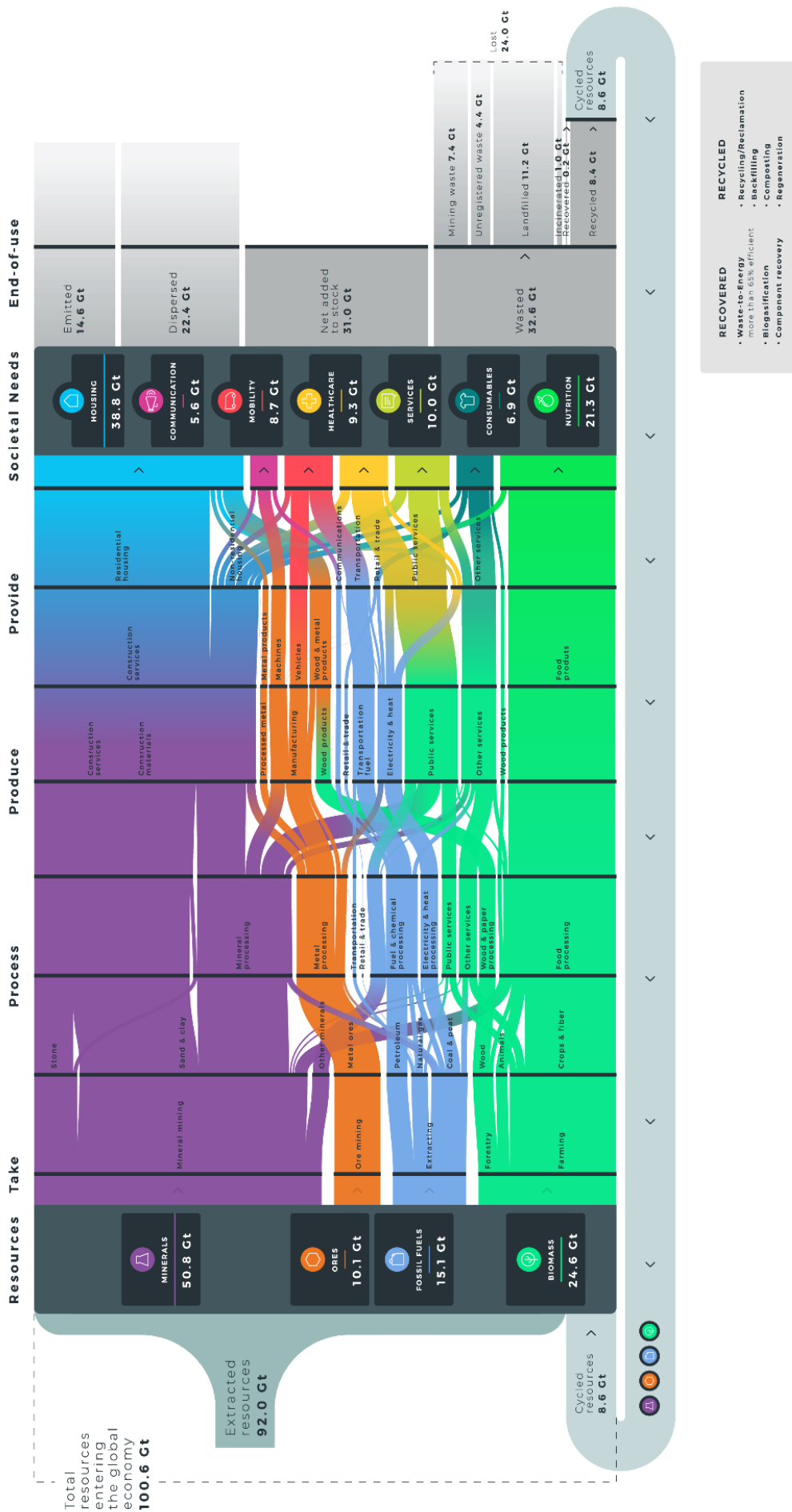
<sup>15</sup> (UNEP IRP Global Material Flows Database, 2023)

<sup>16</sup> (Haberl et al., 2019, 178)

<sup>17</sup> (Circle Economy, 2023)

<sup>18</sup> (Haberl et al., 2019, 178)

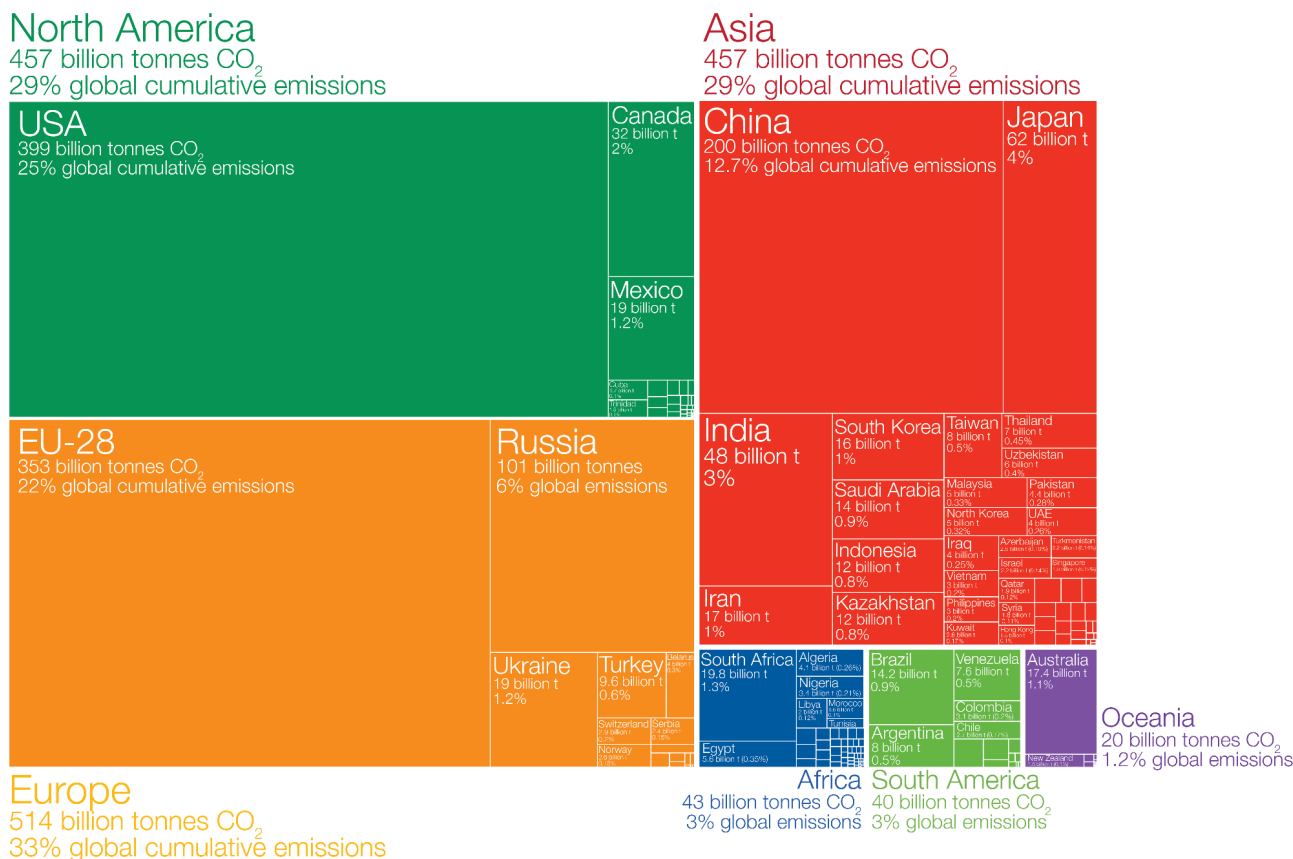
<sup>19</sup> (Circle Economy, 2023)



06. Abb.: Globale Materialflüsse und gesellschaftliche Bedürfnisse 2020 (Quelle: Circle Economy, 2020, 18)

## Globale Gerechtigkeit

Global betrachtet herrscht eine starke Ungleichverteilung von Wohlstand, dem damit verbundenen Ressourcenverbrauch, der Menge an ausgestoßenem CO<sub>2</sub> und der daraus resultierenden Umweltauswirkungen.<sup>20</sup> In Abbildung 7 sind etwa die kumulierten produktionsbasierten CO<sub>2</sub> Emissionen aus der Nutzung von fossilen Energien von 1751 bis 2017 nach Ländern und Regionen gruppiert dargestellt und verdeutlichen den großen Anteil der USA und Europa.<sup>21</sup>



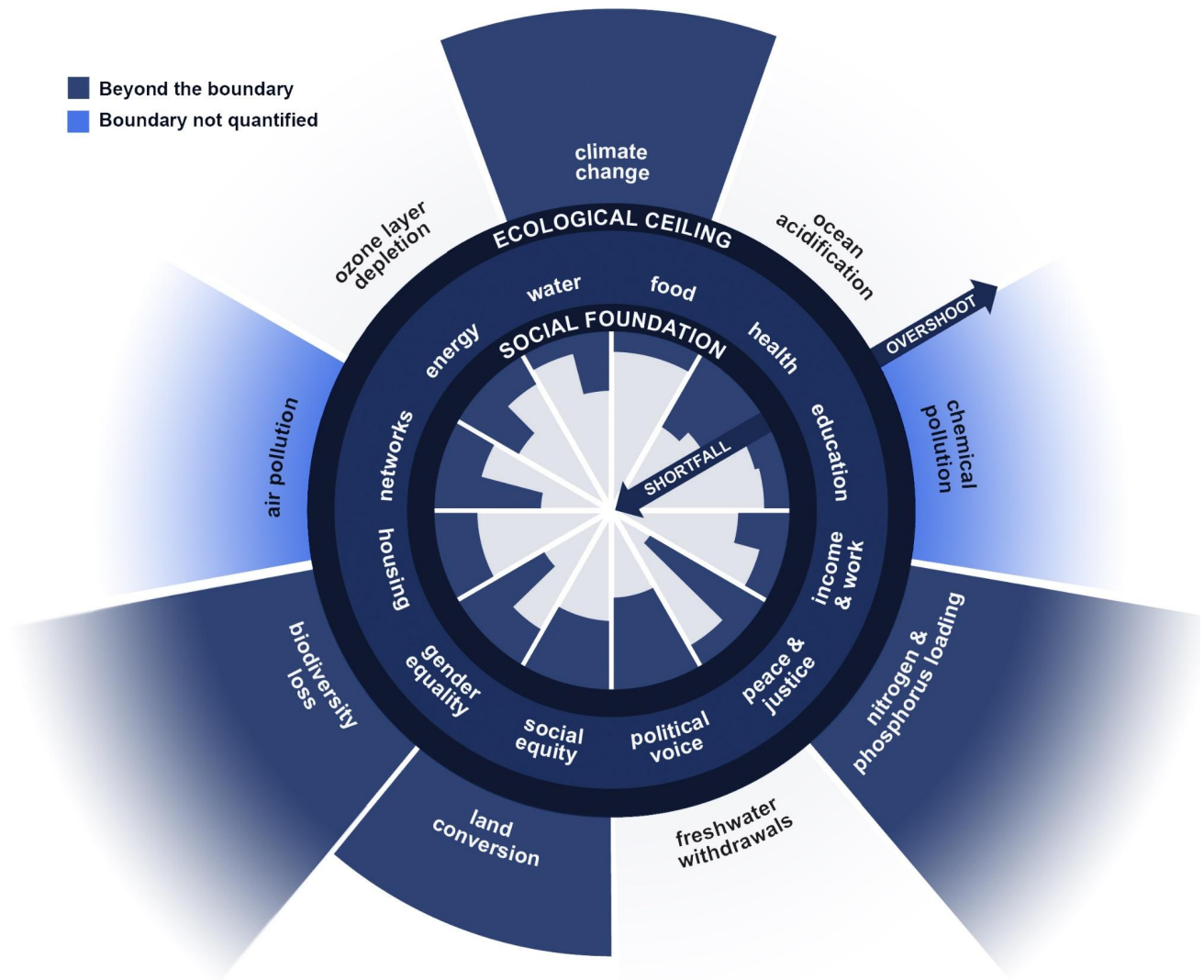
07. Abb.: Kumulierte produktionsbasierte CO<sub>2</sub> Emissionen aus der Nutzung von fossilen Energien von 1751 bis 2017 (Quelle: Ritchie, 2019)

Die Länder des Globalen Südens haben in Summe bis heute nicht nur deutlich weniger CO<sub>2</sub> ausgestoßen, sondern sind auch die Länder, die am meisten unter den Auswirkungen des Klimawandels leiden. Im Sinne der globalen Gerechtigkeit müssen diese Klimaschulden beglichen und Ausgleichsmaßnahmen geleistet werden. Es gilt aus dem westlichen Wohlstand heraus Nachhaltigkeits- und Dekarbonisierungsmaßnahmen zu forcieren und die eigenen Klima- und Umweltziele zu erreichen. Der globale Handel mit CO<sub>2</sub> Zertifikaten und Ausgleichsmaßnahmen in anderen Ländern führen oftmals wiederum zu Auslagerungseffekten und verringern die Kapazitäten der ausgleichenden Länder, ihre eigenen Nachhaltigkeitsziele zu erreichen.<sup>22</sup> Die Bioökonomie stellt eine mögliche Teillösung dar, die Wertschöpfung und die damit verbundenen Auswirkungen durch Regionalisierung des primären Sektors zu internalisieren und den CO<sub>2</sub> Ausstoß zu senken.

<sup>20</sup> (Boehnert, 2018)

<sup>21</sup> (Ritchie, 2019)

<sup>22</sup> (von Eichhorn, 2023)



08. Abb.: Donut-Ökonomie mit sozialen und ökologischen Grenzen  
(adaptiert von J. Lokrantz/Azote basierend auf Steffen et al., 2015)

## Überschreitung planetarer Grenzen

Basierend auf der Anerkennung planetarer Obergrenzen (ecological ceiling) und sozialen Grundlagen (social foundation) stellt das Konzept der Donut-Ökonomie von Kate Raworth eine Möglichkeit dar, den nachhaltigen und gerechten Handlungsraum für die menschliche Zivilisation, wie in Abbildung 8, zu veranschaulichen. Eindeutig ist eine vielfache Überschreitung der planetaren und ökologischen Grenzen zu erkennen. Massive Überlastungen der Ökosysteme äußern sich beispielsweise im Verlust an Biodiversität, zu hoher Stickstoff- und Phosphorbelastung sowie der Umweltverschmutzung und der Klimakrise. Gleichzeitig sind mit ausgeprägten lokalen Unterschieden Defizite in nahezu allen gesellschaftlichen Bereichen festzustellen. Insbesondere politische Systeme, Gesundheitsversorgung, Frieden und Gerechtigkeit sowie soziale Ungleichheit und Gleichstellung der Geschlechter sind hervorzuheben. Es gilt innerhalb der Grenzen eine regenerative und gemeinwohlorientierte Wirtschaft zu etablieren, die soziale Ungleichheiten abbaut und ein langfristiges gutes Leben für alle ermöglicht.<sup>23</sup>

<sup>23</sup> (Raworth, 2018)

## Ausbleibende Entkopplungseffekte

Die Möglichkeit, ökologische Krisen durch Technologie bei gleichzeitigem Wirtschaftswachstum (grünes Wachstum) zu lösen, wird zunehmend infrage gestellt. Das würde eine umfassende und dauerhafte Entkopplung von Wertschöpfung, Wirtschaftswachstum, Ressourcenverbrauch und Umweltauswirkungen voraussetzen. Allerdings sind die erhofften Effekte bislang nicht eingetreten. Parrique führt dafür verschiedene Argumente an.<sup>24</sup> Zunächst lässt sich das Phänomen der Externalisierung beobachten. Lokale Entkopplungseffekte beruhen oftmals auf einer durch den internationalen Handel ermöglichten Externalisierung und Verlagerung von Umweltauswirkungen. Eine ganzheitliche Bilanzierung auf der Grundlage des Ressourcen- und Umweltfußabdrucks liefert häufig ein weit weniger optimistisches Bild als konventionelle Wirtschaftsstatistiken. In vielen Fällen ist der technologische Wandel nicht disruptiv und schnell genug, um eine ausreichende Entkopplung zu ermöglichen. Hinzu kommt, dass unerwünschte, umweltschädliche Technologien oftmals nicht ausreichend verdrängt werden. Ein weiteres Phänomen ist die Problemverschiebung. Technologische Lösungen für ein Umweltproblem schaffen anderswo neue Probleme und/oder verschlimmern bestehende. Hier ist etwa die Produktion von Elektrofahrzeugen zu nennen, mit der problematischen Gewinnung von Lithium, Kupfer und Kobalt. Ein weiteres bekanntes Problem in der Nachhaltigkeitsdebatte stellt der Reboundeffekt dar. Effizienzgewinne führen zu Kostensenkungen oder Einsparungseffekten, was im Gegenzug zu intensiviertem Nutzungsverhalten oder Kauf, und Konsum zusätzlicher Produkte oder Dienstleistungen führen.<sup>25</sup> Überdies werden Dienstleistungen oft als ökologische Alternative zum individuellen Besitz betrachtet. Durch Konzepte wie die Sharing-Economy, “Everything-as-a-Service” oder “pay-per-use” sollen ressourcenintensive Produkte wie Fahrzeuge kollektiv genutzt werden. Dadurch soll die absolute Zahl an Produkten verringert und die Nutzungsintensität erhöhen werden, allerdings werden diese Services meist zusätzlich genutzt und haben selbst einen großen ökologischen Fußabdruck. Obwohl es unbestreitbar Vorteile bietet, werden auch die Möglichkeiten des Recyclings überschätzt. Die Recyclingquoten sind niedrig und Recyclingverfahren erfordern ihrerseits erhebliche Mengen an Energie und Ressourcen. Somit können lediglich begrenzt Ressourcen für eine expandierende Materialwirtschaft bereitgestellt werden. Schließlich müssen auch steigende Energieausgaben berücksichtigt werden. Bei der Gewinnung einer Ressource werden in der Regel zuerst die wirtschaftlichsten Optionen genutzt. Wenn diese erschöpft sind, wird die Gewinnung der verbleibenden, schwerer zu mobilisierenden Bestände zu einem ressourcen- und energieintensiveren Prozess, was zu einer steigenden Gesamtumweltbelastung pro Einheit der gewonnenen Ressource führt und mit erhöhten Kosten verbunden ist. Die Idee des grünen Wachstums muss also grundlegend infrage gestellt und alternative Wirtschaftsmodelle müssen gefunden werden. Mögliche Lösungsansätze werden im folgenden Kapitel dargestellt.

---

<sup>24</sup> (Parrique, 2023, 7)

<sup>25</sup> (Umweltbundesamt, 2019)

# Lösungsansätze

Die veranschaulichten Herausforderungen zeigen die dringende Notwendigkeit für rasches Handeln in allen wesentlichen Bereichen von Wirtschaft und Gesellschaft. Ein tiefgreifender Systemwandel, eine “große Transformation” ist notwendig.<sup>26</sup> Je nach Region, Land und wirtschaftlichem Entwicklungsstand können die notwendigen Ansätze jedoch variieren. Es muss differenziert werden, welche wirtschaftlichen Transformationsaufgaben die einzelnen Länder haben. Circle Economy unterscheidet dabei im Circularity Gap Report 2023 drei Arten von Ländern; Einkommensstarke Länder mit hohen Lebensstandards (shift-countries), Schwellenländer mit mittleren bis kleinen Einkommen und rasch fortschreitender Industrialisierung sowie einer stark wachsenden Mittelschicht (grow-countries) und Entwicklungsländer, in denen die Mehrheit der Weltbevölkerung lebt, die aber nur ein Zehntel des Materialverbrauchs von Shift Ländern aufweisen (build-countries). Shift-Länder verbrauchen den Großteil der Ressourcen und überschreiten mehrfach die planetaren Grenzen. Diese Länder müssen den Überkonsum und die Auswirkung auf die Umwelt massiv reduzieren. Grow-Länder erreichen nach gestiegenen Verbräuchen langsam einen Sättigungspunkt. Es gilt nun den Materialverbrauch zu stabilisieren und zu optimieren und das gesellschaftliche Wohlergehen weiter zu maximieren. Build-Länder müssen weiter Infrastrukturen aufbauen und Wohlstand für den Großteil ihrer Bevölkerung schaffen.<sup>27</sup> Die folgenden Strategien beziehen sich auf Deutschland.

Die Nachhaltigkeitsstrategien Konsistenz, Suffizienz und Effizienz verfügen über unterschiedliche Transformationsdynamiken und müssen im Zusammenwirken konsequent auf das Wirtschaftssystem übertragen werden (siehe Abbildung 9). Effizienzgewinne sind relativ schnell zu erzielen, erreichen allerdings aufgrund des begrenzten technischen Möglichkeitsraums und Pfadabhängigkeiten mittel- und langfristig ein Plateau. Effizienzsteigerungen können im Allgemeinen durch eine Verbesserung des Input-Output-Verhältnisses erreicht werden. Dies kann unter anderem durch effizientere und sparsamere Technologien, die Optimierung von Produktionsprozessen, Kaskadennutzung und die Mobilisierung von Rest- und Sekundärstoffen, sowie Abfallvermeidung und die Verlängerung der Nutzungsdauer erreicht werden.<sup>28</sup>

Konsistenz bedeutet, die Art des Wirtschaftens und die grundlegenden Systeme ökologischer zu gestalten, etwa der Wandel hin zu einer Bioökonomie mit einer nachwachsenden statt fossilen Rohstoffbasis. Außerdem zählt dazu der Umbau der Linearwirtschaft zu einer Kreislaufwirtschaft, die Regionalisierung von Stoffkreisläufen und der Aufbau von Wertschöpfungsnetzwerken. Dies erfordert eine systemische Transformation, die Jahrzehnte in Anspruch nimmt, dabei aber auch über das größte Veränderungspotenzial verfügen.

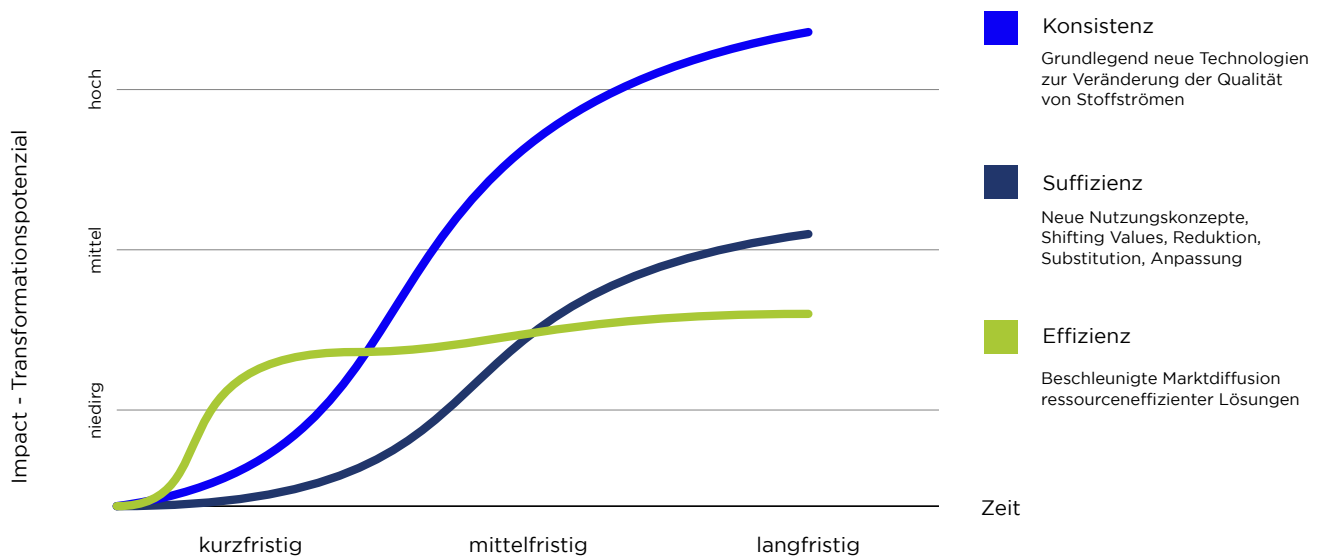
---

<sup>26</sup> (Schneidewind, 2018)

<sup>27</sup> (Circle Economy, 2023)

<sup>28</sup> (Korte et al., 2018)





09. Abb.: Transformationspotenziale der Nachhaltigkeitsstrategien (Korte et al., 2018, 33)

Längerfristig wirksame umfassende Nachhaltigkeitsgewinne sind durch Suffizienzbemühungen zu erzielen und setzen einen gesellschaftlichen Wertewandel voraus.<sup>29</sup> Suffizienzeffekte können durch Reduktion, Substitution und Anpassung erreicht werden. Dies kann durch individuelle Verhaltensänderung, Beschränkung des Konsum und die Verringerung des Verbrauch erreicht werden.<sup>30</sup>

Die Erweiterung der Effizienzstrategie um Suffizienzmaßnahmen ist besonders in wohlhabenden Ländern notwendig. Es braucht eine Gemeinwohlorientierung der Wirtschaft, in Einklang mit sozialen und ökologischen Grundsätzen. Nicht der Materialdurchsatz und dessen Monetarisierung dürfen im Vordergrund stehen, sondern die sozialen und ökologischen Mehrwerte, die durch die Wertschöpfung erbracht werden. Nicht mehr die materielle Akkumulation einzelner, sondern immaterielle Werte wie Gesundheit, Bildung und gutes Zusammenleben und die gerechte Verteilung von Wohlstand für alle sollten im Fokus stehen.<sup>31</sup>

Dieses Projekt leistet einen Beitrag zur Schaffung einer Daten- und Informationsgrundlage für die Koordination einer zirkulären Bioökonomie. So können verschiedene Produktions- und Nutzungsstufen vernetzt, die Verwertungspfade optimiert und Stoffströme besser gemanagt werden. Im Folgenden werden die Themenfelder dieser Arbeit genauer dargestellt und miteinander verknüpft.

<sup>29</sup> (Korte et al., 2018)

<sup>30</sup> (Eisenmenger, 2023)

<sup>31</sup> (Circle Economy, 2023)

# Bioökonomie

## Definition

*“Die Bioökonomie umfasst die Erzeugung, Erschließung und Nutzung biologischer Ressourcen, Prozesse und Systeme, um Produkte, Verfahren und Dienstleistungen in allen wirtschaftlichen Sektoren im Rahmen eines zukunftsfähigen Wirtschaftssystems bereitzustellen.”<sup>32</sup>*

Die Bioökonomie schließt alle industriellen und wirtschaftlichen Bereiche ein, die erneuerbare biologische Ressourcen und Verfahren einsetzen und sich an natürlichen Stoffkreisläufen orientieren. Dafür werden verschiedene Rohstoffquellen wie land- und forstwirtschaftlich erzeugte Rohstoffe, organische Reststoffe, Tiere, Mikroorganismen, Insekten und Algen genutzt. Einen zentralen Aspekt der nachhaltigen und naturverträglichen Bioökonomie bildet der Ersatz von fossilen Ressourcen durch nachwachsende Rohstoffe. Dieser Ansatz erstreckt sich dabei auf alle Bereiche und Anwendungen, von der Energieproduktion über die Materialherstellung bis zu chemischen Prozessen. Hierbei spielen regionale, nachwachsende Rohstoffe eine besonders wichtige Rolle, da sie den lokalen Wirtschaftskreislauf stärken. Ressourcenbedarfe können regional gedeckt und Wertschöpfung dezentral dort stattfinden, wo Rohstoffe anfallen, wodurch neue Arbeitsplätze entstehen können und ländliche Regionen gestärkt werden. Dabei ist zu beachten, dass die Bioökonomie je nach Region und den dort vorkommenden Biomassen sehr unterschiedlich ausgeprägt sein kann.<sup>33</sup>

Das Wissen über die bestmögliche Nutzung biologischer Ressourcen stellt einen weiteren Eckpfeiler der Bioökonomie dar. Dieses Wissen soll laufend ausgebaut und so neue Produkte, Verfahren und Technologien ermöglicht werden.<sup>34</sup> Kenntnisse über biologische Prozesse und Systeme ermöglichen es, Ressourcen effizienter und zielgerichteter zu nutzen und somit den Ressourcenverbrauch zu reduzieren. Die Bioökonomie zielt darauf ab, das Wirtschaftswachstum vom Ressourcenverbrauch zu entkoppeln. Es geht darum, wirtschaftliche Entwicklung zu ermöglichen, ohne dabei natürliche Ressourcen zu übernutzen und die Umwelt zu belasten.<sup>35</sup> Dafür darf die Bioökonomie aber nicht als reine Substitution fossiler durch nachwachsende Rohstoffe verstanden werden, sondern erfordert ein grundlegendes Umdenken. Eine nachhaltige Wirtschaftsweise erfordert eine Verringerung des Ressourcenverbrauchs und die Führung von Stoffen in Kreisläufen.<sup>36</sup>

---

<sup>32</sup> (BMBF, 2020, 10)

<sup>33</sup> (bioökonomie.de, 2020)

<sup>34</sup> (Reich, 2021)

<sup>35</sup> (Thrän & Moesenfechtel, 2020, 1)

<sup>36</sup> (Reich, 2021)



10. Abb.: Felder der Bioökonomie (adaptiert von Beer, 2020)

## Anwendungsfelder

Die in Abbildung 10 dargestellten Anwendungsfelder der Bioökonomie umfassen die Land- und Forstwirtschaft, Energiewirtschaft, Fischerei und Aquakultur, Chemie und Pharmazie, Nahrungsmittelindustrie, industrielle Biotechnologie, Papier- und Textilindustrie. Unter dem Sammelbegriff der „biologischen Transformation“ (Biologisierung) wird die vermehrte Integration von Naturprinzipien in verschiedenste Wirtschaftsbereiche und die Entwicklung von Produkten oder Problemlösungen basierend Erkenntnissen aus Biologie und Biotechnologie zusammengefasst.<sup>37</sup>

<sup>37</sup> (Thrän & Moesenfechtel, 2020, 4)

## Ziele

Das Konzept der Bioökonomie findet sich auch in politischen Agenden wieder. 2018 wurde die europäische Bioökonomiestrategie, mit den Kernzielen der Nachhaltigkeit und Zirkularität, aktualisiert.<sup>38</sup> 2020 hat die deutsche Bundesregierung Ziele, Leitlinien und Handlungsfelder in einer nationalen Bioökonomiestrategie festgelegt. Die politische Rahmensetzung soll danach ausgerichtet werden.<sup>39</sup> Anhand der Übersicht in Abbildung 11 können die wichtigsten Ziele abgelesen werden.

### Bioökonomische Lösungen für die Nachhaltigkeitsagenda entwickeln

› Bioökonomie an den Zielen für nachhaltige Entwicklung der Agenda 2030 der Vereinten Nationen (SDGs) ausrichten

2 KEIN HUNGER



3 GESUNDHEIT UND WOHLERGEHEN



6 SAUBERES WASSER UND SANITÄR-ERDIENTWICKLUNGEN



7 BEZAHLBARE UND SAUBERE ENERGIE



8 MENSCHENWÜRDIGE ARBEIT UND WIRTSCHAFTS WACHSTUM



9 INDUSTRIE, INNOVATION UND INFRASTRUKTUR



11 NACHHALTIGE STÄDTE UND GEMEINDEN



12 NACHHALTIGE KONSUM UND PRODUKTION



13 MASSNAHMEN ZUM KLIMASCHUTZ



14 LEBEN UNTER WASSER



15 LEBEN AN LAND



› Ernährung für eine nachwachsende Weltbevölkerung sichern  
› Durch klimaneutrale Produktion zum Erreichen des 1,5°C Grad Ziels beitragen  
› Biodiversität schützen, erhalten und nutzen

#### Potenziale der Bioökonomie innerhalb ökologischer Grenzen erkennen und erschließen

- › Produktionssysteme in ökosystemaren Zusammenhängen verstehen
- › Zielkonflikte und Wechselwirkungen erforschen
- › Ökonomie und Ökologie in ganzheitlichen Ansätzen integrieren
- › Umfassendes Monitoring etablieren, Biomasseströme messen und bewerten, vergleichende Nachhaltigkeitsbilanzierungen vornehmen

#### Biologisches Wissen erweitern und anwenden

- › Biologische Systeme verstehen und modellieren
- › Neuartige Produktionsorganismen für Agrarsysteme und Industrie entwickeln
- › Innovative Verfahrenskonzepte für biobasierte Produktionssysteme entwickeln und etablieren
- › Digitalisierung, Künstliche Intelligenz, Nanotechnologie, Miniaturisierung, Robotik, Automatisierung als konvergierende Technologien für die Bioökonomie nutzen
- › Interdisziplinäre Zusammenarbeit stärken
- › Infrastruktur für Forschung und Technologietransfer ausbauen

#### Ressourcenbasis der Wirtschaft nachhaltig ausrichten

- › Biogene Rohstoffe nachhaltig erzeugen und bereitstellen
- › Landwirtschaftlich nutzbare Böden schützen und Bodenfruchtbarkeit erhalten
- › Biogene Rohstoffe und Nebenerzeugnisse nutzen
- › Abhängigkeit von fossilen Rohstoffen reduzieren
- › Potenzial der Bioökonomie für die Entwicklung ländlicher Räume nutzen
- › Neuartige Kreisläufe der Erzeugung, Verarbeitung und Verwertung biogener Ressourcen u. a. im urbanen Raum entwickeln

#### Deutschland zum führenden Innovationsstandort der Bioökonomie ausbauen

- › Transfer stärken und wirtschaftliches Potenzial der Bioökonomie für Geschäftsmodelle, Arbeitsplätze und Einkommensmöglichkeiten in allen wirtschaftlichen Sektoren nutzen
- › Markteinführung biobasierter Produkte, entsprechen der Verfahren und Dienstleistungen beschleunigen
- › Neuartige Wertschöpfungsketten etablieren
- › Start-ups, kleine, mittlere und mittelständische Unternehmen fördern
- › Cluster und Modellregionen fördern

#### Gesellschaft einbinden, nationale und internationale Kooperationen intensivieren

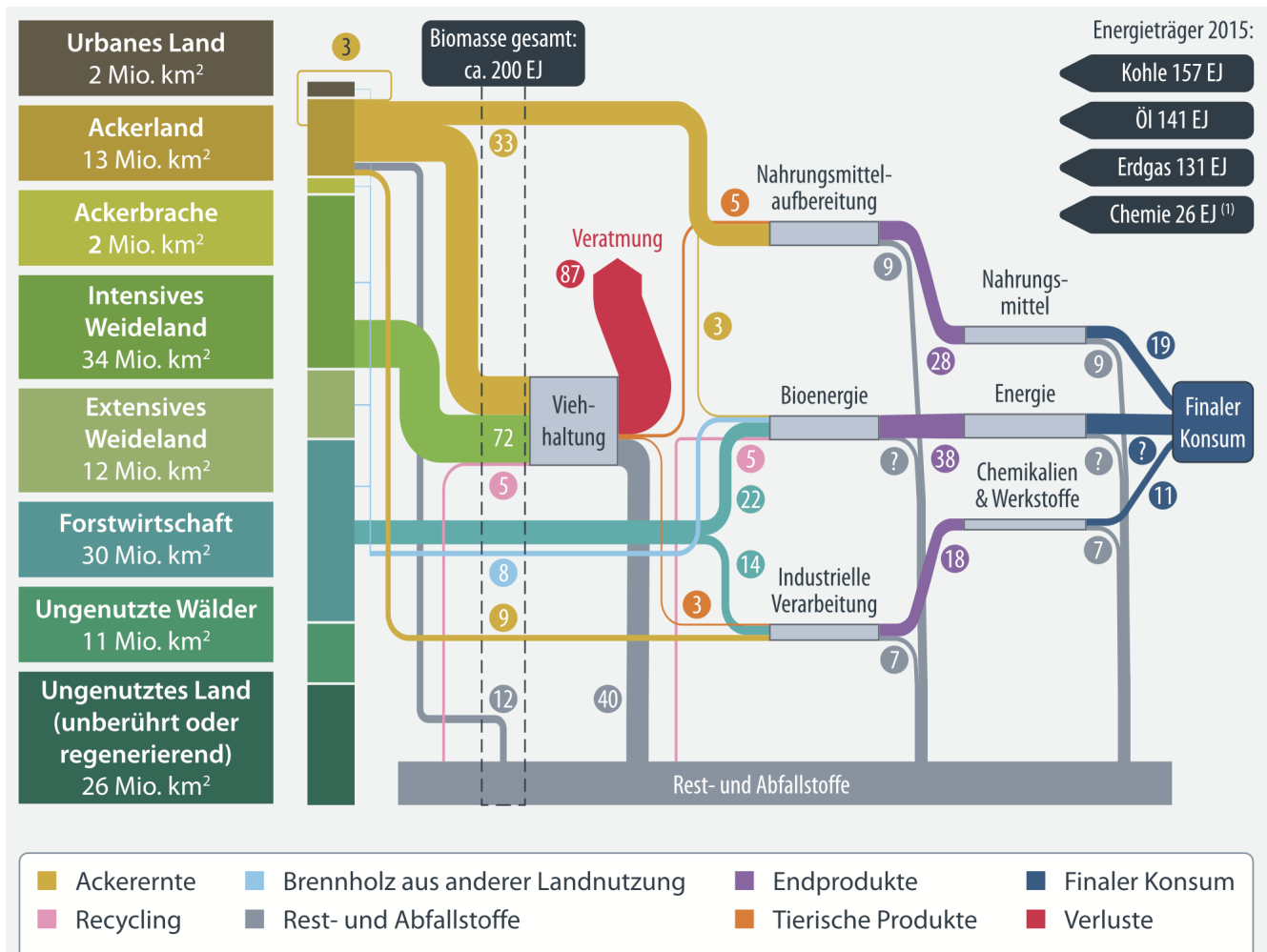
- › Breit aufgestelltes Beratungsgremium einrichten
- › Dialog mit allen interessierten Gruppen der Gesellschaft führen
- › Gesellschaftswissenschaften in der Bioökonomie Forschung stärken
- › Europäische und internationale Zusammenarbeit ausbauen

