

Entwicklungsbegleitende Nachhaltigkeitsanalysen im Querschnittsprojekt zur Fördermaßnahme „Digital GreenTech“

Freiburg, 16.10.2023

Autorinnen und Autoren

Dr. Martin Möller
Öko-Institut e.V.

Dr. Andreas R. Köhler
Öko-Institut e.V.

Dipl.-Ing. Ran Liu
Öko-Institut e.V.

Dipl.-Ing. Jens Gröger
Öko-Institut e.V.

Kontakt

info@oeko.de
www.oeko.de

Geschäftsstelle Freiburg

Postfach 17 71
79017 Freiburg

Hausadresse

Merzhauser Straße 173
79100 Freiburg
Telefon +49 761 45295-0

Büro Berlin

Borkumstraße 2
13189 Berlin
Telefon +49 30 405085-0

Büro Darmstadt

Rheinstraße 95
64295 Darmstadt
Telefon +49 6151 8191-0

Inhaltsverzeichnis

| | |
|--|-----------|
| Abbildungsverzeichnis | 6 |
| Tabellenverzeichnis | 7 |
| Abkürzungsverzeichnis | 8 |
| Zusammenfassung | 9 |
| Summary | 11 |
| 1 Hintergrund und Zielsetzung | 13 |
| 2 Methodische Vorgehensweise | 15 |
| 3 Ergebnisse der Ex-Ante-Analyse | 17 |
| 3.1 Projektcluster „Forstwirtschaft“ | 17 |
| 3.2 Projektcluster „Kreislaufwirtschaft“ | 18 |
| 3.3 Projektcluster „Wasserwirtschaft“ | 19 |
| 3.4 Zwischenfazit zu den wichtigsten Erkenntnissen | 19 |
| 4 Ergebnisse der Selbstevaluierungen | 21 |
| 4.1 Projektcluster „Forstwirtschaft“ | 21 |
| 4.1.1 DiGeBaST | 21 |
| 4.1.2 FORESTCARE | 22 |
| 4.2 Projektcluster „Kreislaufwirtschaft“ | 23 |
| 4.2.1 CYCLOPS | 23 |
| 4.2.2 DigInform | 24 |
| 4.2.3 DiKueRec | 26 |
| 4.2.4 DiRecLIB | 27 |
| 4.2.5 ODiWiP | 28 |
| 4.3 Projektcluster „Wasserwirtschaft“ | 29 |
| 4.3.1 DecS | 29 |
| 4.3.2 K2I | 30 |
| 4.3.3 KIKI | 31 |
| 4.3.4 MOVE | 32 |
| 4.3.5 i-SEWER | 32 |
| 4.4 Zwischenfazit zu den wichtigsten Erkenntnissen | 34 |
| 5 Ergebnisse der vertiefenden Nachhaltigkeitsanalysen | 35 |
| 5.1 DecS | 35 |

| | | |
|------------|--|-----------|
| 5.1.1 | Zielsetzung und Abgrenzung zur Selbstevaluierung | 35 |
| 5.1.2 | Methodische Vorgehensweise und grundlegende Annahmen | 36 |
| 5.1.2.1 | Systemgrenzen | 36 |
| 5.1.2.2 | Funktionelle Einheit | 36 |
| 5.1.2.3 | Wirkungskategorien | 36 |
| 5.1.3 | Ergebnisse | 37 |
| 5.1.3.1 | Modellierung komplexer digitaler Produkte | 37 |
| 5.1.3.2 | Aktualisierung und Konsolidierung der Belastungspotenziale | 38 |
| 5.1.3.3 | Entlastungspotenziale bei Kläranlagen mit Aktivkohle-Adsorption (Fallbeispiel Kläranlage Dülmen) | 39 |
| 5.1.3.4 | Entlastungspotenziale bei Kläranlagen mit Ozonierung (Fallbeispiel Kläranlage Bad Sassendorf) | 40 |
| 5.1.3.5 | Ermittlung der Nettoentlastungen | 40 |
| 5.1.3.6 | Hochskalierung der Be- und Entlastungspotenziale auf Deutschland | 41 |
| 5.1.4 | Diskussion der Ergebnisse | 42 |
| 5.2 | DiGeBaST | 43 |
| 5.2.1 | Zielsetzung und Abgrenzung zur Selbstevaluierung | 43 |
| 5.2.2 | Methodische Vorgehensweise und grundlegende Annahmen | 43 |
| 5.2.2.1 | Systemgrenzen | 43 |
| 5.2.2.2 | Funktionelle Einheit | 44 |
| 5.2.2.3 | Wirkungskategorien | 44 |
| 5.2.3 | Ergebnisse | 44 |
| 5.2.3.1 | Modellierung komplexer digitaler Produkte und Verbrauchsmaterialien | 44 |
| 5.2.3.2 | Vermeidung von Verlustholz | 46 |
| 5.2.3.3 | Aktualisierung und Konsolidierung der Be- und Entlastungspotenziale für Baden-Württemberg | 47 |
| 5.2.3.4 | Hochskalierung der Be- und Entlastungspotenziale auf Deutschland | 48 |
| 5.2.4 | Diskussion der Ergebnisse | 50 |
| 5.3 | DiRecLIB | 51 |
| 5.3.1 | Zielsetzung und Abgrenzung zur Selbstevaluierung | 51 |
| 5.3.2 | Methodische Vorgehensweise und grundlegende Annahmen | 51 |
| 5.3.2.1 | Systemgrenzen | 51 |
| 5.3.2.2 | Funktionelle Einheit | 52 |
| 5.3.3 | Ergebnisse | 52 |
| 5.3.3.1 | Kurzbeschreibung klassischer LIB-Recyclingverfahren | 52 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 5.3.4 | Umweltauswirkungen klassischer LIB-Recyclingverfahren | 58 |
| 5.3.4.1 | Umweltauswirkungen pyrometallurgischer Verfahrensrouten | 60 |
| 5.3.4.2 | Umweltauswirkungen hydrometallurgischer Verfahrensrouten | 61 |
| 5.3.5 | Diskussion der Ergebnisse | 64 |
| 6 | Schlussfolgerungen und Ausblick | 64 |
| 6.1 | Einordnung der Nachhaltigkeitsgewinne der betrachteten Forschungsvorhaben | 64 |
| 6.2 | Reflektionen und Rückschlüsse zur methodischen Vorgehensweise | 65 |
| 6.3 | Ausblick und prioritärer Forschungsbedarf | 66 |
| | Literaturverzeichnis | 67 |
| | Anhang | 72 |
| | Anhang I. Dossiers der Ex-Ante-Analyse für die Forschungsvorhaben des Projektclusters "Forstwirtschaft" | 72 |
| | Anhang II. Dossiers der Ex-Ante-Analyse für die Forschungsvorhaben des Projektclusters "Kreislaufwirtschaft" | 79 |
| | Anhang III. Dossiers der Ex-Ante-Analyse für die Forschungsvorhaben des Projektclusters "Wasserlaufwirtschaft" | 99 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|----------------|--|----|
| Abbildung 2-1 | Die 17 Ziele für eine nachhaltige Entwicklung der Agenda 2030 | 15 |
| Abbildung 2-2 | Dreistufige Vorgehensweise der Nachhaltigkeitsanalysen im Begleitforschungsvorhaben „NetDGT“ | 16 |
| Abbildung 5-1: | Waldflächen in Deutschland und deren Differenzierung nach Eigentumsart | 49 |
| Abbildung 5-2 | Systemgrenze des Referenzszenarios für das DiRecLIB-Verfahren | 52 |
| Abbildung 5-3 | Prognose zur Rücklaufmenge gebrauchter LIB aus unterschiedlichen Anwendungen | 53 |
| Abbildung 5-4 | In kommerziellen LIB verwendete Kathodenmaterialien und deren typische Recyclingmethoden | 54 |
| Abbildung 5-5 | Rezyklatmengen aus LIB-Recycling in der EU nach Material | 55 |
| Abbildung 5-6 | Grundsätzliche Prozessrouten beim klassischen LIB-Recyclingverfahren | 55 |
| Abbildung 5-7 | Kombinationen und Abfolge verschiedener LIB-Recyclingverfahren | 56 |
| Abbildung 5-8 | Beispiel für ein hydrochemisches Recyclingverfahren für Lithium-Ionen-Batterien: „Scalable Cathode-healing Process“ | 58 |
| Abbildung 5-9 | Ökobilanzieller Vergleich pyrometallurgischer und hydrometallurgischer Verfahrensrouten des LIB-Recyclings | 59 |
| Abbildung 5-10 | Beispiel für pyrometallurgisches LIB-Recycling: ReLion Verfahren | 61 |
| Abbildung 5-11 | Treibhausgaspotenzial des LithoRec II Verfahren für NMC-Batterien mit Aluminiumgehäuse | 62 |
| Abbildung 5-12 | Beispiel für hydrochemisches LIB-Recycling: Revolt Verfahren | 63 |
| Abbildung 5-13 | Relative Anteile der verschiedenen Prozessschritte an den Umweltauswirkungen des Revolt Verfahrens nach ReCiPe 2016 v1.1 | 63 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|---------------|---|----|
| Tabelle 3-1: | Ergebnisse der Ex-Ante-Analysen für die betrachteten Forschungsvorhaben mit einer Übersicht der relevanten Belastungspotenziale (B) und Entlastungspotenziale (E) | 20 |
| Tabelle 4-1: | Ergebnisse der Selbstevaluierung mit Angaben zu Belastungspotenzial, Entlastungspotenzial und Nettoentlastung bezüglich CO ₂ -Fußabdruck | 34 |
| Tabelle 5-1: | Gegenüberstellung der Ergebnisse aus Selbstevaluierung und vertiefender Nachhaltigkeitsanalyse für die Belastungspotenziale am Beispiel des Treibhausgaspotenzials | 38 |
| Tabelle 5-2: | Gegenüberstellung der Ergebnisse aus Selbstevaluierung und vertiefender Nachhaltigkeitsanalyse für die Entlastungspotenziale bei Kläranlagen mit Aktivkohle-Behandlung (Fallbeispiel Kläranlage Dülmen) | 39 |
| Tabelle 5-3: | Gegenüberstellung der Ergebnisse aus Selbstevaluierung und vertiefender Nachhaltigkeitsanalyse für die Entlastungspotenziale bei Kläranlagen mit Ozonierung (Fallbeispiel Kläranlage Bad Sassendorf) | 40 |
| Tabelle 5-4: | Nettoentlastung für die Fallbeispiele Dülmen (Aktivkohle-Behandlung) und Bad Sassendorf (Ozonierung) | 40 |
| Tabelle 5-5: | Anzahl registrierter Kläranlagen und Jahresabwassermenge als Bemessungsgrundlagen für die Hochskalierung der Be- und Entlastungspotenziale | 41 |
| Tabelle 5-6: | Ergebnisse der Hochskalierung der Be- und Entlastungspotenziale sowie der Nettoentlastungen auf Deutschland | 42 |
| Tabelle 5-7: | Gegenüberstellung der Ergebnisse aus Selbstevaluierung und vertiefender Nachhaltigkeitsanalyse für die Belastungspotenziale | 47 |
| Tabelle 5-8: | Gegenüberstellung der Ergebnisse aus Selbstevaluierung und vertiefender Nachhaltigkeitsanalyse für die Entlastungspotenziale | 48 |
| Tabelle 5-9: | Gegenüberstellung der LCA-Ergebnisse für pyrometallurgische und hydrometallurgische Verfahrensrouten des LIB-Recyclings | 60 |
| Tabelle 5-10: | Vergleich der Ökobilanz-Ergebnisse des LithoRec II Verfahren für 2015 und 2016 | 62 |

Abkürzungsverzeichnis

| | |
|-----------------|---|
| ADP | Abiotischer Ressourcenverbrauch (<i>engl. Adibiotic Depletion Potential</i>) |
| AP | Versauerungspotenzial (<i>engl. Acidification Potential</i>) |
| BMBF | Bundesministerium für Bildung und Forschung |
| CO ₂ | Kohlendioxid |
| EP | Eutrophierungspotenzial (<i>engl. Eutrophication Potential</i>) |
| F&E | Forschung und Entwicklung |
| FCKW | Fluorchlorkohlenwasserstoffe |
| fm | Festmeter |
| GK | Größenklassen |
| GWP | Treibhausgaspotenzial (<i>engl. Global Warming Potential</i>) |
| ha | Hektar |
| IMS | Informationsmanagementsystems |
| IT | Informationstechnik |
| KEA | Kumulierter Energieaufwand |
| KA | Kläranlage |
| KI | Künstliche Intelligenz |
| LC-HRMS | hochauflösender Massenspektrometrie |
| LIB | Lithium-Ionen-Batterien |
| ML | Maschinelles Lernen |
| MWh | Megawattstunden |
| NetDGT | Netzwerk DigitalGreenTech |
| NCM 811 | Lithium-Nickel-Cobalt-Mangan-Oxid (LiNi _{0,8} Co _{0,1} Mn _{0,1} O ₂) |
| o.R. | ohne Rinde |
| PAK | Pulverisierte Aktivkohle |
| PEF | Product Environmental Footprint |
| PMMA | Polymethylmethacrylat |
| POCP | Photooxidantienpotenzial (<i>engl. Photochemical Ozone Creation Potential</i>) |
| SAK | Spektraler Absorptionskoeffizient |
| SDG | Sustainable Development Goal |
| THG | Treibhausgase |

Zusammenfassung

Mit der Digitalisierung, also dem Einsatz moderner Informations- und Kommunikationstechnik, sind große Erwartungen verbunden, die Effizienz anderer technischer Prozesse und wirtschaftlicher Transaktionen zu steigern. Gleichzeitig wird immer deutlicher, dass der Einsatz digitaler Technologien nicht nur positive Nachhaltigkeitseffekte mit sich bringt, sondern auch Rohstoffe und Energie benötigt. Im Zuge der technologischen Innovation stellt sich vor diesem Hintergrund die zentrale Frage, ob digitale Lösungen im Kontext ihrer Anwendung und unter Berücksichtigung aller damit verbundenen Be- und Entlastungspotenziale zu einer Nettoentlastung der Umweltwirkungen führen können.