11. Abb.: Übersicht über die Ziele der deutschen Bioökonomiestrategie (BMBF, 2020, 16)

<sup>38</sup> (Europäische Kommission, 2018)

<sup>39</sup> (BMBF, 2020)

17



12. Abb.: Flussdiagramm der geernteten globalen Biomasseflüsse in Exajoule pro Jahr für das Jahr 2000, links die Nutzung der globalen Landflächen. (Thrän & Moesenfechtel, 2020, 9)

## Entwicklungen

Mit der wachsenden Weltbevölkerung und einer steigenden Nachfrage nach tierischen Lebensmitteln, insbesondere in bevölkerungsreichen Ländern wie Indien und China, sieht sich die globale Agrarproduktion enormen Herausforderungen gegenübergestellt. Prognosen zufolge muss die globale Agrarproduktion bis 2050 um 60 % im Vergleich zu 2005 steigen, um den Bedarf decken zu können.<sup>40</sup> Zusätzlich wird die Situation durch die Auswirkungen des Klimawandels verschärft. Es gilt immer mehr Menschen mit Nahrung, Energie und Materialien zu versorgen und gleichzeitig den Ressourcenverbrauch zu verringern. Die globalen Biomasseflüsse in Exajoule im Jahr 2000 sind in Abbildung 12 dargestellt. Wie daraus ersichtlich wird, liegt eine Herausforderung darin, dass weniger als die Hälfte der geernteten Biomasse, etwa 86 Exajoule/Jahr, die Endverbraucher:innen in Form von Nahrungsmitteln, Energieträgern, Chemikalien und Werkstoffen erreicht. Hier liegt ein erhebliches Potenzial für die Verbesserung der Ressourceneffizienz. Unter anderem verbleiben Reststoffe der Pflanzen- und Holzernte auf dem Feld oder im Wald, wo sie zur natürlichen Düngung des Bodens, zur Humusbildung und zum Erhalt der Artenvielfalt beitragen. Ferner fallen nutzbare Rest- und

<sup>40</sup> (Thrän & Moesenfechtel, 2020, 9)

Abfallstoffe bei der Ernte und Weiterverarbeitung der Biomasse an, aber auch bei Verarbeitung und nach der Nutzung. Derzeit ist die Biomassenutzung wenig kreislaforientiert und ressourcenschonend. Es gibt daher erhebliches Potenzial für die Verbesserung der Ressourceneffizienz und die Verringerung der Umweltauswirkungen. Dies kann durch eine stärkere Ausrichtung auf die Prinzipien der Kreislaufwirtschaft und Ressourcenschonung erreicht werden.<sup>41</sup>

## Datenlage zu Biomasse

In der nachhaltigen und kreislaforientierten Bioökonomie spielen Informationen zu verfügbaren Biomassen und deren Eigenschaften eine zentrale Rolle. Die aktuelle Datenlage zu verfügbaren Stoffmengen ist jedoch ausbaufähig. Auf europäischer und deutscher Ebene wurden Daten hauptsächlich unter dem Gesichtspunkt der Bioenergieerzeugung erhoben. Um einen umfassenden Überblick über vorhandene und nutzbare Biomasse-Ressourcen auch zur stofflichen Nutzung zu gewinnen, braucht es Informationen zu lokal anfallenden Reststoffen, deren Mengen und Verfügbarkeiten sowie deren Eigenschaften. Darauf basierend kann mit dem entsprechenden Fachwissen zu Herstellungsprozessen abgeleitet werden, welche Produkte sich daraus herstellen lassen. Ebenso müssen logistische Herausforderungen gelöst und bestehende Gesetze und Regularien möglicherweise angepasst werden, um eine effiziente und nachhaltige Nutzung von Biomasse zu ermöglichen. Dafür muss geklärt werden, ob eine dauerhafte Nachfrage und Lieferfähigkeit gewährleistet werden kann. Auch betriebswirtschaftliche und verfahrenstechnische Herausforderungen müssen gelöst werden. Saisonale Schwankungen können beispielsweise zu geringeren Auslastungen von industriellen Anlagen oder sogar -stillstände führen, was Fragen der Wirtschaftlichkeit aufwirft.<sup>42</sup>

Die Lösung dieser Herausforderungen erfordert die enge Zusammenarbeit verschiedener Akteur:innen und die Bündelung von Potenzial, Wissen und Innovationskraft. Unternehmen und Institutionen, die in einem bestimmten Wertschöpfungsbereich tätig sind und durch Kooperation und Wettbewerb miteinander verbunden sind, können dafür einen gemeinsamen Standort teilen und sich in Clustern ansiedeln. Cluster erfordern eine intelligente Verknüpfung und einen intensiven Informations- und Datenaustausch. So können Wissen, Infrastrukturen und Ressourcen bestmöglich geteilt und genutzt werden. Dafür muss die Interaktionen zwischen den verschiedenen Akteur:innen strukturiert und koordiniert werden und gemeinsame Standards zur Kommunikation gefunden werden.<sup>43</sup>

---

<sup>41</sup> (Thrän & Moesenfechtel, 2020, 9)

<sup>42</sup> (Reich, 2021)

<sup>43</sup> (Thrän & Moesenfechtel, 2020, 189)

# Biogene Rest- und Sekundärstoffe

## Definition

*„Biogene Rest- und Abfallstoffe sind Stoffe organischer Herkunft, die bei der Herstellung eines Hauptproduktes anfallen, [...], nutzbar sind und derer sich ihr Besitzer entledigt, entledigen will oder entledigen muss. Zu biogenen Rest- und Abfallstoffen zählen auch Siedlungsabfälle, sofern sie hohe Anteile an organischen Komponenten aufweisen.“<sup>44</sup>*

Eine effiziente Nutzung nachwachsender Rohstoffe umfasst insbesondere die Abfall- und reststoffbasierte Bioökonomie. Dabei geht es um die Identifikation und Mobilisierung von biogenen Rest- und Sekundärstoffen, Koppelprodukten, Nebenprodukten aus der Land- und Forstwirtschaft, Siedlungsabfällen, Klärschlamm, industriellen Reststoffen und deren Wiedereinbringung in die Kaskadennutzung.<sup>45</sup> Biogene Abfall- und Reststoffe stellen keine Konkurrenz zur Nahrungs- oder Futtermittelproduktion dar und deren Nutzung kann Flächenkonkurrenzen sowie Risiken für Ökosysteme entschärfen. Durch die Mobilisierung und kombinierte stoffliche und energetische Nutzung zuvor ungenutzter Ressourcen in Kaskaden wird die Ressourceneffizienz und Wertschöpfung erhöht.<sup>46</sup>

## Potenziale

Die Datenlage zu biogenen Reststoffen in Deutschland, speziell zu deren stofflichen Verwertbarkeit, ist unzureichend. In einem ersten sektorenübergreifenden Reststoffmonitoring hat das Deutsche Biomasseforschungszentrum eine Erhebung zu den vorhandenen Mengen und den Verwertungspotenzialen vorgenommen. Dabei wurden Daten aus fünf Sektoren für das Jahr 2015 zusammengeführt und in 77 Biomassekategorien unterteilt (siehe Anhang I.). Das Monitoring umfasst Nebenprodukte aus der Land- und Forstwirtschaft, Siedlungsabfälle, Klärschlamm, industrielle Reststoffe sowie Reststoffe von sonstigen Flächen. Das errechnete technische Biomassepotenzial beträgt 85,6 bis 139,6 Mio. t Trockenmasse, wovon 67 % und 85 % bereits stofflich und/oder energetisch genutzt werden. So ergibt sich ein ungenutztes mobilisierbares technisches Biomassepotenzial von 29 Mio. t Trockenmasse. Durch Optimierung der bestehenden Nutzung könnten noch 12,8 bis 45,5 Mio. t Trockenmasse für weiterführende Anwendungen mobilisiert werden.<sup>47</sup>

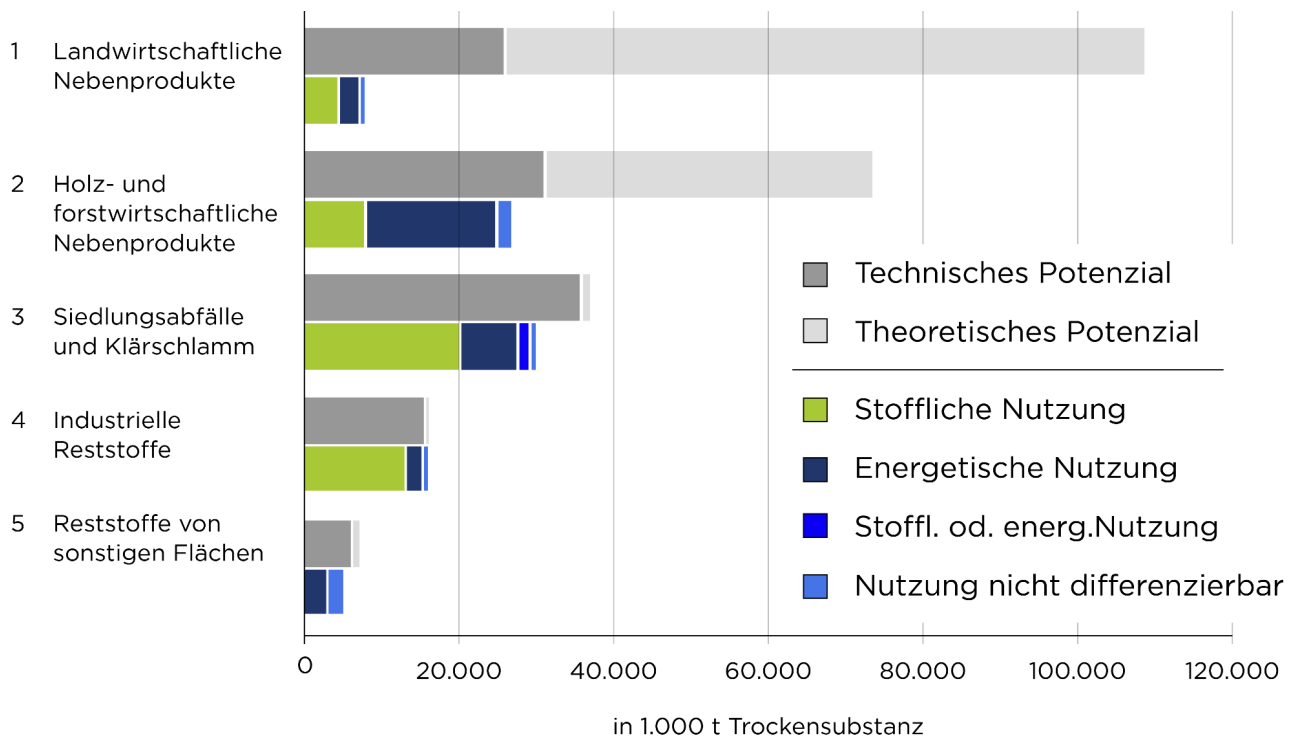
---

<sup>44</sup> (Raschka & Carus, 2012, 8)

<sup>45</sup> (Hrouda, 2021)

<sup>46</sup> (Schüch & Hennig, 2020, 126)

<sup>47</sup> (Brosowski, 2019)



13. Abb.: Reststoffpotenziale und tatsächliche Nutzung in Deutschland im Jahr 2015 (eigene Darstellung, basierend auf Schüch & Hennig, 2020, 131; basierend auf Brosowski, 2019)

Das in der Abbildung 13 veranschaulichte Monitoring zeigt Potenziale in den Bereichen der landwirtschaftlichen Nebenprodukte und in der Holz- und Forstindustrie. Auch die kombinierte Nutzung von Reststoffen im Sinn der Kaskadennutzung kann noch ausgebaut werden. Zudem sollte das theoretische Potenzial durch technische Innovationen und den Abbau von rechtlichen Hürden besser ausgeschöpft werden.<sup>48</sup> Besonders relevant sind Reststoffe, welche in großen Mengen auftreten, sortenrein sind und/oder wertgebende Eigenschaften und Inhaltsstoffe, wie hohe Gehalte an Lignin, Zucker, oder Fett aufweisen.<sup>49</sup> Da Reststoffe in großen Mengen bei teilweise geringer Dichte an relevanten Inhaltsstoffen auftreten, wird die Transportwürdigkeit ein zunehmend starker wirtschaftlicher und auch ökologischer Faktor. Ein vielversprechendes Konzept zur regionalen Verwertung von Biomasse und insbesondere von Reststoffen stellen Bioraffinerien dar. Dezentrale Bioraffinerieanlagen und Cluster ermöglichen Konversionsprozesse, welche unterschiedlichste biogene Ausgangsprodukte zu Chemikalien, Grundstoffen, Wärme und elektrischer Energie umwandeln. Durch das Zerlegen von Reststoffen wie ligninreichen Resten, Treber, Molke oder proteinreiche Seitenströme der Lebensmittelverarbeitung in ihre Bestandteile werden verschiedene Haupt- und Nebenprodukte und/oder Energie bereitgestellt.<sup>50</sup> Dadurch bleiben Transportwege kurz und die Wertschöpfung in der Region. Zusätzlich wird die Rohstoffunabhängigkeit und Versorgungssicherheit gestärkt. Die hergestellten Werkstoffe, Energieträger und Produkte wie Säuren, Proteine, Fasern können als universelle Ausgangsstoffe für die Weiterverarbeitung dienen.<sup>51</sup>

<sup>48</sup> (BMU, 2016, 58)

<sup>49</sup> (Schüch & Hennig, 2020, 127)

<sup>50</sup> (BioBASE, 2023)

<sup>51</sup> (Schüch & Hennig, 2020, 139)



# Herausforderungen

## Ökonomisierung der Natur

Grundsätzlich stellt sich die Frage, inwieweit die Natur einer Ökonomisierung unterworfen werden soll, erbringt sie doch weitaus mehr Ökosystemservices als die Bereitstellung von Ressourcen. Der Konflikt, der sich aus dem begrenzten Angebot an natürlichen Ressourcen und dem stetig wachsenden Bedarf ergibt, lässt sich nicht allein durch Technologie und Effizienz lösen. Vielmehr ist ein bewusster, verringerter und regionaler Konsum notwendig. Um die Bioökonomie effektiv und nachhaltig zu gestalten, muss sie in eine Wirtschaftsweise eingebettet werden, die insgesamt weniger Ressourcen verbraucht. Es geht dabei um eine grundlegende Neuorientierung der Wirtschaft, weg vom Wachstumszwang. Wirtschaftswachstum als politisches Ziel ist mit der Bioökonomie nicht vereinbar. Stattdessen sollten Nachhaltigkeit, Ressourcenschonung und soziale Gerechtigkeit im Vordergrund stehen. Hier stellt sich die Frage, wie die Bioökonomie zur gerechten Verteilung von Wohlstand und einem guten Leben für alle beitragen kann und aktuelle Entwicklungen nicht weiter verschärft.<sup>52</sup>

## Rohstoffverfügbarkeit und Stoffstrommanagement

Ein wesentlicher Unterschied zwischen der bisher überwiegend auf fossilen Ressourcen basierenden Wirtschaft und der aufstrebenden Bioökonomie liegt in der Bereitstellung und Verfügbarkeit der Rohstoffe. Während fossile Ressourcen in der Regel relativ homogen sind und aus punktuellen Quellen wie Ölfeldern oder Kohleminen stammen, sind die Rohstoffquellen für die Bioökonomie in der Regel dezentral verteilt, variieren saisonal und die Zusammensetzung der Biomasse ist oft schwankend. Daher spielt das Management von Stoffströmen eine entscheidende Rolle in der Bioökonomie. Es gilt, Aspekte wie die Transportwürdigkeit und die kaskadierende Verwertung zu beachten, um eine effiziente und nachhaltige Nutzung von Biomasse zu gewährleisten. In Zukunft soll das Stoffstrommanagement durch umfassende Daten zu verfügbaren Ressourcen informiert werden.<sup>53</sup>

Eine der größten Herausforderungen besteht darin, die Verfügbarkeit verschiedenster Biomassen je nach Ort und Zeit mit den Bedürfnissen der Verarbeitung zusammenzuführen. Dafür benötigte Daten umfassen unter anderem die Zusammensetzung, Menge und regionale Verfügbarkeit, Bedarfe, Potenzialen zur stofflichen Verwertung und Aspekte von Transport und Logistik. Aktuell gibt es Bestrebungen, integrierte Modelle zu entwickeln. In integrierten Modellen wird interdisziplinäres Wissen aus verschiedenen Fachgebieten zusammengeführt, um verschiedene Handlungsalternativen darzustellen, zu untersuchen und zu bewerten. Damit sollen komplexe Probleme mit möglichst

---

<sup>52</sup> (BMUV, 2020)

<sup>53</sup> (Rübberdt, 2020, 150)

vollständigen Ursache-Wirkungs-Ketten dargestellt und gelöst werden.<sup>54</sup> Angewandt auf Biomasse sollen damit Rohstoffe analysiert und die Analyseergebnisse zu ihrer Zusammensetzung und Stoffgehalten, zusammen mit Angaben über die Rohstoffmenge und den Herkunfts- oder Lagerort, in digitale Rohstoffbörsen eingespeist werden. Auf diese Weise können Verfügbarkeit und Bedarf zusammengeführt und gleichzeitig optimale Transportrouten ermittelt werden, um kurze Transportwege zu gewährleisten und eine effiziente Rohstoffnutzung zu erreichen.<sup>55</sup> Die begrenzte Rohstoffverfügbarkeit setzt eine effizientere Nutzung der Biomassen in Kaskaden oder Kreisläufen voraus. Biomasse muss intelligent und konsequent stofflich und erst dann energetisch genutzt werden.<sup>56</sup>

## Zielkonflikte

Die effiziente und nachhaltige Nutzung begrenzt verfügbarer Ressourcen stellt eine komplexe Herausforderung dar. Wenn die Nachfrage nach einem bestimmten Rohstoff steigt, tritt dieser in Konkurrenz zu bereits etablierten Rohstoffströmen. Dies kann zu Nutzungskonflikten führen, insbesondere, wenn es um die Verwendung von Reststoffen geht. Die bisherige Verwendung solcher Materialien, wie Holzreste im Wald oder Stroh, das für die Humusbildung benötigt wird, muss gegen neue Bedarfe abgewogen werden.<sup>57</sup> Daher sind intelligente Entscheidungs- und Informationsgrundlagen notwendig, um zu bestimmen, welche Ressourcen, wo, in welcher Menge und für welchen Zweck erzeugt werden sollten.<sup>58</sup>

## Flächenkonkurrenz

Begriffe wie “erneuerbar” oder “nachwachsend” suggerieren eine grenzenlose Verfügbarkeit von Rohstoffen, allerdings stellen die begrenzte Regenerationsfähigkeit der Ökosysteme und die nutzbaren Anbauflächen einen limitierenden Faktor der Biomasseproduktion dar.<sup>59</sup> Es herrscht ständige Konkurrenz um Anbauflächen und Rohstoffe. Die direkte Substitution erdölbasierter Rohstoffe durch nachwachsende Rohstoffe ist aufgrund des hohen Flächenbedarfs nicht möglich und würde zur Verschärfung von Landnutzungskonflikten führen.<sup>60</sup> In Deutschland wird bereits rund 50 % der Fläche für landwirtschaftliche Zwecke genutzt, was etwa 35,8 Millionen Hektar entspricht. Von dieser Fläche werden 22 % für die direkte Nahrungsmittelproduktion, 60 % für den Futtermittelanbau, 14 % für Bioenergie und 2 % für Industriepflanzen verwendet. Zusätzlich nimmt auch der nicht landwirtschaftliche Flächenverbrauch, beispielsweise für Straßen und Siedlungen, stark zu. Diese

---

<sup>54</sup> (Edmonds et al., 2012)

<sup>55</sup> (Rübberdt, 2020, 155)

<sup>56</sup> (Fehrenbach et al., 2017, 49)

<sup>57</sup> (Reich, 2021)

<sup>58</sup> (Fehrenbach et al., 2017, 47)

<sup>59</sup> (Fehrenbach et al., 2017, 47)

<sup>60</sup> (BMUV, 2020)

Entwicklung stellt eine zusätzliche Herausforderung für das Management begrenzter Ressourcen dar. Um eine nachhaltige Nutzung der verfügbaren Ressourcen zu gewährleisten, muss die Sicherheit der Nahrungsmittelproduktion, der Naturschutz und Artenvielfalt sowie der Klimaschutz vor der Verwendung von Biomasse für bioökonomische Produkte Vorrang haben. Dies sollte durch entsprechende Gesetzgebung sichergestellt werden.<sup>61</sup>

## Ökologische Anbauformen

Die industrielle Biomasseproduktion überschreitet bereits heute die planetaren Belastungsgrenzen und verursacht erhebliche ökologische Schäden. Diese beinhalten unter anderem die Auslaugung der Böden, die Schädigung des Wasserhaushalts, die Freisetzung von Treibhausgasen, Kontaminationen, Eutrophierung und den Verlust an Arten- und Lebensraumvielfalt.<sup>62</sup>

Die nationale Biomassenutzung hat dabei globale Auswirkungen, da große Mengen nach Deutschland importiert werden. Dadurch werden öko-soziale Kosten, wie Naturzerstörung, Landraub, Verarmung, Hunger in den Globalen Süden externalisiert. Profiteure sind meist globale Konzerne und Agrarunternehmen.<sup>63</sup> Eine Intensivierung der industriellen Biomasseproduktion würde diese Entwicklung verstärken und zu zusätzlichem Nutzungsdruck auf Naturlandschaften führen. Faire globale Partnerschaften, die Internalisierung von Kosten und die entsprechenden Preiswahrheiten sowie nachhaltigere Arten der Landnutzung wie ökologische Anbauformen, den Verzicht auf Gentechnik, Pestizide und Kunstdünger können dazu beitragen, die negativen Auswirkungen zu mindern.<sup>64</sup>

---

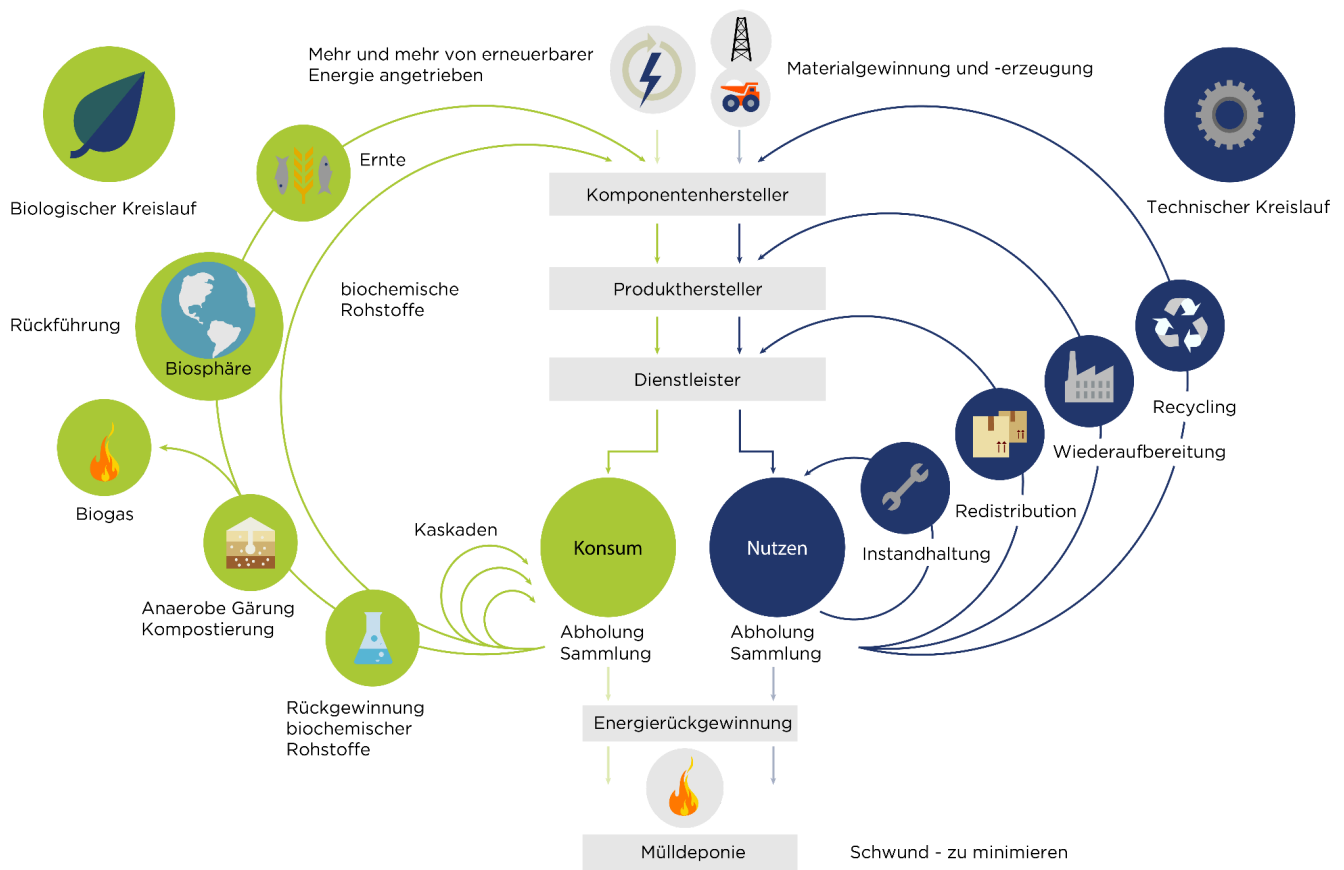
<sup>61</sup> (BUND, 2021)

<sup>62</sup> (BMUV, 2020)

<sup>63</sup> (BMUV, 2020)

<sup>64</sup> (BUND, 2021)

# Kreislaufwirtschaft



14. Abb.: Schematische Darstellung der Kreislaufwirtschaft (adaptiert von Ellen MacArthur Foundation, 2013)

Das Konzept der Kreislaufwirtschaft kann wie in Abbildung 14 durch das Schmetterlings Diagramm dargestellt werden. Dabei werden biologische (links) und technische Kreisläufe (rechts) unterschieden. Im Gegensatz zur vorherrschenden Linearwirtschaft sieht das Konzept die Wiederverwendung aller technischen Stoffe sowie die Rückführung aller biologischen Stoffe in die Biosphäre vor, nachdem diese in Kaskaden genutzt wurden. Oberstes Ziel der Kreislaufwirtschaft ist die Vermeidung von Müll, und der Erhalt des höchstmöglichen Gebrauchswerts von Produkten und Rohstoffen. Materialien werden stets als Ausgangsstoffe für neue Produkte betrachtet. Produkte werden als Zusammenführung von Rohstoffen für eine gewisse Zeit verstanden. In der Idealvorstellung erfolgt die Energieversorgung ausschließlich durch erneuerbare Quellen und alle zirkulierenden Rohstoffe sind für Mensch und Umwelt unbedenklich. Dabei ist es wichtig, die Stoffströme stets sortenrein, idealerweise mono-materiell zu halten und auf die Trennbarkeit von Materialien des technischen Kreislaufs mit denen des biologischen Kreislaufs zu achten.<sup>65</sup> Auch politisch wird das Konzept aufgegriffen. Auf europäischer Ebene wurde 2020 ein Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft vorgestellt.<sup>66</sup> Eine nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie für Deutschland befindet sich aktuell in Ausarbeitung.<sup>67</sup>

<sup>65</sup> (Ellen MacArthur Foundation, 2013)

<sup>66</sup> (Europäische Kommission, 2020)

<sup>67</sup> (BMUV, 2023)

# Prinzipien der Kreislaufwirtschaft

EU-ABFALLRAHMENRICHTLINIE: ABFALLHIERARCHIE		10R-STRATEGIE DER KREISLAUFWIRTSCHAFT	
VERMEIDUNG		REFUSE	Verzicht
		RETHINK	Intensivere Nutzung, Sharing
		REDUCE	Stoffströme verlangsamen und verringern
WIEDERVERWENDUNG		REUSE	Wiederverwenden, Second Hand
		REPAIR	Servicieren und Reparieren
		REFURBISH	Überholung und Instandsetzung
RECYCLING		REMANUFACTURE	Wiederaufarbeitung
		REPURPOSE	Umnutzung für andere Funktionen
		RECYCLE	Wiederv. v. Materialien auf mögl. hohem Niveau
VERWERTUNG			Anaerobe Gärung
		RECOVER	Energieinhalt von Reststoffen wiedergewinnen
			Kompostierung
BESEITIGUNG			Deponie

15. Abb.: Europäische Abfallhierarchie und 10R Strategie der Kreislaufwirtschaft (basierend auf Europäische Kommission, 2022; European Environment Agency et al., 2020, 9)

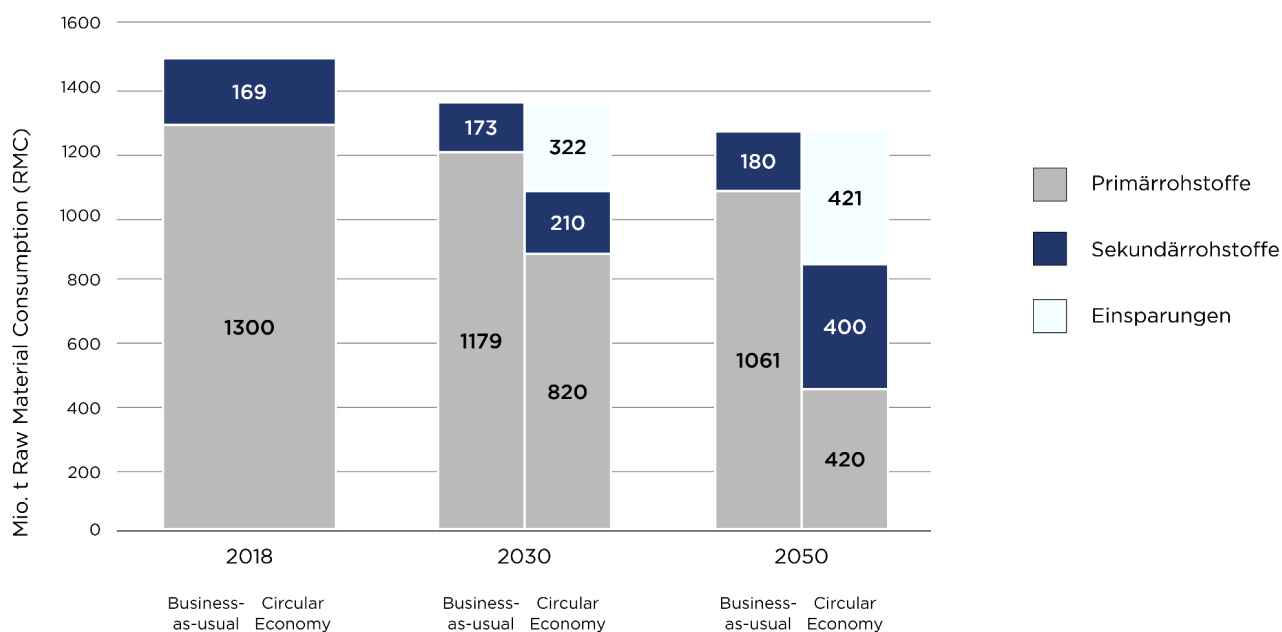
Die europäische Abfallhierarchie sieht eine klare Priorisierung nach Reihung der Einsparungspotenziale vor.<sup>68</sup> Diese wird in Abbildung 15 um die 10R Strategie der Kreislaufwirtschaft ergänzt. Das Prinzip Refuse bedeutet den Verzicht auf bzw. Absage an bestimmte Rohstoffe, Produkte und Technologien. Der Produktnutzen kann auch anders erbracht bzw. substituiert werden. Rethink meint das Umdenken bezogen auf intelligentere Herstellung, intensivere Nutzung durch Sharingkonzepte und die grundlegende Transformation bestehender Konsum- und Produktionsmuster. Dies bedeutet auch ein Neudenken von Geschäftsmodellen und Kooperationen. Um die Ressourceneffizienz zu steigern und den Einsatz von Materialien und Energie zu verringern, wird das Prinzip Reduce angewandt. Weitere Einsparungspotenziale können durch die Verlängerung der Lebensdauer von Produkten, Komponenten und Infrastruktur erreicht werden. Dafür werden die Prinzipien Reuse (funktionsfähige Produkte wiederverwenden), Repair (Produkte durch Reparatur weiternutzen), Refurbish (alte Produkte wiederaufbereiten), Remanufacture (Teile aus defekten Produkten für neue Produkte nutzen) und Repurpose (Teile aus defekten Produkten in anderen Funktionen verwenden) angewandt.<sup>69</sup> Sind Produkte nicht mehr auf einer Bauteilebene wiederzuverwenden, werden sie nach dem Recycle Prinzip auf materieller Ebene in den Kreislauf zurückgeführt. Ist auch diese Möglichkeit nicht mehr gegeben, sollte nach dem Recover Prinzip die thermische Verwertung mit Energierückgewinnung und im biologischen Kreislauf zusätzlich die Kompostierung bzw. Vergärung (Rot) stehen.<sup>70</sup> Lediglich absolut nicht mehr zu verwertende Stoffe und Materialien, die eine Gefahr für Mensch und Umwelt darstellen, sollen den Kreislauf verlassen.

<sup>68</sup> (European Environment Agency et al., 2020, 9)

<sup>69</sup> (Ressourcen Forum Austria, 2023)

<sup>70</sup> (Sachverständigenrat Bioökonomie Bayern, 2022, 1)

## Ziele der Kreislaufwirtschaft



16. Abb.: Vergleich Circular Economy Szenario zum Business-as-Usual Case beim deutschen Ressourcenverbrauch (RMC) (adaptiert von Ramesohl et al., 2021, 10; basierend auf Kadner et al., 2021)

Grundsätzlich soll die Wertschöpfung vom Ressourcenverbrauch entkoppelt und die Ressourceneffizienz durch Verlangsamern, Verringern und Schließen von Stoffkreisläufen erhöht werden. Es braucht eine absolute Reduktion des Rohstoffverbrauchs, und insbesondere des Einsatzes von Primärrohstoffen. Dies kann durch Effizienzstrategien und wiederverwendete Materialien (Sekundärrohstoffe) erreicht werden. Damit sollen die mit dem Ressourcenverbrauch verbundenen Umweltauswirkungen und Treibhausgasemissionen verringert und der Klimaschutz und Erhalt der Biodiversität gestärkt werden. Durch Anwendung von Kreislaufwirtschaftsstrategien könnten die Treibhausgasemissionen der vier CO<sub>2</sub>-intensivsten Stoffströme der europäischen Industrie (Stahl, Plastik, Aluminium und Zement) bis 2050 um bis zu 60 Prozent gesenkt werden. Wie in Abbildung 16 dargestellt, gehen Schätzungen der Circular Economy Initiative Deutschland davon aus, dass der Ressourcenverbrauch in Deutschland durch ambitionierte Circular Economy Strategien bis zum Jahr 2050 um rund zwei Drittel gesenkt werden könnte. Sekundärrohstoffe sollen dabei beinahe die Hälfte des Ressourcenbedarfs decken.<sup>71</sup> Der globale Bedarf an Primärrohstoffen könnte durch Etablierung der Kreislaufwirtschaft um ein Drittel sinken.<sup>72</sup> Die bestehenden Probleme lassen sich allerdings nicht allein mit technischer Innovation bewältigen. Es braucht eine gesamtgesellschaftliche Transformation, das Überdenken und Ablegen von Konsummustern und Lebensstilen. Technische und soziale Innovationen sowie ein kollektiver Lernprozess von Produzent:innen, Konsument:innen und Politik sind notwendig.<sup>73</sup>

<sup>71</sup> (Ramesohl et al., 2021, 9)

<sup>72</sup> (Circle Economy, 2023)

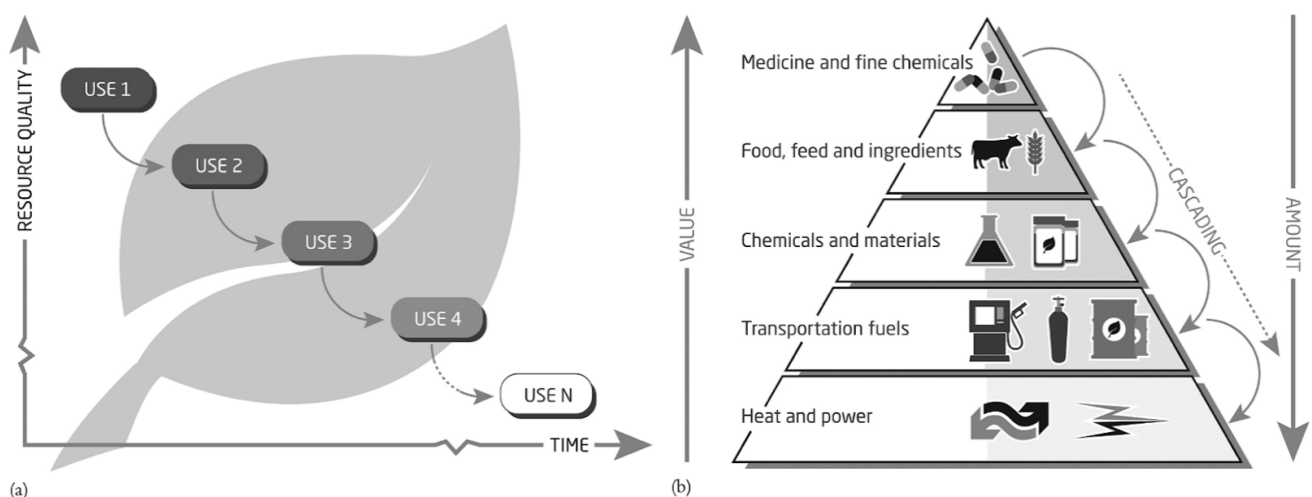
<sup>73</sup> (Ressourcen Forum Austria, 2023)

# Kaskadennutzung

## Definition

“Leitprinzip der Bioökonomie ist der Aufbau einer Kreislaufwirtschaft, die im Sinne von Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit eine bestmögliche Verwertung sowie Mehrfachnutzung von Rohstoffen und Stoffströmen – auch sektorenübergreifend – ermöglicht.“<sup>74</sup>

Eine begrenzte Rohstoffbasis erfordert die stoffliche Mehrfachnutzung von Roh- und Reststoffen als Basis einer effizienten Ressourcennutzung. Der biologische Teil der Kreislaufwirtschaft zeichnet sich durch das Konzept der Kaskadennutzung aus und stellt damit das Grundprinzip einer zirkulären Bioökonomie dar. Die Kaskadennutzung maximiert die Ressourceneffizienz, durch die Einsparung von Primärrohstoffen und die optimale Nutzung von Biomasse über verschiedene Stufen (Kaskaden).<sup>75</sup>



17. Abb.: Kaskadennutzung nach Zeit (a) und Wert (b) (Quelle: Bugge et al., 2019, 55)

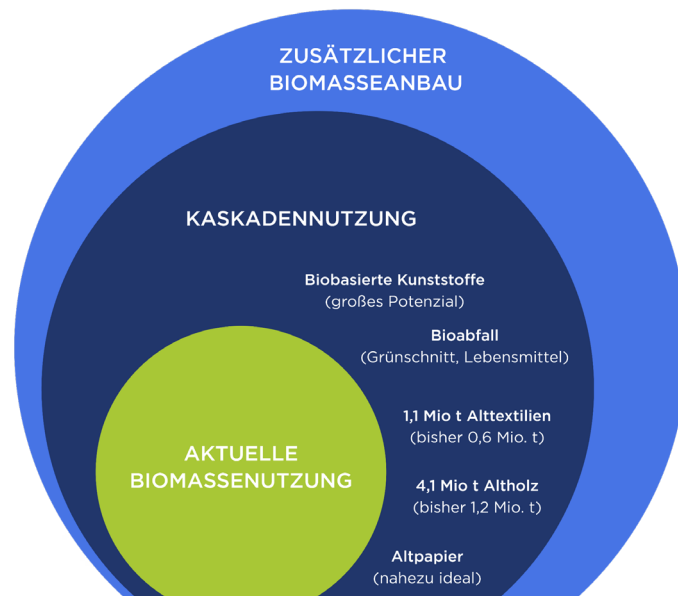
Wird ein biogener Rohstoff zu einem biobasierten Endprodukt verarbeitet und dieses Endprodukt mindestens ein weiteres Mal stofflich oder energetisch genutzt, so wird dies als *einstufige Kaskadennutzung* bezeichnet. *Mehrstufige Kaskadennutzung* von Biomasse ist gegeben, wenn ein biogener Rohstoff zu einem biobasierten Endprodukt verarbeitet und dieses mindestens ein weiteres Mal stofflich genutzt wird, bevor es energetisch verwertet wird (siehe Abbildung 17).<sup>76</sup> Dieser Ansatz reiht die energetische Verwertung als letzte Stufe, wenn die Potenziale aller höherwertigen Stufen durchlaufen und ausgeschöpft sind. Auch Rest- und Sekundärstoffe können auf der höchstmöglichen Stufe Kreisläufen zugeführt und genutzt werden.<sup>77</sup> Grundsätzlich sollten sich die Prozessstufen dabei auch an der Hierarchie der EU-Abfallrahmenrichtlinie orientieren und der 10R-Strategie folgen.

<sup>74</sup> (Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) Referat Bioökonomie, 2014, 6)

<sup>75</sup> (Fehrenbach et al., 2017, 28)

<sup>76</sup> (Fehrenbach et al., 2017, 27)

<sup>77</sup> (Hrouda, 2021)



18. Abb.: Rohstoffquellen für eine nachhaltige Biomassenutzung (basierend auf Fehrenbach et al., 2017, 46)

Die Kaskadennutzung stellt eine wesentliche Strategie dar, die steigende Nachfrage nach biogenen Ressourcen durch die stoffliche Mehrfachnutzung auf den unterschiedlichen Nutzungsebenen zu befriedigen (siehe Abbildung 18). Dabei werden sämtliche biogene Rohstoffe gleich behandelt, egal ob Haupt-, Neben- oder Zwischenprodukte aus der land- oder forstwirtschaftlichen Primärproduktion oder biogene Reststoffe aus der Lebens-, Futtermittel- oder sonstigen Industrie. Die durch die Biomassenutzung entstehenden Spannungsfelder und Nutzungskonkurrenzen zwischen Nahrungsmittelsicherheit, Vermeidung fossiler Ressourcen, der daraus resultierenden Hinwendung zu biobasierten Energien und dem allgemeinen immensen Rohstoffhunger sollen durch die Kaskadennutzung entschärft werden.<sup>78</sup> Im Zuge einer Wirkungsabschätzung zur stofflichen Kaskadennutzung von Biomasse im Auftrag des Umweltbundesamtes wurden überwiegende Vorteile in allen Umweltaspekten festgestellt. Entscheidend dabei ist besonders, was substituiert wird und weniger die reine Anzahl an durchlaufenen Kaskaden. Grundsätzlich ist auf eine hohe Qualität der stofflich substituierten Produkte zu achten und es muss sichergestellt werden, dass über die Kaskaden möglichst geringe Verluste auftreten. Dadurch kann am Ende der Kaskaden das Potenzial zur energetischen Verwertung noch voll ausgeschöpft werden. Weniger relevant im Gesamtbild der Ökobilanz zeigten sich zusätzliche logistische und prozessuale Aufwendungen wie zusätzliche Transportwege oder Verarbeitungsprozesse. Diese stellen oftmals eher ein organisatorisches und wirtschaftliches Hemmnis dar.<sup>79</sup> Durch die langfristige Nutzung von biobasierten Produkten ergibt sich ein weiterer klimawirksamer Effekt – die Bindung des während des Wachstums aufgenommenen atmosphärischen Kohlenstoffs. Somit fungieren biobasierte Produkte als Kohlenstoffsinken für den Nutzungszeitraum. Je länger also Produkte in Kaskaden gehalten werden, desto länger wird auch der darin enthaltene Kohlenstoff gebunden.<sup>80</sup>

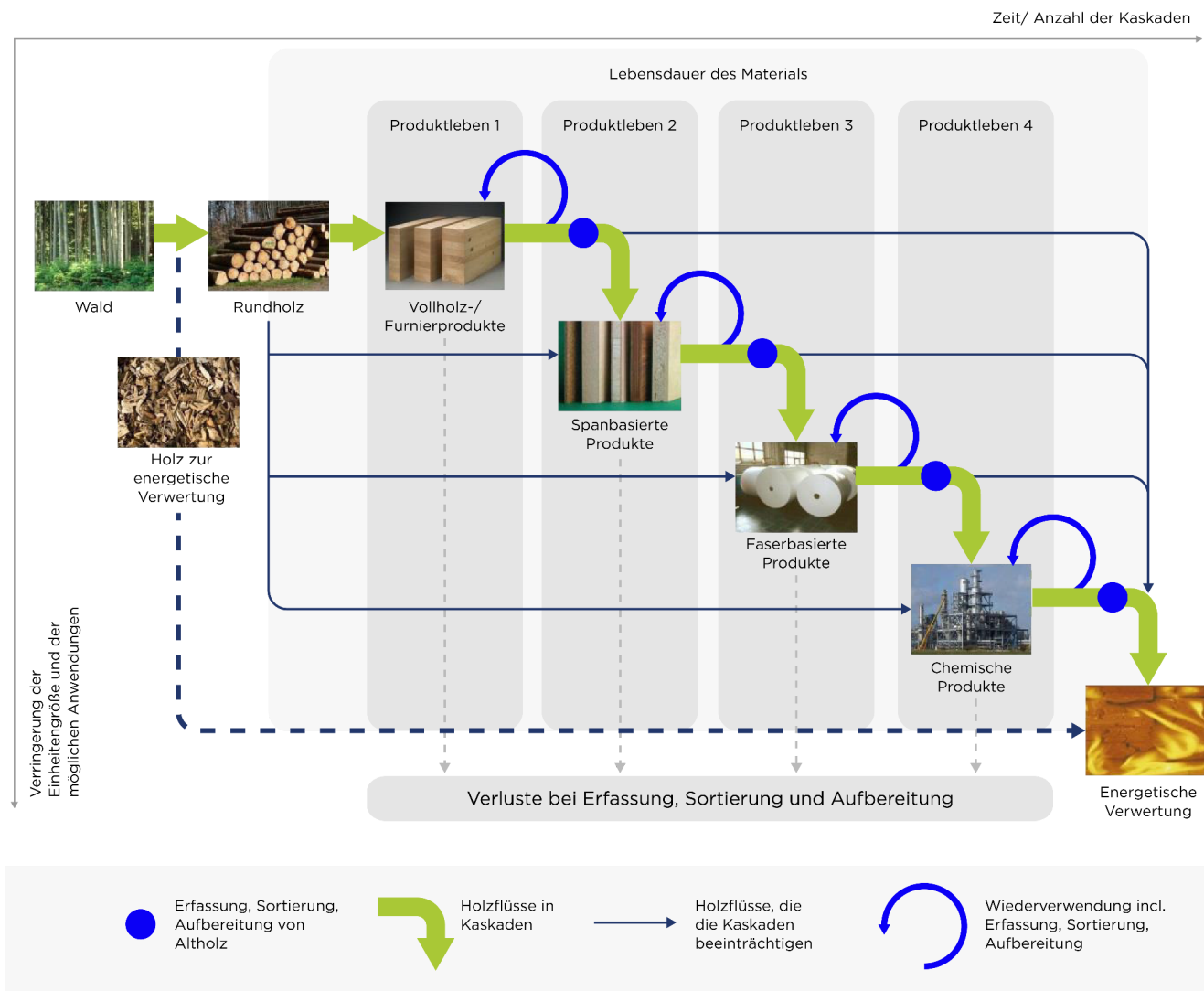
<sup>78</sup> (Fehrenbach et al., 2017, 30)

<sup>79</sup> (Fehrenbach et al., 2017, 82)

<sup>80</sup> (Fehrenbach et al., 2017, 64)



## Die Kaskadennutzung am Beispiel der Holzwirtschaft



19. Abb.: Kaskadennutzung von Holz (eigene Darstellung basierend auf Höglmeier, 2015, 7)

Das Konzept der Kaskadennutzung wird häufig mit der Forst- und Holzwirtschaft in Verbindung gebracht. Dort wird die Kaskadennutzung in Teilen bereits umgesetzt und kann gut veranschaulicht werden. Eine ressourceneffiziente Kaskade kann etwa mit Massivholz beginnen, das als Vollholz oder Furnierprodukt verwendet wird. Nach Ende der Nutzungsphase können daraus spanbasierte Produkte hergestellt werden. Diese können anschließend weiterverarbeitet werden, um faserbasierte Produkte herzustellen. Anschließend dienen diese faserbasierten Produkte als Rohstoffe für die Produktion von biobasierten chemischen Stoffen, die schließlich energetisch verwertet werden, um Strom und Wärme zu erzeugen. Grundsätzlich sind Verluste möglichst gering zu halten und die Wiederverwendung zu bevorzugen.<sup>81</sup> Anhand von Abbildung 19 wird deutlich, dass nach den einzelnen Nutzungsphasen stets eine erneute Erfassung und Bewertung notwendig ist, um die nächste Nutzung zu bestimmen. Dies könnte zukünftig digital und automatisiert erfolgen. So könnten die ideale Nutzungspfade vorgeschlagen und die Ressourceneffizienz weiter gesteigert werden.

<sup>81</sup> (Vrzel, 2022)

## Verwertungspfade

*“In general, it makes sense to use a cascading approach to wastes and residues, prioritizing re-use or recycling and acknowledging that the value of this material is more than simply its energy content.”<sup>82</sup>*

Bis ins 20. Jahrhundert war die stoffliche Mehrfachnutzung von Biomasse ebenso selbstverständlich wie alternativlos. Erst durch die zunehmende Nutzung fossiler Energie- und Rohstoffquellen wurden erneuerbare durch erdölbasierte Materialien substituiert. In den vergangenen zwei Jahrzehnten hat die energetische Nutzung von Biomasse in Deutschland einen starken Aufschwung erlebt und stellt in Teilbereichen eine Nutzungskonkurrenz zur stofflichen Verwertung dar. Angesichts der Anforderungen an eine möglichst effiziente Biomassenutzung, die den Vorrang von stofflicher Nutzung vor der energetischen Nutzung vorsieht, wird es zunehmend wichtiger, die Datenverfügbarkeit zur stofflichen Nutzung zu verbessern. Die vollständige Verwertung von Rest- und Abfallstoffen und die Vermeidung von negativen Umweltbelastungen erfordern eine umfassende stoffliche Charakterisierung dieser Stoffe. Nebenprodukte sind ein integraler Bestandteil der Kreislaufwirtschaft, doch das Wissen über den Umgang mit ihnen ist noch lückenhaft. Sie haben das Potenzial, Primärrohstoffe zu ersetzen und als Grundlage für weitere Produktionsprozesse zu dienen. Hierbei kommt es jedoch auf differenzierte Verwertungsverfahren und eine regionale Abstimmung der Bioökonomie an, da je nach Region unterschiedliche Biomasseproduktionen und damit unterschiedliche Rest- und Sekundärstoffe anfallen. Die Nutzung dieser Reststoffe erfordert neue Ideen und Entwicklungen, insbesondere in den Bereichen Analytik und Eignungsprüfung für Prozesse und Verfahren. Innovative Verfahren können zur Aufwertung beitragen, dabei müssen allerdings auch die ökologischen Auswirkungen berücksichtigt werden. Dies erfordert Know-how aus den Bereichen Verfahrenstechnik, Materialwissenschaften und Chemie. Biotechnologie bietet Potenzial für die Weiterverwertung von Lebensmittelabfällen. Zum Beispiel können Insekten und Pilze Reststoffe effizient verarbeiten und Proteine für den menschlichen oder tierischen Verzehr produzieren. Nach einer thermischen Behandlung könnten Lebensmittelabfälle problemlos verfüttert werden. Um den größtmöglichen Nutzen aus Reststoffen zu erzielen, ist es wichtig, die Datenlage zu verfügbaren Stoffmengen und Strömen weiter auszubauen. Es gilt, regulatorische, logistische, betriebswirtschaftliche und verfahrenstechnische Herausforderungen zu lösen und zu klären, welche Produkte aus welchen Reststoffen hergestellt werden können und welche Prozesse dafür erforderlich sind. Die Zusammenführung von Potenzial, Wissen und Innovationskraft ist der Schlüssel, um die Kreislaufwirtschaft voranzutreiben und eine nachhaltige Nutzung von Biomasse zu gewährleisten. Die Erhebung relevanter Daten und darauf basierende Anwendungen können ein Beitrag dazu sein.<sup>83</sup>

---

<sup>82</sup> (Malins et al., 2014)

<sup>83</sup> (Fehrenbach et al., 2017)

# Digitale Transformation

*“Digitalisierung bedeutet, Informationen zum Zustand der realen Welt in elektronische Signale zu übersetzen, diese dadurch von der physischen Basis zeitlich und räumlich zu entkoppeln und so in nahezu unbegrenztem Maße nutzbar zu machen. So wird unser digitales Bild der Welt immer genauer; im Rahmen der Industrie 4.0 wird zum Beispiel vom digitalen Zwilling von Anlagen und Prozessen gesprochen, der umfassende Optimierungen in einer virtuellen Umgebung ermöglicht. Die Verfügbarkeit von Informationen ist auch Grundlage für neue, ökologische Dienstleistungen wie z.B. der Circular und Sharing Economy.”<sup>84</sup>*

Neue Technologien haben maßgeblichen Einfluss auf das gesellschaftliche Miteinander und die Strukturierung der Wirtschaft. Die großen Gestaltungspotenziale der Digitalisierung sollten dabei in den Dienst der nachhaltigen Entwicklung als drängendste Gestaltungsaufgabe des 21. Jahrhunderts gestellt werden.<sup>85</sup> Von der Europäischen Kommission als “Twin Transition” beschrieben, müssen die Transformation zu einer ökologischen Ökonomie und die digitale Transformation als interdependente Prozesse und gemeinsame Gestaltungsaufgabe begriffen und als Veränderungsprozesse demokratisch verhandelt und bewusst gesteuert werden.<sup>86</sup>

Die Digitalisierung zeichnet eine hohe Innovationsdynamik aus. Schlüsseltechnologien wie Sensorik, Datenübertragung, Chiptechnologien oder auch Datenanalysen wie Verfahren der künstlichen Intelligenz verändern die Art und Weise, wie Daten erfasst, vernetzt, geteilt, analysiert und für Entscheidungen genutzt werden. Digitale Technologien haben damit das Potenzial, Arbeitsorganisation, Produktionsprozesse und Geschäftsmodelle radikal zu verändern.<sup>87</sup>

Darüber hinaus braucht es soziale Innovationen, die das gesellschaftliche Engagement stärken und Verhaltensänderungen sowie neue Praktiken anregen. Insbesondere lokale Ansätze der Kreislaufwirtschaft können davon profitieren, indem sie lokales Wissen einbinden, lokale Bedürfnisse und Kompetenzen berücksichtigen und lokale Akteur:innen befähigen.<sup>88</sup>

---

<sup>84</sup> (Ramesohl et al., 2021, 9)

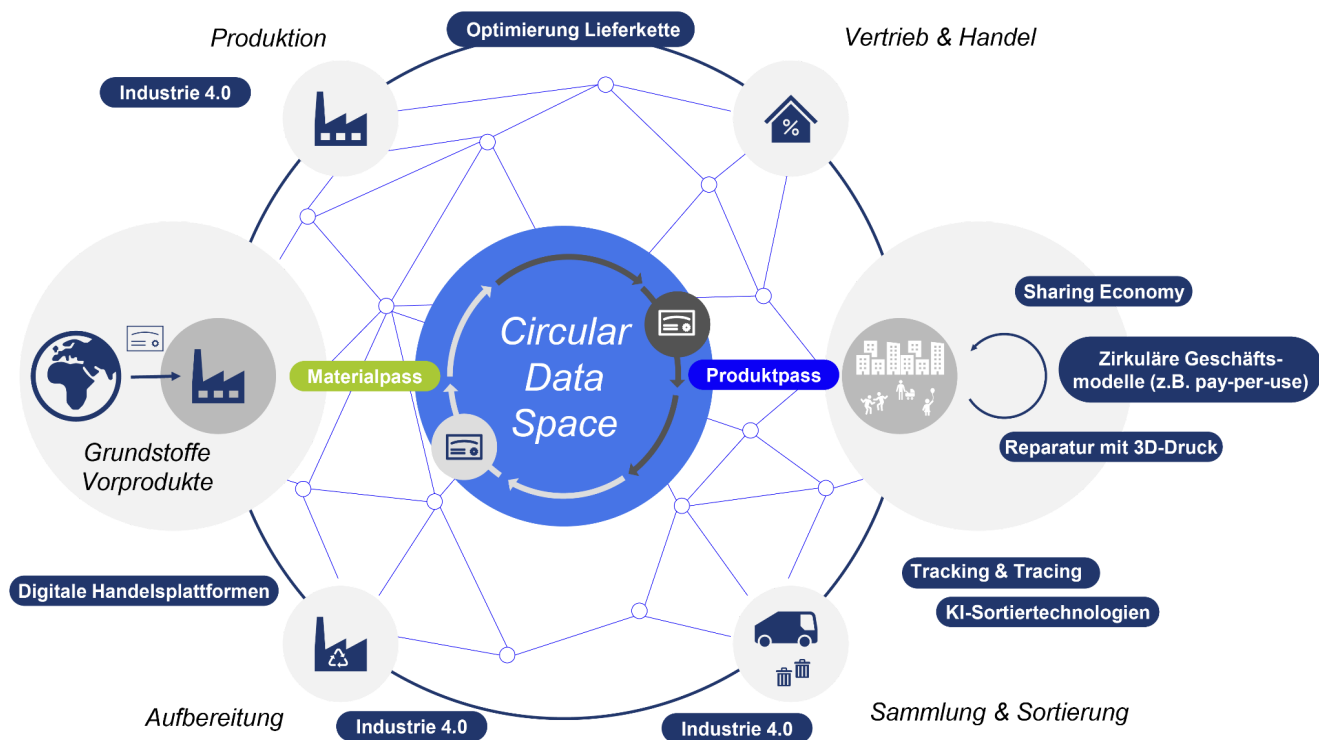
<sup>85</sup> (Ramesohl et al., 2021, 6)

<sup>86</sup> (EU Joint Research Centre, 2022)

<sup>87</sup> (Ramesohl et al., 2021, 9)

<sup>88</sup> (Herlo et al., 2022, 36)

## Digitale zirkuläre Bioökonomie



20. Abb.: Vision einer digitalen Kreislaufwirtschaft (adaptiert von Ramesohl et al., 2022, 16)

Eine zentrale Herausforderung der Kreislaufwirtschaft besteht im komplexen Management der Stoffströme und Ressourcennutzung. Dies betrifft sowohl einzelne Unternehmen innerhalb einer Wertschöpfungskette, als auch den Austausch zwischen unterschiedlichen Branchen und Sektoren. In diesem Kontext wandeln sich traditionelle lineare Wertschöpfungsketten zunehmend in ein multidimensionales Wertschöpfungsnetzwerk.<sup>89</sup> Es geht um die Erfassung und elektronische Verarbeitung, sowie den Austausch von Daten über verschiedene Sektoren wie Landwirtschaft, Logistik, verarbeitender Industrie, Endverbrauchern und Behörden hinweg. Die Virtualisierung von Stoffströmen erfordert die Erstellung digitaler Abbilder von Ressourcen, Abläufen und Prozessen.<sup>90</sup>

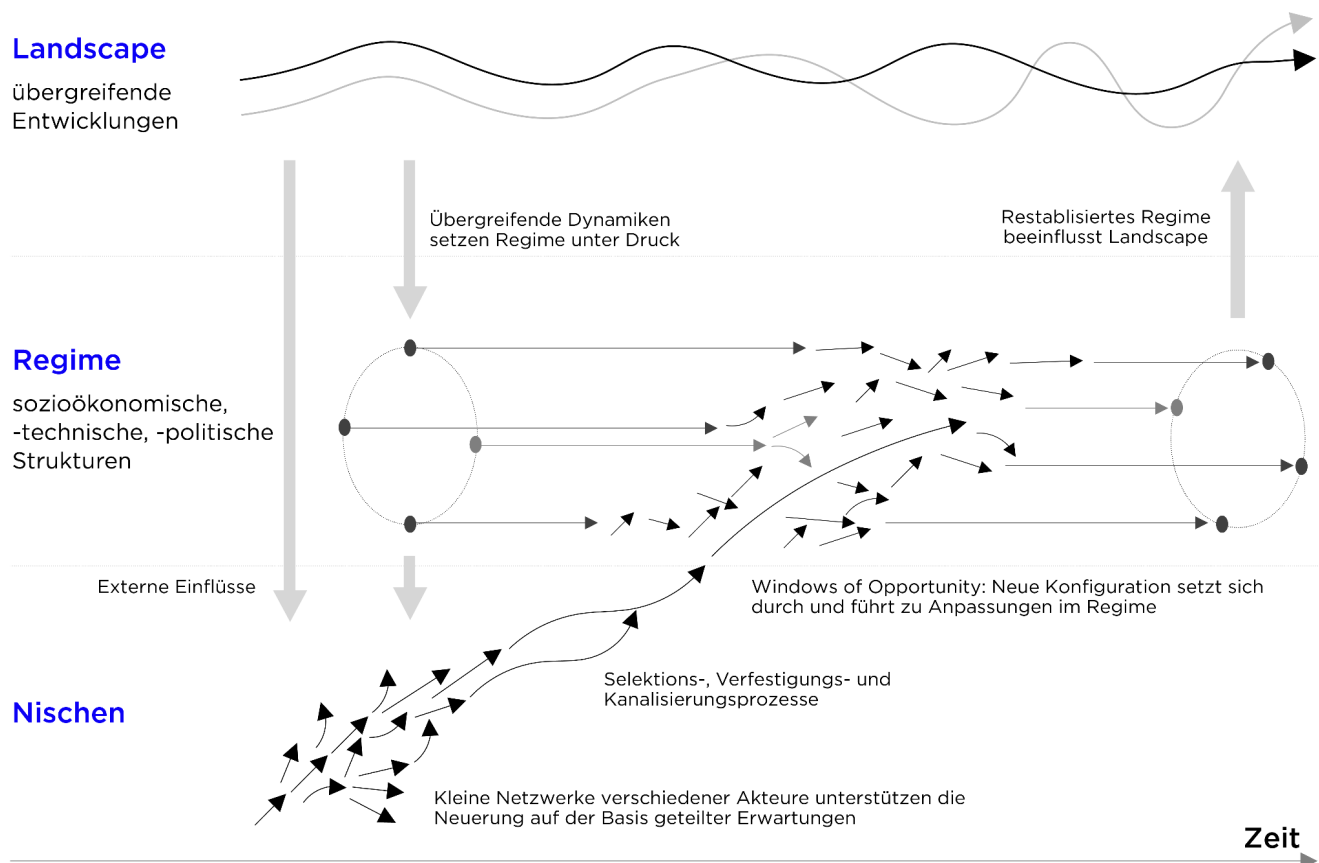
Im Zuge dieser Entwicklung gewinnt das Konzept von Daten-Ökosystemen immer mehr an Bedeutung. Unternehmen werden zu integralen Bestandteilen dieser Ökosysteme, die Datenbeziehungen gestalten und koordinieren müssen. Hierbei gewinnen Partnerschaften und Kooperationen an Bedeutung, was neue Strukturen für die digitalen Interaktionen und Datenflüsse zwischen den beteiligten Akteur:innen erfordert. Um eine datenbasierte zirkuläre Bioökonomie zu ermöglichen, muss die Verfügbarkeit von Daten über den gesamten Kreislauf gewährleistet sein (siehe Abbildung 20). Dies eröffnet erhebliche Innovationspotenziale, insbesondere im Bereich digitaler Modelle, die auf Datenaustausch basieren oder ganze Systeme beschreiben. Der Zugriff auf Informationen über vorgelagerte Prozesse sowie das Wissen um die Auswirkungen des eigenen unternehmerischen Handelns auf nachgelagerte Wertschöpfungsstufen sind dabei essenziell.<sup>91</sup>

<sup>89</sup> (Ramesohl et al., 2021, 12)

<sup>90</sup> (Rübberdt, 2020, 149)

<sup>91</sup> (Ramesohl et al., 2021, 11)

## Multilevel-Perspektive



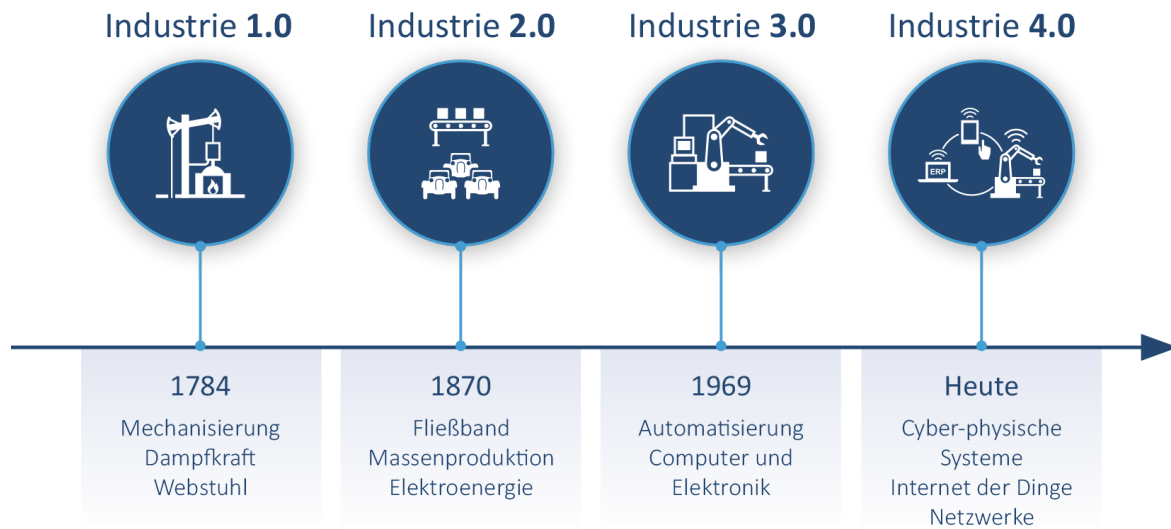
21. Abb.: Sozio-technische Transformationsdynamiken in der Multilevel-Perspektive (Geels & Schot, 2007)

Die Multilevel-Perspektive (MLP) nach Geels und Schot wird verwendet, um systemische sozio-technische Veränderungsdynamiken zu veranschaulichen (siehe Abbildung 21). Dabei gliedert sich die MLP in drei Ebenen.<sup>92</sup> Die Landscape-Ebene, der übergreifende Entwicklungen, wie der Klimawandel oder die vielfache Überschreitung planetarer Grenzen, zugeordnet werden können. Die Regime-Ebene, die vorherrschende sozio-ökonomisch, technische und politische Strukturen beschreibt, etwa die fossil-basierte Linearwirtschaft, die automatisierte, aber noch nicht vernetzte Industrie oder auch vorherrschende Konsum- und Wachstumsparadigmen. Und die Ebene der Nischen, die neue Entwicklungen wie die Bioökonomie, Kreislaufwirtschaft, Industrie 4.0 und andere Innovationen als digitale Enabler hervorbringt. Die übergreifenden Entwicklungen üben dabei Veränderungsdruck auf etablierte Regime aus und bedingen etwa politische Maßnahmen, wie die Zielsetzung, eine Kreislaufwirtschaft und Bioökonomie zu etablieren oder Unternehmen zu verpflichten, einen digitalen Produktpass bereitzustellen. Diese veränderten Rahmenbedingungen fördern das Aufkommen von Nischenentwicklungen, die sich in günstigen Zeitfenstern (Windows of Opportunity) etablieren und festigen können. Auf das Projekt angewandt, stellen die übergeordneten Herausforderungen, die politischen Weichenstellungen sowie die Möglichkeiten der Industrie 4.0 eine vielversprechende Möglichkeit für die Etablierung einer digitalen zirkulären Bioökonomie dar.<sup>93</sup>

<sup>92</sup> (Geels & Schot, 2007)

<sup>93</sup> (Götz et al., 2021, 34)

## Industrie 4.0



22. Abb.: Industrielle Entwicklung über die Zeit (Quelle: Stein, 2020)

### Definition

*“Industrie 4.0 bezeichnet die intelligente Vernetzung von Maschinen und Abläufen in der Industrie mithilfe von Informations- und Kommunikationstechnologie.”<sup>94</sup>*

Das Konzept der Industrie 4.0 soll als nächste hochtechnologische Entwicklungsstufe der Industrie neue Kooperations- und Vernetzungsmethoden ermöglichen, die eine tiefere Digitalisierung der industriellen Wertschöpfungskette voraussetzen (siehe Abbildung 22). Zentrale Innovationen wie Internet of Things, Big Data und Cloud-Computing werden dabei verknüpft.<sup>95</sup> Dabei werden verstärkt Daten erzeugt, genutzt und weitergegeben. Indem Daten aus relevanten Produktionsprozessen gebündelt werden, können Hersteller schneller auf Störungen reagieren und dadurch ihre Resilienz erhöhen. Ferner erlaubt die verbesserte Datennutzung, Emissionen systematisch zu reduzieren und zirkuläre Netzwerke zu etablieren. Dies fördert Prozessoptimierungen, die Entstehung neuer Geschäftsmodelle und erleichtert die Einhaltung gesetzlicher Verpflichtungen, wie die Implementierung des digitalen Produktpasses. Der unternehmensübergreifende Datenaustausch erfordert vertrauenswürdige Infrastrukturen und Frameworks. Es geht darum, Datenökosysteme zu schaffen, um die verschiedenen Stufen der Lieferkette miteinander zu vernetzen.<sup>96</sup> Das Konzept der Datenökosysteme wird im nächsten Kapitel näher erläutert. Datensouveränität und Datensicherheit müssen jederzeit gewährleistet werden. Dazu gehören rechtliche Rahmenbedingungen, standardisierte Technologien und Informationsmodelle wie die Verwaltungsschale (Asset Administration Shell) und eine Datenpolitik mit entsprechenden Kontrollen. Konnektivität und Interoperabilität werden als

<sup>94</sup> (Plattform Industrie 4.0, 2019)

<sup>95</sup> (Stein, 2020)

<sup>96</sup> (BMBF, 2016)

Leitprinzipien betont, wobei der Datenraum niedrige Barrieren besonders für die Anbindung von kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) bieten muss. Die verschiedenen Akteur:innen in der Wertschöpfungskette, wie Zulieferer:innen, Hersteller:innen, Wiederaufbereiter:innen und Einzelhändler:innen, profitieren alle auf unterschiedliche Weise von dieser verbesserten Vernetzung und Datennutzung. Beispielsweise erlauben Echtzeitdaten aus der Produktion und die Rückverfolgbarkeit von Ressourcen den Zulieferer:innen auf veränderte Kundenanforderungen zu reagieren. Hersteller:innen können ihre Maschinenstabilität erhöhen und nächste Produktchargen mit realen Maschinendaten optimieren. Wiederaufbereiter:innen erhalten Transparenz über die Materialzusammensetzung.<sup>97</sup> Schließlich ist ein weiterer Grund die Erfüllung aktueller und zukünftiger regulatorischer Anforderungen, wie das Lieferkettensorgfaltspflichtengesetz, die CO<sub>2</sub>-Berichterstattung sowie die Berücksichtigung von ökologischen und sozialen Kriterien.<sup>98</sup>

## Datenökosystem

Ein Datenökosystem ist im Wesentlichen eine kollaborative Umgebung, in der Daten die grundlegende Voraussetzung für Zusammenarbeit und Innovation sind. Es beinhaltet eine Reihe von technischen, organisatorischen und institutionellen Bedingungen. In der europäischen Datenstrategie 2020 wurde ein gemeinsamer europäischer Datenraum vorgeschlagen.<sup>99</sup> Dieser soll eine vertrauenswürdige und zuverlässige technische Infrastruktur bereitstellen, die es den verschiedenen Anwender:innen ermöglicht, Informationen zu teilen, ohne die Datenhoheit aufzugeben. Um die Kollaboration innerhalb dieses Dataspace zu erleichtern, müssen Daten und Informationen zwischen Systemen und Komponenten ausgetauscht werden können. Dies wird durch Interoperabilität, also die Fähigkeit unterschiedlicher Systeme, möglichst nahtlos zusammenzuarbeiten, ermöglicht, was durch festgelegte Standards und Ontologien sowie den Austausch von Metadaten realisiert werden kann. Ontologien sind formalisierte Modelle, die eine einheitliche und strukturierte Repräsentation von Informationen ermöglichen und die Integration und Interpretation von Daten erleichtern.<sup>100</sup> Die Schaffung einer solchen Umgebung erfordert sorgfältige Planung. Ein sensibler Aspekt ist, wer die Datenökosysteme betreibt. Eine föderierte Informationsstruktur könnte einen Zugang zu verschiedenen autonom verwalteten Informationsquellen ermöglichen, ohne dass dabei Daten ausgelagert werden müssen. Diese Systeme sind Zusammenschlüsse von einzelnen Systemen, die ihre Autonomie bewahren. Solche föderierten Informationssysteme können dazu beitragen, eine Kultur des Datenteilens zu fördern und zu festigen.<sup>101</sup> Ob der europäische Datenraum zentral von der EU verwaltet und gepflegt wird oder in Form dezentraler Systeme bei verschiedenen Akteur:innen liegt, ist noch unklar.<sup>102</sup>