Um dieser Frage nachzugehen, wurden im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Begleitforschungsprojekts „Netzwerk Digital GreenTech“ Nachhaltigkeitsanalysen für insgesamt zwölf „Digital GreenTech“-Forschungsvorhaben durchgeführt. Dabei sollten zum einen die Belastungspotenziale der zum Einsatz kommenden Digitaltechnologien, d. h. insbesondere der Rohstoffverbrauch bei der Herstellung und der Energiebedarf bei der Nutzung, berücksichtigt werden. Andererseits waren auch die zu erwartenden positiven Nachhaltigkeitseffekte bei der Nutzung der neuen Digitaltechnologien in ihren angedachten Anwendungskontext Gegenstand der Untersuchung. Zu diesen Entlastungspotenzialen zählen beispielsweise Effizienzsteigerungen in industriellen Prozessen und die Ermöglichung der Substitution von Primär- durch Sekundärrohstoffe, die zu Einsparungen von Treibhausgasemissionen führen können.

Für die konkrete Durchführung der Nachhaltigkeitsanalysen wurde in NetDGT eine gestufte Vorgehensweise angewandt, bei der je nach technologischem Reifegrad des Analyseobjekts und damit je nach Datenlage unterschiedliche, niedrigschwellige und möglichst richtungssichere Instrumente zum Einsatz kamen. In einer ersten Stufe wurde für alle Forschungsvorhaben eine „Ex-ante-Analyse“ durch das Öko-Institut angefertigt. Diese initialen Untersuchungen erfassten alle zu Projektbeginn als relevant erachteten Be- und Entlastungspotenziale mit Blick auf die Sustainable Development Goals der Agenda 2030. Die zugehörigen Ergebnisse bildeten die Grundlage für die Festlegung des Untersuchungsrahmens („Scoping“), mit dem die folgenden Analyseschritte festgelegt sowie erste Arbeitshypothesen zu möglichen Be- und Entlastungspotenzialen aufgestellt wurden.

Aufbauend auf dem Scoping wurden in einer zweiten Stufe die als relevant identifizierten Nachhaltigkeitsaspekte quantitativ analysiert. Hierfür wurden die Forschungsvorhaben aufgefordert, die Analysen eigenverantwortlich durchzuführen. Um sie bei dieser Selbstevaluierung bestmöglich zu unterstützen, wurden geeignete Bewertungsinstrumente vorgeschlagen und Methoden erläutert, die für alle relevanten Nachhaltigkeitsaspekte eine möglichst weitgehende Quantifizierung erlauben.

In einer dritten Stufe wurden schließlich drei ausgewählte Forschungsprojekte einer vertiefenden Nachhaltigkeitsanalyse durch das Öko-Institut unterzogen. Gegenstand dieses Analyseschritts war eine Quantifizierung aller relevanten Nachhaltigkeitseffekte auf der Grundlage lebenszyklusbasierter Analysen. Wie schon bei der Selbstevaluierung wurde auch bei der dritten Stufe eine Differenzbetrachtung zwischen dem „Digitalisierungsszenario“ und dem „Referenzszenario“ vorgenommen. Im Rahmen einer Beitragsanalyse wurden jeweils diejenigen Systemkomponenten („Stellschrauben“) identifiziert, die für den größten Beitrag zum Gesamtergebnis verantwortlich sind und Ansatzpunkte zur Optimierung der Nachhaltigkeitsgewinne herausgearbeitet.

In der Gesamtschau der Nachhaltigkeitsanalysen in den betrachteten Forschungsvorhaben zeigte sich, dass zwar in fast allen Fällen durch die Neuentwicklung Nachhaltigkeitsgewinne in Form von Netto-Treibhausgasreduktionen zu erwarten sind, die Größenordnungen der Entlastungspotenziale jedoch stark variieren. Besonders große Hebelwirkungen im Hinblick auf Treibhausgasreduktion ergaben sich bei Digitaltechnologien, die eine Reduzierung des Einsatzes CO₂-intensiver Materialien und Betriebsstoffe (z. B. Beton, Aktivkohle) oder industrieller Prozesse (z. B. Recycling von Kühlgeräten und Lithium-Ionen-Batterien) ermöglichen. Diesbezüglich wiesen die Ergebnisse der Selbstevaluierungen bzw. der vertiefenden Nachhaltigkeitsanalysen darauf hin, dass im Falle einer erfolgreichen Hochskalierung der Neuentwicklung auf ganz Deutschland Treibhausgasreduktion bis in den dreistelligen Millionenbereich (bezogen auf *Kilogramm* CO₂-Äquivalente) möglich sind.

Die genannten Treibhausgasreduktionen relativieren sich jedoch, wenn man sie in Relation zu den notwendigen CO₂-Einsparungen setzt, um die für Deutschland geltenden Klimaschutzziele zu erreichen. Demnach müssen im Zeitraum bis 2025 jährlich 23 Mio. *Tonnen* CO₂-Äquivalente eingespart werden, im Zeitraum 2026 bis 2030 steigt die notwendige CO₂-Reduktion sogar auf 46 Mio. *Tonnen* CO₂-Äquivalente pro Jahr. Vor dem Hintergrund der genannten Reduktionsziele wird deutlich, dass die in den Nachhaltigkeitsanalysen betrachteten Digitaltechnologien jeweils nur einen Beitrag maximal im Promillebereich leisten können.

Dennoch ist jeder Beitrag in diesem Zusammenhang wertvoll und unverzichtbar, insbesondere dann, wenn durch die Neuentwicklung weitere Nachhaltigkeitsgewinne entstehen können. In diesem Zusammenhang ist z. B. eine durch digitale Technologien ermöglichte Reduktion des Insektizideinsatzes in Waldgebiete zu nennen. Mit Blick auf die ökonomische Dimension der Nachhaltigkeit konnten zudem für einige Forschungsprojekte im Rahmen der Selbstevaluierung geringere Lebenszykluskosten als bei der vorherrschenden Referenztechnologie ermittelt werden.

Die Erfahrungen aus der Anwendung des entwickelten Methodikansatzes im Rahmen der NetDGT-Nachhaltigkeitsanalysen zeigen, dass eine Selbstevaluierung durch die Akteure in den jeweiligen Forschungsprojekten besonders förderlich für eine frühzeitige Auseinandersetzung mit Be- und Entlastungspotenzialen ist, insbesondere im Hinblick auf vorhandene Bezüge zu den normativen Vorgaben der Agenda 2030. Für den Ansatz einer Selbstevaluierung spricht ferner die Tatsache, dass quantitative Daten für eine substantielle Nachhaltigkeitsbewertung zuallererst in den Forschungsvorhaben selbst verfügbar werden. Durch die Bereitstellung niedrighwelliger Instrumente können mithilfe dieser Daten richtungsweisende Impulse für die laufenden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in den Forschungsprojekten gesetzt werden. Darüber hinaus tragen die Selbstevaluierungen zum Aufbau eigener Modellierungs- und Evaluierungskompetenzen in den jeweiligen Forschungsverbänden bei. Ein solches „Capacity Building“ zu Nachhaltigkeitsthemen kann darüber hinaus für die Inwertsetzung der Neuentwicklung, aber auch für Weiterentwicklungen und Folgeprojekte hilfreich sein. Schließlich können die Ergebnisse von Nachhaltigkeitsanalysen auch für Fördermittelgeber handlungsleitend bei der Auswahl von Forschungsprojekten bzw. deren Weiterführung sein.

Summary

Digitization, i.e. the use of modern information and communication technologies, is associated with great expectations of increasing the efficiency of other technical processes and economic transactions. At the same time, it is becoming increasingly clear that the use of digital technologies not only has a positive impact on sustainability, but also consumes raw materials and energy. Against this backdrop, technological innovation raises the central question of whether digital solutions can lead to a net reduction in environmental impacts in the context of their application, taking into account all the associated potential burdens and reliefs.

To address this question, sustainability analyses were carried out for a total of twelve “Digital GreenTech” research projects as part of the “Digital GreenTech Network” accompanying research project funded by the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF). On the one hand, the potential burdens of the digital technologies used were to be taken into account, i.e. in particular the consumption of raw materials during production and the energy requirements during use. On the other hand, the expected positive sustainability effects of using the new digital technologies in their intended application context were also the subject of the investigation. These relief potentials include, for example, efficiency increases in industrial processes and the enabling of the substitution of primary raw materials by secondary raw materials, which can lead to savings in greenhouse gas emissions.

For the practical implementation of the sustainability analyses, a staged approach was applied in NetDGT, in which different, low-threshold and reliable instruments were used depending on the technological maturity of the object of analysis and the availability of data. In the first stage, an “ex ante analysis” was carried out by the Öko-Institut for all research projects. These initial investigations covered all the potential impacts and reductions that were considered to be relevant at the start of the project with a view to the Sustainable Development Goals of the 2030 Agenda. The results formed the basis for defining the scope of the study (“scoping”), defining the subsequent analysis steps, and formulating initial working hypotheses on potential burdens and reliefs.

Based on the scoping, the sustainability aspects identified as relevant were analyzed quantitatively in a second stage. For this purpose, the research projects were requested to carry out the analyses on their own responsibility. In order to provide them with the best possible support in this self-evaluation, suitable evaluation tools were proposed and methods explained that allow the greatest possible quantification for all relevant sustainability aspects.

Finally, in a third stage, three selected research projects were subjected to an in-depth sustainability analysis by the Öko-Institut. The purpose of this analysis step was to quantify all relevant sustainability impacts using life cycle-based analyses. As in the self-evaluation, a comparison between a “digitization scenario” and a “reference scenario” was carried out in the third step. As part of a contribution analysis, system components (“adjusting screws”) responsible for the greatest contribution to the overall result were identified, and starting points for optimizing the sustainability gains were worked out.

Overall, the sustainability analyses of the research projects considered show that in almost all cases the new development can be expected to produce sustainability gains in the form of net greenhouse gas reductions. However, the magnitude of the relief potential varies considerably. Particularly large levers in terms of greenhouse gas mitigation were found for digital technologies that enable a reduction in the use of CO₂-intensive materials and supplies (e.g. concrete, activated carbon) or industrial processes (e.g. recycling of refrigeration appliances and lithium-ion batteries). The results

of the self-evaluations and in-depth sustainability analyses indicate that greenhouse gas reductions of up to triple-digit millions (in terms of *kilograms* of CO₂ equivalents) are possible if the new developments are successfully scaled up to Germany as a whole.

However, the above-mentioned greenhouse gas reductions are put into perspective when they are compared with the CO₂ reductions required to achieve the climate protection targets for Germany. According to these targets, 23 million *metric tons* of CO₂ equivalents will have to be saved annually in the period up to 2025, and the necessary CO₂ reduction will even rise to 46 million *metric tons* of CO₂ equivalents per year in the period from 2026 to 2030. Against the backdrop of these reduction targets, it becomes clear that the digital technologies considered in the sustainability analyses can only make a contribution in the per mille range at most.

Nevertheless, any contribution in this context is valuable and indispensable, especially if the new development can generate further sustainability gains. In this context, for example, a reduction in insecticide use in forest areas made possible by digital technologies is worth mentioning. With regard to the economic dimension of sustainability, some research projects were also able to identify lower life cycle costs than the prevailing reference technology as part of the self-evaluation.

Experience gained from the application of the developed methodological approach in the context of the NetDGT sustainability analyses shows that self-evaluation by the players in the research projects is particularly conducive to an early analysis of the burden and relief potentials. This is particularly applicable with regard to existing references to the normative requirements defined by the 2030 Agenda. Another factor advocating the approach of self-evaluation is the fact that quantitative data for a substantial sustainability assessment are first and foremost available in the research projects themselves. By providing low-threshold tools, these data can be used to provide momentum for ongoing research and development work in the research projects. Furthermore, the self-evaluations contribute to the development of own modeling and evaluation competencies in the respective research networks. Such “capacity building” on sustainability issues can furthermore be beneficial for the valorization of the new development, but also for further developments and follow-up projects. Finally, the results of sustainability analyses can serve as a guideline for funding agencies in the selection of research projects or their continuation.

1 Hintergrund und Zielsetzung

Mit der Digitalisierung, also dem Einsatz moderner Informations- und Kommunikationstechnik, sind große Erwartungen verbunden, die Effizienz anderer technischer Prozesse und wirtschaftlicher Transaktionen zu steigern. So gaben drei Viertel der vom Branchenverband bitkom befragten Unternehmen an, dass durch den Einsatz digitaler Technologien und Anwendungen der CO₂-Ausstoß reduziert werden konnte. Die bitkom kommt daher zu dem Schluss, dass die deutsche Wirtschaft ihre Klimaziele ohne den Einsatz digitaler Technologien nicht erreichen kann. (Bitkom 2023). Auch die deutsche Bundesregierung verweist in ihrer Digitalstrategie auf die beträchtlichen Potenziale der digitalen Technologien „im Kampf gegen die Klimakrise, den Verlust der Biodiversität und die Verschmutzung der Natur durch Schadstoffe und Abfall“ (Bundesregierung 2022). Demnach ist die „Wirtschaft [...] mit Hilfe der Digitalisierung erfolgreich gewachsen und stärker auf Nachhaltigkeit ausgerichtet.“ ... „Digitale Technologien machen die Umwelttechnik effizienter und zukunftsfähig. Sie unterstützen den Umbau der Energieversorgung und die Entwicklung hin zu einer zukunftssicheren und nachhaltigen Land- und Ernährungswirtschaft und einer Kreislaufwirtschaft zum Schutz der natürlichen Lebensgrundlagen.“

Vor allem der „Künstlichen Intelligenz“ (KI) wird ein disruptives Potenzial zugeschrieben, verbunden mit der Hoffnung, dass sich durch ihren Einsatz erhebliche Nachhaltigkeitsgewinne erzielen lassen. (Jungblut 2021). In den Zukunftsstrategien der Europäischen Kommission und der Bundesregierung wird das Ziel der digitalen Transformation der Wirtschaft häufig in einem Atemzug mit „grün“ oder „sauber“ im Sinne von nachhaltig beschrieben. (Europäische Kommission 2023). Beispielsweise betont der europäische Grüne Deal, dass „Digitale Technologien [...] eine entscheidende Voraussetzung für die Verwirklichung der Nachhaltigkeitsziele des Grünen Deals in vielen verschiedenen Sektoren“ sind (Europäische Kommission 2019).