---

<sup>97</sup> (Plattform Industrie 4.0, 2019)

<sup>98</sup> (Jochem et al., 2022)

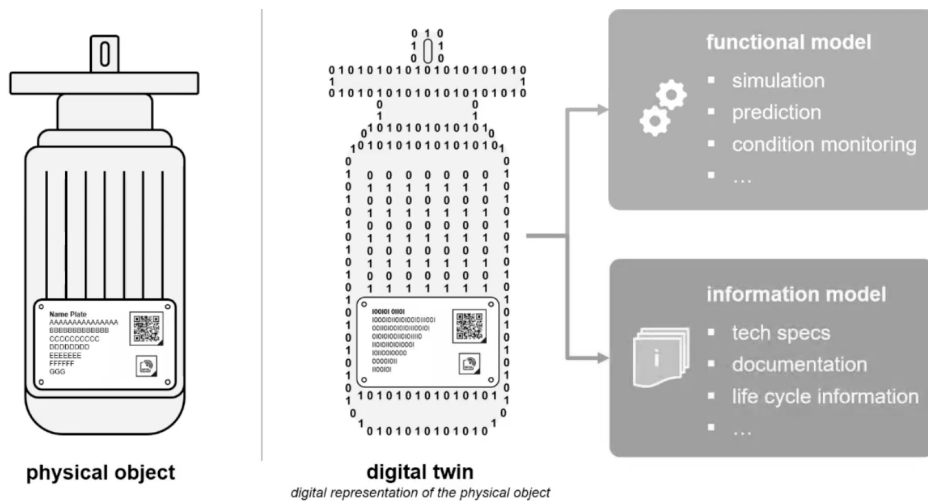
<sup>99</sup> (Europäische Kommission, 2020, 31)

<sup>100</sup> (Hesse, 2005)

<sup>101</sup> (Ramesohl et al., 2022, 4)

<sup>102</sup> (Götz et al., 2021, 34)

# Digitale Zwillinge



23. Abb.: Vereinfachte Darstellung eines Objekts mit zugeordneter Verwaltungsschale (Kun, 2023)

## Definition

Digitale Zwillinge sind digitale Abbilder eines physischen Objekts, Prozesses oder Systems in Form von Informations- und Funktionsmodellen (siehe Abbildung 23). Im Kontext von Industrieanwendungen entstanden, werden digitale Zwillinge zunehmend auch für systemische Abbildungen verwendet. Sie werden etwa genutzt, um Abläufe zu simulieren, zu analysieren und zu optimieren. Digitale Zwillinge zeichnen sich durch die Verwendung von Echtzeitdaten aus, beispielsweise von installierten Sensoren, können jedoch auch auf historische Daten zurückgreifen, um ein umfassendes Bild der repräsentierten Entität zu liefern. Diese Integration von virtueller und physischer Realität ermöglicht eine fortgeschrittene Datenanalyse und Überwachung von Systemen. Überdies eröffnet diese Technologie die Möglichkeit, neue Potenziale zu erschließen und mithilfe von Simulationen zukünftige Entwicklungen und Szenarien zu planen.<sup>103</sup>

Digitale Zwillinge gewinnen zunehmend an Bedeutung, da sie beispielsweise auf Produkt- oder Materialebene gesamte Lebenszyklen abbilden können. Sie bilden die Grundlage für vernetzte Produkte und Dienstleistungen und werden zunehmend zu einer betrieblichen Notwendigkeit, um in einer zunehmend digitalisierten und vernetzten Wirtschaft partizipieren zu können. Digitale Zwillinge finden in unterschiedlichsten Formen und für diverse Einsatzbereiche Anwendung. Dabei stellt die Skalierung jenseits von System- oder Unternehmensgrenzen eine bedeutende Herausforderung der aktuellen Lösungen dar. Eine mögliche Umsetzungsvariante bietet die Asset Administration Shell (AAS), engl. für *Verwaltungsschale*. Sie bildet das Grundgerüst für den digitalen Zwilling im Kontext der Industrie 4.0 und ermöglicht als branchenunabhängiger und herstellerübergreifender, international normierter Standard schnelle und einfache interoperable Verfügbarkeit von Daten eines industriellen Assets über seinen gesamten Lebenszyklus hinweg.<sup>104</sup>

<sup>103</sup> (Grösser, 2018)

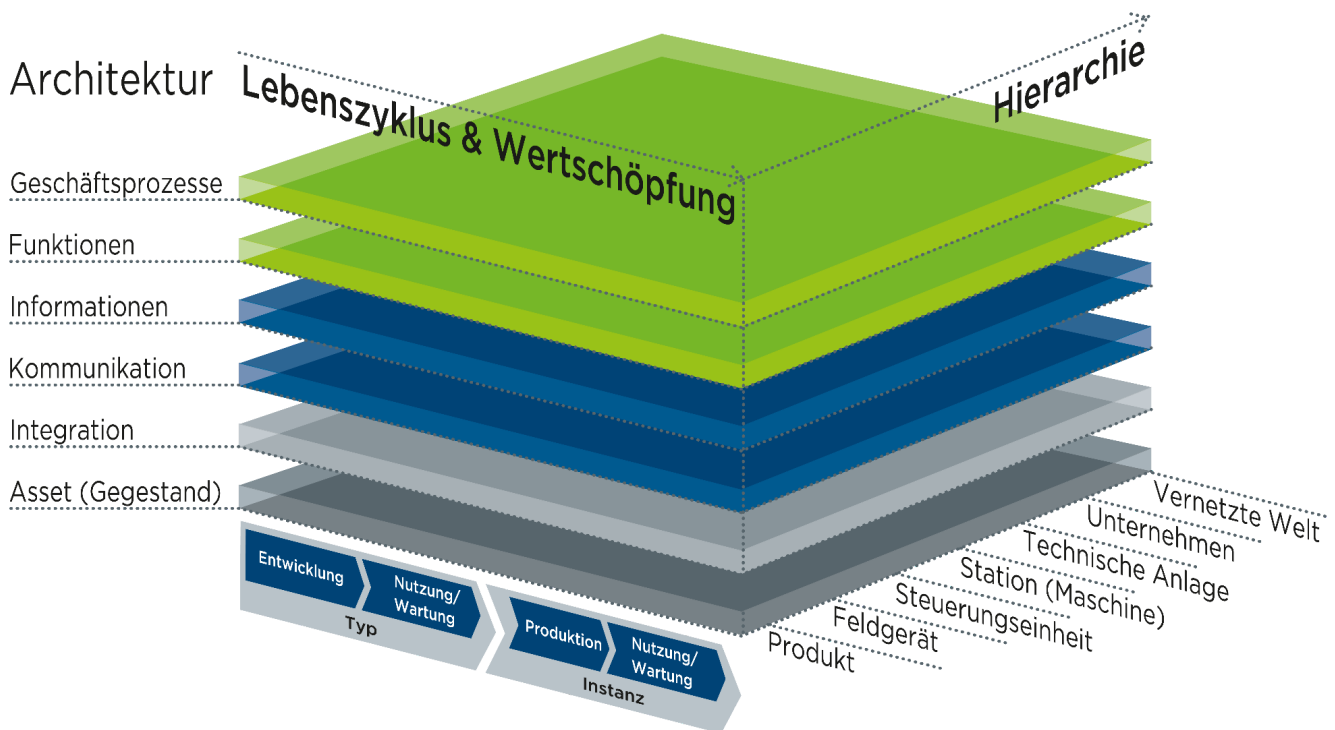
<sup>104</sup> (Heinrich, 2021)



## Verwaltungsschale

Die Verwaltungsschale (VwS) fungiert als Schnittstelle, die den Zugriff auf und die Ablage von Daten oder Informationen zu einem bestimmten Asset, Material, Bauteil oder System ermöglicht. Sie kann als eine konkrete Realisierung des digitalen Zwilling betrachtet werden und bildet dadurch ein wesentliches Fundament für die Industrie 4.0 nach den Standards der IDTA.<sup>105</sup> Die Industrie 4.0 basiert auf den Grundsäulen Interoperabilität, Souveränität und Nachhaltigkeit. Die VwS ermöglicht dies durch die Verwendung von sektorübergreifenden Standards und Formaten. Durch die Implementierung von VwS als einheitliche Datenstruktur können Informationen zu spezifischen Assets, Materialien oder Bauteilen effizient gespeichert und gefunden werden.<sup>106</sup>

## Aufbau



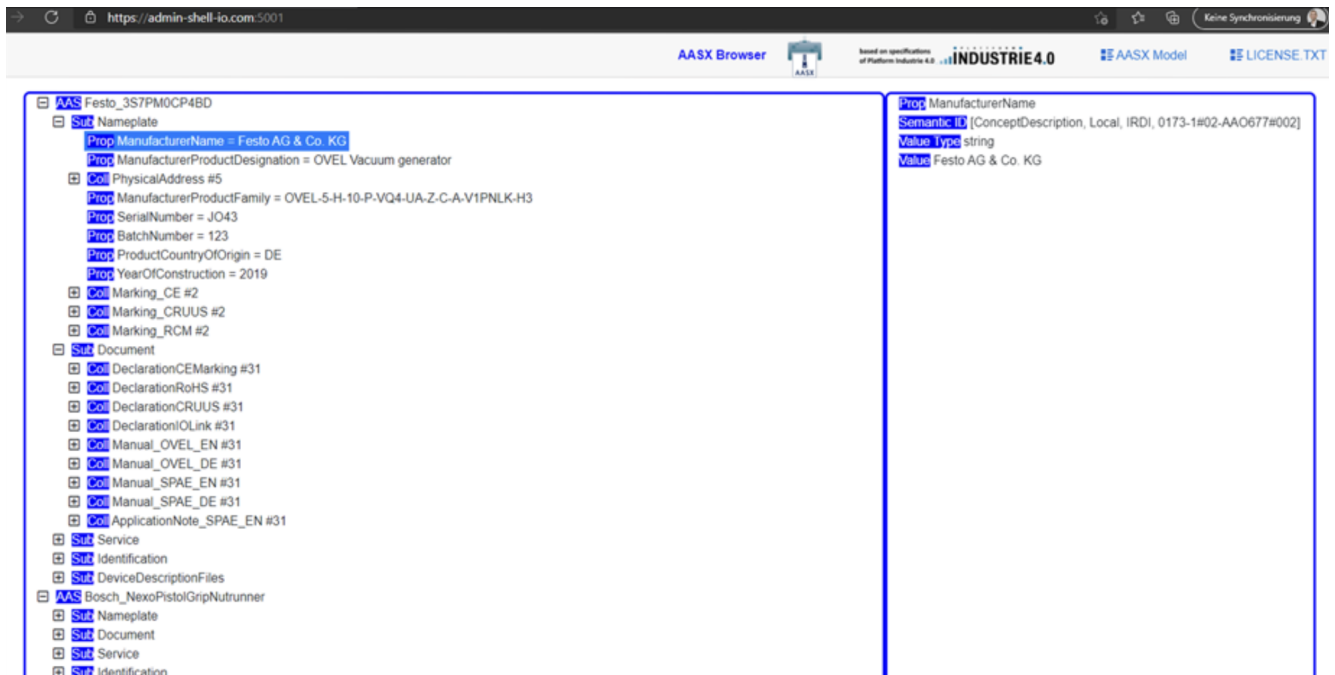
24. Abb.: Dreidimensionales Layer Modell des Referenzarchitekturmodells Industrie 4.0 - RAMI 4.0 (Plattform Industrie 4.0, 2018)

Die Industrie 4.0 ist maßgeblich durch die I4.0-Komponente geprägt, die als zentrales Element der Plattform Industrie 4.0 auftritt und im Rahmen des Referenzarchitekturmodells Industrie 4.0 (RAMI4.0) konkretisiert wird. Die I4.0-Komponente setzt sich aus dem physischen Asset und der dazugehörigen Verwaltungsschale zusammen. Die Verwaltungsschale soll alle relevanten Merkmale (properties) des physischen Assets enthalten.<sup>107</sup> Wie in Abbildung 24 zu sehen, gibt die Referenzarchitektur dafür eine klar hierarchische Struktur und Systematik vor.

<sup>105</sup> (Industrial Digital Twin Association, 2023)

<sup>106</sup> (Heinrich, 2021)

<sup>107</sup> (Standardization Council Industrie 4.0, 2022)



25. Abb.: Beispielansicht einer Verwaltungsschale (Quelle: Heinrich, 2021)

Die Gliederung der Verwaltungsschale (VwS) in einzelne Teilmodelle gewährleistet, dass jeder Aspekt oder Use Case von ihr abgedeckt wird und Daten systematisch einheitlich abgelegt und abgerufen werden können. Demzufolge sind Teilmodelle Merkmalsgruppen. Innerhalb eines Teilmodells befinden sich die Merkmale (Properties), die auch in Listen (Collections) verwaltet werden können. Jedes Merkmal besteht aus einem Wert (Value), dem Werttyp (Value Type) und einer Semantic ID, die das Merkmal eindeutig definiert und somit die Maschinenlesbarkeit sicherstellt. Zusätzlich zur Bereitstellung über Programmierschnittstellen (APIs) kann eine Verwaltungsschale auch als aasx-File (Dateiformat der Verwaltungsschale) zur Verfügung gestellt werden.<sup>108</sup> Eine exemplarische VwS ist in Abbildung 25 dargestellt. Eine Auswahl an Teilmodellen ist bereits standardisiert. Zudem besteht die Möglichkeit, neue Teilmodelle zu entwickeln und diese zur allgemeinen Nutzung zu teilen. Die Wartung und Veröffentlichung der Standard-Teilmodelle obliegt dem „Standardization Council Industrie 4.0“.<sup>109</sup> Laufend kommen weitere Templates für Teilmodelle mit unterschiedlichen Inhalten und Funktionen hinzu.<sup>110</sup> Wichtige Teilmodelle sind etwa das Teilmodell „Identifikation“, welches zur Identifizierung des konkreten Assets dient und Daten wie den Namen des Herstellers, die Seriennummer und den eindeutigen Identifier des Assets enthält, sowie das Teilmodell "Typenschild" oder engl. Nameplate. Letzteres bildet die Basis für die Industrie 4.0, da es den globalen Zugriff auf umfangreiche Informationen ermöglicht. Diese Informationen können dynamisch angepasst werden, wodurch die Notwendigkeit von Papierdokumentation entfällt und Kosten gespart werden. Je mehr relevante Informationen hinterlegt sind, desto präziser wird das digitale Abbild des physischen Assets.<sup>111</sup>

<sup>108</sup> (Heinrich, 2021)

<sup>109</sup> (Standardization Council Industrie 4.0, 2022)

<sup>110</sup> (Industrial Digital Twin Association, 2023)

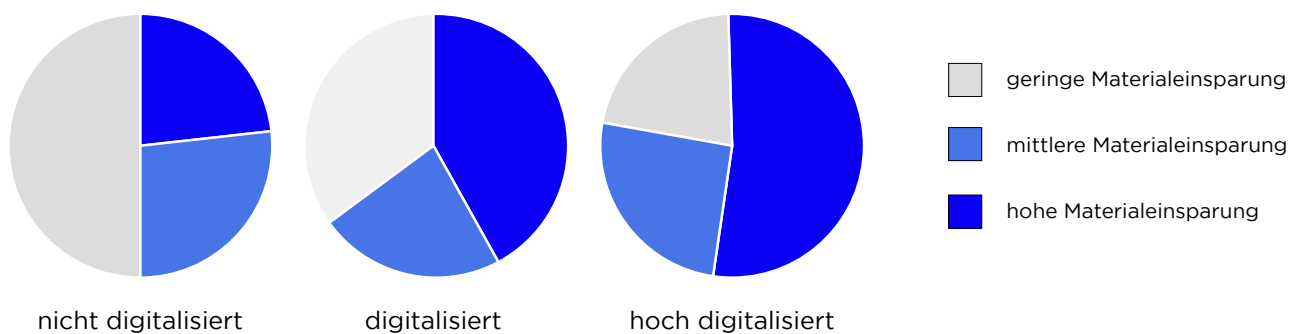
<sup>111</sup> (Götz et al., 2021, 23)

# Anwendungsbereiche

Die Digitalisierung erlaubt verschiedene Anwendungen, nachfolgend wird eine Auswahl vorgestellt.

## Prozesskontrolle und -optimierung

Begünstigt durch den Einsatz neuer Sensortechnologien, nimmt die Automatisierung von Prozessen stetig zu. Prozessdaten werden in Echtzeit erfasst, unmittelbar an Steuerungssysteme weitergeleitet und verarbeitet. So kann der Sensor selbst als regulierende Einheit in den Prozess eingreifen, wodurch unabhängige lokale Regelkreise entstehen. Im Laufe dieses Prozesses verlagert sich die „Intelligenz“ von einer zentralen Leitstelle hin zu den einzelnen Sensoren. Das minimiert das Problem großer Datenvolumina, die transportiert werden müssen, und reduziert zudem die Reaktionszeiten.<sup>112</sup>



26. Abb.: Materialeinsparung in deutschen Unternehmen in Abhängigkeit des Digitalisierungsgrads (adaptiert von Ramesohl et al., 2021, 22)

Des Weiteren ergab eine Untersuchung, dass Materialeinsparungen in deutschen Unternehmen in Abhängigkeit des Digitalisierungsgrades variieren (siehe Abbildung 26). Es scheint, dass die Fähigkeit eines Unternehmens zur Optimierung der Ressourcennutzung eng mit dem Grad der Digitalisierung zusammenhängt. Dabei reicht es nicht aus, Daten zu erfassen und zu vernetzen. Diese Daten müssen zusammengeführt und integriert werden, um für weitergehende Analysen verfügbar gemacht zu werden. Mess- und Managementinstrumente für unternehmensbezogene Nachhaltigkeitsdaten (*Sustainability Ledger*) ergänzen dabei das klassische finanz- und produktionsbezogene Controlling und tragen so zu einer ganzheitlicheren Unternehmensführung bei.<sup>113</sup>

## Materialflussanalysen

Die Materialflussanalyse (MFA) oder Stoffstromanalyse ist ein essenzielles Instrument zur Quantifizierung von Materialflüssen und -beständen in komplexen Systemen. Dadurch lassen sich Quellen, Pfade sowie Zwischen- und Endsenken von Materialien miteinander verknüpfen.<sup>114</sup> Als

<sup>112</sup> (Ramesohl et al., 2021, 22)

<sup>113</sup> (Ramesohl et al., 2021, 23)

<sup>114</sup> (Heinrich & Lang, 2019, 30)

Zwischensenken werden Ver- und Gebrauchsorte bezeichnet. Orte, an denen Materialien endgültig verbleiben, werden als Endsenken bezeichnet.<sup>115</sup> Die MFA ist dabei nicht nur auf die Analyse von Stoffen, Waren oder Produkten beschränkt, sondern spielt auch bei der Ermittlung von Ressourcennutzung, Produktionsschritten, Materialverlusten und Abfallentstehung eine bedeutende Rolle. Mit der MFA lassen sich Materialien und Stoffe verfolgen und Aufkommen in individuellen Prozessen oder Produktionsschritten messen. Dadurch können Stoffströme kartiert und Materialkataster erstellt werden, was sowohl von wissenschaftlichen Institutionen als auch von Behörden für Monitoring-Zwecke und zur Erstellung eines volkswirtschaftlichen Stoffinventars genutzt werden kann.<sup>116</sup> Durch die Identifikation von Reststoffen kann die MFA die Wiederverwendung und -verwertung von Materialien fördern. Durch die Verknüpfung von nationalen oder lokalen Katastern oder Registern lassen sich regionale Wertschöpfungsketten etablieren und Stoffströme managen.<sup>117</sup> Materialflussinformationen sind auf verschiedenen Ebenen relevant – von der Produkt- oder Materialebene über lokale und regionale Ebenen bis zu globalen Analysen. Im Rahmen von Materialpässen könnte unter anderem ein automatisches Flussdiagramm erstellt werden, das sich je nach den bereitgestellten Informationen ändert. Ein kontinuierliches Monitoring ermöglicht die Schaffung einer Daten- und Wissensbasis, die als Grundlage für Informations- und Entscheidungsprozesse dient und auf das politische Handeln ausgerichtet werden kann. Solches Monitoring kann den Verlauf von Biomasse-Stoffströmen oder wirtschaftliche Kennzahlen der Bioökonomie erfassen und so das Stoffstrommanagement verbessern und die Bereitstellung von Ressourcen zum richtigen Zeitpunkt ermöglichen.<sup>118</sup>

## Abfallwirtschaft und Recycling

Insbesondere im Bereich der Abfallwirtschaft ist es von zentraler Bedeutung, dass sämtliche Abfälle vollumfänglich erfasst und einer sachgerechten Verwertung zugeführt werden. Durch den Einsatz digitaler Technologien zur Steuerung und Optimierung von verfahrenstechnischen Prozessen eröffnen sich zusätzliche Möglichkeiten für eine transparente und zuverlässige Dokumentation der Prozessparameter. Im weiteren Schritt der Vermarktung der wiedergewonnenen Materialien als qualitätsgeprüftes Rezyklat leisten die Informationen über die vorgelagerten Recyclingprozesse einen wertvollen Beitrag zur Dokumentation und Zertifizierung. Auf diese Weise trägt die Digitalisierung dazu bei, das Vertrauen in die Qualität von Sekundärrohstoffen zu stärken und Akzeptanz und Nachfrage zu erhöhen.<sup>119</sup>

---

<sup>115</sup> (Feess & Krieger, 2018)

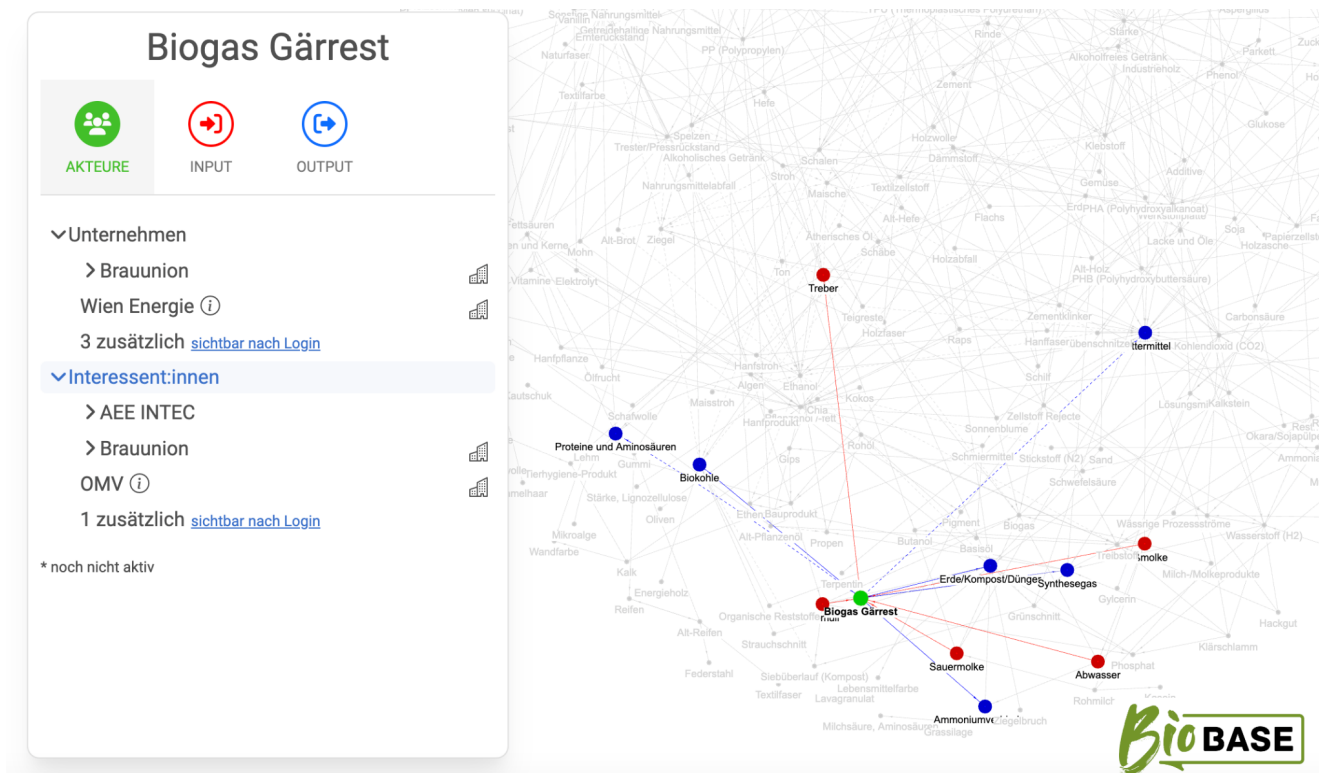
<sup>116</sup> (Götz et al., 2021, 32)

<sup>117</sup> (Heinrich & Lang, 2019, 30)

<sup>118</sup> (Graf, 2021, 21)

<sup>119</sup> (Ramesohl et al., 2021, 14)

## Optimierung von Verwertungspfaden und Ressourceneffizienz



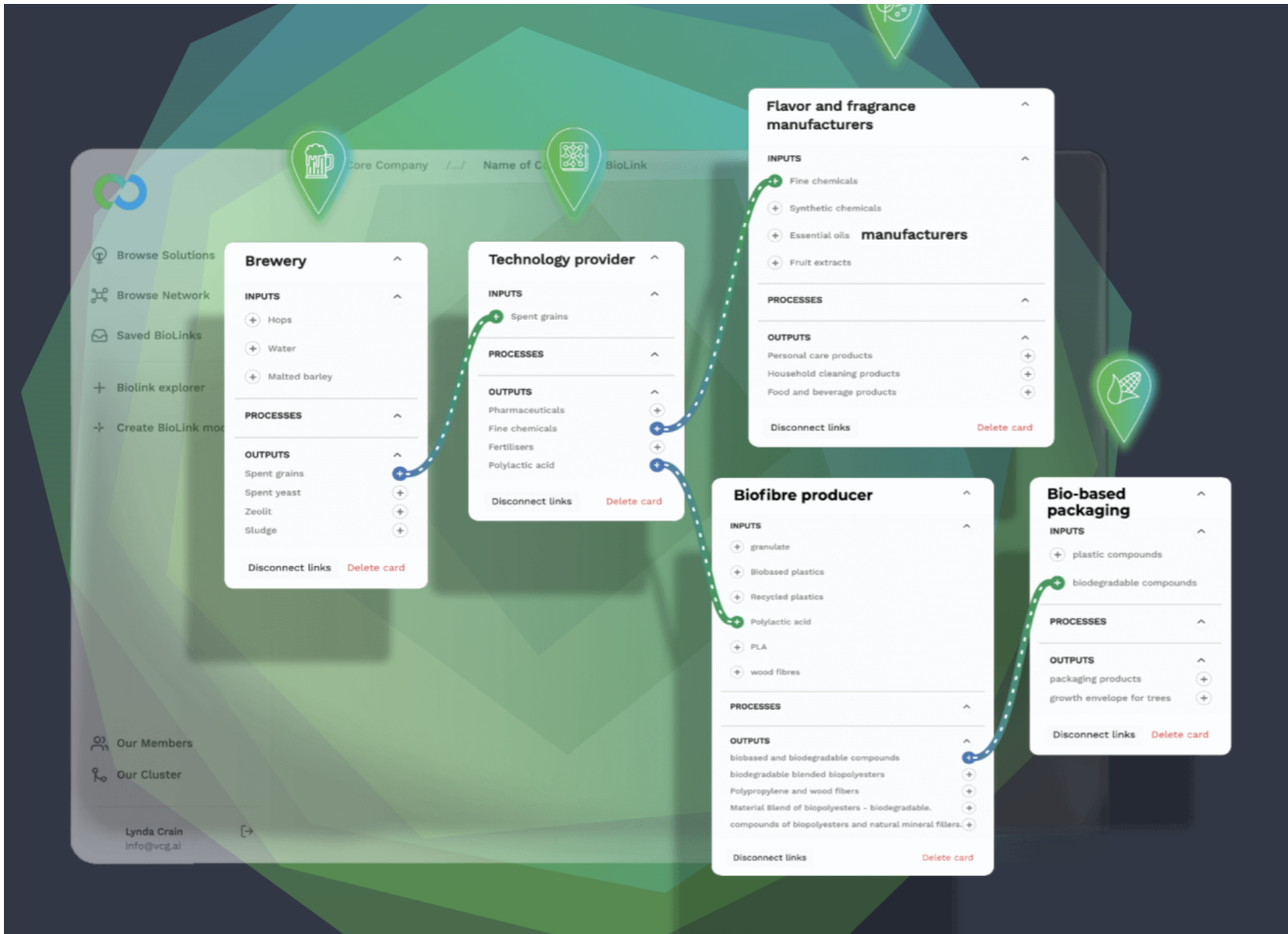
27. Abb.: Ansicht des BioBASE Kompass (Quelle: BioBASE, 2023)

Eine zentrale Frage in der nachhaltigen Bioökonomie ist die Entscheidung, welcher Rohstoff zur Produktion welcher Produkte verwendet werden soll. Plattformen wie der BioBASE Kompass zeigen etwa, aus welchen Ausgangsmaterialien welche Stoffe entstehen können und welche Akteur:innen diese bereitstellen oder benötigen (siehe Abbildung 27).<sup>120</sup> Durch den Einsatz von Algorithmen kann die bestmögliche Kombination aus Rohstoff, Verfahren und Produkt ermittelt werden. Ziel ist es, sowohl die Wertschöpfung als auch die Ressourceneffizienz zu maximieren. Für fortgeschrittene Modelle müssen für diesen Zweck sämtliche relevante Daten für jeden möglichen Verwertungspfad, jeden Verwertungsschritt und jeden Rohstoff zur Verfügung stehen. Dies umfasst Angaben zu Energieverbrauch, Effizienz, Nebenprodukten und deren Verwertung, den ökologischen Fußabdruck und viele weitere Aspekte.

Jedoch beschränkt sich die Komplexität dieser Entscheidungsfindung nicht nur auf die reinen Daten und Fakten. Es gibt auch zusätzliche Aspekte, die berücksichtigt werden müssen und die teilweise in Konflikt miteinander stehen können. Außerdem zeigen sich speziell in Bezug auf soziokulturelle Kontexte, aber auch beim ganzheitlichen Monitoring von Ökosystemen Grenzen von Messbarkeit. Letztlich bedarf es einer individuellen Abwägung und Entscheidung, um eine nachhaltige und gleichzeitig wirtschaftliche Bioökonomie zu ermöglichen.<sup>121</sup>

<sup>120</sup> (BioBASE, 2023)

<sup>121</sup> (Rübberdt, 2020, 159)



28. Abb.: Konzept des Valuechain Generators von vcg.ai (Quelle: vcg.ai, 2023)

Der Value Chain Generator (vcg.ai) zeigt zusätzlich die dazwischen notwendigen industriellen Prozesse und potenziellen Wertschöpfungspfade auf.<sup>122</sup> Anbieter:innen, Abnehmer:innen und relevante technische Anbieter:innen werden vernetzt. Eine exemplarische Verknüpfung von Akteur:innen ist in Abbildung 28 dargestellt. VCG.AI nutzt hierfür das Biolink-Modell. Dieses Datenmodell wurde für die Untersuchung biologischer Systeme (Gene, Krankheiten, Phänotypen, Pfade, Individuen, Substanzen usw.) und ihre Verbindungen entwickelt, um Typen und relationale Strukturen in Wissensgraphen (Knowledge Graphs) zu standardisieren und darzustellen.<sup>123</sup> Dafür werden formale Aussagen über Ressourcen semantisch vernetzt und somit ein Wissensnetz generiert.<sup>124</sup> Das Modell basiert auf der Integration und Verknüpfung von Daten aus unterschiedlichen Quellen, etwa der In- und Outputs der Unternehmen in der Region. Technologien wie maschinelles Lernen, basierend auf Wissensgraphen, unterstützen den Prozess der Datenintegration und -analyse. Sie erlauben es, komplexe Zusammenhänge zu erfassen und vorherzusagen, was die Prozesseffizienz und die Entscheidungsqualität verbessert.<sup>125</sup>

<sup>122</sup> (vcg.ai, 2023)

<sup>123</sup> (Moxon, 2022)

<sup>124</sup> (Körner, 2021)

<sup>125</sup> (The Biomedical Data Translator Consortium, 2022)

## Digitale Produkt- und Materialpässe

Eine weitere mögliche Anwendung von digitalen Zwillingen ist deren Nutzung als digitaler Materialpass. Zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und der Ressourceneffizienz ist ein Verständnis der materiellen Zusammensetzung und der Materialströme erforderlich. Während einige dieser Informationen bereits existieren, sind sie oft über verschiedene Datenquellen verteilt oder aufgrund von Schutzmaßnahmen für geistiges Eigentum der Hersteller nicht zugänglich. Hier liegt die Bedeutung von strukturiert und standardisiert zusammengeführten Informationen über Materialien – ob räumlich, zeitlich oder stofflich – welche den Schlüssel zur Transformation von einer linearen hin zu einer Kreislaufwirtschaft darstellen. Ein mögliches Instrument zur Bereitstellung dieser Informationen ist der Materialpass (MP), der auch als Produktpass oder Kreislaufpass bezeichnet wird. Dieser dient als Plattform und zentraler Ort für die Speicherung, Verknüpfung und Bereitstellung relevanter Materialinformationen (Repository) für die Akteur:innen entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Es gibt bereits eine Reihe von Initiativen, darunter Forschungsprojekte und Datenbanken, die darauf abzielen, die Nutzung von materialbezogenen Datenquellen zu erleichtern. Die meisten dieser Bemühungen konzentrieren sich derzeit auf spezifische Anwendungsbereiche. Einige Datenquellen liefern etwa primär gesundheits- oder umweltbezogene Informationen.<sup>126</sup> Ein in der Praxis breit anwendbarer digitaler Produkt- oder Materialpass ist bislang nicht etabliert. Erste Teilansätze bestehen, allerdings sind diese oftmals nicht durch verpflichtende Standarddatensätze oder Datenbanken institutionalisiert.<sup>127</sup>

Mit Blick auf Materialströme hilft der Materialpass beim Management von Angebot und Nachfrage und ermöglicht die Bewertung und Prognose potenzieller Sekundärrohstoffe. Es werden so Wege für systematische Rückgewinnungs- und Verwertungsstrategien geöffnet, die identifiziert und weiterentwickelt werden können. Des Weiteren unterstützt er die strategische Positionierung von Anlagen, wie Recycling-Einrichtungen und Materialhändlern, und verbessert das Supply-Chain-Management. Die Verknüpfung und Bereitstellung relevanter Daten für Bewertungen auf verschiedenen Hierarchieebenen führt zu einer Reduzierung der Kosten durch ein verbessertes Ressourcenmanagement. Dies trägt zur Entwicklung eines nachhaltigen Lebenszyklusmanagements von Materialien bei und unterstützt die Eliminierung von Abfällen und die Reduzierung des Einsatzes neuer Ressourcen. Als wichtiges Instrument der Kreislaufwirtschaft, trägt der Materialpass maßgeblich dazu bei, die Qualität, den Wert und die Sicherheit der Materialversorgung zu verbessern.<sup>128</sup> Materialpässe können auch dafür genutzt werden, um Berichtspflichten und Richtlinien, wie die REACH-Verordnung für Chemikalien, zu erfüllen.<sup>129</sup>

---

<sup>126</sup> (Heinrich & Lang, 2019, 2)

<sup>127</sup> (Götz et al., 2021, 7)

<sup>128</sup> (Heinrich & Lang, 2019, 5)

<sup>129</sup> (Götz et al., 2021, 8)

Materialpässe bilden eine wichtige Brücke in der Rückverfolgbarkeit von Materialien und Produkten im gesamten Lebenszyklus und darüber hinaus. Dafür ist eine eindeutige Identifikation der Produkte und eine direkte Verknüpfung der materialbezogenen Informationen mit dem zugehörigen physischen Objekt notwendig. Diese eindeutigen Identifikatoren sind zudem von hoher Relevanz für Logistik- und Transportanforderungen. Eine weitere elementare Komponente des Materialpasses ist die eindeutige und nachvollziehbare Herkunft des Datensatzes. Teil dieser Informationsanforderungen sind die sogenannten Metadaten, Informationen über andere Daten wie Ersteller oder Erstellungsjahr.<sup>130</sup>

Zu den prinzipiellen Datenanforderungen gehört, dass die Informationen in Echtzeit vorliegen müssen, um eine optimale Organisation der Kreislaufwirtschaft zu gewährleisten. Die erforderliche Aktualität und chargenspezifische Charakterisierung gilt insbesondere für biogene Stoffe, die oftmals über begrenzte Haltbarkeit verfügen, sowie in Zusammensetzung und Verfügbarkeit schwanken.<sup>131</sup> Außerdem müssen die Daten in einem definierten Detailgrad vorliegen, überprüfbar sein und die Langzeitverfügbarkeit muss gewährleistet sein. Bereits bestehende Informationspflichten verschiedener Akteur:innen sollten aufgegriffen und daraus vorhandene Daten zusammengeführt werden. So soll zunächst eine Vereinfachung bei der Erfüllung bestehender Vorgaben erreicht und Anreize zur Nutzung des Passsystems gesetzt werden.<sup>132</sup>

Ein digitaler Pass ermöglicht eine zentrale Zusammenführung aller Daten als *“single source of truth”* (SPOT). Das Produktpasssystem steht damit im Zentrum des europäischen Ansatzes zur Erfassung und Auswertung umweltrelevanter Daten. Dadurch soll die Vielzahl unterschiedlicher bestehender, themenspezifisch isolierter Systeme und Datenbanken zur Erfassung berichtspflichtiger Daten ersetzt werden. So könnte der Aufwand für die Datenübermittlung und das Konformitäts-Management stark reduziert werden.<sup>133</sup> Aspekte der Datenarchitektur, der eindeutigen Identifikation und der Informationsübermittlung müssen bei der Konzipierung eines Passsystems berücksichtigt werden.<sup>134</sup> Klare Dateneigentumsregelungen geben den Eigentümern die Kontrolle über potenziell sensible Informationen.<sup>135</sup> Außerdem sollte das Materialpasssystem die Möglichkeit für differenzierte Lese- und Schreibrechte aufweisen.<sup>136</sup>

---

<sup>130</sup> (Heinrich & Lang, 2019, 16)

<sup>131</sup> (Heinrich & Lang, 2019, 23)

<sup>132</sup> (Götz et al., 2021, 27)

<sup>133</sup> (Götz et al., 2021, 36)

<sup>134</sup> (Götz et al., 2021, 32)

<sup>135</sup> (Heinrich & Lang, 2019, 47)

<sup>136</sup> (Götz et al., 2021, 32)



## Digital Product Passport (DPP)

Das Konzept eines digitalen Passes für Produkte und Materialien wurde auch von der Europäischen Union aufgegriffen. Am 30. März 2022 hat die Europäische Kommission im Rahmen der Sustainable Product Initiative (SPI) einen Entwurf für eine neue Ökodesign-Verordnung für nachhaltige Produkte vorgestellt. Teil dieser Verordnung ist die Einführung eines digitalen Produktpasses (DPP), der dabei helfen soll, Stoffkreisläufe zu schließen und produktspezifische Informationen entlang der Wertschöpfungskette bereitzustellen. Damit soll ein rechtlicher Rahmen für den europäischen Binnenmarkt geschaffen werden, um ein verpflichtendes Informationssystem für die Kreislaufwirtschaft zu etablieren.<sup>137</sup> Grundsätzlich soll der Produktpass auf sämtliche Produkte und Dienstleistungen anwendbar sein, der Schwerpunkt soll zunächst auf besonders ressourcen- und energieintensiven Gütern liegen.<sup>138</sup> Auch auf nationaler Ebene findet sich der digitale Produktpass in der Umweltpolitischen Digitalagenda als zentrale Maßnahme wieder und wird wie folgt beschrieben:

*„Der digitale Produktpass (DPP) ist ein Datensatz, der die Komponenten, Materialien und chemischen Substanzen oder auch Informationen zu Reparierbarkeit, Ersatzteilen oder fachgerechter Entsorgung für ein Produkt zusammenfasst. Die Daten stammen aus allen Phasen des Produktlebenszyklus und können in all diesen Phasen für verschiedene Zwecke genutzt werden (Design, Herstellung, Nutzung, Entsorgung). Die Strukturierung umweltrelevanter Daten in einem standardisierten, vergleichbaren Format ermöglicht allen Akteur:innen in der Wertschöpfungs- und Lieferkette, gemeinsam auf eine Kreislaufwirtschaft hinzuarbeiten.“*<sup>139</sup>

Der digitale Produktpass (DPP) wird als strukturierte Datensammlung definiert, die spezifische Produktinformationen über den gesamten Produktlebenszyklus enthält. Seine eindeutige Kennzeichnung ermöglicht den elektronischen Zugriff auf vorab festgelegte und eigentumsrechtlich geregelte Daten. Damit fungiert der DPP als zentrales Informationssystem für die Kreislaufwirtschaft.<sup>140</sup> Die European Sustainable Product Regulation (ESPR) fordert dabei eine Fülle an Informationen. Diese reichen von Aspekten der Herkunft, Zusammensetzung, Langlebigkeit, Zuverlässigkeit und Wiederverwendbarkeit über Reparierbarkeit, Wartungsfähigkeit bis hin zur Energieeffizienz und Ressourcenverbrauch.<sup>141</sup> Ebenso wichtig sind Angaben zu umweltgefährdenden Stoffen, dem Anteil recycelter Materialien, Möglichkeiten zur Wiederaufbereitung und zum Recycling

---

<sup>137</sup> (Europäische Kommission, 2022)

<sup>138</sup> (Götz et al., 2021, 7)

<sup>139</sup> (BMUV, 2023)

<sup>140</sup> (Bernier, 2023)

<sup>141</sup> (Götz et al., 2021, 7)

sowie zur Rückgewinnung von Materialien. Des Weiteren werden Angaben zur Umweltbelastung und der erwarteten Abfallproduktion gefordert. Der digitale Produktpass (DPP) soll sich positiv auf die, im Kapitel “Prinzipien der Kreislaufwirtschaft” (Seite 26) beschriebenen, R-Strategien (Wiederverwendung, Wiederverwertung, Reparatur) auswirken, berücksichtigt soziale (Vermeidung von Zwangs- und Kinderarbeit) und ökologische Aspekte (Berechnung des Produkt-CO2 Fußabdrucks) und kann bei Themen wie Tierschutz und Produktverfolgbarkeit Transparenz bieten.<sup>142</sup>

Datenpunkte und Datenstrukturen von Materialpässen sind bislang nicht spezifisch für biogene Stoffe konzipiert und es fehlen Standards und Normen zur Orientierung. Zudem sind die entwickelten digitalen Produkt Pässe (DPPs) meist sektorspezifisch und ein einheitliches, branchen- und unternehmensübergreifendes Produktpass-System ist noch nicht etabliert.<sup>143</sup> Angesichts der Vielfalt der Datenquellen müssen einheitliche Formate und offene Datenstandards festgelegt und angewendet werden. Dies stellt sicher, dass Informationen aus verschiedenen Quellen maschinenlesbar sind und entweder direkt in den Materialpass eingefügt oder digital verknüpft werden können<sup>144</sup>

Die Interoperabilität, auch Leitprinzip der Industrie 4.0, ist ein weiterer Schlüsselaspekt des DPP. Sie muss auf technischer, semantischer und organisatorischer Ebene gewährleistet sein. Dabei spielen Datenaustauschprotokolle und -formate eine entscheidende Rolle. Sie sorgen für eine reibungslose Kommunikation zwischen unterschiedlichen Systemen und Plattformen. In Bezug auf die Datenspeicherung und -verarbeitung sind Aspekte wie Integration, Modifikation und Aktualisierung zu berücksichtigen. Es ist noch unklar, ob es für ein Produkt oder Material mehrere Pässe geben wird.<sup>145</sup>

## Die Verwaltungsschale als Basis für den DPP

Denkbar ist, dass digitale Zwillinge in Form von Verwaltungsschalen aufgrund der technischen Eignung und der durch die fortschreitende Industrie 4.0 unternehmensintern oftmals bereits vorliegenden Daten als Basis für das Passsystem dienen könnten. Nachdem die Verwaltungsschale (VwS) ebenfalls eine digitale Repräsentanz für einzelne Produkte darstellt, müssten lediglich eine Datenschnittstelle zum Produktpass-System gepflegt werden.<sup>146</sup> Die Industrial Digital Twin Association hat in diesem Zuge die Verwaltungsschale zusammen mit anderen Bausteinen der Industrie 4.0 als Basis für das Produktpasssystem der Europäischen Kommission vorgeschlagen (siehe Abbildung 29).

---

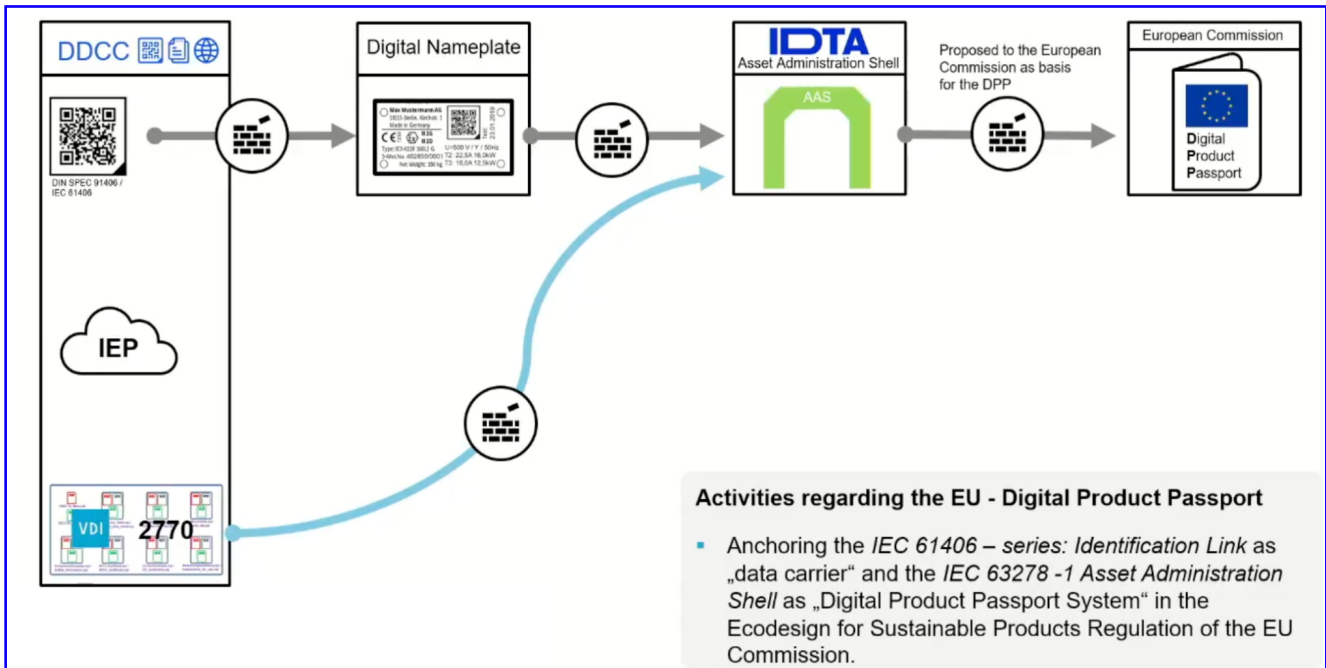
<sup>142</sup> (Bernier, 2023)

<sup>143</sup> (Jansen, 2022)

<sup>144</sup> (Heinrich & Lang, 2019, 46)

<sup>145</sup> (Jansen et al., 2022, 5)

<sup>146</sup> (Kun, 2023)



29. Abb.: Vorschlag den digitalen Produktpass über Verwaltungsschalen abzubilden (Quelle: Kun, 2023)

*“Ein digitaler Produktpass muss auf einer akteursübergreifend standardisierten Dokumentation aufbauen, um die spezifischen Informationen aus möglichst allen Lebensphasen des Produkts zu erfassen, zusammenzuführen und [...] ganzheitlich abzubilden. Idealerweise werden Informationen dabei kontinuierlich aktualisiert, weshalb die digitalen Infrastrukturen von Beginn an in Hinblick auf die Umsetzung im Sinne eines „digitalen Zwillings“ ausgestaltet werden sollten. Damit alle relevanten Akteur:innen von dieser Datenbereitstellung profitieren können, muss die aufzubauende digitale Infrastruktur zudem so gestaltet werden, dass Produktinformationen [...] zielgruppenspezifisch aufbereitet und entsprechend verfügbar gemacht werden.”<sup>147</sup>*

Außerdem würde durch die zentrale Datenaustauschmöglichkeit der Industrie 4.0 auch die Voraussetzung erfüllt, kontinuierliche Aktualisierungen von individuellen, produktspezifischen Daten über den gesamten Lebenszyklus zu gewährleisten. Somit würde die VwS jederzeit bestmöglich dem realen Gegenstand entsprechen.<sup>148</sup> Ein weiterer Vorteil ist, dass Datensätze bereits gruppiert und selektiv nur autorisierten Gruppen zur Verfügung gestellt werden können. Die Verwaltungsschale bietet vielversprechende Anknüpfungspunkte für ein digitales Produktpasssystem, allerdings stellt sich die Grundsatzfrage, inwiefern sich der Ansatz der Industrie 4.0 auf die breite Masse von Produkten und Materialien übertragen lässt.<sup>149</sup>

<sup>147</sup> (Götz et al., 2021, 33)

<sup>148</sup> (Götz et al., 2021, 37)

<sup>149</sup> (Götz et al., 2021, 24)

## Anwendungen für digitale Material- und Produktpässe

### Marktplätze & Börsen

Digitale Materialpässe (DMP) haben das Potenzial, die Funktionalität und Effizienz von Marktplätzen und Materialbörsen, wie [cyrkl.com](https://www.cyrkl.com), durch die Bereitstellung von detaillierten Spezifikationen zu verbessern.<sup>150</sup> Diese Informationen könnten etwa die Analyse von Nährstoffgehalten, Energie und Proteinen umfassen, was hilft, diese den entsprechenden Abnehmern zuzuordnen. Diese Verbesserungen können zu erhöhten Absatzchancen für Reststoffe führen. Durch den Einsatz von DMPs wird nachhaltiges Rohstoffmanagement gefördert, die Planungssicherheit für Produzenten und Verarbeiter erhöht und innovative Wertschöpfungsnetzwerke unterstützt.<sup>151</sup>

Um den Einsatz natürlicher Ressourcen durch recycelte Sekundärmaterialien so umfangreich wie möglich zu ersetzen, ist es notwendig, funktionierende und gut skalierbare Rezyklatmärkte zu etablieren. Hierbei ist es entscheidend, dass Sekundärmaterialien in ausreichender Menge, guter Qualität und mit einer vorhersehbaren Verfügbarkeit bereitstehen und bedarfsgerecht bereitgestellt werden können. Digitale Handelsplattformen eröffnen dabei innovative Vertriebswege für qualitätsgesicherte und zertifizierte Sekundärmaterialien (Rezyklate). Diese Plattformen gewinnen an Relevanz, da sie dazu beitragen, bestehende Barrieren im Markt zu überwinden. Sie aggregieren die aktuell häufig stark zersplitterte und regional bestimmte Verfügbarkeit von Rezyklaten und schaffen so eine Verbindung zwischen der Recyclingbranche und den Herstellern. Insofern stellen sie eine wesentliche Grundlage für das Wachstum dieser Märkte dar. Ihre Nutzung ermöglicht es, die Vorteile der Digitalisierung zu nutzen, um die Effizienz und Effektivität des Recyclingprozesses zu verbessern und eine nachhaltige und ressourcenschonende Wirtschaft zu fördern.<sup>152</sup>

### Assessments, Zertifizierungen, rechtliche Auflagen

Digitale Materialpässe (DMP) können auch als umfassendes, digitales Informationsdokument dienen, das alle wesentlichen Informationen zu einem Produkt, dessen Materialien und Substanzen, entlang des gesamten Lebenszyklus enthält. Erste Anwendung findet der DMP in der Durchführung von Assessments, insbesondere im Bereich Life Cycle Assessments und Nature Impact Assessments. Mithilfe der im DMP enthaltenen Informationen können Unternehmen ihre Produkte hinsichtlich ihrer ökologischen Auswirkungen und Energiebilanz analysieren. Zudem ermöglicht der DMP eine fundierte Nature Footprint-Berechnung und die Umsetzung von Science-Based Targets for Nature (SBTN), indem er relevante Daten zur Messung und Adressierung von Umweltauswirkungen liefert.<sup>153</sup>

---

<sup>150</sup> (Cyrkl, 2023)

<sup>151</sup> (Hrouda, 2021)

<sup>152</sup> (Ramesohl et al., 2021, 15)

<sup>153</sup> (Science Based Targets, 2023)

Eine weitere Möglichkeit ist die Berechnung des Product Environmental Footprint (PEF). Dieses Modell wird seit 2013 von der Europäischen Kommission entwickelt und bietet eine multi-kriterielle Methode zur standardisierten Bewertung ökologischer Performanz von Dienstleistungen oder Produkten im gesamten Lebenszyklus. Im PEF werden 16 Kategorien potenzieller Umweltauswirkungen (bspw. Landnutzung, Klimawandel, Eutrophierung) von Material- bzw. Energieflüssen und sich daraus ergebenden Emissions- und Abfallströmen erfasst. Bislang gestaltete sich die Bereitstellung und Nachvollziehbarkeit fluktuierender Vorketten als schwierig. Umweltverbände fordern außerdem die Berücksichtigung weiterer Umweltauswirkungen wie Verlust an Biodiversität, Tierwohl und Lärm. Nachdem politische und methodische Herausforderungen gelöst sind, könnte der digitale Produktpass die erforderlichen Informationen zur einheitlichen Berechnung und Quantifizierung des ökologischen Fußabdrucks der gesamten Lieferkette bereitstellen und informierte Produkt- und Materialentscheidungen ermöglichen.<sup>154</sup>

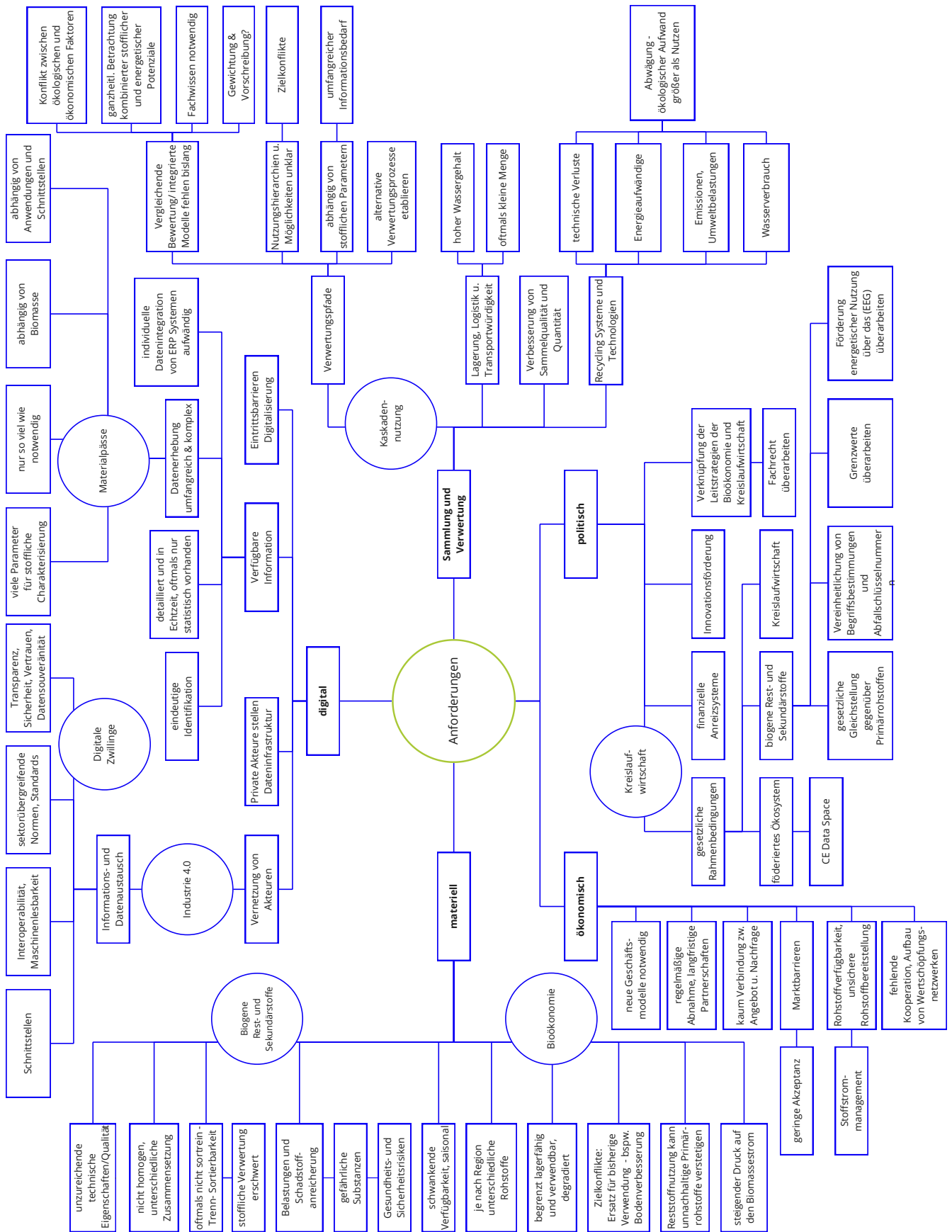
Außerdem unterstützt der DMP die Erfüllung von Zertifizierungen und Zulassungen. Die im DMP erfassten und ständig aktualisierten Informationen liefern ein hohes Maß an Transparenz und Rückverfolgbarkeit. Dies erleichtert die Verifizierung der Einhaltung von Standards und Auflagen, was die Erlangung relevanter Zertifikate und Gütesiegel unterstützt. Drittens erfüllt der DMP eine entscheidende Funktion bei der Erfüllung rechtlicher Auflagen, besonders im Bereich Reporting und Dokumentationspflichten. Beispielsweise verlangt die EU-Gesetzgebung ab 2024 ein Nachhaltigkeitsreporting von Unternehmen, welches durch die umfangreichen und aktuellen Informationen des DMP unterstützt wird.<sup>155</sup> Darüber hinaus ermöglicht der DMP die Erstellung von Datenblättern und Deklarationen sowie die Gewährleistung von Gesundheits- und Sicherheitsauflagen durch die lückenlose Dokumentation von Materialien und Substanzen.

---

<sup>154</sup> (Götz et al., 2021, 16)

<sup>155</sup> (Rat der Europäischen Union, 2022)

# Anforderungen und Handlungsansätze



30. Abb.: Anforderungen (eigene Darstellung)

Der Wandel zu einer ressourceneffizienten zirkulären Bioökonomie stellt eine systemische Transformationsaufgabe dar und erfordert das Zusammenwirken aller Akteur:innen aus Wirtschaft, Politik, Wissenschaft und Zivilgesellschaft. In Abbildung 30 werden zusammenfassend und als Ergebnis der Literaturrecherche die Herausforderungen für diesen Veränderungsprozess, insbesondere für die Erfassung von biogenen Rest- und Sekundärstoffen und deren Überführung in digitale Zwillinge, dargestellt. Diese werden im folgenden Kapitel ausgeführt und durch Handlungsempfehlungen ergänzt. Darauf basierend wird anschließend das BioVal Konzept entwickelt.

## Bioökonomie, biogene Materialien und Reststoffe

Der steigende Druck auf die Biomasseproduktion und die Notwendigkeiten zur Schaffung einer nachhaltigen Ressourcenbasis erfordern die Maximierung der Ressourceneffizienz und die intelligente Nutzung biogener Rohstoffe und Nebenerzeugnisse.<sup>156</sup> Wie im Kapitel *Bioökonomie* beschrieben, müssen Nebenprodukte zur Substitution von Primärrohstoffen als elementarer Teil der Kreislaufwirtschaft verstanden und genutzt werden. Allerdings verhindert der Mangel an Informationen über die Zusammensetzung und fehlendes Wissen im Umgang mit biogenen Nebenprodukten und Reststoffen die Zuordnung zu differenzierten Verwertungsverfahren. Wiederverwendungs- und Umwandlungspotenzial sind wenig bekannt.<sup>157</sup> Insbesondere für die stoffliche Verwertung ist unklar, welche Mengen sich nach Region differenziert mobilisieren lassen.<sup>158</sup> Dabei ist zu beachten, dass eine vollständige Mobilisierung und Verwertung weder ökologisch noch ökonomisch sinnvoll oder technisch möglich ist. Reststoffe werden etwa auf landwirtschaftlichen Flächen oder in Wäldern belassen und tragen dort zur Bodenverbesserung und zum Erhalt der Ökosysteme bei.<sup>159</sup> So ergeben sich wie in der gesamten Bioökonomie Zielkonflikte zum Umgang mit begrenzten Flächen und Rohstoffen. Außerdem ist bei der Reststoffnutzung zu berücksichtigen, dass diese teilweise den Anbau nicht nachhaltiger Primärrohstoffe verstetigen kann und die Verfügbarkeit stets an die Primärrohstoffproduktion gekoppelt ist. Zusätzlich kann die Bioökonomie je nach Region sehr unterschiedlich ausgeprägt sein und jeweils andere Rohstoffe hervorbringen. Biomasse als Naturprodukt und besonders Reststoffe sind nicht homogen, sondern charakterisieren sich durch unterschiedliche Zusammensetzungen und unterliegen grundlegend der Saisonalität und schwankenden Verfügbarkeiten.<sup>160</sup> Speziell Reststoffe und Nebenprodukte fallen oftmals lediglich in kleineren Mengen an und machen eine Beschaffung in industriell relevanten Mengen schwierig. Hinzu kommt, dass diese nur begrenzt lagerfähig und verwendbar sind und über die Zeit degradieren. Eine hochwertige Nutzung ist nur mit wenig zersetzter Biomasse mit vertretbarem Aufwand möglich, was

---

<sup>156</sup> (BMBF, 2020, 16)

<sup>157</sup> (Deutsche Gesellschaft für Abfallwirtschaft e.V., 2021, 4)

<sup>158</sup> (Reich, 2021)

<sup>159</sup> (Deutsche Gesellschaft für Abfallwirtschaft e.V., 2021, 4)

<sup>160</sup> (Otto A. Müller Recycling GmbH, 2021)

eine schnelle Vermittlung an einen Abnehmer erfordert.<sup>161</sup> Reststoffe sind oftmals nicht sortenrein, die Trenn- und Sortierbarkeit oftmals nicht gewährleistet. Zudem kann die Anreicherung und Belastungen mit Schadstoffen und gefährlichen Substanzen durch das Zirkulieren in Kaskaden zu Gesundheits- und Sicherheitsrisiken führen.<sup>162</sup> Außerdem verändern Fremdstoffe die technischen Eigenschaften und Qualitäten und erschweren die stoffliche Nutzung. Aktuell werden daher viele Reststoffe auf Deponien entsorgt oder verbrannt.<sup>163</sup>

## Kreislaufwirtschaft und Kaskadennutzung

Auch wirtschaftlich ergeben sich einige Barrieren in Bezug auf die Kreislaufwirtschaft und insbesondere den Handel mit biogenen Rest- und Sekundärstoffen. Dazu gehören die stark schwankenden Preise, die geringe Akzeptanz von Sekundärmaterial, die erschwerte Zusammenführung von Angebot und Nachfrage sowie die rechtlichen Hürden.<sup>164</sup> Die Kreislaufwirtschaft setzt grundlegend neue Denkweisen und die Entwicklung neuer Geschäftsmodelle voraus. Unternehmen müssen eine Kultur der Kooperation etablieren und neuartige Wertschöpfungsnetzwerke aufbauen.<sup>165</sup> Der Aufbau neuartiger Kreisläufe der Erzeugung, Verarbeitung und Verwertung biogener Ressourcen bringt diverse Herausforderungen mit sich. Durch die Saisonalität und schwankende Verfügbarkeit ergeben sich Herausforderungen bezogen auf die Rohstoffbereitstellung. Dies erschwert regelmäßige Abnahmen und kontinuierliche Produktion im klassischen industriellen Verständnis. Auch der Aufbau dezentraler Bioökonomiecluster, um regionale Grundstoffe herzustellen und Transportwege kurz zu halten, erfordert eine Informationsgrundlage zu den verfügbaren Biomassearten und Mengen, um die Anlagen richtig zu konzipieren und auslasten zu können. Außerdem ist eine Verbesserung von Sammelqualität und Quantität notwendig, denn Biomasse fällt meist dezentral und teilweise in kleinen Mengen an. Der oftmals hohe Wassergehalt und die geringe Dichte an stofflich nutzbaren Eigenschaften stellen Fragen der Transportwürdigkeit, Logistik und Lagerung. Gängige Recyclingkonzepte und Technologien müssen überarbeitet und angepasst werden, wandelt sich doch die Aufgabe von der sicheren und kostengünstigen Abfallentsorgung zur Aufbereitung und Bereitstellung von Rohstoffen.<sup>166</sup> Die Recyclingprozesse erfordern genaue fallweise Abwägungen, denn durch technische Verluste, Energieaufwände, Wasserverbrauch sowie Emissionen und Umweltbelastungen ist der ökologische Aufwand oftmals größer als Nutzen.<sup>167</sup> Wird die Kreislauffähigkeit bereits bei der Gestaltung von Produkten berücksichtigt, so kann dies wesentlich zur Stärkung der Wiederaufbereitung und Kaskadennutzung beitragen.<sup>168</sup>

---

<sup>161</sup> (Schüch & Hennig, 2020, 136)

<sup>162</sup> (Fehrenbach et al., 2017, 115)

<sup>163</sup> (Hrouda, 2021)

<sup>164</sup> (Fehrenbach et al., 2017, 52)

<sup>165</sup> (BMBF, 2020, 16)

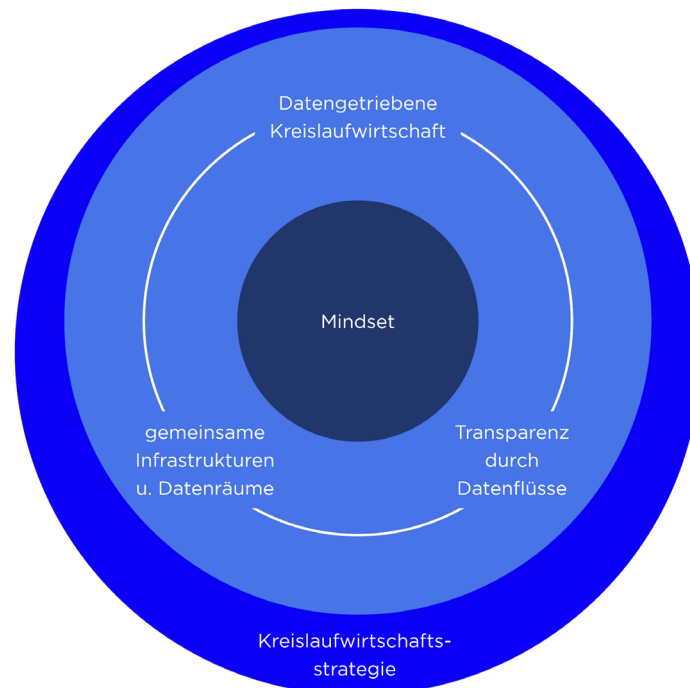
<sup>166</sup> (Schüch & Hennig, 2020, 137)

<sup>167</sup> (Ramesohl et al., 2021, 10)

<sup>168</sup> (Fehrenbach et al., 2017, 59)



## Industrie 4.0, digitale Zwillinge, Materialpässe



31. Abb.: Voraussetzungen für eine digital-ökologische Transformation (adaptiert von Ramesohl et al., 2021, 21)

Die grundlegenden Voraussetzungen für eine erfolgreiche digital-ökologische Industrietransformation sind in Abbildung 31 dargestellt. Für eine datengetriebene Kreislaufwirtschaft sind gemeinsame digitale Infrastrukturen und Datenräume sowie Datenflüsse entlang von Stoffströmen nötig. Dafür braucht es ein neues Verständnis von zirkulärem Wirtschaften und einen gesetzlichen Rahmen in Form einer nationalen bzw. europäischen Kreislaufwirtschaftsstrategie.<sup>169</sup>

Digitale Materialpässe in Form digitaler Zwillinge, Industrie 4.0, künstliche Intelligenz und Automatisierung sollen als konvergierende Technologien für die Bioökonomie und die Kreislaufwirtschaft genutzt werden. Die neuen Erfordernisse von Wirtschaft und Kooperation bedürfen allerdings auch neue Konzepte im Umgang mit digitalen Technologien. Hierfür muss die Kreislaufwirtschaft auch als Daten-Ökonomie verstanden werden, denn entlang zu den vorhanden und auch potenziellen Stoffströmen müssen Daten und Information ausgetauscht werden. Dafür braucht es einen Wandel hin zu einem Selbstverständnis des proaktiven Teilens von Daten im Rahmen von regulatorischen Leitplanken sicherer, förderierter Ökosysteme.<sup>170</sup> Die Vernetzung von Akteur:innen setzt interorganisatorischen Informations- und Datenaustausch voraus. Dafür müssen die Voraussetzungen mit sektorübergreifenden Normen und Standards geschaffen werden, die die Interoperabilität von verschiedenen Systemen und die Maschinenlesbarkeit ermöglichen. Über verschiedene Schnittstellen kann eine effiziente und flexible Skalierung zu verschiedenen Anwendungen und Einsatzbereichen vorgesehen werden.

<sup>169</sup> (Ramesohl et al., 2021, 21)

<sup>170</sup> (Rübberdt, 2020, 159)

Die Informationsgrundlage zu den zirkulierenden Waren und Rohstoffen, besonders bei Biomasse, setzt detaillierte Echtzeitdaten voraus. Die Informationen zu den einzelnen Chargen müssen über Adapter, Schnittstellen zu ERP und MES-Systemen sowie zu verschiedenen Datenbanken, Sensordaten und auch eine manuelle Eingabe bezogen werden. Dies kann sehr aufwendig sein, da die internen IT-Systeme zumeist individualisiert und auf die jeweiligen Unternehmensanforderungen angepasst sind. Damit verbunden sind die Notwendigkeit der eindeutigen Zuordnung zum digitalen Abbild sowie die Identifikation und Rückverfolgbarkeit des physischen Assets. Die notwendigen Parameter für stoffliche Charakterisierung und ganzheitliche Betrachtung sind abhängig von Biomasse, Anwendungen und Schnittstellen.<sup>171</sup> Nach einer Untersuchung des Wuppertal Instituts von 76 Produkt- und Materialpassinitiativen, gibt es bislang keinen spezifischen Materialpass für Biomasse.<sup>172</sup> Einheitliche Datenstrukturen müssen dafür erst geschaffen werden.