Gleichzeitig wird immer deutlicher, dass der Einsatz digitaler Technologien nicht nur positive Nachhaltigkeitseffekte mit sich bringt, sondern auch Ressourcen und Energie verbraucht. Allerdings sind die wissenschaftlichen Erkenntnisse zu den positiven und negativen Nachhaltigkeitseffekten der Digitalisierung noch nicht ausreichend erforscht, um auf einer allgemeinen Ebene richtungssichere Aussagen treffen zu können (Gossen et al 2021). Angesichts der Komplexität der Wirkungszusammenhänge ist es nicht ohne weiteres möglich, die erhofften Entlastungseffekte in nachvollziehbarer Weise auf den Einsatz digitaler Methoden zurückzuführen. Noch schwieriger ist es, die erhofften Entlastungseffekte zu quantifizieren und den zusätzlichen Umweltbelastungen gegenüberzustellen, die durch den Einsatz digitaler Technik entstehen. Während es zu der letztgenannten Problematik bereits eine Vielzahl von Ökobilanzstudien gibt, ist eine Bilanzierung der Entlastungseffekte bislang nur in Ansätzen bekannt. (Köhler et al. 2018; Liu et al. 2019). Im Zuge der technologischen Innovation stellt sich vor diesem Hintergrund die zentrale Frage: „Führen digitale Lösungen im Kontext ihrer Anwendung unter Berücksichtigung aller damit verbundenen Be- und Entlastungspotenziale zu einer Nettoentlastung der Umweltwirkungen?“

Um dieser Frage nachzugehen, hat das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Förderrichtlinie „Digital GreenTech“ das Begleitforschungsprojekt „Netzwerk Digital GreenTech“ (NetDGT) ins Leben gerufen. Dieses verfolgt das Ziel, nachhaltige Produkte, Dienstleistungen und Verfahren in der Forst-, Kreislauf- und Wasserwirtschaft durch die Verknüpfung von Umwelttechnologien mit digitalen Technologien, wie digitalen Zwillingen und künstlicher Intelligenz, zu entwickeln.

Die geförderten Forschungsvorhaben sollen dazu beitragen, natürliche Ressourcen zu schonen oder Umweltbelastungen in Deutschland und weltweit im Sinne von Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit zu reduzieren. Sie sollen nachweislich zu einer nachhaltigeren Nutzung von Wasser, Energie oder Rohstoffen bzw. zur Minderung von Umweltbelastungen in den Bereichen Wasser- und Kreislaufwirtschaft, Geotechnologien und Landmanagement führen.

Im Rahmen von NetDGT hat die Gesellschaft für Informatik das Öko-Institut beauftragt, Nachhaltigkeitsanalysen für jedes der geförderten Forschungsvorhaben durchzuführen. Ziel der Nachhaltigkeitsanalysen ist eine systematische Gegenüberstellung der Umweltbelastungen durch die jeweils eingesetzte digitale Infrastruktur und der zu erwartenden Entlastungspotenziale durch die in NetDGT betrachteten Umwelttechnologien. Dabei sollen zum einen die Belastungspotenziale der zum Einsatz kommenden Technologien, d. h. insbesondere der Ressourcenverbrauch bei der Herstellung und der Energiebedarf bei der Nutzung, berücksichtigt werden. Andererseits sind auch die zu erwartenden positiven Nachhaltigkeitseffekte Gegenstand der Untersuchung. Zu diesen Entlastungspotenzialen zählen beispielsweise Effizienzsteigerungen in industriellen Prozessen, die zu Einsparungen von Treibhausgasemissionen führen können.

Nachhaltigkeitsanalysen von technologischen Neuentwicklungen sind grundsätzlich mit der Herausforderung konfrontiert, dass die für die Einflussmöglichkeiten auf die Technologieentwicklung und die für die Bewertung verfügbaren Daten in einem umgekehrten Verhältnis zueinanderstehen: In einer frühen Phase des Forschungs- und Entwicklungsprozesses (F&E-Prozess) sind die Gestaltungsmöglichkeiten groß, die Datenverfügbarkeit ist aber oft gering. Später nehmen Quantität und Qualität der Daten deutlich zu, die Gestaltungsmöglichkeiten können aber durch bestehende Pfadabhängigkeiten bereits stark eingeschränkt sein.

Vor diesem Hintergrund wird für die Nachhaltigkeitsanalysen in NetDGT eine gestufte Vorgehensweise verfolgt, bei dem je nach technologischem Reifegrad des Analyseobjekts und damit je nach Datenlage unterschiedliche, niedrighschwellige und möglichst richtungssichere Instrumente zum Einsatz kommen. Dabei wird in einem partizipativen Ansatz großer Wert auf Selbstreflexion gelegt und eine Selbstevaluierung durch die an den geförderten Forschungsvorhaben beteiligten Akteuren vorgesehen. Dadurch wird nicht nur eine bestmögliche Datenbasis für die Nachhaltigkeitsanalysen gewährleistet, sondern es ergeben sich auch weitere Vorteile im Sinne eines „Capacity Building“, d. h. einer Stärkung der methodischen Kenntnisse und Fähigkeiten zur Nachhaltigkeitsbewertung bei den an den Forschungsvorhaben involvierten Personen.

Um jedoch richtungssichere Analysen zu gewährleisten, die alle relevanten Nachhaltigkeitsaspekte berücksichtigen, ist bei dem gewählten Ansatz eine inhaltliche und methodische Begleitung der Selbstevaluierungen durch erfahrene Methodenexpertinnen bzw. -experten erforderlich. Im Rahmen der Nachhaltigkeitsanalysen in NetDGT wird dies durch die Einbettung der Selbstevaluierungen in vorgelagerten Analysen zur Festlegung des Untersuchungsrahmens sowie in nachfolgenden Untersuchungen zur Vertiefung und Verfeinerung bzw. Ergänzung gewährleistet.

Der vorliegende Bericht beschreibt sowohl das zuvor skizzierte methodische Vorgehen (vgl. Kapitel 2) als auch die Ergebnisse der einzelnen Analyseschritte des mehrstufigen Ansatzes (vgl. Kapitel 3 - 5). Abschließend werden die vorliegenden Resultate hinsichtlich ihrer Relevanz, Belastbarkeit und Vollständigkeit diskutiert und Schlussfolgerungen für zukünftige Nachhaltigkeitsanalysen in vergleichbaren F&E-Kontexten sowie für prioritären Forschungsbedarf gezogen (vgl. Kapitel 6).

2 Methodische Vorgehensweise

Den normativen Bezugsrahmen für die Nachhaltigkeitsanalysen bildet die Agenda 2030 der Vereinten Nationen. Mit der Verabschiedung der Agenda 2030 und ihrer Sustainable Development Goals (SDGs) im Jahr 2015 haben sich alle 193 Mitgliedsstaaten der Vereinten Nationen erstmals auf einen universellen Katalog verbindlicher und zeitlich befristeter normativer Ziele geeinigt. Diese 17 SDGs (siehe folgende Abbildung) sowie die zugehörigen 169 SDG-Unterziele und 231 Indikatoren können als derzeit gültige normative Grundlage einer Nachhaltigkeitsbewertung betrachtet werden, die alle drei Dimensionen der nachhaltigen Entwicklung, d. h. ökologische, ökonomische und soziale Aspekte, abdecken (United Nations 2015).

Abbildung 2-1 Die 17 Ziele für eine nachhaltige Entwicklung der Agenda 2030



Quelle: (UNDP 2016)

Positive wie negative Beiträge der einzelnen Forschungsvorhaben bezogen auf die SDGs sollen auf der Ebene der 169 SDG-Unterziele qualitativ und möglichst auch quantitativ ermittelt werden.

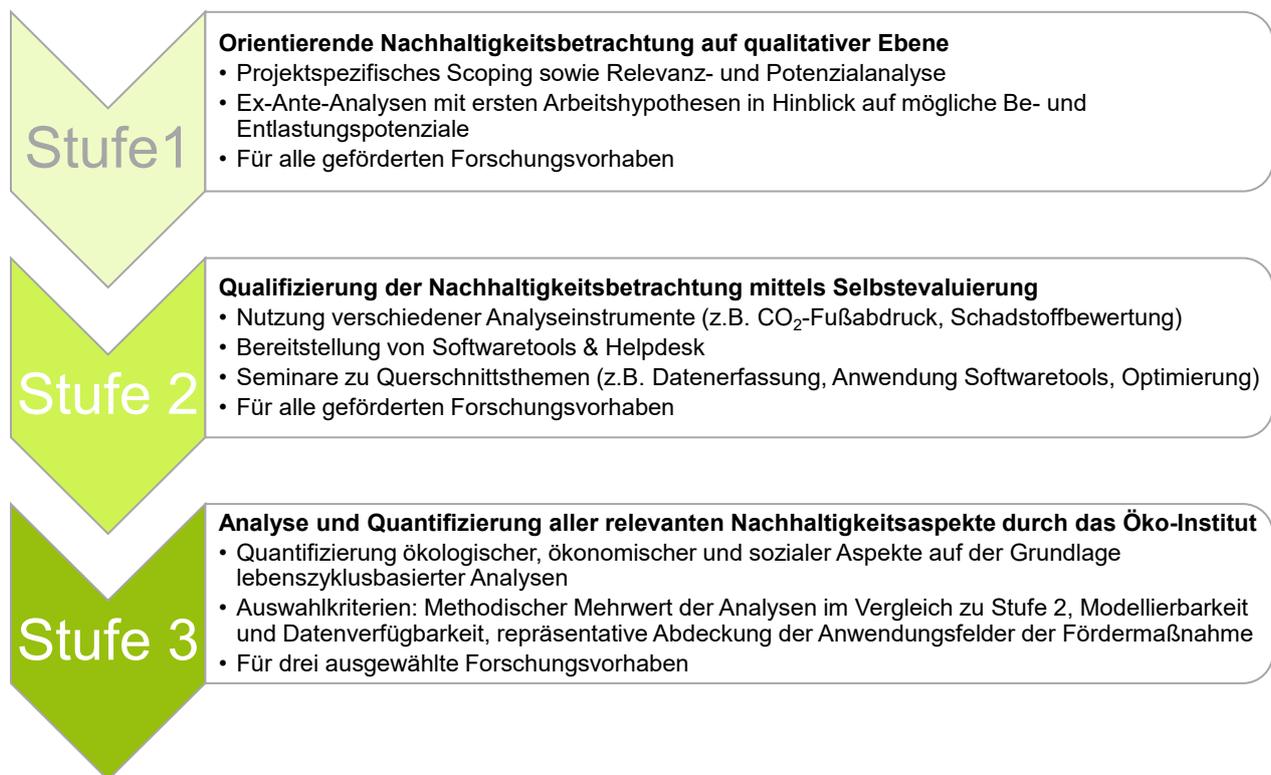
Außerdem werden die identifizierten Be- und Entlastungspotenziale dahingehend klassifiziert, auf welcher der folgenden drei Effektebenen sie ihre Wirkung entfalten können (vgl. Kampffmeyer & Gensch 2019):

- Effekt erster Ordnung bzw. direkter Effekt: Direkter Verbrauch von Ressourcen und Energie durch die verwendeten Digitaltechnologien (Infrastruktur und Geräte), einschließlich vorgelagerter Prozesse, wie der Herstellung von Hardware und der Bereitstellung von Energie;

- Effekt zweiter Ordnung bzw. indirekter Effekt: Unmittelbare Auswirkungen der Digitaltechnologien auf die Nachhaltigkeitsleistung anderer (bereits bestehender) Produkt- bzw. Dienstleistungssysteme, bei denen die Digitaltechnologien zum Einsatz kommen;
- Effekt dritter Ordnung bzw. systemischer Effekt: Indirekte Auswirkungen auf Nachhaltigkeitsaspekte durch die Nutzung der Digitaltechnologien und deren Einfluss auf Wertvorstellungen, Leitbilder, Produktions-, Arbeits- und Konsumweisen etc.

Der praktische Ablauf der Nachhaltigkeitsanalysen ist in drei Stufen gegliedert (siehe Abbildung 2-2):

Abbildung 2-2 Dreistufige Vorgehensweise der Nachhaltigkeitsanalysen im Begleitforschungsvorhaben „NetDGT“



Quelle: Eigene Darstellung

Für alle Forschungsvorhaben der Fördermaßnahme sieht der Methodenrahmen in einer ersten Stufe zunächst eine orientierende Nachhaltigkeitsbetrachtung auf qualitativer Ebene vor. Um alle relevanten Aspekte zu identifizieren, wird seitens des Begleitforschungsvorhaben für jede der betrachteten digitalen Technologien vorab eine „Ex-ante-Analyse“ angefertigt. Diese erfasst alle vorhandenen Be- und Entlastungspotenziale mit Blick auf die SDGs und bildet die Grundlage für das „Scoping“, mit dem der Untersuchungsrahmen festgelegt, die folgenden Analyseschritte modelliert sowie erste Arbeitshypothesen zu möglichen Nachhaltigkeitsgewinne aufgestellt werden.

Aufbauend auf dem Scoping werden in einer zweiten Stufe die als relevant identifizierten Nachhaltigkeitsaspekte quantitativ analysiert. Hierfür sind die Forschungsvorhaben aufgefordert, die Analysen eigenverantwortlich durchzuführen. Um sie bei dieser Selbstevaluierung bestmöglich zu unterstützen, wurden geeignete Bewertungsinstrumente vorgeschlagen und Methoden erläutert, die für alle relevanten Nachhaltigkeitsaspekte eine möglichst weitgehende Quantifizierung erlauben. Diese

Unterstützung umfasst Seminare zu zentralen Abläufen der Selbstevaluierung (wie Datenerfassung und Wirkungsabschätzung) sowie ein für spezifische Nachfragen eingerichtetes Helpdesk. Inhaltlich fokussieren die Nachhaltigkeitsanalysen in der zweiten Stufe auf den CO₂-Fußabdruck. Das bedeutet, dass für alle im Rahmen des Scopings als relevant identifizierten Prozesse, Produkte und Dienstleistungen die jeweiligen Treibhausgaspotenziale ermittelt werden. Ergebnis der Analysen ist eine Differenzbetrachtung zwischen einem „Digitalisierungsszenario“ und einem „Referenzszenario“ (ohne Digitaltechnologie), d. h. es werden nur diejenigen Stoff- und Energieströme betrachtet, bei denen im Quervergleich zwischen den beiden Systemen Unterschiede bestehen. Vergleicht man schließlich die Ergebnisse der beiden Szenarien, stellt sich die zentrale Frage, ob der Einsatz der Digitaltechnologie zu einer Netto-CO₂-Entlastung führt.

In einer dritten Stufe werden schließlich durch das Begleitforschungsvorhaben vertiefende Nachhaltigkeitsanalysen durchgeführt. Gegenstand dieses Bewertungsschritts ist eine Quantifizierung aller relevanten Nachhaltigkeitseffekte auf der Grundlage lebenszyklusbasierter Analysen. Wie schon bei der Selbstevaluierung wird auch bei der dritten Stufe eine Differenzbetrachtung zwischen dem „Digitalisierungsszenario“ und dem „Referenzszenario“ vorgenommen. Im Rahmen einer Beitragsanalyse werden jeweils diejenigen Systemkomponenten („Stellschrauben“) identifiziert, die für den größten Beitrag zum Gesamtergebnis verantwortlich sind und Ansatzpunkte zur Optimierung der Nachhaltigkeitsgewinne herausgearbeitet.