## Niedrigschwelligkeit

Des Weiteren gilt es darauf zu achten, die technischen und finanziellen Eintrittsbarrieren möglichst niedrig zu halten, um auch kleinen und mittleren Unternehmen eine Partizipation in der Industrie 4.0 zu ermöglichen. Dazu fordert die European Digital SME Alliance (2020) die Entwicklung und den Einsatz von grünen Technologien, die Förderung der Kreislaufwirtschaft, einen innovationsfördernden Politik- und Regulierungsrahmen und die Schaffung von langfristigen synergetischen Partnerschaften zwischen traditionellen und digital-innovativen Unternehmen.<sup>173</sup>

## Datenschutz & Datensouveränität

Außerdem braucht es sichere und zuverlässige Infrastrukturen für die Datenspeicherung und -verarbeitung. Diese sollten nicht privaten Akteur:innen und Betreibern überlassen werden, sondern für den gesamten Wirtschaftsraum mit fairen Regeln und einer vertrauenswürdigen Data-Governance europäisch organisiert werden. Dabei gilt es, eine Balance zwischen Transparenz und dem Schutz von Geschäftsgeheimnissen zu finden.<sup>174</sup> Durch einen differenzierten Zugang zu Daten entsprechend der jeweiligen Rolle der Akteur:innen können Transparenz, Sicherheit, Vertrauen und die Wahrung der Datensouveränität sichergestellt werden. In Bezug auf den Datenschutz sollte der Grundsatz der Datensparsamkeit gelten. Es sollten nur so viele Daten gesammelt werden, wie für den jeweiligen Zweck unbedingt erforderlich sind.<sup>175</sup>

---

<sup>171</sup> (Ramesohl et al., 2022, 4)

<sup>172</sup> (Jansen et al., 2022)

<sup>173</sup> (Herlo et al., 2022, 24)

<sup>174</sup> (Balta, 2021)

<sup>175</sup> (Ramesohl et al., 2021, 24)

## Integrierte Datensysteme

Die Voraussetzung für eine dezentrale Bioökonomie und die Maximierung von Nachhaltigkeit und Wertschöpfung aus begrenzten Rohstoffmengen sind integrierte Datensysteme. Modelle vom Fußabdruck, Methoden zur Messung der Ressourceneffizienz von Verfahren bis hin zur Ökobilanz oder Lebenszyklusanalysen haben einen enormen Datenbedarf, um aussagekräftige Ergebnisse zu liefern. Die Bioökonomie und die Kreislaufwirtschaft sind auf den bidirektionalen Austausch von Daten zwischen verschiedensten Bereichen angewiesen.<sup>176</sup> Die richtige Wahl des Verwertungspfades erfordert eine genaue stoffliche Charakterisierung auf Basis umfassender Parameter, kombiniert mit Fachwissen. Dabei reichen die Daten von der Erfassung molekularer Parameter beim Screening von Pflanzeninhaltsstoffen, Enzymen oder Mikroben bis zur Erfassung von Stoffströmen und Prozessanalytik bei der biotechnologischen oder chemischen Verarbeitung von biobasierten Rohstoffen. Daten sollen mit einem Produkt über jede einzelne Stufe hinweg verknüpft werden, um ein vollständiges Bild von dessen Einfluss auf Umwelt und Ressourcen zu zeichnen.<sup>177</sup>

Allerdings sind Nutzungshierarchien und Möglichkeiten oftmals unklar, denn vergleichende Bewertungen, Nachhaltigkeitsbilanzierungen in Form etablierter integrierter Modelle fehlen bislang.<sup>178</sup> Nutzungspfade werden zumeist von wirtschaftlichen Faktoren und nicht von Nachhaltigkeitskriterien bestimmt. Es braucht ganzheitliche Betrachtungen kombinierter stofflicher und energetischer Potenziale und die Bewertung von Behandlungsverfahren, Nährstoffgehalten, Klimaeffekt, Energieumwandlung und Schadstofffrachten. Dabei soll eine höhere Gewichtung von Kohlenstoffspeicher- und Bodenverbesserungspotenzialen, Nährstoffressourcen und stoffliche Verwertbarkeit gegenüber energetischen Potenzialen vorgenommen werden.<sup>179</sup>

## Open Data

Um eine Kultur der gemeinsamen Datennutzung zu etablieren, müssen die Grenzen zwischen den Akteur:innen durchlässiger gestaltet werden, Datensilos aufgelöst und Konzepte wie Open Access, Open Knowledge, Open Source und Open Data gefördert werden.<sup>180</sup> Es gibt kaum Zugriffsmöglichkeiten auf verlässliche Datenbanken und lediglich sehr grobe Aufschlüsselungen von Produktkategorien.<sup>181</sup> Offene Daten stellen in diesem Kontext einen besonderen Mehrwert dar, da sie als Informationsressourcen für öffentliche Maßnahmen und deren Implementierung dienen können. Daten, die von Behörden gesammelt werden, beispielsweise zur Luftqualität, zum Klima oder

---

<sup>176</sup> (Rübberdt, 2020, 149)

<sup>177</sup> (Rübberdt, 2020, 152)

<sup>178</sup> (BMBF, 2020, 16)

<sup>179</sup> (Deutsche Gesellschaft für Abfallwirtschaft e.V., 2021)

<sup>180</sup> (Ramesohl et al., 2021, 24)

<sup>181</sup> (Hrouda, 2021)

Satellitenbilder, können im Rahmen von Open-Data-Programmen oder Lizenzen zur Verfügung gestellt werden. Dies ermöglicht die Entwicklung kommerzieller Anwendungen und unterstützt so die Etablierung einer umfassenden Datenverwendungskultur.<sup>182</sup>

## Nachhaltigkeit

Die Digitalisierung setzt große Datenmengen voraus, die adäquate Speicher- und Serverkapazitäten bedürfen sowie einen erheblichen Energiebedarf haben. Es ist daher wichtig, dass die digitale Transformation – das heißt ihre Technologien, Infrastrukturen und Geschäftsmodelle – auf eine ökologisch nachhaltige Weise gestaltet wird.<sup>183</sup> Die Minimierung von Umweltbelastungen durch Digitalisierung ist dabei ein zentraler Aspekt. Beispielsweise muss der Ressourcenverbrauch für Rechenzentren und digitale Endgeräte reduziert werden.<sup>184</sup> Die Sammlung, Vernetzung, Speicherung und Nutzung von Daten sollte stets auf Zweck und Nutzen abgestimmt sein, um unnötige Umweltauswirkungen zu verhindern. Die angemessene zeitliche und räumliche Auflösung der Daten in Bezug auf die dynamischen Anforderungen des jeweiligen Anwendungsfalls sollte als Leitprinzip der Digitalisierung etabliert werden. Des Weiteren müssen die Erhebung, Übermittlung und Verarbeitung von Daten zeitlich und räumlich optimiert organisiert sein, denn Daten sollen nur dort und dann erhoben und verarbeitet werden, wo und wann sie tatsächlich benötigt werden.<sup>185</sup>

## Wissenschaft

Der Wissenschaft kommt die Aufgabe zu, das Stoffstrommanagement durch umfassendes Bioökonomie-Monitoring zu informieren, indem Materialflüsse und Biomasseströme detailliert und in Echtzeit gemessen und bewertet werden.<sup>186</sup> Erhobene Daten und Fachwissen sollen für Unternehmen zugänglich und nutzbar gemacht werden. Potenzial, Wissen und Innovationskraft müssen zusammengebracht werden und qualitative Evaluierung in Form integrierter Modelle entwickelt und durchgeführt werden.<sup>187</sup> Die Ressourceneffizienz von Biomassekaskaden und unterschiedlichen Verwertungspfaden erfordert eine ganzheitliche und differenzierte Bewertung.<sup>188</sup> Dabei müssen verschiedenste Anwendungen und Materialströme branchenübergreifend mit den jeweiligen Anforderungen an die Datengrundlage mitgedacht werden.<sup>189</sup>

---

<sup>182</sup> (Herlo et al., 2022, 35)

<sup>183</sup> (Rübberdt, 2020, 149)

<sup>184</sup> (Ramesohl et al., 2021, 5)

<sup>185</sup> (Ramesohl et al., 2021, 5)

<sup>186</sup> (BMBF, 2020, 16)

<sup>187</sup> (Thrän & Moesenfechtel, 2020)

<sup>188</sup> (Fehrenbach et al., 2017, 112)

<sup>189</sup> (Di Francesco, 2020)

## Politik

Die Politik steht vor einer Reihe von wichtigen Aufgaben im Hinblick auf die Bioökonomie und Kreislaufwirtschaft. Eine der Hauptaufgaben besteht darin, die Leitstrategien dieser beiden Bereiche miteinander zu verknüpfen und in Fachgesetzen zu verankern. Die angestrebten Transformationsziele müssen sich in Gesetzen und Richtlinien widerspiegeln, um das Schließen von Kreisläufen und das Einbringen von Abfall- und Sekundärstoffen zu ermöglichen. Alle Akteur:innen der Circular Economy benötigen verlässliche Orientierung und Anreize für ihr eigenes Handeln.<sup>190</sup> Eine wesentliche Rolle spielen hierbei biogene Rest- und Sekundärstoffe. Diese müssen durch eine gezielte Förderpolitik und gesetzliche Rahmenbedingungen stärker in den Fokus gerückt werden. Beispielsweise könnte das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) überarbeitet werden, um die Konkurrenz zwischen stofflicher und geförderter energetischer Biomassenutzung zu entschärfen.<sup>191</sup> Die Kaskadennutzung schließt die Lücke zwischen der Biomassebereitstellung und Verwendung und der konkreten Umsetzung der Abfallhierarchie und sollte in der Bioökonomie-Strategie als ein Prinzip zur Optimierung der Ressourceneffizienz verankert werden. Auf europäischer Ebene sind einheitliche Standards und Vorgaben für die Sammlung und Sortierung von Abfällen erforderlich.<sup>192</sup> So müssen die Begriffsbestimmungen gemäß Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) und die Abfallschlüsselnummern vereinheitlicht werden.<sup>193</sup> Rohstoffe aus biogenen Abfällen sollen vorrangig gegenüber fossilen Rohstoffen eingesetzt und aufbereitete Stoffe sollten gesetzlich mit Primärrohstoffen gleichgestellt werden. Die derzeitigen Grenzwerte in den unterschiedlichen Regelwerken sind nicht konsistent und benachteiligen Produkte aus Abfällen. Es gilt, bürokratische Hürden abzubauen und gleichzeitig die Einhaltung von Auflagen und Grenzwerten sicherzustellen.<sup>194</sup> Außerdem sollen Marktverzerrungen abgebaut und finanzielle Anreizsysteme zur Förderung einer öko-sozialen Ressourcenwirtschaft etabliert werden. Außerdem sollen Start-ups und Nischenentwicklungen unterstützt werden, die oftmals beim Übergang vom Labor auf den Industriemaßstab scheitern.<sup>195</sup> Um einen integrierten, sektorübergreifenden Rahmen für eine digital-ökologische Wirtschaftspolitik zu schaffen, ist eine nationale digitale Kreislaufwirtschaftsstrategie notwendig.<sup>196</sup> Für die digitale Kreislaufwirtschaft müssen sichere Infrastrukturen für Datenspeicherung und -verarbeitung geschaffen werden. Der Aufbau eines EU Circular Economy Data Space und eines Rahmens für föderierte Ökosysteme ist essenziell, ebenso die Schaffung technischer Voraussetzungen wie gemeinsamer Datenmodelle und Referenzarchitekturen, etwa für den digitalen Produktpass. Dafür sollen bereits bestehende Plattformen integriert werden, um Redundanzen und Inkonsistenzen zu vermeiden.<sup>197</sup>

---

<sup>190</sup> (Ramesohl et al., 2022, 4)

<sup>191</sup> (Fehrenbach et al., 2017, 115)

<sup>192</sup> (Fehrenbach et al., 2017, 59)

<sup>193</sup> (Schüch & Hennig, 2020, 137)

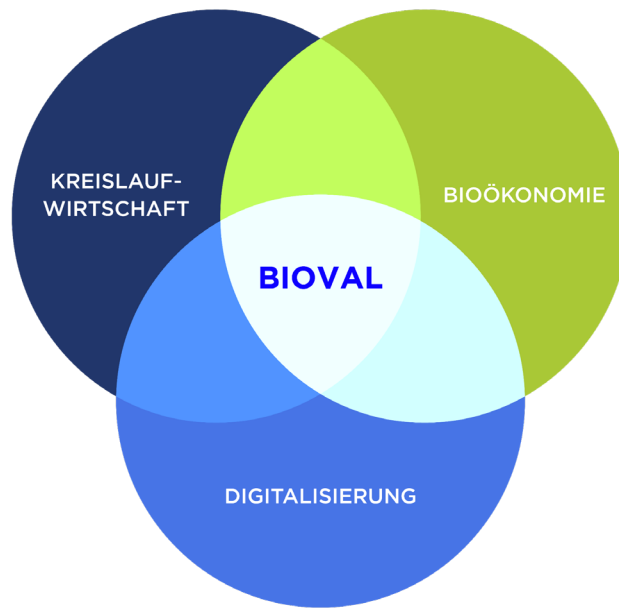
<sup>194</sup> (Deutsche Gesellschaft für Abfallwirtschaft e.V., 2021)

<sup>195</sup> (Fehrenbach et al., 2017, 59)

<sup>196</sup> (Ramesohl et al., 2022, 4)

<sup>197</sup> (Ramesohl et al., 2021, 24)

# BioVal Konzept



32. Abb.: BioVal Konzept (eigene Darstellung)

Basierend auf den Recherchen zu den Themen Bioökonomie, Kreislaufwirtschaft und Digitalisierung und den sich daraus ergebenden Anforderungen wird in diesem Kapitel das Konzept von BioVal entwickelt und vorgestellt.

BioVal sieht sich als zentrale Koordinierungsstelle zwischen allen Akteur:innen, die Biomasse, insbesondere Sekundär- und Reststoffe, bereitstellen oder benötigen. Dazu zählen neben Unternehmen, Behörden und Verwaltungen, verschiedene Anbieter von Anwendungen, die auf Materialpässen und digitalen Zwillingen, sowie Business- und Prozessdaten beruhen, sowie Wissenschaft und Forschung. BioVal leistet mit der Erfassung von Biomassechargen und der Erstellung von digitalen Zwillingen einen Beitrag zur datengetriebenen zirkulären Bioökonomie. Dadurch wird ein unternehmens- und branchenübergreifender Datenaustausch im Sinn der Industrie 4.0 maschinenlesbar und interoperabel ermöglicht. Aspekte der Kreislaufwirtschaft, der Bioökonomie sowie die Möglichkeiten der Digitalisierung und Industrie 4.0. werden vereint (siehe Abbildung 32). Digitale Zwillinge können durch Anbindung an laufende Systeme der Unternehmen (Datenintegration) oder durch einzelne manuelle oder teilautomatisierte Analysen und Eingaben erzeugt werden. Die Zwillinge fungieren dabei als Datencontainer und beschreiben Biomasseströme und Chargen im Industrie 4.0-Standard. Damit fungieren sie gemeinsam mit entsprechenden Software-Adaptoren und Schnittstellen als Middleware zwischen den proprietären Unternehmenssystemen und den verschiedenen Anwendungen. Diese Softwareschicht stellt Standardschnittstellen für verteilte Anwendungen bereit und ermöglicht damit die Integration der Anwendungen und ihrer Daten.<sup>198</sup>

<sup>198</sup> (Lackes & Siepermann, 2018)

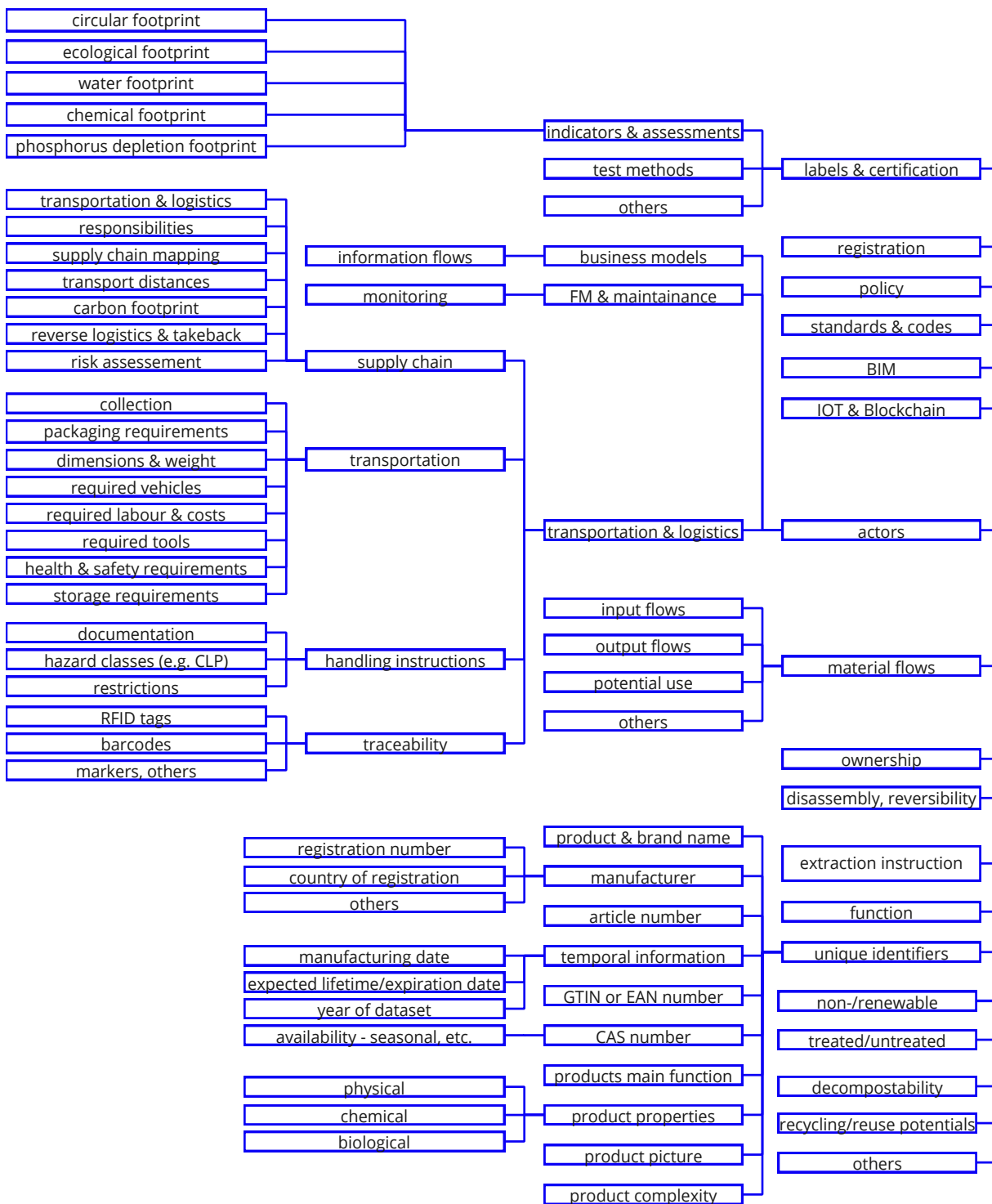
Ziel ist es also, Unternehmen bei der Datenerfassung, Digitalisierung und Standardisierung von biogenen (Rest-)Stoffströmen, und dadurch bei der Vorbereitung auf zirkuläre Industrie 4.0 zu unterstützen und somit die branchenübergreifende Kommunikation und Vernetzung zu fördern. Durch die Bereitstellung von standardisierten detaillierten Echtzeitdaten sowie von Schnittstellen und Adaptionen für verschiedene Anwendungen, können über die digitalen Zwillinge verschiedenste Funktionen, die eine strukturierte und digitalisierte Datenbasis voraussetzen, ermöglicht werden. Dazu zählt die Automatisierung von Stoffströmen, die Erstellung von Zertifikaten und die Durchführung verschiedener Assessments. Ebenso können regulatorische Verpflichtungen wie das Erstellen von Echtzeitmodellen für den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck, Nachhaltigkeitsberichterstattung und Transparenzberichte erfüllt werden. Die Erfassung und Digitalisierung von Informationen zu Materialien schafft auch die Grundlage für den noch in Entwicklung befindlichen europäischen Digital Product Passport, der den Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft als standardisierter digitaler Material- und Produktpass ermöglichen soll.

Auf der Gesamtheit der digitalen Zwillinge basierende Materialflussanalysen zeigen, welche Arten, Qualitäten und Mengen von Biomasse je nach Region mobilisierbar sind und sollen die Rohstoffbereitstellung verbessern. Besonders Biomasse und biogene Reststoffe zeichnen sich durch schwankende Verfügbarkeiten, unterschiedliche Zusammensetzungen und Beschaffenheiten aus und machen so die individuelle Erfassung und Analyse notwendig.

Die genaue stoffliche Charakterisierung und die daraus erzeugten standardisierten Daten stellen die Grundlage für Anwendungen dar, die auf Basis der individuellen Informationen und speziell trainierter Modelle mithilfe künstlicher Intelligenz und maschinellen Lernens (KI/ML) die bestmöglichen Verwertungspfade zwischen regionalen Akteur:innen unter Berücksichtigung von stofflichen und energetischen Eigenschaften, sowie Umweltauswirkungen und Wirtschaftlichkeit ermitteln. Dabei soll die stoffliche, kaskadische Verwertung priorisiert werden.

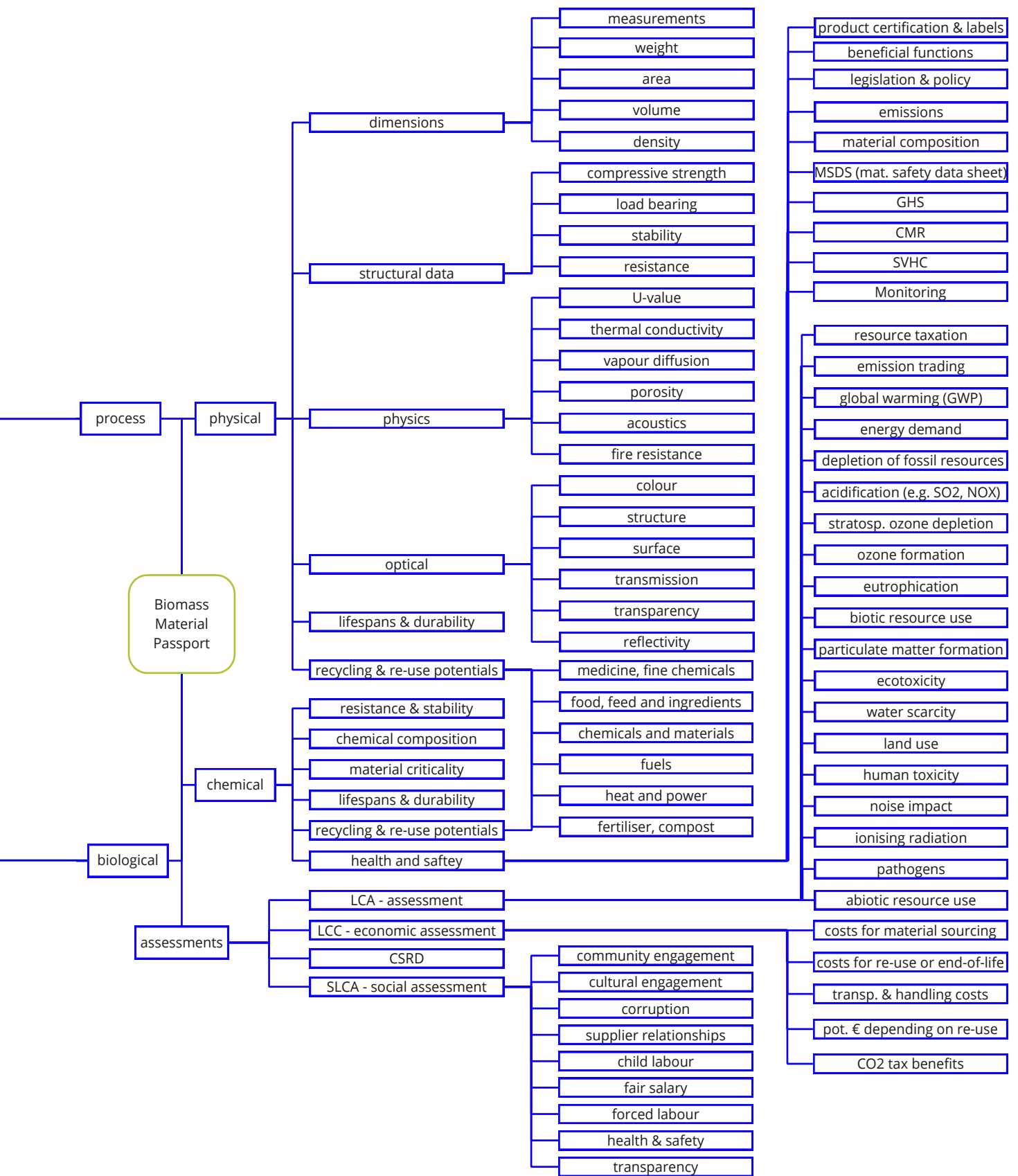
## Digitale Erfassung von Biomasse

Welche Daten für einen Produkt- bzw. Materialpass gebraucht werden, hängt vom Datenbedarf der Anwendungen ab. Um möglichst ganzheitliche Entscheidungen zu ermöglichen, können nicht nur Informationen zu den Materialeigenschaften an sich, sondern zu der gesamten unternehmerischen Praxis und zum gesamten Lebenszyklus bereitgestellt werden. Die folgende Abbildung 33 zeigt eine Übersicht zu den möglichen Informationen in einem Materialpass.



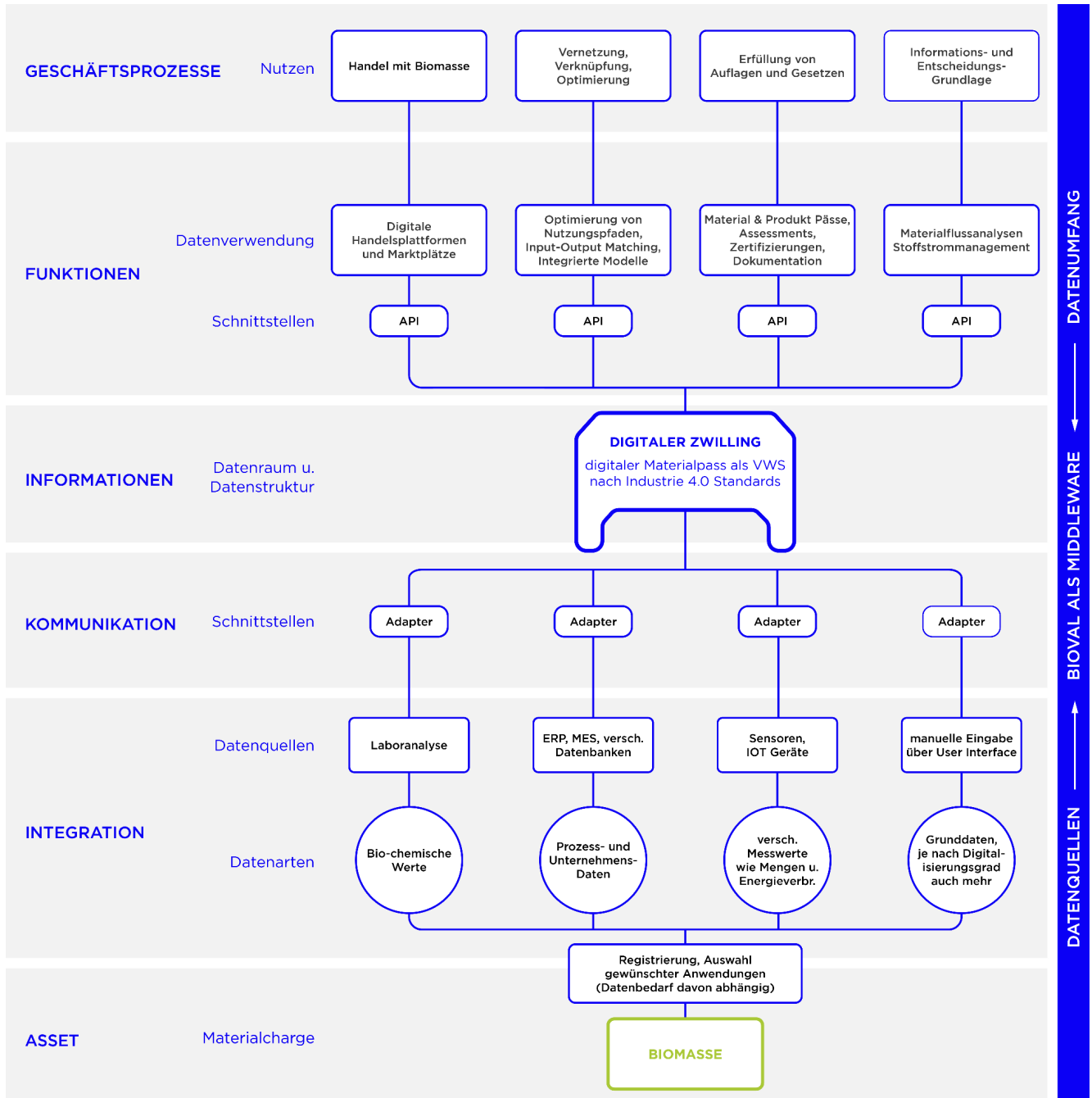
33. Abb.: Mögl. Informationen in einem Materialpass (eigene Darstellung basierend auf Heinrich & Lang, 2019)





# Digitalisierungsstruktur

Aufbauend auf der Exploration möglicher Anwendungen von digitalen Material- und Produktpässen und der Annahme, dass diese über digitale Zwillinge in Form von Verwaltungsschalen nach Industrie 4.0 Standards umgesetzt werden, wird eine mögliche Digitalisierungsstruktur zur Erfassung und Bereitstellung der relevanten Daten erarbeitet. Die Architektur basiert auf dem Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (RAMI I4.0), wie in Abbildung 24 dargestellt.<sup>199</sup> Die Struktur in Abbildung 34 stellt den Kern der Entwurfsarbeit dar und wird folgend näher erläutert.



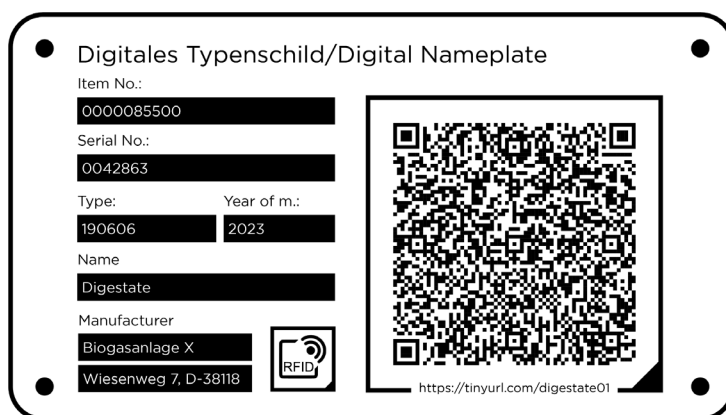
34. Abb.: Digitalisierungskonzept basierend Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (eigene Darstellung)

<sup>199</sup> (Plattform Industrie 4.0, 2018)

## Ebene 1: Asset

### Materialcharge

Auf der Assetebene befindet sich die physische, zu digitalisierende Biomassencharge. Die Digitalisierung wird durch die Erfassung der Charge über eine Website oder App eingeleitet. Bei der Registrierung werden die ersten Grunddaten zur Biomasse wie Kategorie, Standort, Menge, Verfügbarkeit, Transportart etc. eingetragen. Je nachdem, um welche Biomasseart es sich handelt und welche Anwendungen in weiterer Folge informiert werden sollen, verändert sich der dafür benötigte Datenumfang und damit auch die benötigten Datenquellen. Ziel von BioVal ist es, ein User Interface zu schaffen, das basierend auf wenigen manuellen Eingaben im Hintergrund die Verwaltungsschale (VwS) erstellt, auf unternehmensinterne sowie offene Datenbanken zugreift und verschiedene vorhandene statische Information zu der konkreten Biomassenart automatisch bezieht. In den folgenden Schritten wird die VwS sukzessive mit den benötigten Daten aus den verschiedenen Datenquellen befüllt. Mit der Erstellung der VwS erhält die Charge eine eindeutige Kennung (ID). Die Verknüpfung mit dem physischen Asset und die eindeutige Identifikation erfolgt über Typenschilder, die etwa am Gebinde angebracht werden können und über RFID-Chips (Funkerkennung) und QR-Codes einen direkten Zugang zu den digitalen Zwillingen ermöglichen (siehe Abbildung 35).



35. Abb.: Digitales Typenschild als Verbindung zwischen Asset und digitalem Abbild (eigene Darstellung)

## Ebene 2: Integration

Die Ebene der Integration beinhaltet die umfassende und effiziente Zusammenführung von Informationen verschiedener, heterogener Datenbestände und Quellen zu einer einheitlichen und strukturierten Informationsmenge für verschiedene Nutzer und Anwendungen.<sup>200</sup> Dafür werden unterschiedlichste Datenquellen herangezogen. Je nach Digitalisierungsgrad können bereits viele Daten in unternehmensinternen Systemen vorhanden sein, diese gilt es zu integrieren. Wenig oder gar nicht digitalisierte Unternehmen könnten alle Daten auch manuell bereitstellen. Somit wird eine niederschwellige Partizipation für KMUs und nicht digital affine Akteur:innen ermöglicht.

<sup>200</sup> (Panse, 2017)

Für die Erfassung und Zusammenführung der unterschiedlichen relevanten Informationen aus verschiedenen Systemen oder Quellen existiert bislang kein Verfahren oder koordinierendes Datenerfassungs- und Managementsystem.<sup>201</sup>

## Datenarten

Wie in Abbildung 33 veranschaulicht, können verschiedenste Datenarten in digitale Materialpässe einfließen. Dazu zählen biologische, chemische und physikalische Informationen zum Rohstoff selbst, aber auch Prozess- und Unternehmensdaten, die mit dem Handling des Materials und dessen Lebenszyklus zu tun haben.

## Datenquellen

Nach dem Konzept der Industrie 4.0 würden Messungen, Integration und Kommunikation durch Maschinen, IOT Geräte, Sensoren und andere digitale Messinstrumente voll automatisiert stattfinden. Genau dafür wurde die Verwaltungsschale entwickelt. In der Vision würden so Produktions- und Logistikprozesse automatisiert, gesteuert und optimiert. Allerdings sind erst wenige Akteur:innen so weit digitalisiert. Neben den Grunddaten können praktisch alle Felder über das Userinterface manuell gefüllt werden, allerdings ist dies einigermaßen zeitaufwendig. Vorstellbar ist auch, dass über verschiedene Anwendungen, basierend auf minimalen Angaben, Informationen in den digitalen Zwilling einfließen, da die APIs bidirektional funktionieren. Beispielsweise könnten verschiedene Assessments über Anwendungen durchgeführt und die Ergebnisse im Zwilling gespeichert werden. Durch Data-Mining und Crawler könnten automatisiert und systematisch große Datenbestände von bestehenden Datenbanken und Berichtssystemen bezogen werden.<sup>202</sup>

Umfassende Analysen und Materialprüfungen würden in den entsprechenden Laboren und Anstalten durchgeführt und die Daten dann über entsprechende Schnittstellen in die Verwaltungsschale eingespeist werden. Abhängig von der Biomasseart könnten die entsprechenden standardisierten Prüfprozesse nach *Smart Standards* erfolgen. Smart Standards sind digital bereitgestellte Normen und Standards, die automatisch von verschiedenen Systemen und Maschinen ausgelesen und angewendet werden können. Im Idealfall können diese automatisch in verschiedene Produktionen und Prozesse einfließen und Auswertungen effizient, standardisiert und korrekt in großem Umfang durchgeführt werden. Ein weiterer Vorteil von Smart Standards liegt im Bezug stets aktueller Normen, der Sicherstellung, dass die richtigen Normen angewendet werden, sowie der Nachvollziehbarkeit. Das bedeutet, dass nach eindeutiger Zuordnung der Biomasse zu einer Kategorie/Klasse die dafür notwendigen Auswertungsanforderungen automatisch abgerufen und die Auswertung vollautomatisch

---

<sup>201</sup> (Götz et al., 2021, 11)

<sup>202</sup> (Götz et al., 2021, 35)

durchgeführt werden könnten. Anschließend könnte nach der Logik der Industrie 4.0 das Submodell automatisiert mit den entsprechenden Werten befüllt und fallweise entsprechende Zertifikate maschinell erstellt werden. Dadurch könnte eine hohe und gleichbleibende Datenqualität sichergestellt werden.<sup>203</sup> Bei größeren Unternehmen, die über eigene Software zur Unternehmensführung (Enterprise Resource Planning, ERP) oder Fertigungssteuerungssysteme (Manufacturing Execution System, MES) und größere Datenmengen verfügen, ist eine Datenintegration über entsprechende Schnittstellen und Prozesse sinnvoll. Je nach System der einzelnen Unternehmen sind hier allerdings individuelle Adapter und Lösungen notwendig. Die Datenintegration könnte von spezialisierten Anbietern durchgeführt und die Unternehmen könnten für die Industrie 4.0 vorbereitet werden. Die Integration bringt einige Herausforderungen mit sich. Dazu gehören die Schema- und Datenheterogenität, der Aufbau einer Integrationsarchitektur, die Zusammenführung fragmentierter Informationen und die Überwindung von Systembrüchen.<sup>204</sup> Zwei Möglichkeiten zur Datenintegration sind *Data Warehousing*, also die Integration durch Zusammenführung der Daten in ein einziges (physisches) Data Warehouse und die *virtuelle Datenintegration*. Dabei werden die Daten in den Quellen belassen und zur Abfragezeit abgerufen.<sup>205</sup>

### Ebene 3: Kommunikation

Auf der Ebene der Kommunikation werden die gewonnenen Daten über individuelle Schnittstellen in die Verwaltungsschale übertragen. Je nach Datenquelle und Akteur:in müssen diese Schnittstellen individuell angepasst werden.

### Ebene 4: Informationen

Auf der Ebene der Informationen werden alle Daten und Informationen in standardisierten Strukturen der Verwaltungsschale gesammelt. Der digitale Zwilling befindet sich dabei in einem geteilten Umgebung (*shared environment*) des Eigentümers. Der Zugriff kann durch individuelle Rechte (*Role Based Access*) geregelt werden. Die Datenstrukturen und Standards werden von den Industrie 4.0-Standards vorgegeben. Zu den grundlegenden Untermodellen wie *Nameplate*, *Technical Data*, *Documentation*<sup>206</sup> und *Product Carbon Footprint* mit entsprechenden Datenstrukturen und Feldern (Properties) kommen laufend Sub Modell Templates hinzu (siehe Anhang II.).<sup>207</sup> Die Standards stellen die unternehmensübergreifende Interoperabilität und Maschinenlesbarkeit sicher. Verschiedene *Sub Modelle* ermöglichen eine Vielzahl von Funktionen in einer Verwaltungsschale und können die Bedarfe des gesamten Materiallebenszyklus abdecken. Es gilt dabei Redundanzen und Dopplungen zu

---

<sup>203</sup> (DIN, Deutsches Institut für Normung, 2020)

<sup>204</sup> (Holicki, 2021)

<sup>205</sup> (Panse, 2017)

<sup>206</sup> (Plattform Industrie 4.0, 2020)

<sup>207</sup> (Industrial Digital Twin Association, 2023)

vermeiden und auf etablierte Modelle und Standards zurückzugreifen. Denkbar wäre die Erarbeitung eines BioVal Sub Model Templates mit der IDTA, speziell für Biomasse. Außerdem sollten Möglichkeiten der Normung von Prozessen und Anwendungen, etwa zur Erstellung von digitalen Produktpässen, geprüft werden.<sup>208</sup>

## Ebene 5: Funktionen

Die Funktionalität des digitalen Zwillings entfaltet sich erst, wenn die gesammelten Daten mit anderen Akteur:innen geteilt und für Anwendungen genutzt werden. Entitäten, die in I4.0 Standards kommunizieren, können je nach Zugriffsrechten direkt auf den Zwilling zugreifen. Anwendungen benötigen in der Regel Programmierschnittstellen (APIs).