Um die Relevanz der ermittelten Nachhaltigkeitsgewinne in Bezug auf die jeweiligen globalen Herausforderungen zu klären, sind Signifikanzanalysen ebenfalls ein wesentlicher Bestandteil der Bewertungen. Dadurch wird geprüft, ob die Forschungsvorhaben tatsächlich einen signifikanten Beitrag zur Problemlösung beisteuern können. Aus dieser Einordnung werden Empfehlungen für die Forschungsvorhaben zur strategischen Optimierung ihrer Neuentwicklungen sowie für Fördermittelgeber mit Blick auf besonders vielversprechende Anwendungsfelder abgeleitet.

3 Ergebnisse der Ex-Ante-Analyse

Dieses Kapitel fasst die wesentlichen Ergebnisse der Ex-ante-Analysen zusammen, die den ersten Schritt der Nachhaltigkeitsanalysen im Querschnittsprojekt NetDGT darstellen (s.o.). Gemäß der inhaltlichen Gliederung der Forschungsvorhaben wird zunächst auf die Ergebnisse des Projektclusters „Forstwirtschaft“ eingegangen (vgl. Kap. 3.1), gefolgt von den Projektclustern „Kreislaufwirtschaft“ (vgl. Kap. 3.2) und „Wasserwirtschaft“ (vgl. Kap. 3.3).

Die individuellen Dossiers der Ex-ante-Analysen für die einzelnen Forschungsvorhaben befinden sich, geordnet nach Projektclustern, in den Anhängen I – III.

3.1 Projektcluster „Forstwirtschaft“

Die Ex-Ante-Analysen für die Forschungsvorhaben im Projektcluster „Forstwirtschaft“ markieren zunächst besonders relevante Nachhaltigkeitsaspekte bezüglich des Rohstoffaufwands für die Herstellung der Digitaltechnologien sowie der benötigten Systemkomponenten. So sind beim Forschungsvorhaben „DiGeBaSt“ zahlreiche Kameras und Blitzgeräte erforderlich, während beim Forschungsvorhaben „FORESTCARE“ v. a. eine Vielzahl von Drohnen sowie die für deren Betrieb erforderlichen Akkus berücksichtigt werden müssen.

Mit Blick auf mögliche Entlastungspotenziale ist eine wichtige Gemeinsamkeit der beiden Forschungsvorhaben im Projektcluster „Forstwirtschaft“ eine verbesserte CO₂-Bindung von nachhaltig

bewirtschafteten Waldbeständen. Hinzu kommen im Falle von „DiGeBaSt“ positive Beiträge zur Ressourcenschonung durch einen Verzicht auf eine physische Markierung von Bäumen (z. B. durch Nummernplättchen, Barcodes oder Sprayfarbe). Bei „FORESTCARE“ können sich Entlastungspotenziale auch durch einen Verzicht auf Insektizide ergeben, was neben einem geringeren Ressourceneinsatz auch einen reduzierten Schadstoffeintrag in Waldökosysteme zur Folge hat.

Bemerkenswert ist ferner, dass bei beiden Forschungsvorhaben auch Potenziale für positive Effekte dritter Ordnung (vgl. Kapitel 2) identifiziert werden konnten. Bei „DiGeBaSt“ ist in diesem Zusammenhang z. B. eine gesteigerte Bereitschaft zur Holzmobilisierung in Kleinprivatwäldern sowie eine höhere Akzeptanz- und Nachfragesteigerung von nachhaltig produziertem Holz zu nennen. Für „FORESTCARE“ wird davon ausgegangen, dass sich durch die Neuentwicklung eine verbesserte Stabilität des Waldökosystems, positive Auswirkungen auf die Artenvielfalt sowie Beiträge zur Verhinderung von Bodenerosion ergeben können.

3.2 Projektcluster „Kreislaufwirtschaft“

Die im Projektcluster „Kreislaufwirtschaft“ vertretenen Projekte zeigen im Quervergleich der Ex-ante-Analysen eine stark ausgeprägte Heterogenität hinsichtlich ihrer Wirkungsmechanismen und Effektkategorien der Umweltwirkungen. Als gemeinsames Merkmal lässt sich eine angestrebte Umweltentlastung auf Basis der Substitution von Primärrohstoffen durch Sekundärrohstoffe identifizieren (mit Ausnahme von DiKueRec, wo eher technische Effizienzsteigerungen zu einer Reduktion der THG-Emissionen im Recyclingprozess führen). Die beiden Forschungsvorhaben CYCLOPS und DigInform zielen auf die Verbesserung der Entscheidungsunterstützung beim zwischenbetrieblichen Informationsaustausch über Sekundärrohstoffe und Rezyklate. Durch den Einsatz von digitalen Zwillingen von Sekundärrohstoffen soll es für gewerbliche Handelspartner einfacher werden, geeignete Sekundärrohstoffe anzubieten bzw. zu erwerben. Dieser Vorteil ermöglicht letztlich einen verstärkten Einsatz von Rezyklaten, was den Einsatz von Primärrohstoffen reduzieren kann und damit sowohl dem Konzept der Kreislaufwirtschaft dient als auch (durch Substitution) die Neuproduktion von Primärrohstoffen und die damit verbundenen Umweltbelastungen reduziert. Dieser Wirkungsmechanismus entfaltet sich aus Sicht der Projekte jedoch nur indirekt, wenn Dritte (d.h. gewerbliche Anwender) die neu entwickelten Werkzeuge in der Praxis einsetzen. Daher war es im Rahmen der Ex-ante-Analysen schwierig, den Umfang zukünftiger Transaktionen mit den beiden Instrumenten abzuschätzen. Dies liegt jedoch nicht im Einflussbereich der Projekte, sondern hängt von den späteren Anwendern der Instrumente ab. Es wurden daher nur exemplarische Fallbeispiele betrachtet. Im Projekt DiRecLib konnten auch Umweltentlastungspotenziale durch die Substitution von Primärrohstoffen identifiziert werden. Hier fungiert die zu entwickelnde KI-Anwendung als technischer Enabler für eine neuartige Recyclingtechnologie für Lithium-Ionen-Batterien (LIB). Diese soll das Recycling von gebrauchten LIBs einfacher und kostengünstiger machen, da sie mit deutlich weniger Energie und Chemikalien auskommt als bisher übliche LIB-Recyclingverfahren. Dieser Einspareffekt führt einerseits zu direkten Umweltentlastungen und trägt andererseits zur Substitution von Primärrohstoffen bei der Herstellung von LIB-Kathodenmaterialien bei. Im Projekt ODiWiP werden Umweltentlastungen auch durch die Effizienzsteigerung von Recyclingprozessen (in diesem Fall Altpapierrecycling) erwartet, wodurch Prozessenergie eingespart und die Qualität des Rezyklats verbessert wird. Auch hier trägt der Substitutionseffekt zu einer Verringerung des Bedarfs an Primärrohstoffen (in diesem Fall Rohholz für die Zellstoffproduktion) bei.

Für alle betrachteten Projekte ergaben die jeweiligen Ex-ante-Analysen ein geringes bis allenfalls moderates zusätzliches Umweltbelastungspotenzial durch den zusätzlichen Einsatz digitaler Tech-

nik für den Betrieb der KI-Lösungen. In den meisten Fällen beschränkt sich die zusätzliche Rechenleistung auf den Leistungsumfang eines Industrie-PCs mit ggf. angeschlossener Sensorik oder Kameras (DiRecLIB, ODiWiP, DiKueRec). Bei CYCLOPS und DigInform erfolgt die Dateneingabe durch die Anwender auf bereits vorhandenen PCs, während die KI-Anwendung entweder auf lokalen Servern oder in der Cloud angesiedelt ist. In den letztgenannten Fällen war es schwierig, die erforderliche Rechenleistung und den damit verbundenen zusätzlichen Stromverbrauch zu antizipieren, da die erforderliche Rechenleistung wiederum vom Umfang der späteren Nutzung dieser Instrumente abhängt. In allen Projekten wurde davon ausgegangen, dass die durch die jeweilige KI-Anwendung erzielbaren Umweltentlastungspotenziale die zusätzlichen Umweltbelastungen durch die digitale Technik deutlich überwiegen.

3.3 Projektcluster „Wasserwirtschaft“

In den Ex-ante-Analysen für die Forschungsvorhaben des Projektclusters „Wasserwirtschaft“ wird auf der Ebene der Belastungseffekte bei der Mehrheit der Forschungsvorhaben ein vergleichsweise geringer Rohstoff- und Energieaufwand für die Herstellung und den Betrieb der Digitaltechnik sowie der notwendigen Systemkomponenten erwartet. Dieser beschränkt sich im Wesentlichen auf eine zentrale Recheneinheit und Datentransfers. Ausnahmen bilden eine relativ komplexe Messsensorik (einschließlich umfangreicher peripherer Systemkomponenten) im Forschungsvorhaben „DecS“ sowie mehrere Unterwasserroboter (mit zahlreichen Messsonden, Sonaren und Kameras) im Forschungsvorhaben „MOVE“.

Bezüglich möglicher Entlastungspotenziale können sich bei allen Forschungsvorhaben im Projektcluster „Wasserwirtschaft“ nennenswerte Rohstoffeinsparungen und dadurch auch CO₂-Reduktionspotenziale ergeben. Zu nennen sind in diesem Zusammenhang Einsparungen von Beton aufgrund eines geringen Bedarfs von Regenrückhaltebecken beim Forschungsvorhaben i-SEWER sowie Vermeidung von aufwändigen Kanalerneuerungen beim Forschungsvorhaben KIKI. Bei den Forschungsvorhaben DecS und K2I kann sich bei Verfahren zur gezielten Spurenstoffelimination eine Einsparung von Aktivkohle und Ozon ergeben. Beim Forschungsvorhaben MOVE beziehen sich die Entlastungspotenziale auf die Substitution von Taucherausrüstungen aus der klassischen Gewässerüberwachung (v. a. Taucheranzüge, Pressluft, Boote und Kraftstoff).

Darüber hinaus erwarten die Forschungsvorhaben des Projektclusters „Wasserwirtschaft“ zu verschiedenen Aspekten auch substanzielle Effekte dritter Ordnung. Dazu gehört vor allem die Verbesserung der Qualität von Oberflächengewässern und Trinkwasser durch einen geringeren Eintrag von Schadstoffen und gefährlichen Chemikalien, wodurch letztlich wichtige Beiträge zum Schutz der allgemeinen Intaktheit von Ökosystemen geleistet werden können. Darüber hinaus wurde auch die Verringerung von Erkrankungen beim Menschen durch geringere Schadstoffkonzentrationen im Trinkwasser bzw. ein geringeres Wachstum von Mikroorganismen in (Bade-)Gewässern genannt (DecS, KIKI und MOVE). Über die ökologischen Entlastungspotenziale hinaus werden in mehreren Forschungsvorhaben (i-SEWER, K2I und KIKI) auch Kostendämpfungen bzw. -einsparungen und damit die Sicherung einer bezahlbaren Trinkwasserversorgung in Aussicht gestellt.

3.4 Zwischenfazit zu den wichtigsten Erkenntnissen

In der folgenden Tabelle werden für die untersuchten Forschungsvorhaben die Ergebnisse der Ex-Ante-Analysen und die wichtigsten Erkenntnisse mit Blick auf die jeweils relevanten Nachhaltigkeitsaspekte zusammengefasst.

Tabelle 3-1: Ergebnisse der Ex-Ante-Analysen für die betrachteten Forschungsvorhaben mit einer Übersicht der relevanten Belastungspotenziale (B) und Entlastungspotenziale (E)

| Projekt | Carbon Footprint | | Schadstoffe (REACH-Radar) | | Life Cycle Costing | | |
|------------|------------------|--|---------------------------|---|--------------------|---|--|
| | Relevanz | Aspekte | Relevanz | Aspekte | Relevanz | Aspekte | |
| Blue2035 | | Aufgrund der Ausrichtung des Projekts (keine Technologieentwicklung, sondern Konzeptentwicklung) wird im Rahmen von NetDGT keine Nachhaltigkeitsanalyse durchgeführt. | | | | | |
| CYCLOPS | X | Primärdatenerfassung bei den Usern wahrscheinlich schwierig, da hierzu eine Marktbeobachtung nötig wäre | | | | | |
| DecS | X | Rechner (B); Sensoren (B); Datentransfer (B); Datenspeicherung (B); Strom (B,E); Aktivkohle (E); Ozon (E) | X | Substanzen in den Sensoren (B) Spurenstoffe (E) Analysechemikalien (E) | | | |
| DiGeBaSt | X | Rechner (B); Kameras (B); Datenscanner (B); Datentransfer (B); Datenspeicherung (B); Strom (B) Kunststoffplättchen (E); Barcodes (E); Sprühfarbe (E); Kraftstoffe (E) | X | Substanzen in den Messköpfen / Scannern (B) Sprühfarbe (E) | | | |
| DigiInform | X | Sekundärrohstoffe gemäß Greenhousegass Protokoll Scope 3 | | | | | |
| DiKueRec | X | vermiedene FCKW-Emissionen (E) | | | X | Vermeidung von Regenerationszyklen bei den Aktivkohlefiltern | |
| DiRecLIB | X | Datenerfassung beim Referenzszenario anspruchsvoll | (X) | Substitution hydrometallurgischer Prozessschritte; allerdings eher CLP-Relevanz sowie Vermeidung bes. überw.-bed. Abfälle | X | Datenerfassung beim Referenzszenario anspruchsvoll | |
| FORESTCARE | X | HPC-Rechner (B); Drohnen (B); Akkus (B); Datenübertragung (Satelliten) (B); Datenspeicherung (B) Strom (E); Treibstoffe (E); Pestizide (E) | X | Pestizide (E) Konservierung Polter (E) | | | |
| i-SEWER | X | Rechner (B); Sensoren (B); Datentransfer (B); Datenspeicherung (B); Strom (B); Ersatz bzw. Reduzierung des Baus von Regenrückhaltebecken (E) | X | Sicherung der Versorgung mit bezahlbarem Trinkwasser / Verringerung Kostensteigerungen bei Abwasser € | | | |
| K2I | X | Rechner (B); Datenübertragung (B); Datenspeicherung (B); Strom (B,E); Kraftstoffe (B,E) Aktivkohle (E); Ozon (E); Membranen (E) | X | Spurenstoffe (E) Analysechemikalien (E) | X | "relative Kosteneinsparung bei der Wasseraufbereitung" | |
| KIKI | X | Rechner (B); Datenübertragung (B); Datenspeicherung (B) Strom (B,E); Kraftstoffe (B,E) | | | X | "bezahlbares Trinkwasser" | |
| MOVE | X | Unterwasserroboter (B); [Rechner (B); Sensoren (B); Datentransfer (B); Datenspeicherung (B); Strom (B); Substitution von Taucherausrüstungen aus der klassischen Gewässerüberwachung (E) | | | | | |
| ODIWIP | X | Verifizierung der angestrebten Reduzierung des CO2-Ausstoßes jährlich um 138.000 t | | | X | Abhängig von der Verfügbarkeit von Kostendaten und Bilanzierbarkeit des Nutzens | |

Quelle: Eigene Darstellung

Die jeweils identifizierten Belastungs- und Entlastungspotenziale bilden die Grundlage für die Selbstevaluierungen, die im Anschluss an die Ex-Ante-Analyse als zweite Stufe der NetDGT-Nachhaltigkeitsanalysen durchgeführt wurden.

4 Ergebnisse der Selbstevaluierungen

Das vorliegende Kapitel enthält die Ergebnisse der Selbstevaluierungen für alle Forschungsvorhaben, bei denen im Rahmen des NetDGT-Querschnittsprojekts Nachhaltigkeitsanalysen durchgeführt wurden. Eine Ausnahme bildet das Forschungsvorhaben „Blue 2035“, da hier nicht die Entwicklung von Technologien, sondern die Entwicklung von Konzepten im Mittelpunkt der F&E-Arbeiten stand. Entsprechend der inhaltlichen Einordnung der Forschungsvorhaben werden zunächst die Ergebnisse aus dem Projektcluster „Forstwirtschaft“ vorgestellt (vgl. Kapitel 4.1), gefolgt von den Projektclustern „Kreislaufwirtschaft“ (vgl. 4.2) und „Wasserwirtschaft“ (vgl. Kapitel 4.3). Eine tabellarische Zusammenfassung der Ergebnisse befindet sich in Kapitel 4.4.

4.1 Projektcluster „Forstwirtschaft“

4.1.1 DiGeBaST

Das von Forst Baden-Württemberg geleitete Forschungsvorhaben DiGeBaST hat zum Ziel, ein Cloud-basiertes Rückverfolgungssystem für Rundholz zu entwickeln, das ohne jegliche Markierung auf dem Holz auskommt. Dazu wird von dem Baumstamm bzw. Stammabschnitt unmittelbar nach dem Fällen eine Aufnahme der Holzschnittfläche erstellt, die ähnlich einem digitalen Fingerabdruck eine eindeutige Identifikation ermöglicht. Dem Baumstamm bzw. Stammabschnitt wird anschließend ein digitaler Zwilling zugewiesen, der Informationen zu zentral wichtigen forstwirtschaftlichen Parametern (z. B. in Hinblick auf Wuchsort, Eigentümer, Zeitpunkt der Fällung, Logistik und Weiterverarbeitung) enthält und für die verschiedenen Akteure der gesamten Wertschöpfungskette zur Verfügung gestellt werden kann. Dadurch kann eine lückenlose und zudem intrinsisch fälschungssichere Identifikation und Rückverfolgung von der Holzernte im Wald bis zum Sägewerk erreicht werden. Diese ermöglicht Forstbetrieben bzw. Waldbesitzern eine effizientere Bewirtschaftung des Waldes und schafft somit auch Anreize zur Holzmobilisierung (DigitalGreentech 2023a).

Die Belastungspotenziale der Neuentwicklung umfassen im Wesentlichen die Herstellung und den Betrieb der für die Digitaltechnologie erforderlichen Kameras, Blitzgeräte, Desktops und Notebook sowie Servern. Diese würden bei einem Einsatz der Digitaltechnologie in allen Staatswaldgebieten Baden-Württembergs insgesamt rund 54.000 kg CO₂-Äquivalente verursachen.

Bei den Entlastungspotenzialen handelt es sich um Effekte 2. Ordnung, die durch den Verzicht auf physische Markierung (v. a. Sprayfarbe) ermöglicht werden. Hinzu kommen CO₂-Einsparung durch eine Verminderung von Suchfahrten beim Abtransport des geernteten Holzes, da angenommen wird, dass mit der Neuentwicklung eine bessere Auffindbarkeit der Polter¹ gewährleistet werden kann. Ein weiterer wesentlicher Aspekt ergibt sich durch eine möglicherweise zusätzliche Holzmobilisierung, weil durch das Cloud-basierte Rückverfolgungssystem eine aktuelle und kontinuierlich gepflegte Datenbasis für die o.g. forstwirtschaftlichen Parameter zur Verfügung steht. Dies wird als eine wichtige Voraussetzung für die Mobilisierung bislang ungenutzter Holzvorräte erachtet. Die zuvor genannten Effekte wurden im Rahmen der Selbstevaluierung ebenfalls für den Staatswald in Baden-Württemberg als geographischer Bezugsrahmen untersucht. Dabei wurde ersichtlich, dass es sich bei der zusätzlichen Holzmobilisierung um den dominierenden Entlastungseffekt handelt.

¹ Als Polter wird in der Forstwirtschaft gesammeltes und sortiertes Rundholz bezeichnet, das nach der Holzernte auf einem Sammelplatz zur Abfuhr bereitliegt.

Um diesen abzuschätzen, wurden vier Szenarien² basierend auf der Bezugsgröße des Fichten-Holzeinschlags im Staatswald Baden-Württemberg aus dem Jahr 2021 modelliert. Bei der Berechnung der CO₂-Entlastungseffekte wurden nach Fehrenbach et al. (2022) die CO₂-Emissionen aus der Produktionskette, die CO₂-Speicherung in Holz, die CO₂-Speicherung im Wald und Substituierungseffekte berücksichtigt. Unter der konservativen Annahme, dass durch die Digitaltechnologie bezogen auf die gesamte Einschlagmenge nur 0,1 % mehr Holz mobilisiert wird, beziffern sich die zugehörigen Entlastungseffekte auf rund 582.000 kg CO₂-Äquivalente. Zusammen mit den CO₂-Einsparungen aus vermiedenen Suchfahrten (rund 21.000 kg CO₂-Äquivalente) summieren sich die Entlastungspotenziale auf insgesamt ca. 602.000 kg CO₂-Äquivalente. Unter Berücksichtigung der Belastungseffekte ergeben sich für den Bezugsrahmen Baden-Württemberg Netto-Entlastungspotenziale in Höhe von 549.000 kg CO₂-Äquivalente.

Einige relevante Nachhaltigkeitsaspekte konnten mit den für die Selbstevaluierung zur Verfügung stehenden Ressourcen nicht modelliert bzw. noch nicht geklärt werden. Dabei handelte es sich v. a. um die Modellierung der Sprayfarbe für die Holzmarkierung (beim Referenzsystem) und einiger komplexer Digitalisierungsprodukte (v. a. Kameras und Blitzgeräte). Ein weiterer Aspekt ist die Hochskalierung der Ergebnisse von Baden-Württemberg auf Deutschland. Diese Punkte wurden im Rahmen der vertiefenden Nachhaltigkeitsanalyse untersucht (vgl. Kapitel 5.2).

4.1.2 FORESTCARE

Ziel des von der Universität Göttingen geleiteten Projekts FORESTCARE ist es, eine KI-basierte Kernparameter-Identifikation von Waldbeständen zu entwickeln, um den Zustand und das Wachstum des Waldes mit Hilfe von Drohnen- und Satellitendaten einzelbaumdiskret und automatisiert zu bewerten. Dies ermöglicht angesichts der durch den Klimawandel immer dynamischer werdenden Standortbedingungen beispielsweise eine zielgerichtete Optimierung von Aufforstungen mit trockenresistenten Baumarten oder robusten Waldökosystemtypen. Hierfür werden im Projekt Label- und Bilddaten aus Einzelbaumgeoreferenzierungen mit KI-sprachbasierter Merkmalsansprache und Datensätze aus Drohnenbefliegungen sowie Satellitendaten zu Big-Data-Datenarrays zusammengefasst und mittels KI-basierter Methoden ausgewertet (DigitalGreentech 2023b).

Im Rahmen der Ex-ante-Analyse wurden die Treibhausgasemissionen aus der Herstellung und dem Betrieb der benötigten Drohnen als besonders relevante Belastungspotenziale identifiziert. Darüber hinaus verursachen die Datenübertragung und die Bildauswertung durch ihren Stromverbrauch zusätzliche Klimabelastungen. Entlastungspotenziale wurden in erster Linie bei der Einsparung von Insektiziden gesehen, die bei der Behandlung von Holzpoltern vor allem zum Schutz vor Borken- und Rüsselkäfer eingesetzt werden. Dies beruht auf der Einschätzung, dass in stabileren Waldökosystemen eine solche Behandlung nicht erforderlich ist.

Dementsprechend fokussierte sich die Selbstevaluierung bei FORESTCARE zunächst auf die Abschätzung des CO₂-Fußabdrucks der Drohnen, der Akkus für deren Betrieb sowie der für die Datenauswertung benötigten Desktop-Computer. Dabei wurde angenommen, dass für eine deutschlandweite Hochskalierung der Neuentwicklung 120 Drohnen, 1.800 Akkus sowie 120 Desktop-Computer benötigt werden. Die Drohnen wurden in Ermangelung spezifischer Daten jeweils durch zwei Desktop-Computer abgeschätzt. Insgesamt summieren sich die Belastungspotenziale auf ca. 69.000 kg CO₂-Äquivalente.

² Bei diesen Szenarien wurde ein zusätzlicher Holzeinschlag in Höhe von 0,1%, 1%, 10% sowie 50% angenommen.

Die Abschätzung der Entlastungspotenziale geht von der grundlegenden Annahme aus, dass bezogen auf ganz Deutschland 930 Tonnen Insektizide eingespart werden können. Dies entspricht 5 % des Gesamteinsatzes in Deutschland in Höhe von 18.600 Tonnen. Für die Abschätzung des CO₂-Fußabdrucks der Insektizide kann aus der Literatur ausgehend von den verwendeten Wirkstoffen³ eine Bandbreite von 9 – 65 kg CO₂-Äquivalente pro Kilogramm Insektizid ermittelt werden (Ecoinvent 2022; Heimpel et al. 2013). Unter der konservativen Annahme von 9 kg CO₂-Äquivalente pro Kilogramm Insektizid ergibt sich durch die angenommene Insektizideinsparung ein Entlastungspotenzial von rund 8.370.000 kg CO₂-Äquivalente.

Abzüglich der Belastungspotenziale lässt sich für Deutschland die Nettoentlastung auf rund 8,30 Mio. kg CO₂-Äquivalente abschätzen.

Zusätzlich zu den CO₂-Einsparungen ergeben sich durch den verminderten Insektizideinsatz noch weitere positive Nachhaltigkeitseffekte. Diese beziehen sich auf die Schadstoffpotenziale der verwendeten Wirkstoffe. Die im Rahmen der Selbstevaluierung durchgeführte REACH-Radar-Analyse ergab für die Substanzen 1,2-Benzisothiazol-3(2H)-on, Lambda-Cyhalothrin und Toluoldiisocyanat (Inhaltstoffe des Pflanzenschutzmittels „Karate Forst Flüssig“), dass diese als mögliche SVHC-Kandidatenstoffe (besonders besorgniserregende Substanzen) gelistet werden⁴. Wird aufgrund der Neuentwicklung sukzessive auf diese Stoffe verzichtet, kann dies zu geringeren Schadstoffeinträgen in Waldgebiete führen.

Aus heutiger Sicht wird in Zukunft die Polterspritzung im Wald nicht mehr durchgeführt. Dies bedeutet, dass die Reduzierung von Schadstoffeinträgen sowie die zugehörigen CO₂-Einsparungen aus der vermiedenen Produktion von Insektiziden (siehe oben) faktisch auf gesetzlichen Vorgaben beruhen und folglich nicht dem Forschungsprojekt gutgeschrieben werden können.

4.2 Projektcluster „Kreislaufwirtschaft“

4.2.1 CYCLOPS

Ziel des vom Kunststoff-Zentrum SKZ geleiteten Projektes ist die Entwicklung eines digitalen Werkzeugkastens zur Informationsgewinnung und Entscheidungsunterstützung für die Marktakteure im Kunststoffrecyclingkreislauf (DigitalGreentech 2023c). Dieser soll es den Akteuren im Recyclingsektor ermöglichen, detaillierte Informationen zu Materialeigenschaften und Nachhaltigkeitsaspekten von Kunststoff-Abfällen und -Rezyklaten zu erhalten. Die auf Basis von digitalen Zwillingen der angebotenen Rezyklate generierten Informationen sollen eine optimierte Aufbereitung und zielgerichtete Rückführung von Sekundärkunststoffen in hochwertige Anwendungen ermöglichen. Dies soll dazu beitragen, möglichst viele Sekundärkunststoffe in technisch und wirtschaftlich sinnvolle Einsatzmöglichkeiten zu lenken sowie neue Anwendungsfelder zu erschließen.

Nach derzeitigem Kenntnisstand ist die zusätzlich benötigte Hardwarekapazität des CYCLOPS-Systems relativ gering, so dass weitgehend auf die vorhandene Hardware bereits bestehender digitaler Handelsplattformen zurückgegriffen werden kann. Es werden daher nur die THG-Effekte des Stromverbrauchs von IT-Endgeräten betrachtet, die zur Durchführung entsprechender Transaktio-

³ Dabei handelt es sich u.a. um die Substanzen Lambda-Cyhalothrin und 1,2-Benzisothiazol-3(2H)-on.

⁴ Dabei handelt es sich bei Lambda-Cyhalothrin um die TEDX-Liste (potenzielle endokrine Disruptoren) bei 1,2-Benzisothiazol-3(2H)-on um die Siemens-Nixdorf-Liste und bei Toluoldiisocyanat waren es fünf Listen (IKEA, CMR, PACT, Siemens-Nixdorf und CORAP). Das Pflanzenschutzmittel „Karate Forst flüssig“ war bis zum 30.09.2023 als einziges Insektizid zur Bekämpfung von Käfern im Wald zugelassen.

nen auf einer digitalen Handelsplattform mit Hilfe von CYCLOPS genutzt werden. Diese zusätzliche Nutzung von IT-Endgeräten betrifft die Erstellung und den Abruf von Anzeigen sowie die Speicherung und den Transfer der als digitaler Zwilling hinterlegten Informationen. Auf Basis von Annahmen zur Skalierung der Nutzung wurde für diese Transaktionen ein deutschlandweites Treibhauspotenzial von 977 kg CO₂-Äquivalenten pro Jahr approximiert. Darüber hinaus kann der praktische Einsatz der CYCLOPS-Lösungen eine erhöhte Nutzung von IT-Ressourcen (Server, Datenbanken) z. B. durch KI-Training erfordern. Der Strombedarf dieser KI-Trainingsphase war zum Projektzeitpunkt noch nicht absehbar, so dass hierfür kein Treibhauspotenzial ermittelt werden konnte.