## Datenverwendung

Grundsätzlich können die Daten für den direkten sektorübergreifenden Datenaustausch zwischen Maschinen, Anlagen und Unternehmen im Sinn der Industrie 4.0 verwendet werden. Überdies ermöglicht die standardisierte Bereitstellung die einfache Anbindung verschiedenster Anwendungen, wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln erläutert. Beispielsweise könnten über die Daten des Materialpasses automatisiert digitale Handelsplattformen betrieben werden. Ebenso bieten semantische Systeme wie Ontologien und Wissensgraphen große Potenziale, digitale Zwillinge mit erweiterten wissensbasierten Funktionen auszustatten. So könnten über integrierte Modelle Lieferketten optimiert, Nutzungspfade basierend auf ökologischen und ökonomischen Bewertungen gefunden werden. Des Weiteren ist eine Nutzung des digitalen Zwillings zur laufenden Berechnung des CO<sub>2</sub> Äquivalents möglich.<sup>209</sup> Außerdem können damit gesetzliche Auflagen wie Dokumentations- und Transparenzpflichten erfüllt werden. Auch Zulassungen, Zertifikate und Gütesiegel und verschiedene Assessments könnten erstellt werden. Ebenso können Prozesse kontrolliert und optimiert, sowie Simulationen und Vorhersagen gemacht werden. Zudem sind Anwendungen wie Materialflussanalysen, Monitoring, Tracking & Tracing, Stoffstrommanagement, KI-gestützte Sortiertechnologien möglich.

## Ebene 6: Geschäftsprozesse

All diese Funktionen sollen am Ende Geschäftsprozesse in einer digitalisierten biobasierten Kreislaufwirtschaft verbessern, die Vernetzung von Akteur:innen und Bedarfen und damit den Handel mit Biomasse fördern, die Erfüllung von Auflagen und Gesetzen erleichtern und eine Informations- und Entscheidungsgrundlage für ein nachhaltiges Wirtschaftssystem liefern.

---

<sup>208</sup> (Götz et al., 2021, 39)

<sup>209</sup> (ghgprotocol.org, 2023)

# Fallbeispiel

Um den Ansatz exemplarisch darzustellen, wird im Folgenden ein Fallbeispiel zur Erstellung eines digitalen Zwillings von Gärresten und der Verwertung durch Mikroalgen dargestellt. Die relevanten Parameter (Properties) können je nach Kategorie und Bezeichnung der Biomasse sowie den beabsichtigten Anwendungen variieren. Für das BioVal Sub Model wurden exemplarisch relevante Informationen für die Nutzung von Gärresten verwendet.

## Gärrest

Die bei der Vergärung von Biomasse in Biogasanlagen verbleibenden flüssigen oder festen Rückstände werden als Gärrest bezeichnet. Diese Reste können als Dünger oder Substrat für verschiedene Anwendungen genutzt werden.<sup>210</sup>

Durch die Vergärung in Biogasanlagen können Reststoffen wie Maissilage, Bioabfällen oder Gülle verwertet und Energie erzeugt werden. Dabei fallen deutschlandweit Gärreste mit einem theoretischen Biomassepotenzial von 13.502.000 t Trockenmasse an.<sup>211</sup> Gärreste stellen einen wichtigen und umweltfreundlichen Dünger für die Landwirtschaft dar. Alle wichtigen Pflanzennährstoffe sind enthalten und der Einsatz von Kunstdünger kann verringert werden. Je nach Zusammensetzung eignet sich der Gärrest aber auch für andere Anwendungen. Ein klassisches Beispiel für einen Zielkonflikt in der Reststoffnutzung, das genauer Abwägung bedarf.

Trockenmasse	7	% FM
pH-Wert	8.3	pH-Wert
Organische Substanz	51	kg/t FM
C/N-Verhältnis	6.4	C/N-Verhältnis
Bas. Wirkstoffe	3.7	kg/t FM
Stickstoff	4.7	kg N/t FM
Ammonium	2.7	kg NH4-N/t FM
Phosphor	1.8	kg P205/t FM
Kalium	5.0	kg K20/t FM
Magnesium	0.84	kg MgO/t FM
Schwefel	0.33	kg S/t FM
Schad- und Risikostoffe	unterhalb der Grenzwerte	
Risikoeinstufung	gering	

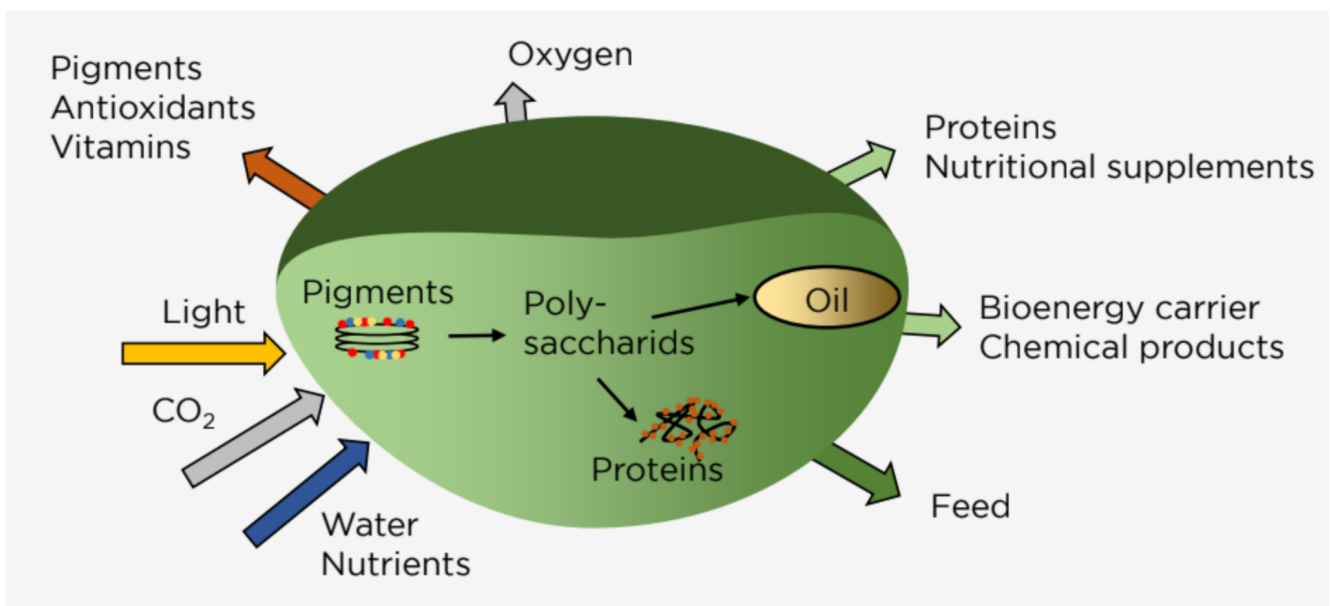
36. Abb.: Analyse von Gärresten (Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg, 2008)

<sup>210</sup> (Wendland & Lichti, 2012, 2)

<sup>211</sup> (Brosowski, 2019)

Ferner bieten sich Vorteile gegenüber Gülle, wie geringerer Besatz mit pathogenen Bakterien und Pilzen, weniger Unkrautsamen, Erhöhung des pH-Wertes des Bodens, geringere Geruchsbelastung aufgrund der abgebauten Fettsäuren und ein höherer Anteil direkt verfügbarer Nährstoffe. Allerdings variiert die chemische Zusammensetzung des Gärrestes je nach Substrat, Anlage und Aufbereitung sehr stark, weshalb eine Gärrestanalyse zur Düngeplanung oder zur Verwendung für andere Verwertungspfade notwendig ist (siehe Abbildung 36). Je nach Verwendungsabsicht und Ausgangssubstrat kann auch eine zusätzliche Überprüfung auf unerwünschte Inhaltsstoffe wie Schwermetalle, Fremdstoffe, Steine und keimfähige Samen sinnvoll sein.<sup>212</sup> Wurden Bioabfälle verwertet, ist diese Überprüfung nach Bioabfallverordnung sogar verpflichtend.<sup>213</sup>

## Mikroalgen



37. Abb.: Schematische Darstellung der In- und Outputs einer Mikroalge (Martin & AlgaeRithm, 2022)

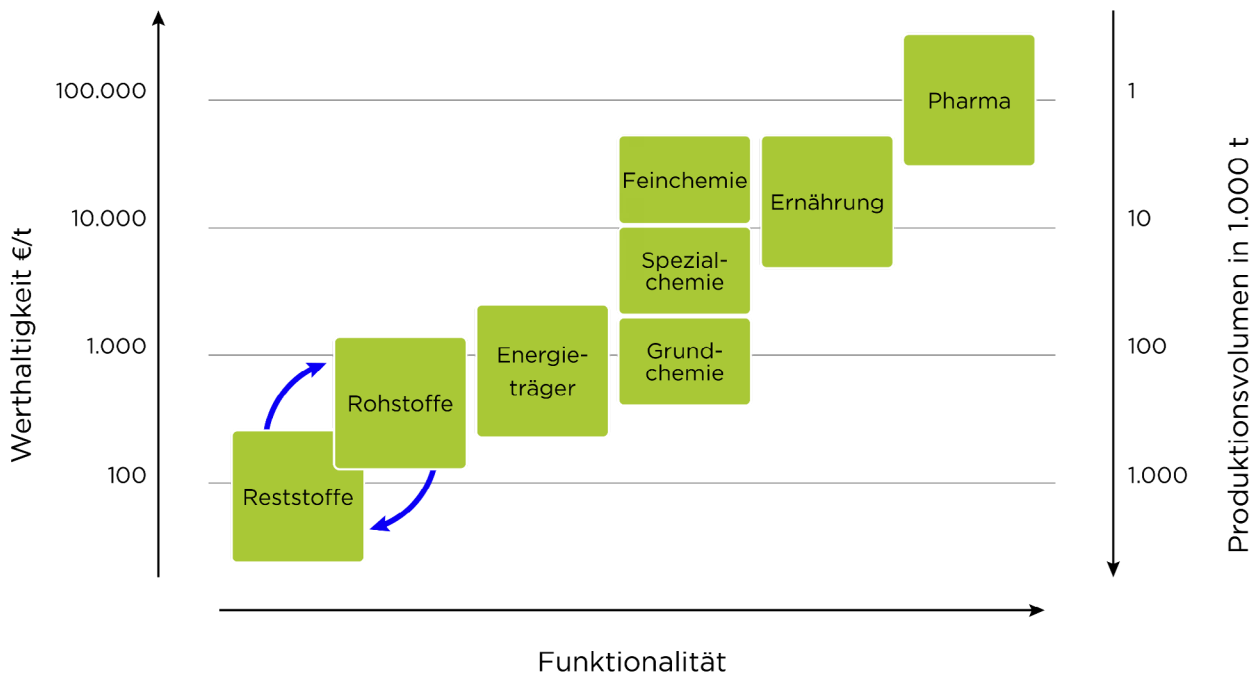
Ein Projekt im VIRIDIS Cluster ist das Start-up AlgaeRithm, das sich mit der Automatisierung der Mikroalgenproduktion beschäftigt. Mikroalgen stellen eine vielversprechende, umweltverträgliche und platzsparende Möglichkeit dar, Biomasse für die unterschiedlichsten Anwendungen zu produzieren.<sup>214</sup> Mikroalgen sind relativ anspruchslos und verfügen über ein bis zu zehnfach schnelleres Wachstum als Landpflanzen, da jede einzelne Zelle Photosynthese betreibt. Zudem stehen Mikroalgen nicht in direkter Konkurrenz zur Lebensmittelherstellung. Mikroalgen benötigen neben ausreichend Süß- oder Salzwasser lediglich Licht und Substrat für ihr Wachstum. Zudem kann das Wachstum der Mikroalgen mit der Zugabe von CO<sub>2</sub> beschleunigt werden, das in der Biomasse gebunden wird. Gärreste stellen ein bestens geeignetes Substrat für Mikroalgen dar, womit sich ein konkreter Verwertungspfad im Sinn der Kaskadennutzung ergibt. Die In- und Outputs von Mikroalgen sind in Abbildung 37 ersichtlich.

<sup>212</sup> (Eurofins Agraranalytik, 2021)

<sup>213</sup> (Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg, 2008)

<sup>214</sup> (Martin & AlgaeRithm, 2022)





38. Abb.: Werthaltigkeit, Funktionalität und Produktionsvolumen mikrobieller Rohstoffe bspw. Mikroalgen (eigene Darstellung, basierend auf Kircher, 2020, 102)

Mikroalgen stellen beispielhaft ein innovatives Verfahren zur Aufwertung von Reststoffen dar, denn sie können diese optimal verwerten und Proteine für den menschlichen oder tierischen Verzehr erzeugen, also hierarchisch zu einer hohen Produktebene beitragen (siehe Abbildung 38).<sup>215</sup> Als Substrate, also Nährstofflieferanten, könnten auch direkt Ausscheidungen von Tieren oder andere schwer zu verwertenden Bioabfälle zugeführt werden. Als notwendige Lichtquelle ist die Sonne bestens geeignet. Insbesondere in Photobioreaktoren können Mikroalgen sehr platzsparend und effizient gezüchtet werden. Die Ernte der Algen erfolgt durch Zentrifugieren, Filtern, Ausflocken oder Sedimentieren.<sup>216</sup> Aus Mikroalgen können verschiedenste Produkte gewonnen werden. Mikroalgen zeichnen sich durch ihren hohen Proteingehalt, hohe Omega-3 & 6 Anteile, Vitamine und Antioxidantien aus. Damit sind sie wertvolle Stoffe für Pharma-, Futter- und Chemieindustrie. Diese verarbeiten die Mikroalgen unter anderem zu Nahrungsergänzungsmitteln, Kosmetik, Arzneimitteln und Feinchemikalien weiter. Werden Mikroalgen beispielsweise zu einem Pharmaprodukt weiterverarbeitet, sind oftmals Produktionsparameter und Inputs sowie die Freiheit von verschiedenen Belastungen in Form von Zertifikaten nachzuweisen und zu dokumentieren. Das könnte durch digitale Zwillinge erfolgen. Aus Sicht der Herstellung bieten die Mikroalgen auch diverse Vorteile: die Möglichkeit konstanter Produktion, die Unabhängigkeit von Lieferketten, gute Integration in Stoffkreisläufe, hohes Potenzial für Automatisierung und damit Skalierbarkeit, lokal in kleineren Anlagen realisierbar, und die Produktion auf Brachflächen oder ungenutzten Dächern. Damit würde keine landwirtschaftliche Flächenkonkurrenz entstehen.<sup>217</sup>

<sup>215</sup> (Reich, 2021)

<sup>216</sup> (Carstens, 2021)

<sup>217</sup> (Martin & AlgaeRithm, 2022)

## Datenstruktur BioVal Sub Model

COLLECTION	FILE	PROPERTY SEMANTIC ID	VALUE WERT	BESCHREIBUNG	VALUE TYPE
Anbieter		Organisation	Biogas GmbH		string
		Ansprechpartner:in Vorname	Flora		string
		Ansprechpartner:in Nachname	Musterfrau		string
		Adresse	Musterstraße 1, 38118 Braunschweig		string
		E-Mail	f.musterfrau@biogas.de		string
		Telefonnummer	17321493851		float
Biomasse		Begutachtungsdatum	17.06.2023 14:39:32		date...
		Klassifizierung	Europäisches Abfallverzeichnis		string
		Klasse	Gärrückstand		string
		Abfallschlüsselnummer	190606		float
		Kategorie	Landwirtschaftliche Nebenprodukte		string
		Unterkategorie	Nebenprodukte aus der Energieproduktion		string
		Gewicht	5	t FM	float
		Volumen	4,5	m3	float
		Konsistenz	Flüssig		string
		Gebinde	Fass		string
		aktuelle Standort	Braunschweig		string
		monetärer Restwert	100	€/t FM	float
		Preis	500	€/t FM	float
		Haltbarkeit	07.07.2023 14:39:32	zu verwerten bis	date...
Biochemische Analyse		Trockenmasse	7	% FM	float
		pH-Wert	8.3	pH-Wert	float
		Organische Substanz	51	kg/t FM	float
		C/N-Verhältnis	6.4	C/N-Verhältnis	float
		Bas. Wirkstoffe	3.7	kg/t FM	float
		Stickstoff	4.7	kg N/t FM	float
		Ammonium	2.7	kg NH4-N/t FM	float
		Phosphor	1.8	kg P205/t FM	float
		Kalium	5.0	kg K20/t FM	float
		Magnesium	0.84	kg MgO/t FM	float
		Schwefel	0.33	kg S/t FM	float
		Schad- und Risikostoffe	unterhalb der Grenzwerte		string
		Risikoeinstufung	gering		string
Analysedokumente		Analysedokumente			
	Laborwerte.pdf				
	Düngewirkung.pdf				

39. Abb.: Listenansicht verschiedener Properties des BioVal Sub Models (eigene Darstellung)

Zur Veranschaulichung wurde eine mögliche Datenstruktur speziell für Gärreste entwickelt, die die standardisierte Informationsbereitstellung in Form einer Verwaltungsschale zeigen soll. (Abb. 39) In einem eigenen BioVal Sub Model sollen alle relevanten Informationen abgebildet werden. Zur besseren Übersichtlichkeit wurden die einzelnen Properties in Collections zusammengefasst. Die Collection "Anbieter" informiert über den Bereitsteller der Biomasse. Die Collection "Biomasse" gibt relevante Grundinformationen zu Biomasse und Logistik. In der Collection "Biochemische Analyse" werden exemplarische Werte angeführt, die speziell bezogen auf die Gärrestnutzung relevant sind. In der Collection "Dokumente" besteht dann auch die Möglichkeit, Laborergebnisse und Zertifikate anzuhängen. Der Datenumfang bzw. die Struktur können je nach Bedarfen erweitert werden. Die bereitgestellten Werte sollen die Vermittlung über eine Materialbörse ermöglichen und die Informationsbasis für Anwendungen bilden, die optimale Verwertungspfade für Reststoffe aufzeigt.

## Überführung in die Verwaltungsschale

The screenshot displays a web-based management interface for the BioVal sub-model. At the top, there is a breadcrumb navigation path: Home / Digestate / BioVal / Anbieter. To the right of the path are four action buttons: 'Speichern' (Save), 'Aktualisieren' (Refresh), 'Veröffentlichen' (Publish), and 'Kopieren & Ableiten' (Copy & Derive). On the left side, a navigation menu is visible with a search bar and several categories: 'Gärrest' (expanded), 'Technische Daten', 'Inputs', 'Nameplate', 'CarbonFootprint', 'CIRPASS', and 'BioVal' (highlighted in blue). The main content area is titled 'BioVal ☆' and shows the last update information: 'Zuletzt aktualisiert von lunterholzner am 19.05.2023 17:41:18'. Below this, there is an 'Identifikation' section with the text 'Digestate/BioVal:1' and an 'ID Short' section with the text 'BioVal'. The 'Inhalte' section shows a tree view of the 'Anbieter' collection, which is a 'SubmodelElementCollection'. The collection contains five properties:

Property [string]	Value
<b>Organisation</b>	Unternehmensname Biogas GmbH
<b>Ansprechperson</b>	Vor- und Nachname Ansprechperson Flora Musterfrau
<b>Adresse</b>	Adresse Musterstraße 1, 38118 Braunschweig
<b>E-Mail</b>	E-Mail-Adresse Ansprechperson f.musterfrau@biogas.de
<b>Telefonnummer</b>	Telefonnummer 017321493851

40. Abb.: Darstellung der Collection “Anbieter” im BioVal Sub Model (eigene Darstellung)

In einem weiteren Schritt wurde eine Verwaltungsschale “Gärrest” mit dem BaSyx Configurator des Partnerunternehmens objective partner AG erstellt und die Datenstruktur im Sub Model “BioVal” aufgebaut, wie in Abbildung 40 ersichtlich. Die Felder wurden mit exemplarischen Werten manuell befüllt, so wie es bei der Grunderfassung der Biomasse auch erfolgen würde. Zu sehen sind hier auch die Standard Sub Modelle “Technische Daten” und “Nameplate”. Auch für Anwendungen wie “CarbonFootprint” und den digitalen Produktpass “CIRPASS” wurden Sub Models angelegt. Im Sub Model “Inputs” wäre denkbar, Stoffe zu hinterlegen, sofern vorhanden auch deren digitale Zwillinge zu verknüpfen, die in die Charge eingeflossen sind und damit die Kaskade bzw. Wertschöpfungskette besser nachvollziehbar darzustellen.

Es folgen Darstellungen der Collections “Biomasse” (Abbildung 41) und “Biochemische Analyse” (Abbildung 42).

Navigation

- ▼ Gärrest
- Technische Daten
- Inputs
- Nameplate
- CarbonFootprint
- CIRPASS
- BioVal**

## BioVal ☆

Zuletzt aktualisiert von **lunterholzner** am 19.05.2023 17:41:18

Identifikation  
Digestate/BioVal:1

ID Short  
BioVal

B Lokaler Arbeitsstand v1/r1.0

---

Inhalte ☰

SubmodelElementCollection  
▼ Anbieter

SubmodelElementCollection ⓘ ⋮  
^ Biomasse

⊞	Property [dateTime]	<b>Erfassungszeitpunkt</b>	Erfassungszeitpunkt 10.05.2023 17:12:00
⊞	Property [string]	<b>Kategorie</b>	Kategorisierung Landwirtschaftliche Nebenprodukte
⊞	Property [string]	<b>Unterkategorie</b>	Unterkategorisierung Nebenprodukt aus der Energieproduktion
⊞	Property [string]	<b>Klassifizierungssystem</b>	Angewandtes Klassifizierungssystem Europäisches Abfallverzeichnis
⊞	Property [string]	<b>Klasse</b>	Klassifizierung Gärrückstand
⊞	Property [float]	<b>Abfallschlüsselnummer</b>	Klassifizierungsnummer 190606
⊞	Property [float]	<b>Gewicht</b>	t Fm 5
⊞	Property [float]	<b>Volumen</b>	m3 4,5
⊞	Property [string]	<b>Konsistenz</b>	flüssig
⊞	Property [string]	<b>Gebinde</b>	Fass
⊞	Property [string]	<b>aktueller Standort</b>	Adresse Musterstraße 1, 38118 Braunschweig
⊞	Property [dateTime]	<b>Haltbarkeit</b>	18.06.2023 17:00:00

41. Abb.: Darstellung der Collection "Biomasse" im BioVal Sub Model (eigene Darstellung)

Home / Digestate / BioVal / Biochemische Analyse

Navigation

- ▼ Gärrest
  - Technische Daten
  - Inputs
  - Nameplate
  - CarbonFootprint
  - CIRPASS
  - BioVal

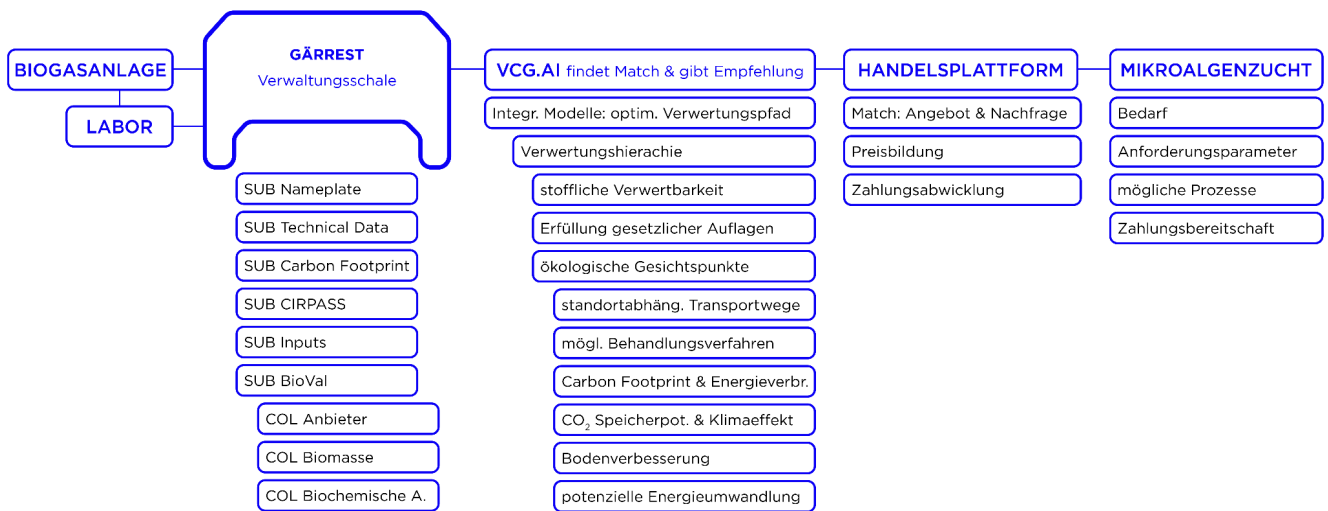
SubmodelElementCollection

- ▼ Anbieter
- SubmodelElementCollection
- ▼ Biomasse
- SubmodelElementCollection
- ^ Biochemische Analyse

Property [dateTime]	<b>Zeitstempel</b>	19.05.2023 10:05:00
Property [float]	<b>Trockenmasse</b>	% FM 7
Property [float]	<b>pH-Wert</b>	pH-Wert 8.3
Property [float]	<b>Organische Substanz</b>	kg/t FM 51
Property [float]	<b>C/N-Verhältnis</b>	C/N-Verhältnis 6.4
Property [float]	<b>Bas. Wirkstoffe</b>	kg/t FM 3.7
Property [float]	<b>Stickstoff</b>	kg N/t FM 4.7
Property [float]	<b>Ammonium</b>	kg NH4-N/t FM 2.7
Property [float]	<b>Phosphor</b>	kg P205/t FM 1.8
Property [float]	<b>Kalium</b>	kg K20/t FM 5.0
Property [float]	<b>Magnesium</b>	kg MgO/t FM 0.84
Property [float]	<b>Schwefel</b>	kg S/t FM 0.33
Property [string]	<b>Schadstoffe</b>	Überschreitung von Grenzwerten keine
Property [string]	<b>Risikoeinstufung</b>	Risikoeinstufung gering
File [application/octet-stream]	<b>Laborwerte</b>	Dokument vom 19.05.2023 -

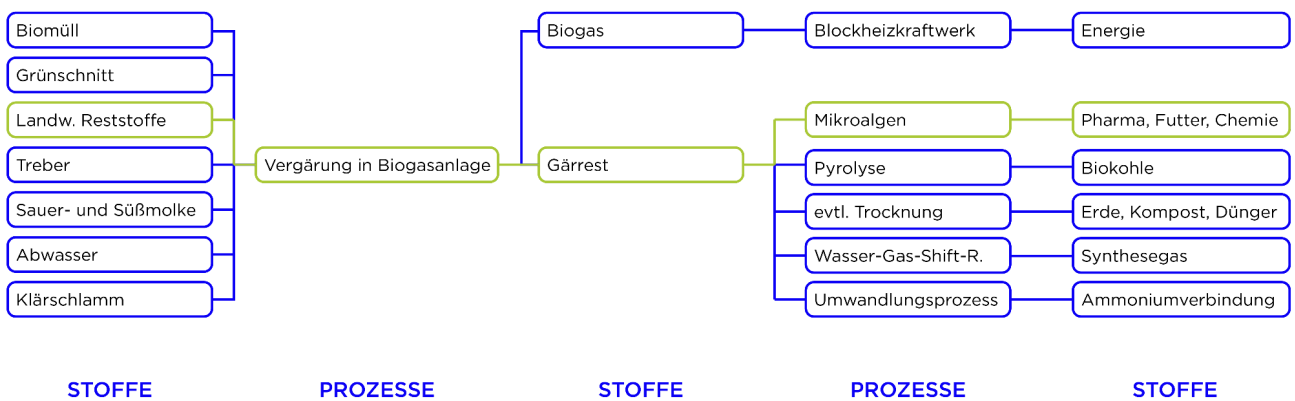
42. Abb.: Darstellung der Collection “Biochemische Analyse” im BioVal Sub Model (eigene Darstellung, Datenquelle: Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg, 2008)

# Vermittlungsprozess



43. Abb.: Möglicher Vermittlungsprozess zwischen Biogasanlage und Mikroalgenzucht (eigene Darstellung)

Basierend auf dem erstellten digitalen Zwilling könnte ein Vermittlungsprozess erfolgen. Dabei würde beispielsweise vcg.ai als Matching Software mit zukünftig zusätzlich berücksichtigen ökologischen Aspekten auf die Grund- und Labordaten in der Verwaltungsschale und angemeldete Bedarfe auf digitalen Handelsplattformen zugreifen (siehe Abbildung 43). So würde ein Match zwischen der digitalisierten Biomassencharge und einem Abnehmer hergestellt. Über die digitale Handelsplattform würden Angebot und Nachfrage zusammengebracht. Dort würde auch die Preisbildung und Zahlungsabwicklung erfolgen. So könnte sich etwa ein Verwertungspfad wie in Abbildung 44 ergeben.



44. Abb.: Möglicher Verwertungspfad für Gärreste (eigene Darstellung basierend auf BioBase, 2023)

Das Fallbeispiel zeigt exemplarisch, welche Potenziale in der Digitalisierung von Biomasse und Reststoffen und den damit ermöglichten Anwendungen stecken. Es ist zu erwarten, dass laufend weitere Anwendungen für digitale Zwillinge bzw. digitale Materialpässe hinzukommen, und die dahinter liegenden Modelle einen zunehmend intelligenten, effizienten und nachhaltigen Umgang mit Biomasse ermöglichen.



## Conclusio

Die Möglichkeiten der Digitalisierung zur Quantifizierung und Charakterisierung von Biomasse bieten klare Potenziale zur Verbesserung der Ressourceneffizienz und zur Etablierung einer datengestützten Kreislaufwirtschaft. Durch die Möglichkeiten und interoperablen Standards der Industrie 4.0 können durch kooperationsorientierten proaktiven Datenaustausch aus linearen Wertschöpfungsketten regionale Wertschöpfungsnetzwerke werden. Biogene Rest- und Sekundärstoffe können erfasst und in Stoffkreisläufe eingebracht werden. Durch integrierte KI-gestützte Modelle können optimale Nutzungspfade und Abnehmer gefunden werden. Dabei sollte eine Priorisierung ökologischer Aspekte sowie der stofflichen Kaskadennutzung vor der energetischen Verwertung und rein ökonomischen Faktoren vorgenommen werden. Hierfür müssen Anwendungen entwickelt werden. Außerdem braucht es ein klares Bekenntnis der Politik zur Kreislaufwirtschaft und Bioökonomie und die Umsetzung in förderlichen gesetzlichen Rahmungen, insbesondere im Umgang mit Rest- und Sekundärstoffen. Der digitale Produktpass ist dafür ein erster, wichtiger Schritt. Dieser sollte nicht nur für Konsumentenprodukte, sondern auch für den B2B-Bereich und Materialien ausgelegt werden. Wie und ob der Produktpass als Verwaltungsschale umgesetzt wird, ist noch unklar. Grundsätzlich bieten digitale Zwillinge in Form von Verwaltungsschalen einen vielversprechenden Standard zum sektorübergreifenden Datenaustausch und könnten über Sub Modelle unterschiedlichste Funktionen und Bedarfe, wie die des Material- oder Produktpasses abdecken. Dafür sollten Insellösungen vermieden und Normungsgremien möglichst divers besetzt werden, um eine universelle Grundlage für verschiedenste Akteur:innen und Anwendungen zu schaffen. Der Zugriff auf unternehmensunabhängig einheitliche Datencontainer, wie die Verwaltungsschale, stellt eine förderliche Basis für die Entwicklung vielfältiger Anwendungen zur Koordination, Automatisierung und Optimierung von Stoffströmen dar. BioVal trägt durch Datenintegration und Erstellung digitaler Zwillinge dazu bei, die erforderlichen Daten für die unterschiedlichen Anwendungen bereitzustellen und ermöglicht verschiedene Akteur:innen, in der digital gestützten, zirkulären Bioökonomie zu partizipieren.

Während sich durch die Digitalisierung klare Vorteile ergeben, müssen auch die negativen Auswirkungen berücksichtigt werden, ansonsten ist der ökologische Schaden größer als der Nutzen. Die Errichtung, Erhaltung und der Betrieb von digitalen Infrastrukturen sind mit erheblichem materiellen und energetischen Ressourcenverbrauch verbunden. Der Kommunikations- und Speicherbedarf der Industrie 4.0 ist enorm, wird doch jede Entität zum Erzeuger und Empfänger von Daten. Hier sollte genau abgewogen werden, welche Technologien wofür genutzt werden, welche Daten relevant sind und an welchen Stellen in welchen Funktionen die Digitalisierung sinnvoll eingesetzt werden kann. Außerdem sollte stets die Datensouveränität und Sicherheit gewahrt bleiben. Auch kleinen und mittleren Unternehmen sollte die Partizipation in der Industrie 4.0 durch niedrige



Eintrittshürden, offene Daten und Software sowie Kooperationsbereitschaft einflussreicher Akteur:innen ermöglicht werden. Diesbezüglich ist auch die Politik gefordert, einen Rahmen, unter anderem für den Datenaustausch in föderierten Ökosystemen, zu schaffen. Außerdem sollte geklärt werden, welche konkreten akteurspezifischen Informationsbedürfnisse bestehen, bevor rechtsverbindliche Informationsumfänge definiert und Datenstrukturen festgelegt werden. Dafür braucht es Austausch und weitere Machbarkeitsstudien, um Chancen, Interessen und Herausforderungen zu identifizieren. Die Praxistauglichkeit der erarbeiteten Digitalisierungsprozesse und Datenstrukturen muss in weiteren Schritten anhand erster Prototypen mit verschiedenen Projektpartnern wie vcg.ai getestet und evaluiert werden. Der digitale Zwilling konnte noch nicht mit Anwendungen oder anderen Industrie 4.0 Entitäten verknüpft werden. Die Anbahnung der Partnerschaft mit vcg.ai ist noch nicht so weit fortgeschritten, als dass dem Autor Einblick in deren Datenstrukturen gewährt wurden. Somit konnte die Verwaltungsschale noch nicht als Datenquelle für einen Vermittlungsprozess genutzt werden. Sobald dies geschieht, könnte etwa das BioVal Sub Model adaptiert und die entsprechenden Schnittstellen hergestellt werden.

Im Projektverlauf und auch beim Verfassen dieser Arbeit war es aus dem Arbeitsverhältnis heraus nicht einfach, einen kritisch-reflektierten Abstand zum Projekt, insbesondere aus der Perspektive des Transformations Designs, einzunehmen. Das Projekt hat sich über die Zeit sehr stark gewandelt. Dabei zeigten sich Widersprüche, wie die der vollständigen Kybernetisierung und Ökonomisierung der Natur, der Legitimation grünen Wachstums durch Kreislaufwirtschaft, Bioökonomie und Digitalisierung und die Bedenken, inwieweit die Industrie 4.0 tatsächlich in ländlichen, landwirtschaftlich geprägten Kontexten Akzeptanz findet. Des Weiteren stellt sich die Frage, wie inklusiv die Industrie 4.0 wirklich ist, ist das Konzept doch aus dem Gedanken entstanden, Deutschland als Wirtschaftsstandort und Hochtechnologieland zu stärken und abzusichern. Hohe Eintrittshürden wie der große Implementierungs- und Kostenaufwand und die, durch die Leitlinie der deutschen Automobilindustrie geprägten Standards und Infrastrukturen stellen Barrieren für kleinere Akteur:innen dar. Grundlegende Fragen, nach nachhaltigen, suffizienten Wirtschafts- und Lebensweisen und dem notwendigen Paradigmenwechsel werden durch die Konzepte der Industrie 4.0, der Bioökonomie und der Kreislaufwirtschaft nur in Teilen beantwortet. Die scheinbare Absicht besteht vielmehr darin, die Industrie zu stärken, die Produktion zu optimieren und die Rohstoffverfügbarkeiten abzusichern. Wie in der Arbeit gezeigt, reicht dies allerdings nicht für eine global gerechte, langfristig nachhaltige Entwicklung aus. Dennoch stellt der Wandel von einer fossil-basierten Linearwirtschaft zu einer erneuerbaren zirkulären Bioökonomie einen wesentlichen Baustein für eine zukunftsfähige Wirtschaftsweise dar. Die großen Potenziale der Digitalisierung müssen dafür genutzt, demokratisch verhandelt und in den Dienst der nachhaltigen Entwicklung als drängendste Gestaltungsaufgabe des 21. Jahrhunderts gestellt werden.