Der angestrebte Nutzen der CYCLOPS-Tools in Bezug auf Nachhaltigkeit ergibt sich indirekt durch den vermehrten Einsatz von Sekundärkunststoffen. Je mehr Nutzer zur vermehrten Verwendung von recycelten Kunststoffen anstelle von Neukunststoff bewegt werden, umso größere Effekte sind diesbezüglich zu erwarten. Dies hängt jedoch stark von der zukünftigen Entwicklung des Marktes und der Angebotspalette für Kunststoffzyklate ab, ein Faktor, der außerhalb des Einflussbereiches der betrachteten Fallstudie liegt. Es wurde davon ausgegangen, dass der Einsatz von CYCLOPS im Wertstoffkreislauf von Kunststoffabfällen eine gezielte Auswahl und Optimierung von Aufbereitungsschritten bei der Rezyklataufbereitung ermöglicht. Dadurch können Recyclingprozesse optimiert werden, wodurch der Einsatz von Energie und Zusatzstoffen reduziert wird. Darüber hinaus kann die verbesserte Charakterisierung von Kunststoffzyklaten mit Hilfe von digitalen Zwillingen deren Einsatz in der Industrie erleichtern und damit den Rezyklateinsatz insgesamt positiv beeinflussen. In der Folge würde eine verstärkte Substitution von Neukunststoffen durch Rezyklate erfolgen und damit ein Beitrag zur Schonung nicht erneuerbarer Rohstoffe geleistet sowie eine Reduktion des Carbon Footprints im Kunststoffsektor bewirkt werden. Eine Quantifizierung dieser indirekten Entlastungspotenziale war im Rahmen der Selbstevaluierung nicht möglich.

Die quantitative Bewertung der zusätzlichen Umweltbelastungen durch den verstärkten Einsatz digitaler Technik (Effekte 1. Ordnung) konnte nur für die zu erwartende Nutzungsphase vorgenommen werden. Zum Zeitpunkt der Selbstevaluierung war noch nicht absehbar, in welchem Umfang das System den Einsatz zusätzlicher Rechenleistung erfordert. Dies hängt sehr stark von der im praktischen Einsatz zu erwartenden Anzahl der Nutzer, der Nutzungsintensität und der Art der im System hinterlegten Rezyklate ab. Die Quantifizierung der Effekte 2. Ordnung durch den Einfluss des Systems auf den Markt für Kunststoffzyklate war aus methodischen Gründen schwierig, da dieser Wirkungszusammenhang außerhalb des Einflussbereichs des vorliegenden Projektes liegt. Diese epistemologische Problematik erscheint symptomatisch für die Bewertung der Effekte 2. Ordnung von Digitaltechnologien, die ihre beabsichtigte Wirkung erst im Zusammenspiel von Dritten (z. B. Kunststoffrecycler und -verarbeiter) entfalten, und deshalb für die Projektbeteiligten nicht direkt messbar oder abschätzbar sind.

4.2.2 DigInform

Ziel des unter der Leitung der Fraunhofer-Einrichtung für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie (IWKS) laufenden Projektes ist die Entwicklung eines digitalen Informationsmanagementsystems (IMS) für die Akteurskette der Kreislaufwirtschaft (DigitalGreentech 2023d). Die Akteurskette wird im Projekt von Unternehmen der produzierenden Industrie und Entsorgungsunternehmen dargestellt, welche das in der Projektlaufzeit entwickelte IMS als Plattform nutzen und erproben. Das IMS dient dazu die Kommunikationswege zwischen Verursacher und Erzeuger von Nebenprodukten zu vereinfachen und zusätzlich Vertretern der produzierenden Industrie die Möglichkeit einer Vermarktung ihrer Nebenerzeugnisse zu bieten.

Durch die Vernetzung von Produzenten und Entsorgern entstehen Synergien für mögliche Verwertungswege der Rückstände und Fehlchargen. Wichtige Informationen (Analysezertifikate, Gebindegrößen) für den potenziellen Käufer können dabei im IMS hinterlegt werden. Der Fokus liegt auf dem Wertschöpfungsnetzwerk von produzierenden Unternehmen der chemischen Industrie und soll diesen Akteuren ermöglichen, im Sinne einer industriellen Symbiose Angebot und Nachfrage von Produktionsrückständen zusammenzuführen. Damit soll die Ressourceneffizienz der Industrie verbessert und die Menge an nicht verwerteten Abfällen reduziert werden.

Im Rahmen der Selbstevaluierung für das Projekt DigInform wurde eine vereinfachte Abschätzung der Entlastungs- und Belastungspotenziale durch das IMS vorgenommen. Der Schwerpunkt lag dabei auf der Abschätzung des CO₂-Fußabdrucks durch das IMS im Vergleich zu den CO₂-Minderungspotenzialen durch den verstärkten Einsatz von Sekundärrohstoffen in der Industrie.

Aufgrund der breiten Einsatzmöglichkeiten eines solchen IMS für den Handel mit einer Vielzahl völlig unterschiedlicher Produktionsrückstände kann das THG-Reduktionspotenzial, das sich aus der Substitution von Primärrohstoffen durch Nebenprodukte und Sekundärrohstoffe aus der produzierenden Industrie ergibt, nicht pauschal bestimmt werden. Daher erfolgte die Abschätzung des Carbon Footprints exemplarisch anhand eines Use Cases zum Handel mit Ammoniumphosphat, das als Nebenprodukt in der chemischen Industrie anfällt und als Nährlösung in Kläranlagen eingesetzt werden kann. Bislang wird der Handel zwischen Erzeuger und Abnehmer in der Regel in getrennten Transaktionen per Telefon und E-Mail abgewickelt. Das IMS kann nun diese Transaktionen effizienter gestalten. Neben der Einsparung von E-Mail, Drucker und Papier wird eine Erhöhung der Substitutionsrate von primären Nährlösungen (Harnstoff und Diammonium-Phosphat) und eine Verringerung der Abfallentsorgung erwartet. Demgegenüber stehen Mehraufwendungen für die digitale Infrastruktur des IMS sowie dessen Stromverbrauch im Betrieb. Als Ergebnis des Use Cases für den Handel mit 1 Tonne Ammoniumphosphat ergibt sich für die Effekte 1. Ordnung ein anteiliger CO₂-Fußabdruck von 4,2 kg CO₂-Äquivalenten für den Betrieb des IMS. Zusätzlich wurde unter der Annahme eines durchschnittlichen Transportweges von 390 km für das Handelsgut ein CO₂-Fußabdruck von 73 kg CO₂-Äquivalenten ermittelt. Die Summe der Entlastungspotenziale durch die Substitution von Primärrohstoffen beträgt 280 kg CO₂-Äquivalenten pro Tonne Handelsgut. Zusätzlich wurde eine THG-Entlastung durch optimierte Kommunikation von 4,5 kg CO₂-Äquivalenten ermittelt, wobei der Großteil auf die eingesparte Nutzungszeit von IT-Endgeräten entfällt. Insgesamt ergibt sich eine rechnerische Nettoentlastung von 207 kg CO₂-Äquivalenten pro Tonne Handelsgut. Eine Hochrechnung der Entlastungseffekte auf den potenziellen Gesamtumsatz aller mit dem IMS möglichen Transaktionen in der zukünftigen Anwendungsphase wurde nicht vorgenommen, da hierfür derzeit keine Datenbasis vorliegt. Ergänzend wurde im Rahmen des Projekts noch weitere qualitative und quantitative Ressourceneffizienzanalysen durchgeführt.

Ähnlich wie bei CYCLOPS ist die Analyse der Effekte 2. Ordnung bei DigInform aus methodischen Gründen dadurch erschwert, dass die Effekte erst durch die Interaktion Dritter (in diesem Fall Marktteilnehmer der chemischen Industrie) mit dem DigInform-System entstehen. Da sich dieses noch im Aufbau befindet, fehlen zum jetzigen Zeitpunkt wesentliche Informationen über die Anzahl der Transaktionen und vor allem über die Art der dort gehandelten Sekundärrohstoffe. Durch die Betrachtung einer hypothetischen Transaktion konnte zumindest gezeigt werden, dass die potentielle Umweltentlastung durch die Erleichterung des Handels mit Produktionsrückständen die zusätzliche Umweltbelastung durch den Einsatz der digitalen Technologie mehr als aufwiegt.

4.2.3 DiKueRec

DiKueRec entwickelt unter der Leitung des Instituts für Umwelt & Energie, Technik & Analytik (IUTA) eine auf digitalen Zwillingen basierende Technologie zur effizienten Steuerung des Kühlgeräte-Recyclings (DigitalGreentech 2023e). Dazu erfolgt eine sensorische Erfassung von Eingangs-, Betriebs- und Ausgangsdaten bestehender Recyclinganlagen und der dort verarbeiteten Altgeräte. Gemäß dem aktuellen Stand der Technik moderner Recyclinganlagen werden Kühl-Altgeräte in einem speziellen Zerlegeprozess behandelt, um eine Freisetzung darin enthaltener umweltschädlicher Stoffe zu verhindern und diese sicher zu entfernen. Dies ist insbesondere bei Altgeräten, die noch FCKW als Kältemittel in den Kühlaggregaten oder als Treibmittel in den Isolierschäumen enthalten, von besonderer Bedeutung, da FCKW in hohem Maße eine ozon- und klimaschädigende Wirkung haben. Das ist in modernen Recyclinganlagen Stand der Technik, jedoch gelangen aus Vorsorgegründen auch viele FCKW-freie Altgeräte in die Zerlegung. Um die ökonomische und ökologische Effizienz der Sortierung zu verbessern, soll der Anteil falsch positiver Ergebnisse in der Sortierung reduziert werden. Dazu wird eine Datenbank für Altkühlgeräte mit gesicherten Informationen zum FCKW-Gehalt aufgebaut und mit digitalen Zwillingen der Altgeräte abgeglichen. Alle eingehenden Altgeräte werden mittels Laserabtastung und KI-gestützter Bilderkennung erfasst und die Daten in einen digitalen Zwilling überführt. Dadurch soll die Aufbereitung effizienter und die Demontage und Verwertung fälschungssicher und transparent dokumentiert werden.

Im Zuge der Selbstevaluierung des Projekts mithilfe einer vereinfachten ökobilanziellen Berechnung wurden folgende Umweltentlastungspotenziale identifiziert: Eine höhere Zuverlässigkeit der KI-gestützten Identifizierung von FCKW-haltigen Altgeräten reduziert das Risiko einer Freisetzung von klimaschädlichen FCKW. Durch eine präzisere Erfassung der Altgeräte ist zum Beispiel eine optimierte Absaugung der Treibmittel und eine bessere Steuerung des Belastungszustandes der zugehörigen Filteranlage möglich. Dies erlaubt eine genauere Planung der Standzeiten dieser Filteranlage, wodurch beispielsweise die energieintensive Regeneration der Aktivkohle und die Produktion des dafür benötigten Stickstoffs reduziert werden kann.

Mithilfe einer vereinfachten Ökobilanz lässt sich die Klimawirkung der Energieeffizienzsteigerung unter Berücksichtigung der Belastungen durch die zusätzlich benötigte Rechnerleistung für den Betrieb des KI-Systems abschätzen. Das Entlastungspotenzial durch die verbesserte Steuerung der Filteranlage lässt sich konkret abschätzen: Hochgerechnet auf alle Entsorgungsanlagen in Deutschland würde die Technologie durch die Einsparung von elektrischer Energie zu einer Entlastung von 36.600 kg CO₂-Äquivalenten führen, durch den reduzierten Verbrauch von Aktivkohle zu weiteren 17.800 kg CO₂-Äquivalenten – insgesamt eine mögliche Entlastung von 54.400 kg CO₂-Äquivalenten. Dem gegenüber stehen zusätzliche Belastungen von 10.700 kg CO₂-Äquivalenten durch den zusätzlichen Einsatz der erforderlichen Digitaltechnik. In Summe wird die Nettoentlastung auf 43.700 kg CO₂-Äquivalente geschätzt.

Da sich das Vorhaben zum Zeitpunkt der Selbstevaluierung noch in einem frühen Stadium der Technologieentwicklung befand, konnten die besonders relevanten Umweltentlastungspotenziale durch die angestrebte Reduktion der FCKW-Freisetzung im Zerlegeprozess nur auf der Basis von Annahmen über deren Größenordnung abgeschätzt werden. Bei einer angenommenen Effizienzsteigerung von 1 % bei der Erkennung FCKW-haltiger Altgeräte im Entsorgungsprozess ergibt sich rechnerisch ein deutschlandweites Nettoentlastungspotenzial von 20.000 Tonnen CO₂-Äquivalenten durch die Vermeidung ungewollter FCKW-Emissionen. Dieses Potenzial kann jedoch erst nach Inbetriebnahme des Verfahrens verifiziert werden. Gleiches gilt für die mögliche Verbesserung der

Standzeiten der Filteranlage. Hier wurden Annahmen zur Einsparung von Aktivkohle getroffen, da noch keine Messwerte vorlagen.

Die oben genannte Abschätzung möglicher Entlastungspotenziale in der Größenordnung von 20.000 Tonnen CO₂-Äquivalenten lässt die richtungssichere Aussage zu, dass sich die zusätzlichen Umweltbelastungen von ca. 10 t CO₂-Äquivalenten durch den Einsatz der Digitaltechnik in der Praxis schnell amortisieren können. Dies setzt jedoch voraus, dass es gelingt, die Identifizierung von FCKW-belasteten Kühlgeräten im Recyclingprozess wie geplant zu verbessern.

4.2.4 DiRecLIB

Im Rahmen des Vorhabens DiRecLIB - „Direkte Recycling von Aktivmaterialien aus Lithium-Ionen-Batterien“ wird von den beteiligten Partnern ein hydromechanisches Trennverfahren, basierend auf elektrohydraulischer Zerkleinerung (EHZ) und Zentrifugation, optimiert durch numerische Verfahren (DigitalGreentech 2023f) entwickelt. Dazu werden die Prozessschritte in Form eines digitalen Zwillings kontinuierlich digital überwacht und gesteuert. Dies ermöglicht, für jede Zusammensetzung der Eingangsmaterialien die jeweils optimalen Prozessparameter zu ermitteln, um ein hochwertiges Rezyklat mit konstanter Qualität zu erzeugen.