# Anhang

## I. Reststoffkategorien<sup>218</sup>

1	Landwirtschaftliche Nebenprodukte	Gärreste, Gemüseanbau, Zuckerrübenblätter, Kartoffelkraut, Getreidestroh, Rapsstroh, Sonnenblumenstroh, Körnermaisstroh, Körnermaisspindeln, Hülsenfrüchtestroh, Rindergülle, Rinderjauche, Schweinegülle, Schweinejauche, Hühnerflüssigmist, Stallmist Rinder, Schweinemist, Hühnertrockenkot, Pferdemit, Schafsmist, Ziegenmist, sonstiger Geflügelmist
2	Holz- und forstwirtschaftliche Nebenprodukte	Waldrestholz (Nadel/Laub), Rinde, Sägenebenprodukte und Hobelspäne, Schwarzlauge, Sonstiges Industrierestholz, Altholz
3	Siedlungsabfälle und Klärschlamm	Biogut privaten HH, Grüngut, biog. Anteil Alttextilien, Altpapier, Speiseöle/-fette aus privaten HH, Lebensmittelabfälle im Handel, Küchen-/Kantinenabfälle, Laub, biog. Anteil Straßenkehrschutt, biog. Anteile Kanalgut, Schlämme Nahrungsmittelindustrie, Schlämme Zellstoff-/Leder-/Textilindustrie, Klärschlamm kommunale Kläranlagen, biog. Anteil Abwässer zur anaeroben Behandlung
4	Industrielle Reststoffe	Fleisch-, Fisch-, Obst-, Gemüse-, Kartoffel-, Milch-, Getreide-, Tabakverarbeitung, Reststoffe aus Ölmühen, Stärkeproduktion, Brot-/Backwarenherstellung, Brauereien, Mälzereien, Brennereien, Winzereien, Zucker-, Kakao-, Fertiggerichte-, Kaffee-, Futtermittel-, Hefe-, Bioethanolproduktion, Glycerin aus der Biodieselproduktion
5	Reststoffe von sonstigen Flächen	Halmgut und Holz von Landschaftspflegeflächen, Straßenbegleitgrün/-holz, Bahnbegleitgrün/-holz, Halmgut/Holz von Obstplantagen, Halmgut/Holz von Weinbauflächen, Treibsel-/Schwemmholz

<sup>218</sup> (Schüch & Hennig, 2020, 131)

## II. Properties verschiedener Sub Models

### Sub Model Namplate<sup>219</sup>

unique product identifier
Global Trade Identification Number
relevant commodity codes
Allgemeine Informationen Produkt
Produktbezeichnung des Herstellers
Produktkennung des Herstellers
Produktfamilie des Herstellers
Bestellnummer des Herstellers
Allgemeine Informationen Hersteller
Herstellername
Adresse
E-Mail
Herstellerlogo

### Sub Model Technical Data<sup>220</sup>

Herstellungszeitpunkt
Asset-spezifische Eigenschaften
Seriennummer
Erklärung in Textform
Kennzeichnungen
Produktfoto
Produktklassifikationen
Technische Eigenschaften

---

<sup>219</sup> (Plattform Industrie 4.0, 2020)

<sup>220</sup> (Plattform Industrie 4.0, 2020)

## Sub Model Product Carbon Footprint<sup>221</sup>

PCF Berechnungs Methodologie
PCF CO2Eq (CO2 Equivalent)
Referenzwert für die Berechnung
Menge der Messung
Echzeit-Zyklus-Phase
PCFGoodsAddressHandover
Straße
Hausnummer
PLZ
Stadt
Land
Koordinaten

---

<sup>221</sup> (GHG Protocol Organisation, 2023)

## Sub Model CIRPASS Digital Product Passport (in Ausarbeitung)<sup>222</sup>

Mögliche Track & Trace-Identifikatoren
Name des Unternehmens, eingetragener Handelsname
Global Trade Identification Number oder gleichwertig
TARIC-Code oder gleichwertiger Code
Globale Standortnummer oder gleichwertig
Informationen über den Importeur
Bevollmächtigter Vertreter
Beispiel für mögliche Attribute
Beschreibung des Materials, der Komponente oder des Produkts
Recycelter Inhalt
Bedenkliche Stoffe
Ökologischer Fußabdruck
Leistungsmerkmale
Technische Parameter
Compliance Dokumentation
Anforderungen in Bezug auf bedenkliche Stoffe
Warnhinweise oder Sicherheitsinformationen
Benutzerhandbücher
Anleitungen, sonstige Informationen zur Produkthandhabung
freiwillige EU-Ökolabels
Informationen für Verbraucher und andere Endnutzer über Installation, Verwendung, Wartung, Reparatur, Rückgabe und Entsorgung
Informationen für Demontage, Recycling und Entsorgung

<sup>222</sup> (EU CIRPASS Consortium, 2023)

# Verzeichnisse

## Abbildungsverzeichnis

01. Abb.: Übersicht und Entwurfsprozess basierend auf dem Double Diamond Modell (eigene Darstellung basierend auf Nessler & Hinderling, 2017 und British Design Council, 2005) S. 00
02. Abb.: Fotorealistische Darstellung des geplanten Bioökonomiecampus in Hebertshausen (Quelle: Maier Neuberger Architekten GmbH, 2022) S. 04
03. Abb.: Logo BioVal (Quelle: eigene Darstellung) S. 05
04. Abb.: Verflechtung von globalen Problemen (adaptiert von Capra & Luisi, 2014, 362) S. 07
05. Abb.: Ausmaß und Dynamik des globalen Metabolismus im Anthropozän (Quelle: Haberl et al., 2019, 178) S. 08
06. Abb.: Globale Materialflüsse und gesellschaftliche Bedürfnisse 2020 (Quelle: Circle Economy, 2020, 18) S. 09
07. Abb.: Kumulierte produktionsbasierte CO<sub>2</sub> Emissionen aus der Nutzung von fossilen Energien von 1751 bis 2017 (Quelle: Ritchie, 2019) S. 10
08. Abb.: Donut-Ökonomie mit sozialen und ökologischen Grenzen (adaptiert von J. Lokrantz/Azote basierend auf Steffen et al., 2015) S. 11
09. Abb.: Transformationspotenziale der Nachhaltigkeitsstrategien (Korte et al., 2018, 33) S. 14
10. Abb.: Felder der Bioökonomie (adaptiert von Beer, 2020) S. 16
11. Abb.: Übersicht über die Ziele der deutschen Bioökonomiestrategie (BMBF, 2020, 16) S. 17
12. Abb.: Flussdiagramm der geernteten globalen Biomasseflüsse in Exajoule pro Jahr für das Jahr 2000, links die Nutzung der globalen Landflächen. (Thrän & Moesenfechtel, 2020, 9) S. 18
13. Abb.: Reststoffpotenziale und tatsächliche Nutzung in Deutschland im Jahr 2015 (eigene Darstellung, basierend auf Schüch & Hennig, 2020, 131; basierend auf Brosowski, 2019) S. 21
14. Abb.: Schematische Darstellung der Kreislaufwirtschaft (adaptiert von Ellen MacArthur Foundation, 2013) S. 25
15. Abb.: Europäische Abfallhierarchie und 10R Strategie der Kreislaufwirtschaft (Eigene Darstellung basierend auf Europäische Kommission, 2022; European Environment Agency et al., 2020, 9) S. 26
16. Abb.: Vergleich Circular Economy Szenario zum Business-as-Usual Case beim deutschen Ressourcenverbrauch (RMC) (adaptiert von Ramesohl et al., 2021, 10; basierend auf Kadner et al., 2021) S. 27
17. Abb.: Kaskadennutzung nach Zeit (a) und Wert (b) (Quelle: Bugge et al., 2019, 55) S. 28
18. Abb.: Rohstoffquellen für eine nachhaltige Biomassenutzung (basierend auf Fehrenbach et al., 2017, 46) S. 29
19. Abb.: Kaskadennutzung von Holz (eigene Darstellung basierend auf Höglmeier, 2015, 7) S. 30
20. Abb.: Vision einer digitalen Kreislaufwirtschaft (adaptiert von Ramesohl et al., 2022, 16) S. 33

21. Abb.:	Sozio-technische Transformationsdynamiken in der Multilevel-Perspektive (Geels & Schot, 2007)	S. 34
22. Abb.:	Industrielle Entwicklung über die Zeit (Quelle: Stein, 2020)	S. 35
23. Abb.:	Vereinfachte Darstellung eines Objekts mit zugeordneter Verwaltungsschale (Kun, 2023)	S. 37
24. Abb.:	Dreidimensionales Layer Modell des Referenzarchitekturmodells Industrie 4.0 - RAMI 4.0 (Plattform Industrie 4.0, 2018)	S. 38
25. Abb.:	Beispielansicht einer Verwaltungsschale (Quelle: Heinrich, 2021)	S. 39
26. Abb.:	Materialeinsparung in deutschen Unternehmen in Abhängigkeit des Digitalisierungsgrads (adaptiert von Ramesohl et al., 2021, 22)	S. 40
27. Abb.:	Ansicht des BioBASE Kompass (Quelle: BioBASE, 2023)	S. 42
28. Abb.:	Konzept des Valuechain Generators von vcg.ai (Quelle: vcg.ai, 2023)	S. 43
29. Abb.:	Vorschlag den digitalen Produktpass über Verwaltungsschalen abzubilden (Quelle: Kun, 2023)	S. 48
30. Abb.:	Anforderungen (eigene Darstellung)	S. 51
31. Abb.:	Voraussetzungen für eine digital-ökologische Transformation (adaptiert von Ramesohl et al., 2021, 21)	S. 54
32. Abb.:	BioVal Konzept (eigene Darstellung)	S. 59
33. Abb.:	Mögl. Informationen in einem Materialpass (eigene Darstellung basierend auf Heinrich & Lang, 2019)	S. 61
34. Abb.:	Digitalisierungskonzept basierend Referenzarchitekturmodell Industrie 4.0 (eigene Darstellung)	S. 63
35. Abb.:	Digitales Typenschild als Verbindung zwischen Asset und digitalem Abbild (eigene Darstellung)	S. 64
36. Abb.:	Analyse von Gärresten (Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg, 2008)	S. 68
37. Abb.:	Schematische Darstellung der In- und Outputs einer Mikroalge (Martin & AlgaeRithm, 2022)	S. 69
38. Abb.:	Werthaltigkeit, Funktionalität und Produktionsvolumen mikrobieller Rohstoffe bspw. Mikroalgen (eigene Darstellung, basierend auf Kircher, 2020, 102)	S. 70
39. Abb.:	Listenansicht verschiedener Properties des BioVal Sub Models (eigene Darstellung)	S. 71
40. Abb.:	Darstellung der Collection “Anbieter” im BioVal Sub Model (eigene Darstellung)	S. 72
41. Abb.:	Darstellung der Collection “Biomasse” im BioVal Sub Model (eigene Darstellung)	S. 73
42. Abb.:	Darstellung der Collection “Biochemische Analyse” im BioVal Sub Model (eigene Darstellung, Datenquelle: Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg, 2008)	S. 74
43. Abb.:	Möglicher Vermittlungsprozess zwischen Biogasanlage und Mikroalgenzucht (eigene Darstellung)	S. 75
44. Abb.:	Möglicher Verwertungspfad für Gärreste (eigene Darstellung basierend auf BioBase, 2023)	S. 75

## Literaturverzeichnis

- Achleitner, A.-K. (2018).** *Inkubator*. Gabler Wirtschaftslexikon. Retrieved April 18, 2023, from <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/inkubator-37031/version-260475>
- Balta, D. (2021).** *Vertrauen durch Transparenz*. Seminarreihe "Wertschöpfungsnetzwerke für die Nutzung von Reststoffen in und aus der Landwirtschaft und Nahrungsmittelindustrie als Innovationsmotor für die Bioökonomie". Retrieved March 29, 2023, from <https://www.gotostage.com/channel/4303e381de064355a6e305610a4b207d/recording/8930ced5635041a28e1f8caa3650bfcd/watch>
- Beer, K. (2020).** *Bioökonomie*. Wikipedia. Retrieved June 22, 2023, from <https://de.wikipedia.org/wiki/Bio%C3%B6konomie>
- Bernier, C. (2023).** *Roadmap towards an EU Digital Product Passport — status and next steps* [Vortrag auf der Hannover Messe 2023]. Hannover, Deutschland.
- BioBASE. (2023).** *Schwerpunkte - Innovationsvorhaben 3 - BioBASE*. BioBASE GmbH. Retrieved June 10, 2023, from <https://biobase.at/schwerpunkte-innovationsvorhaben-3/>
- The Biomedical Data Translator Consortium. (2022).** Biolink Model: A universal schema for knowledge graphs in clinical, biomedical, and translational science. *Clinical and Translational Science, Volume 15*(Issue 8), 1848 - 1855. <https://doi.org/10.1111/cts.13302>.
- bioökonomie.de. (2020).** *Was ist Bioökonomie?* Bioökonomie.de. Retrieved June 23, 2023, from <https://biooekonomie.de/themen/was-ist-biooekonomie>
- BMBF. (2014).** Wegweiser Bioökonomie Forschung für biobasiertes und nachhaltiges Wirtschaftswachstum. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) Referat Bioökonomie. [https://www.ufz.de/export/data/2/134696\\_wegweiser-biooekonomie.pdf](https://www.ufz.de/export/data/2/134696_wegweiser-biooekonomie.pdf)
- BMBF. (2016).** Industrie 4.0. Bundesministerium für Bildung und Forschung - BMBF. Retrieved July 19, 2023, from <https://www.bmbf.de/bmbf/de/forschung/digitale-wirtschaft-und-gesellschaft/industrie-4-0/industrie-4-0>



- BMBF. (2020).** *Nationale Bioökonomiestrategie*. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) Referat Nachhaltiges Wirtschaften; Bioökonomie.  
[https://www.bmbf.de/SharedDocs/Publikationen/de/bmbf/7/31576\\_Nationale\\_Biooekonomiestrategie\\_Langfassung.pdf](https://www.bmbf.de/SharedDocs/Publikationen/de/bmbf/7/31576_Nationale_Biooekonomiestrategie_Langfassung.pdf)
- BMU. (2016).** *Klimaschutzplan 2050, Klimaschutzpolitische Grundsätze und Ziele der Bundesregierung*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit.  
[https://www.bmu.de/file-admin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan\\_2050\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/file-admin/Daten_BMU/Download_PDF/Klimaschutz/klimaschutzplan_2050_bf.pdf)
- BMUV. (2020).** *Bioökonomie*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. Retrieved June 9, 2023, from <https://www.bmu.de/WS6845>
- BMUV (2023).** *Was ist ein digitaler Produktpass?* Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. Retrieved June 6, 2023, from <https://www.bmu.de/faq/was-ist-ein-digitaler-produktpass>
- BMUV. (2023).** Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS). BMUV. Retrieved July 12, 2023, from <https://www.bmu.de/themen/wasser-ressourcen-abfall/kreislaufwirtschaft/nationale-kreislaufwirtschaftsstrategie-nkws>
- Boehnert, J. (2018).** *Design, Ecology, Politics: Towards the Ecocene*. Bloomsbury Academic.
- British Design Council. (2005).** Framework for Innovation. British Design Council. Retrieved July 14, 2023, from <https://www.designcouncil.org.uk/our-resources/framework-for-innovation/>
- Brosowski, A. (2019).** *Biomassereststoffmonitoring*. DBFZ | Rohstoffdatenbank. Retrieved May 18, 2023, from <https://webapp.dbfz.de/resource-database/?lang=de>
- Bugge, M. M., Bolwig, S., Hansen, T., & Tanner, A. N. (2019).** Theoretical perspectives on innovation for waste valorisation in the bioeconomy. In *From Waste to Value - Valorisation Pathways for Organic Waste Streams in Circular Bioeconomies* (pp. 51-71). Routledge.
- BUND. (2021).** *Bioökonomie – wirklich nachhaltig oder nur eine Scheinlösung?* Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland. Retrieved June 10, 2023, from <https://www.bund.net/ressourcen-technik/biooekonomie/>

- Capra, F., & Luisi, P. L. (2014). *The Systems View of Life: A Unifying Vision*. Cambridge University Press.
- Carstens, P. (2021). *Erneuerbare Energien: Biogas aus der Algenfabrik* -. GEO. Retrieved June 16, 2023, from <https://www.geo.de/natur/nachhaltigkeit/3806-rtkl-erneuerbare-energien-biogas-aus-der-algenfabrik>
- Circle Economy. (2020). *The Circularity Gap Report 2020*. <https://www.circularity-gap.world/2020>
- Circle Economy. (2021). *CGR 2021*. Circularity Gap Report. Retrieved June 21, 2023, from <https://www.circularity-gap.world/2021>
- Circle Economy. (2023). *CGR 2023*. Circularity Gap Report. Retrieved June 21, 2023, from <https://www.circularity-gap.world/2023>
- Cyrkl. (2023). Online Marktplatz für Abfälle. Cyrkl. Retrieved July 15, 2023, from <https://cyrkl.com/de>
- Deutsche Gesellschaft für Abfallwirtschaft e.V. (2021). *Biogene Reststoffe – ein wesentlicher Stoffstrom für eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft und Bioökonomie*. DGAW-Positionspapier. [https://www.dgaw.de/fileadmin/Presse\\_und\\_Stellungnahmen/2021\\_03\\_05\\_-DGAW\\_Positionspapier\\_Biogene\\_Reststoffe\\_final.pdf](https://www.dgaw.de/fileadmin/Presse_und_Stellungnahmen/2021_03_05_-DGAW_Positionspapier_Biogene_Reststoffe_final.pdf)
- Di Francesco, E. (2020). *Data and Tools for a Sustainable Circular Economy — Circular Conversations*. Circular Conversations. Retrieved March 21, 2023, from <https://www.circularconversations.com/research-series-young-researchers/data-and-tools-for-a-circular-economy>
- DIN Deutsches Institut für Normung. (2020). *SMART Standards*. Deutsches Institut für Normung. Retrieved June 18, 2023, from <https://www.din.de/de/ueber-normen-und-standards/>
- Dost, G., Kummer, B., Matloubi, M., Moesslein, J., & Treick, A. (2022). Ein erforderliches Instrument: Digitale Produkt- und Materialpässe. *EU-Recycling Magazin*, 06/2022, 39.
- Duden Online. (2023). biogen. Duden Online. Retrieved July 19, 2023, from <https://www.duden.de/node/132037/revision/1424297>

- Eclipse Foundation. (2023). *Eclipse BaSyx*. Eclipse projects. Retrieved June 28, 2023, from <https://projects.eclipse.org/projects/dt.basyx>
- Edmonds, J. A., Calvin, K. V., Clarke, L. E., Janetos, A. C., Kim, S. H., Wise, M. A., & McJeon, H. C. (2012). Integrated Assessment Modeling. *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*, Springer. [https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0851-3\\_359](https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0851-3_359)
- Eisenmenger, N. (2023). *Mit der Ressourcenwende in eine klimaneutrale und lebenswerte Zukunft für alle* [Vortrag am Ressourcen Forum Austria 2023]. BOKU Wien, Institut für Soziale Ökologie (SEC).
- Ellen MacArthur Foundation. (2013). *Towards the Circular Economy Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition*. Ellen MacArthur Foundation. [https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/TCE\\_Ellen-MacArthur-Foundation\\_26-Nov-2015.pdf](https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/TCE_Ellen-MacArthur-Foundation_26-Nov-2015.pdf)
- EU CIRPASS Consortium. (2023). *Digital Product Passport*. CIRPASS. Retrieved June 25, 2023, from <https://cirpassproject.eu/>
- EU Joint Research Centre. (2022). *The twin green & digital transition: How sustainable digital technologies could enable a carbon-neutral EU by 2050*. EU Science Hub. Retrieved May 24, 2023, from [https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/twin-green-digital-transition-how-sustainable-digital-technologies-could-enable-carbon-neutral-eu-2022-06-29\\_en](https://joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/twin-green-digital-transition-how-sustainable-digital-technologies-could-enable-carbon-neutral-eu-2022-06-29_en)
- Eurofins Agraranalytik. (2021). *Gärreste*. Eurofins Deutschland. Retrieved June 16, 2023, from <https://www.eurofins.de/agraranalytik/analysen/biogas/gaerreste/>
- Europäische Kommission. (2018). *A Sustainable Bioeconomy for Europe: Strengthening the Connection Between Economy, Society and the Environment : Updated Bioeconomy Strategy*. Publications Office of the European Union.
- Europäische Kommission. (2020). *Eine europäische Datenstrategie*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX:52020DC0066>

- Europäische Kommission. (2020). Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft. EUR-lex. Retrieved July 12, 2023, from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=COM:2020:98:FIN>
- Europäische Kommission. (2022). *Abfallhierarchie*. EUR-Lex. Retrieved June 18, 2023, from <https://eur-lex.europa.eu/DE/legal-content/glossary/waste-hierarchy.html>
- Europäische Kommission. (2022). Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL establishing a framework for setting ecodesign requirements for sustainable products and repealing Directive 2009/125/EC. [https://environment.ec.europa.eu/publications/proposal-ecodesign-sustainable-products-regulation\\_de](https://environment.ec.europa.eu/publications/proposal-ecodesign-sustainable-products-regulation_de)
- European Environment Agency, EPA Network, ISPRA, & Sistema Nazionale per la Protezione dell' Ambiente. (2020). *Circular Economy Monitoring Principles*. European Environment Agency. <https://www.isprambiente.gov.it/files2021/notizie/bellagio-declaration-final.pdf>
- Feess, E., & Krieger, W. (2018). Senke. Gabler Wirtschaftslexikon. Retrieved July 19, 2023, from <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/senke-46279/version-269564>
- Fehrenbach, H., Köppen, S., Kauertz, B., Detzel, A., Wellenreuther, F., Breitmayer, E., Essel, R., Carus, M., Bienge, K., & von Geibler, J. (2017). *BIOMASSEKASKADEN Mehr Ressourceneffizienz durch stoffliche Kaskadennutzung von Biomasse – von der Theorie zur Praxis*. Umweltbundesamt. from <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/biomassekaskaden-mehr-ressourceneffizienz-durch>
- FESTO. (2023). *BionicCellFactory*. Festo. Retrieved June 16, 2023, from [https://www.festo.com/de/de/e/ueber-festo/forschung-und-entwicklung/bionic-learning-network/bioniccellfactory-id\\_1659895/](https://www.festo.com/de/de/e/ueber-festo/forschung-und-entwicklung/bionic-learning-network/bioniccellfactory-id_1659895/)
- GHG Protocol Organisation. (2023). *ghgprotocol.org*. Greenhouse Gas Protocol. Retrieved March 20, 2023, from <https://ghgprotocol.org/>
- Geels, F. W., & Schot, J. W. (2007). Typology of sociotechnical transition pathways. In *Research Policy* (36th ed., Vol. 3, pp. 399-417).

- Götz, T., Adisorn, T., & Tholen, L. (2021). Der Digitale Produktpass als Politik-Konzept. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie gGmbH.
- Graf, P. (2021). *Die Werkzeuge der Bioökonomie*. Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Referat Nachhaltiges Wirtschaften; Bioökonomie. <https://tinyurl.com/8vs9v4e9>
- Grösser, S. (2018). *Digitaler Zwilling*. Gabler Wirtschaftslexikon. Retrieved June 14, 2023, from <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/digitaler-zwilling-54371/version-277410>
- Haberl, H., Wiedenhofer, D., Paulik, S., Krausmann, F., Müller, D. B., & Fischer-Kowalski, M. (2019). Contributions of sociometabolic research to sustainability science. In *Nature Sustainability* (2nd ed., Vol. 3, pp. 173-184). Nature. 10.1038/s41893-019-0225-2
- Heinrich, C. (2021). *Die Verwaltungsschale als standardisierter Digitaler Zwilling*. Xitaso. Retrieved March 20, 2023, from <https://xitaso.com/die-verwaltungsschale-als-standardisierter-digitaler-zwilling/>
- Heinrich, M., & Lang, W. (2019). *Materials Passports - Best Practice Innovative Solutions for a Transition to a Circular Economy in the Built Environment*. Technische Universität München, Fakultät für Architektur.
- Herrmann, U. (2022). *Das Ende des Kapitalismus: Warum Wachstum und Klimaschutz nicht vereinbar sind - und wie wir in Zukunft leben werden*. Kiepenheuer & Witsch.
- Hesse, W. (2005). Ontologie(n). Gesellschaft für Informatik. Retrieved July 17, 2023, from <https://gi.de/informatiklexikon/ontologien>
- Hochschule für Bildende Künste Braunschweig. (2023). Transformation Design. HBK Braunschweig. Retrieved July 16, 2023, from <https://www.hbk-bs.de/studium/studienangebot/transformation-design/>
- Höglmeier, K. (2015). *Holznutzung in Kaskaden: Ansätze zur Potentialanalyse und zur Weiterentwicklung der ökobilanziellen Bewertung*. Technische Universität München.

- Holicki, R. (2021). *Integrationsplattformen als Middleware für die Industrie 4.0*. SEEBURGER Blog. Retrieved June 6, 2023, from <https://blog.seeburger.com/de/die-seeburger-integrationsplattform-als-middleware-fuer-die-industrie-4-0/>
- Hrouda, S. (2021). *Digitale Rohstoffbörse für nachhaltige Rohstoffe*. Seminarreihe "Wertschöpfungsnetzwerke für die Nutzung von Reststoffen in und aus der Landwirtschaft und Nahrungsmittelindustrie als Innovationsmotor für die Bioökonomie". Retrieved March 29, 2023, from <https://www.gotostage.com/channel/4303e381de064355a6e305610a4b207d/recording/3a2c73c389264dd2af97521df83c5671/watch>
- Industrial Digital Twin Association e.V. (2023). *admin-shell-io* by IDTA. GitHub. Retrieved June 28, 2023, from <https://github.com/admin-shell-io>
- Industrial Digital Twin Association e.V. (2023). *Der Standard für den Digitalen Zwilling*. IDTA. Retrieved June 16, 2023, from <https://industrialdigitaltwin.org/>
- Industrial Digital Twin Association e.V. (2023). *Submodels*. IDTA. Retrieved July 2, 2023, from <https://industrialdigitaltwin.org/en/content-hub/submodels>
- Jansen, M. (2022). *Wie wichtig sind Daten? Der Digitale Produktpass (DPP)*. Retrieved 06 06, 2023, from <https://labofrent.de/wp-content/uploads/2022/11/7-Maike-Jansen-Wuppertal-institut.pdf>
- Jansen, M., Gerstenberger, B., Bitter-Krahe, J., Berg, H., Sebestyén, J., & Schneider, J. (2022). Current approaches to the Digital Product Passport for a Circular Economy. In *Wuppertal Papers* (198th ed.). Wuppertal Institute.
- Jochem, M., Sivalingam, K., & Angel, N. (2022). *Unternehmensübergreifende Kooperation im Datenraum Industrie 4.0*. Bayern Innovativ. Retrieved June 23, 2023, from <https://www.bayern-innovativ.de/de/seite/unternehmensuebergreifende-kooperation-im-datenraum-industrie-4-0>
- Kircher, M. (2020). Bioökonomie der Mikroorganismen. In *Das System Bioökonomie* (pp. 87-106). Springer Nature.
- Körner, C. (2021). *RDF / RDFS - Grundlagen der Technischen Dokumentation*. dictaJet. Retrieved June 29, 2023, from <https://www.dictajet.de/rdf-rdfs/>

- Korte, F., Behrendt, S., & Göll, E. (2018). *Effizienz, Konsistenz, Suffizienz: strategieberichtliche Betrachtung für eine Green Economy*. Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung.
- Kun, C. A. (2023). *Digital Data Chain* [Vortrag auf der Hannovermesse 2023].
- Lackes, R., & Siepermann, M. (2018). *Middleware*. Gabler Wirtschaftslexikon. Retrieved June 6, 2023, from <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/middleware-40800/version-264177>
- Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg. (2008). *Inhaltsstoffe von Gärprodukten und Möglichkeiten zu ihrer geordneten pflanzenbaulichen Verwertung*. Projektbericht, S. 2-7. Retrieved June 16, 2023, from [http://www.kompost.de/fileadmin/docs/Archiv/Duenger\\_udn\\_Substrate/Duengewirkung\\_4\\_09\\_1u2.pdf](http://www.kompost.de/fileadmin/docs/Archiv/Duenger_udn_Substrate/Duengewirkung_4_09_1u2.pdf)
- Malins, C., Harrison, P., Searle, S., Baral, A., Turley, D., & Hopwood, L. (2014). *Wasted: Europe's untapped resource*. <http://europeanclimate.org/wp-content/uploads/2014/02/WASTED-final.pdf>
- Martin, J. (2022). *Integration von Mikroalgen in die Wertschöpfungskette* [Vortrag].
- Moxon, S. T. (2022). *Biolink Model*. GitHub. Retrieved June 29, 2023, from <https://biolink.github.io/biolink-model/#biolink-model>
- Nessler, D., & Hinderling, V. (2017). Updated Double Diamond. Medium. Retrieved July 14, 2023, from <https://medium.com/digital-experience-design/how-to-apply-a-design-thinking-hcd-ux-or-any-creative-process-from-scratch-b8786efb812>
- Otto A. Müller Recycling GmbH. (2021). *Recycling 4.0*. Seminarreihe "Wertschöpfungsnetzwerke für die Nutzung von Reststoffen in und aus der Landwirtschaft und Nahrungsmittelindustrie als Innovationsmotor für die Bioökonomie". Retrieved 03 30, 2023, from <https://www.gotostage.com/channel/4303e381de064355a6e305610a4b207d/recording/9a8b8b5d6a3c48f6b155210098f4848a/watch>
- Panse, F. (2017). *Einführung Informationsintegration - Komplexe Informationssysteme*. Verteilte Systeme und Informationssysteme (VSIS). Retrieved 06 06, 2023, from [https://vsis-www.informatik.uni-hamburg.de/oldServer/teaching/ss-17/ii/fohlen/II\\_Introduction\\_2017\\_Handout.pdf](https://vsis-www.informatik.uni-hamburg.de/oldServer/teaching/ss-17/ii/fohlen/II_Introduction_2017_Handout.pdf)

- Parrique, T. (2023). The Rise in Popularity of Degrowth. In *Imagining Europe Beyond Growth* (May 2023 ed., pp. 5-8). European Environmental Bureau, Think Tank Oikos, Green European Journal. <https://eeb.org/wp-content/uploads/2023/05/Imagining-Europe-Beyond-Growth-May-2022-1.pdf>
- Plattform Industrie 4.0. (2018). *RAMI 4.0*. Plattform Industrie 4.0. Retrieved July 3, 2023, from <https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/rami40-eine-einfuehrung.html>
- Plattform Industrie 4.0. (2019). *Industrie 4.0*. Plattform Industrie 4.0. Retrieved June 23, 2023, from <https://www.plattform-i40.de/IP/Navigation/DE/Industrie40/WasIndustrie40/was-ist-industrie-40.html>
- Plattform Industrie 4.0. (2020). *Details of the Asset Administration Shell* (Part 1 - The exchange of information between partners in the value chain of Industrie 4.0 ed.). Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz.
- Ramesohl, S., Gunnemann, A., & Berg, H. (2021). *Digitalisierung gestalten – Transformation zur Nachhaltigkeit ermöglichen*. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. [https://huawei-studie.de/wp-content/uploads/2022/01/Huawei\\_Studie\\_Transformation-zur-Nachhaltigkeit\\_2021\\_DE.pdf](https://huawei-studie.de/wp-content/uploads/2022/01/Huawei_Studie_Transformation-zur-Nachhaltigkeit_2021_DE.pdf)
- Ramesohl, S., Sebestyén, J., & Berg, H. (2022). *Datenökosysteme für die Nachhaltigkeits-transformation: Studie im Rahmen des Projekts „Shaping the Digital Transformation“*. Wuppertal Institut.
- Raschka, A., & Carus, M. (2012). *Stoffliche Nutzung von Biomasse Basisdaten für Deutschland, Europa und die Welt* (Vol. Ökologische Innovationspolitik – mehr Ressourceneffizienz und Klimaschutz durch nachhaltige stoffliche Nutzung von Biomasse). nova-Institut.
- Rat der Europäischen Union. (2022). *Neue Vorschriften für die Nachhaltigkeitsberichterstattung*. Rat der Europäischen Union. Retrieved June 18, 2023, from <https://europa.eu/!DhCm3x>
- Raworth, K. (2018). *Die Donut-Ökonomie* (H. Freundl & S. Schmid, Trans.). Carl Hanser Verlag.



- Reich, M. (2021). *Reststoffe in der Bioökonomie*. Seminarreihe "Wertschöpfungsnetzwerke für die Nutzung von Reststoffen in und aus der Landwirtschaft und Nahrungsmittelindustrie als Innovationsmotor für die Bioökonomie". Retrieved March 22, 2023, from <https://www.gotostage.com/channel/4303e381de064355a6e305610a4b207d/recording/9a8b8b5d6a3c48f6b155210098f4848a/watch>
- Ressourcen Forum Austria. (2023). *Produzierende Wirtschaft*. Ressourcen Forum Austria. Retrieved May 30, 2023, from <https://www.ressourcenforum.at/thema/produzierende-wirtschaft/>
- Ritchie, H. (2019). *Who has contributed most to global CO2 emissions?* Our World in Data. Retrieved May 31, 2023, from <https://ourworldindata.org/contributed-most-global-co2>
- Rübberdt, K. (2020). Digitale Bioökonomie. In *Das System Bioökonomie* (pp. 147-161). Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg. 10.1007/978-3-662-60730-5
- Sachverständigenrat Bioökonomie Bayern. (2022). *Kreislaufwirtschaft im Kontext der Bioökonomie*. Sachverständigenrat Bioökonomie Bayern. [https://www.biooekonomierat-bayern.de/images/2022/Themenpapiere2022/2022\\_Biokonomie\\_und\\_Kreislaufwirtschaft.pdf](https://www.biooekonomierat-bayern.de/images/2022/Themenpapiere2022/2022_Biokonomie_und_Kreislaufwirtschaft.pdf)
- Schneidewind, U. (2018). *Die Große Transformation: Eine Einführung in die Kunst gesellschaftlichen Wandels* (H. Welzer & K. Wiegandt, Eds.). FISCHER E-Books.
- Schüch, A., & Hennig, C. (2020). Abfall- und reststoffbasierte Bioökonomie. In *Das System Bioökonomie* (pp. 125-146). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-662-60730-5\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-662-60730-5_8)
- Science Based Targets. (2023). *Science Based Targets*. Science Based Targets: Ambitious corporate climate action. Retrieved July 6, 2023, from <https://sciencebasedtargets.org/>
- Standardization Council Industrie 4.0. (2022). *RAMI 4.0*. Standardization Council Industrie 4.0. Retrieved June 23, 2023, from <https://www.sci40.com/english/thematic-fields/rami4-0/>
- Stein, F. (2020). *IoT & Industrie 4.0*. b.telligent. Retrieved June 23, 2023, from <https://www.btelligent.com/themen/industrie-40/>
- Thrän, D., & Moesenfechtel, U. (Eds.). (2020). *Das System Bioökonomie*. Springer Berlin.

- Umweltbundesamt. (2019). *Rebound-Effekte*. Umweltbundesamt. Retrieved June 20, 2023, from <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/oekonomische-rechtliche-aspekte-der/rebound-effekte>
- UNEP IRP Global Material Flows Database. (2023). *Global Material Flows Database | Resource Panel*. International Resource Panel. Retrieved May 30, 2023, from <https://www.resourcepanel.org/global-material-flows-database>
- vcg.ai. (2023). *AI & Big Data platform for circular bioeconomy*. vcg.ai. Retrieved June 23, 2023, from <https://vcg.ai/>
- von Eichhorn, C. (2023). Klimaschutz mit CO<sub>2</sub>-Zertifikaten: Was sich ändern muss. Süddeutsche Zeitung. Retrieved July 17, 2023, from <https://www.sueddeutsche.de/wissen/klimaschutz-co2-zertifikate-entwaldung-1.5744614?reduced=true>
- Vrzel, J. (2022). *The Biological Cycle*. Circular Innovation Lab. Retrieved June 18, 2023, from <https://www.circularinnovationlab.com/post/the-circular-economy-basics-series-the-biological-cycle>
- Wendland, M., & Lichti, F. (2012). Biogasgärreste - Einsatz von Gärresten aus der Biogasproduktion als Düngemittel. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft Institut für Agrarökologie, Ökologischen Landbau und Bodenschutz. [https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ipz/dateien/leitfaden\\_2012-03\\_biogasforum.pdf](https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/ipz/dateien/leitfaden_2012-03_biogasforum.pdf)
- Wübbenhorst, K. (2018). *Cluster*. Gabler Wirtschaftslexikon. Retrieved April 18, 2023, from <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/cluster-30562/version-254140>