Verfahrenstechnisch soll das neu zu entwickelnde hydromechanische Trennverfahren die bisher im LIB-Recycling vorherrschende hydrometallurgische oder pyrometallurgische Aufbereitung ersetzen. Der Ansatz des direkten Recyclings basiert auf der Zerkleinerung von LIB-Zellen im EHZ-Prozess mit anschließender gravimetrischer Auftrennung des Aktivmaterials mittels Zentrifuge. Dadurch wird die Anzahl der notwendigen Prozessschritte im Recycling sowie der Einsatz von Chemikalien bzw. Energie deutlich reduziert. Zudem sollen die Funktionsmaterialien der zyklisierten Zellen möglichst in ihrer aktiven Form erhalten bleiben und in den Produktionsprozess von Recycling- oder Neuzellen zurückgeführt werden. Dadurch wird die sonst notwendige Aufbereitung des Rezyklats zu Aktivmaterialien eingespart, wodurch sich der Einspareffekt bei Chemikalien bzw. Energie nochmals vergrößert. Im Zuge der Selbstevaluierung wurde ein Entlastungspotenzial von rund 49 Mio. kg CO₂-Äquivalenten pro Jahr ermittelt, welches sich unter der Annahme ergibt, dass das Verfahren künftig deutschlandweit im LIB-Recycling der jährlich anfallenden 2.500 Tonnen Aktivmaterial angewandt würde. Dem gegenüber steht ein Belastungspotenzial von etwa 4 Mio. kg CO₂-Äquivalenten pro Jahr für den Betrieb der hydromechanischen Trennanlage. Darin enthalten sind ca. 1.700 kg CO₂-Äquivalente pro Jahr für die zusätzlich erforderliche Digitaltechnik zum Betrieb des digitalen Zwillings als Teil der Steuerungsanlage. In Summe wird die mit dieser Technologie auf dem deutschen Markt für LIB-Recycling erzielbare Nettoentlastung auf 45 Mio. kg CO₂-Äquivalente pro Jahr geschätzt.

Die Berechnung der Einsparpotenziale basiert auf generischen Daten für Nickel-Kobalt-Mangan (NCM)-Aktivmaterialien. Diese Näherung spiegelt jedoch nicht die schnelle Entwicklung der Energiespeichertechnologie in Bezug auf die verwendeten Aktivmaterialien wider. Da das ermittelte Ergebnis stark auf dem Substitutionseffekt (Einspareffekte gegenüber den bisher dominierenden LIB-Aktivmaterialien und den dafür eingesetzten Recyclingverfahren) beruht, ergibt sich zwangsläufig eine gewisse Unsicherheit. Zudem basierte die Datengrundlage für das hydromechanische Trennverfahren DiRecLIB zum Zeitpunkt der Selbstevaluierung noch im Labormaßstab. Eine Hochskalierung auf industrielle Anlagengröße kann den Parameter Energieverbrauch noch deutlich verändern.

4.2.5 ODiWiP

Der „Optimierte Wertstoffkreislauf in der Papierindustrie“ (ODiWiP) bezieht sich auf die Anwendung von modernen Algorithmen des maschinellen Lernens (ML) sowie einer datentechnischen Vernetzung innerhalb der Grundstoff- und Prozessindustrie (DigitalGreentech 2023g). Ziel des von der Consultingtalents AG koordinierten Forschungsvorhabens ist die Nutzung innovativer Sensorik bei unterschiedlichen Prozessen des Papierrecyclings in Verbindung mit Big-Data-Ansätzen und ausgewählten Werkzeugen der Künstlichen Intelligenz. Dazu wird der Prototyp einer KI-Anwendung entwickelt, die dazu dienen soll, den Wertstoffkreislauf von der Sammlung und Sortierung des Altpapiers bis zur Herstellung des Papierproduktes zu optimieren und damit einen wesentlichen Beitrag zur Ressourcenschonung zu leisten.

Um eine belastbare Aussage zur Ressourceneinsparung treffen zu können, wird die prototypisch entwickelte KI-Anwendung durch den Einsatz bei einem Industriepartner getestet. Diese Testreihe war zum Zeitpunkt der Selbstevaluierung noch nicht abgeschlossen, so dass eine Quantifizierung der Umweltentlastungspotenziale noch nicht erfolgen konnte. Der angestrebte positive Einfluss der ODiWiP-Lösung auf die Umwelt basiert im Wesentlichen auf der Reduzierung des Einsatzes von Chemikalien, Wasser und Energie durch eine KI-gesteuerte Prozesssteuerung. Insbesondere erfolgte der Zugriff auf Prozessdaten aus internen Systemen und es wurde eine Verknüpfung zum Prozessleitsystem hergestellt, um auf eingehende Alarime zugreifen zu können. Der Prototyp verfügt über eine KI-basierte Situationserkennung des Maschinenzustandes sowie eine Inline-Prognose eines Qualitätsparameters des produzierten Papiers. Diese Informationen werden wiederum KI-basiert mit explizitem Fachwissen und konkreten Handlungsvorschlägen kombiniert. So kann der bzw. die Maschinenbedienende frühzeitig auf Abweichungen bei den Eigenschaften des Fertigprodukts oder Störungen im Produktionsprozess hingewiesen werden. Im Rahmen der gemeinsam mit dem Öko-Institut durchgeführten Ex-ante-Analyse wurde abgeschätzt, dass durch die angestrebte Lösung unter der Annahme einer einprozentigen Effizienzsteigerung bei bundesweiter Anwendung jährlich ca. 600.000 MWh Energie, 3.900 Tonnen Prozesschemikalien und 34.000 Tonnen Additive eingespart sowie die CO₂-Emissionen um 138.000 Tonnen reduziert werden können. Dem gegenüber steht ein auf Basis einer Extrapolation geschätztes zusätzliches Belastungspotenzial von 1.342 kg CO₂-Äquivalente pro Jahr, die dem Einsatz der zum Betrieb des ODiWiP-Systems zusätzlich benötigten Digitaltechnik zuzuordnen ist. Die vermutete Nettoentlastung des Verfahrens übersteigt somit das zusätzliche Belastungspotential um mindestens den Faktor 100.

Es besteht ein Zielkonflikt zwischen Altpapiersortierung und Papierproduktion. Die datenoptimierte Sortierung im Sinne des ODiWiP führt zu Mengenverlusten gegenüber der Anlieferung nach dem derzeit gültigen Papierstandard. Dieses Defizit erfordert die Gestaltung neuer digitaler Geschäftsmodelle, in denen die dem sortierten Altpapier zugeordneten Daten einen Wert erhalten, der die finanziellen Einbußen ausgleicht. Darüber hinaus entstehen dem Sortieranlagenbetreiber Entsorgungskosten für die anfallenden, für die Papierproduktion ungeeigneten Altpapierbestandteile. Auch diese Kosten müssen in einem solchen Geschäftsmodell berücksichtigt werden.

4.3 Projektcluster „Wasserwirtschaft“

4.3.1 DecS

Das von der Universität Kassel koordinierte Verbundvorhaben DecS verfolgt das Ziel, organische Spurenstoffe, die über kommunale Kläranlagen in Gewässer eingetragen werden, möglichst zielgerichtet aus den Abwasserströmen zu entfernen. Dadurch kann im Vergleich zu der derzeit praktizierten Prozessführung bei der weitergehenden Abwasserreinigung die Dosierung der benötigten Betriebsstoffe (Aktivkohle bzw. Ozon) reduziert werden, ohne die Reinigungsleistung negativ zu beeinflussen. Kernelement der Neuentwicklung ist ein Online-Spurenstoff-Messgerät, welches ein kontinuierliches Monitoring von Zu- und Ablauf der weitergehenden Abwasserreinigungsstufe gewährleistet. Die dabei erfassten Messdaten werden auf intelligente Weise verarbeitet und mit den in DecS entwickelten Modellsystemen vernetzt. Wichtige Fragestellungen bei den Forschungs- und Entwicklungsarbeiten beziehen sich auf die Konzeption einer nutzerorientierten Aufbereitung der Daten und die angestrebte Vernetzung mit einem digitalen Abbild der Anlage. Schließlich wird in digitalen Reallaboren die Machbarkeit einer großtechnischen Implementierung untersucht (DigitalGreentech 2023h).

Die im Vorfeld der Selbstevaluierung durchgeführte Ex-Ante-Analyse markiert die Herstellung und den Betrieb des Online-Spurenstoff-Messgeräts als das bedeutendste Belastungspotenzial der Neuentwicklung. Hinzu kommen Online-Datentransfers und -Speicher. Demgegenüber werden Entlastungspotenziale beim laufenden Betrieb der weitergehenden Abwasserreinigungsstufen auf den kommunalen Kläranlagen erwartet, die je nach Art durch einen geringeren Einsatz von Aktivkohle bzw. Ozon erzielt werden können.

Vor diesem Hintergrund ergibt die Selbstevaluierung ein Belastungspotenzial von rund 860 kg CO₂-Äquivalente. Bezugsgröße hierfür ist eine Analyseeinheit mit einem Online-Spurenstoff-Messgerät, das in einem klimatisierten Container untergebracht ist und für jede Kläranlage benötigt wird. Bemerkenswert in diesem Zusammenhang ist, dass die wichtigsten Beiträge zu diesem Belastungspotenzial nicht durch Herstellung und Betrieb des Online-Spurenstoff-Messgeräts verursacht werden, sondern auf die Containerherstellung und die für die Klimatisierung erforderliche Klimaanlage (23 % bzw. 44 % Anteil am Gesamtergebnis) zurückgeführt werden können.

Die Entlastungspotenziale der Neuentwicklung wurden im Rahmen der Selbstevaluierung bei der betrachteten Kläranlage (KA Dülmen, Lippeverband (EGLV) mit 55.000 Einwohnerwerten) auf ca. 8.450 kg CO₂-Äquivalente geschätzt. Diese stammen vollständig aus der eingesparten (pulverisierten) Aktivkohle, die bei dieser Kläranlage für die weitergehende Abwasserreinigung zum Einsatz kommt.

Insgesamt ergibt sich folglich eine Nettoentlastung von rund 7.590 kg CO₂-Äquivalente pro Kläranlage. Eine Hochskalierung auf ganz Deutschland konnte im Rahmen der Selbstevaluierung nicht geleistet werden, da hierfür vergleichsweise komplexe Allokationsfragestellungen geklärt werden müssen. Dieser Aspekt wurde jedoch im Zuge der vertiefenden Nachhaltigkeitsanalyse behandelt (vgl. Kapitel 5.1).

4.3.2 K2I

Das Projekt K2I hat zum Ziel, ein cloudbasiertes System für ein Non-Target Screening von Spurenstoffen zu entwickeln, um bisher nicht bekannte oder beachtete Stoffeinträge in Oberflächengewässer detektieren zu können. Unter der Koordination des TZW: DVGW-Technologiezentrum soll ein Demonstrator für einen „Spurenstoff-Tracker“ konzipiert und implementiert werden, wobei im Zusammenwirken des cloudbasierten Systems mit örtlich verteilten Laboratorien die Quellen von Spurenstoffeinträgen rasch eingegrenzt werden sollen. Für die Spurenanalytik kommen chromatographische Trennmethoden zum Einsatz, die mit hochauflösender Massenspektrometrie (LC-HRMS) gekoppelt werden. Die Non-Target-Screenings erzeugen umfangreiche Datenmengen, die bisher in spezialisierten Einzellaboren erhoben und ausgewertet werden mussten. Dank der automatisierten Auswertung in der Cloud mittels geeigneter Algorithmen können Spurenstoffe mit vergleichsweise geringerem zeitlichem Aufwand identifiziert und einer Eintragsquelle zugeordnet werden. Perspektivisch sollen auch mikrobiologische Parameter in das cloudbasierte System einbezogen werden; die grundsätzliche Machbarkeit hierfür wird bereits im Rahmen des Projekts untersucht. Um die Praxistauglichkeit des Spurenstoff-Trackers zu demonstrieren, ist ferner eine gemeinsam mit mehreren Wasserversorgern vorgesehen (DigitalGreentech 2023i).

Auf Basis der durchgeführten Ex-Ante-Analyse wurden die Herstellung und Nutzung der Analyse- und Digitaltechnologien (v. a. das LC-HRMS-Analysengerät sowie die Rechereinheit für die zentrale Datenbank) identifiziert. Relevante Entlastungspotenziale werden bei den Betriebsstoffen bzw.

-mitteln für die Trinkwasseraufbereitung im Wasserwerk (z. B. Aktivkohle, Ozon, Membranen) erwartet.

Vor diesem Hintergrund kam die Selbstevaluierung zu dem Ergebnis, dass die Herstellung und Nutzung der LC-HRMS-Analysengeräte mit 50.000 kg CO₂-Äquivalenten die Belastungspotenziale in Höhe von insgesamt rund 61.000 kg CO₂-Äquivalenten dominiert. Weitere Belastungspotenziale verursachen die Herstellung und die Nutzung von Desktop-Computern, Monitoren sowie Klimaanlage, die zum Betrieb der Digitaltechnik erforderlich sind.

Mit Blick auf die Entlastungspotenziale wurde ein Best-Case- und ein Worst-Case-Szenarios definiert. Im Best-Case-Szenario wird angenommen, dass auf Basis der Analyseergebnisse Maßnahmen zur Verbesserung der Rohwasserbeschaffenheit ergriffen werden. Durch eine verbesserte Rohwasserbeschaffenheit sind weniger Aufbereitungsstoffe (Aktivkohle, Ozon und Umkehrosiose) erforderlich. Dadurch kann es zu CO₂-Einsparungen von rund 8.400.000 kg CO₂-Äquivalenten kommen. Allein die Einsparungen im Bereich der Umkehrosiose haben einen Anteil von ca. 80 % an den gesamten Entlastungspotenzialen. Werden jedoch keine Maßnahmen bezüglich Gewässerbeschaffenheit und Aufbereitung ergriffen, resultieren keine Entlastungspotenziale (Worst-Case-Szenario).

Im Falle des Best-Case-Szenario beziffert sich folglich die Nettoentlastung auf ca. 8.300.000 kg CO₂-Äquivalente. Unter der Annahme des Worst-Case-Szenario treten nur die o. g. Belastungspotenziale auf. Es käme in diesem Fall daher zu einer Nettobelastung in Höhe von ca. 60.000 kg CO₂-Äquivalenten.

Jenseits der CO₂-Einsparungen lassen sich im Best-Case-Szenario auch Kosteneinsparpotenziale erschließen: Bei einer Verbesserung der Rohwasserbeschaffenheit können einzelne vorhandene Aufbereitungsstufen ggf. außer Betrieb genommen werden. Langfristig sind daher Einsparungen bei den Investitionen wahrscheinlich, wenn beim Bau von Neuanlagen Aufbereitungsstufen zur Entfer-

nung von Spurenstoffen entbehrlich werden. Eine Quantifizierung ist hier jedoch zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht möglich. Bei den Betriebsstoffen (Aktivkohle, Ozon und Umkehrosmose) können die Einsparpotenziale hingegen auf der Grundlage von Erfahrungswerten aus der Praxis für Deutschland auf rund 6,7 Mio. EUR pro Jahr abgeschätzt werden. Diese Einsparung kann allerdings nur dann erreicht werden, wenn aufgrund der Analyseergebnisse tatsächlich Maßnahmen (z. B. Außerbetriebnahme von Aufbereitungsstufen) ergriffen werden.

4.3.3 KIKI

Das vom August-Wilhelm Scheer Institut geleitete Forschungsvorhaben KIKI hat zum Ziel, die bestehenden Inspektionsverfahren zur Instandhaltung von Abwasserkanälen mit den Methoden des maschinellen Lernens anzureichern. Arbeitsschwerpunkte bilden eine KI-basierte automatisierte Erkennung von Schäden in Kanalwänden anhand von Filmdaten aus Kanalinspektionsfahrten sowie die Prognose von Alterungsprozessen im Kanalsystem. Die automatisierte Auswertung ermöglicht eine schnellere Inspektion sowie eine frühzeitige und möglichst zielgenaue Kanalsanierung (DigitalGreentech 2023j; Liebau 2023).

Im Rahmen der Ex-Ante-Analyse wurden als wesentliche Belastungspotenziale die Treibhausgasemissionen aus der Herstellung und dem Betrieb der benötigten digitalen Technologien identifiziert. Dabei handelt es sich vor allem um den CO₂-Fußabdruck der Rechner, die zur Übertragung und Auswertung der Inspektionsfilme erforderlich sind. Entlastungspotenziale ergeben sich hingegen in erster Linie durch die Einsparungen von Baumaterialien (vor allem Beton), wenn infolge einer optimierten Instandhaltungsstrategie aufwändige Kanalsanierungen reduziert beziehungsweise vermieden werden können.

Die mit dem skizzierten Untersuchungsrahmen durchgeführte Selbstevaluierung kommt zum Ergebnis, dass die Treibhausgasemissionen der digitalen Technologien durch die Einsparpotenziale bei den Baumaterialien überkompensiert werden können. Dabei wird angenommen, dass sich Kanalerneuerungen vermeiden lassen, wenn kleinere Schäden frühzeitig erkannt und repariert werden. Jährlich werden rund 6.000 km Kanalleitungen saniert, wobei circa 24 % komplett erneuert werden. Mit Blick auf die Belastungspotenziale wurden bei der Selbstevaluierung die durch Desktop-Computer, Modellentwicklung und Cloud-Speicherung verursachten CO₂-Emissionen auf rund 13.400 kg CO₂-Äquivalente beziffert. Die Entlastungspotenziale wurden mit ca. 197.000.000 kg CO₂-Äquivalente abgeschätzt, wobei diese v. a. durch eingesparte Mengen an Beton infolge einer längeren Nutzung der Abwasserkanäle ermöglicht werden. Allein die Einsparung von rund drei Metern Betonrohr mit einem Durchmesser von 140 cm (3,2 Tonnen CO₂-Äquivalente pro Meter) würde ausreichen, um den CO₂-Fußabdruck der entwickelten Software in Höhe von 10 Tonnen CO₂-Äquivalente zu kompensieren (Liebau 2023). Jenseits dieser quantifizierbaren Nachhaltigkeitsgewinne zeichnen sich auf qualitativer Ebene weitere positive Effekte mit Blick auf die SDGs ab. Dazu gehören der Grundwasserschutz durch Vermeiden der Versickerung von ungeklärtem Abwasser aus den Abwasserkanälen sowie die Verringerung von Kostensteigerungen bei Abwasser.

Ein wesentliches Fazit der Selbstevaluierung im Forschungsvorhaben KIKI ist die Erkenntnis, dass durch den vergleichsweise geringen Aufwand für KI-gestützte digitale Technologien im Kanalinspektionsmanagement erhebliche Einsparungen beim Betonverbrauch und den damit verbundenen CO₂-Emissionen erzielt werden können.

4.3.4 MOVE

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, die Unterwasservegetation und Wasserqualität in Seen mittels autonomer, schwarmfähiger Unterwasserroboter zu monitoren. Die von der Universität zu Lübeck entwickelten Roboter können Umweltdaten mittels Messsonden, Sonaren und Kameras digital erfassen. Die erhobenen Daten werden durch maschinelles Lernen in neuronalen Netzen automatisch ausgewertet und so die Vegetation und Wasserqualität kartiert (DigitalGreentech 2023k).

Im Zuge der Ex-Ante-Analyse wurden die Treibhausgasemissionen aus der Herstellung und dem Betrieb der Unterwasserroboter als relevante Belastungspotenziale identifiziert. Darüber hinaus verursachen die Datenübertragung und die Bildauswertung durch ihren Stromverbrauch eine zusätzliche Klimabelastung. Entlastungspotenziale wurden mit Blick auf die Substitution von Taucherausrüstungen (vor allem Taucheranzüge, Pressluft, Schlauchboote und Kraftstoff) identifiziert, die bei einer klassischen Gewässerüberwachung benötigt werden.

Dementsprechend fokussierte sich die Selbstevaluierung im Forschungsvorhaben zunächst auf die Ermittlung des CO₂-Fußabdrucks des Unterwasserroboters. Hierbei handelt es sich um ein komplexes System, das aus zahlreichen unterschiedlichen Werkstoffen und Komponenten besteht. Daraus resultierte die methodische Herausforderung, für die wesentlichen Bauteile geeignete Datensätze zur Abschätzung der Treibhausgasemissionen zu ermitteln. Mit Unterstützung des Öko-Instituts ist es schließlich gelungen, sowohl den Unterwasserroboter als auch die Taucherausrüstungen modelltechnisch abzubilden und die jeweiligen CO₂-Fußabdrücke mithilfe öffentlich zugänglicher Ökobilanzdatenbanken abzuschätzen. Auch bei diesem Forschungsvorhaben zeigen die Ergebnisse der Selbstevaluierung für die Neuentwicklung das Potential für eine signifikante Netto-CO₂-Einsparung. Bezogen auf die Herstellung der für das Monitoring benötigten Ausrüstung beträgt diese rund 810 kg CO₂-Äquivalente pro Monitoring-Einheit, wenn der Tauchroboter in einer Single-Formation zum Einsatz kommt. Allerdings muss die Vergleichbarkeit der Monitoring-Ergebnisse der Wasserqualität für beide Ansätze in weiteren Tests noch genauer untersucht werden.

Auf qualitativer Ebene wurden weitere, systemische Nachhaltigkeitsgewinne identifiziert. Dabei handelt es sich um den Schutz der Intaktheit von Ökosystemen sowie neue wissenschaftliche Erkenntnisse über die ökosystemaren Zusammenhänge zwischen Gewässerökologie und Klimawandel.

Jenseits der inhaltlichen Ergebnisse konnte aus methodischer Perspektive anhand des Tauchroboters demonstriert werden, dass der CO₂-Fußabdruck eines komplexen Systems mit Datensätzen aus kostenfreien öffentlichen Ökobilanzdatenbanken gut approximiert werden kann. In diesem Zusammenhang haben sich insbesondere die Datenbanken Idemat (2023), ProBas (2023) und Ökobaodat (2021) als hilfreich erwiesen.

4.3.5 i-SEWER

Das Projekt i-SEWER entwickelt eine auf künstlicher Intelligenz basierende Methodik zur autonomen und skalierbaren Steuerung von Mischwasserkanalnetzen (DigitalGreentech 2023l). Die Firma Grimm Water Solutions entwickelt komplexe Surrogatmodelle (d. h. digitale Zwillinge) des Kanalnetzes. Mit einem detaillierten hydrodynamischen Modell sollen alle Prozessdaten eines Kanalnetzes in Echtzeit analysiert werden. Die Erstellung dieser Surrogate erfolgt durch Deep-Learning-

Verfahren⁵ auf Basis von Simulationen. Die Anwendung dieser modellprädiktiven Regelung soll dazu beitragen, Anomalien wie z. B. hohe Pegelstände oder plötzliche Pegeländerungen frühzeitig zu erkennen und Steuerungsmaßnahmen zur Entlastung der entsprechenden Kanalabschnitte einzuleiten.

Der Einsatz hinreichend leistungsfähiger modellbasierter Steuerungen in bestehenden Abwassersystemen soll zu einer Entlastung der Umwelt in Form einer Verringerung der Wahrscheinlichkeit von Abwasserüberläufen aus überlasteten Kanalnetzen führen. In konventionellen Kanalnetzen erfolgt die Steuerung aufgrund von Erfahrungswissen; eine schnelle Reaktion auf Anomalien ist jedoch nicht immer möglich. So kommt es gelegentlich zu Abwasserüberläufen in natürliche Gewässer, die die Wasserqualität aquatischer Ökosysteme beeinträchtigen. Um dies zu verhindern, ist der Bau oder die Erweiterung von Rückhaltebecken notwendig. Diese Baumaßnahmen verursachen Treibhausgasemissionen, insbesondere durch die Zementherstellung für den verwendeten Beton. Mithilfe des KI-basierten Surrogatmodells kann die Überlaufwahrscheinlichkeit auch ohne den Bau solcher Rückhaltebecken reduziert werden. Je nach Größe der Rückhaltebecken lässt sich das Risiko eines Überlaufs zwischen 9 % und 91 % reduzieren. Basierend auf diesen Annahmen zum Wirkungszusammenhang wurde im Rahmen der Selbstevaluierung eine Bandbreite des THG-Minderungspotenzials für vermiedene Überlaufmengen ermittelt. Mit einem zusätzlichen Ausbauvolumen von 180 m³ können 61 % des Überlaufvolumens vermieden werden. Die Herstellung des dafür benötigten Zements verursacht 68 Tonnen CO₂-Äquivalente, was über eine Betriebsphase von 100 Jahren 682 kg CO₂-Äquivalente/Jahr ergibt.

Demgegenüber stehen zusätzliche Belastungspotenziale durch den Stromverbrauch der IT-Technik: Das Training des digitalen Zwillings (576 h/Jahr) verursacht 1 kg CO₂-Äquivalente/Jahr, die Nutzung des digitalen Zwillings mit einer aktiven Betriebszeit von 55 h/Jahr verursacht 0,03 kg CO₂-Äquivalente/Jahr. Daraus ergibt sich eine rechnerische Nettoentlastung von 681 kg CO₂-Äquivalente/Jahr.

Der im Rahmen der Selbstevaluierung betrachtete Umweltentlastungseffekt bezieht sich ausschließlich auf das THG-Potenzial aus dem Bau der vermiedenen Rückhaltebecken. Da bestehende Kanalnetze jedoch aus praktischen und wirtschaftlichen Gründen nicht zwangsläufig entsprechend nachgerüstet werden, ist dieses Referenzszenario eher hypothetischer Natur. Es dient dazu, für die THG-Berechnung eine Nutzengleichheit (= Reduzierung der Überlaufwahrscheinlichkeit) herzustellen. Die Entlastung der Gewässer von eingeleiteten Abwasserinhaltsstoffen kann hingegen nicht über das THG-Potenzial beschrieben werden. Die Schadstoffproblematik von Abwasserüberläufen wird in diesem Rahmen nicht betrachtet, da die im Abwasser enthaltenen Schadstoffe nicht durch die Bewertung einzelner bekannter Chemikalien beschrieben werden können.

Für die Betrachtung der Lebenszykluskosten wird das gleiche Szenario zugrunde gelegt: Neubau eines Rückhaltebeckens mit 180 m³ Stauraum und einer Betriebsdauer von 100 Jahren. Unter vereinfachten Annahmen errechnet sich eine jährliche Abschreibung der Investitionskosten von 2.450 EUR. Hinzu kommen noch Kosten für Grunderwerb und Unterhalt, die hier nicht berücksichtigt wurden. Die Investitionskosten für die digitale Technik zum Betrieb des i-Sewer-Systems fallen hingegen im Vergleich zu den Betriebskosten für Strom kaum ins Gewicht. Hier wird mit jährlichen Kosten in Höhe von 641 EUR gerechnet. Bei gleichem Nutzen (Reduktion der Überläufe um 82 %) erscheint der Einsatz des i-SEWER-Systems somit deutlich wirtschaftlicher (ca. 74 %) als der Neubau von Retentionsbecken.

⁵ Beim "Deep Learning" werden neuronale Netze eingesetzt, um große Datenmengen zu analysieren. Die Daten werden zunächst extrahiert und dann analysiert, um eine Vorhersage zu treffen.

4.4 Zwischenfazit zu den wichtigsten Erkenntnissen

In der folgenden Tabelle werden die einzelnen Ergebnisse der Selbstevaluierung mit Blick auf den CO₂-Fußabdruck zusammengefasst.

Tabelle 4-1: Ergebnisse der Selbstevaluierung mit Angaben zu Belastungspotenzial, Entlastungspotenzial und Nettoentlastung bezüglich CO₂-Fußabdruck

| Projekt | CO ₂ -Fußabdruck | | | | | | Anmerkungen |
|------------|-----------------------------|---|---|--|--|--------------------------------|---|
| | Relevanz | Aspekte (B: Belastungspotenziale; E: Entlastungspotenziale) | Belastungspotenziale [kg CO ₂ -Äquivalente] | Entlastungspotenziale [kg CO ₂ -Äquivalente] | Nettoentlastung [kg CO ₂ -Äquivalente] | geographischer Bezugsrahmen | |
| Blue2035 | | Aufgrund der anderen Ausrichtung des Projekts (keine Technologie- sondern Konzeptentwicklung) Austausch auf methodischer Ebene | | | | | |
| CYCLOPS | X | Primärdatenerfassung bei den Usern wahrscheinlich schwierig, da hierzu eine Marktbeobachtung nötig wäre | 977 | k.A. | k.A. | Deutschland | nur qualitative Begründung: Optimierung des Wertstoffkreislaufs von Kunststoffabfällen |
| DecS | X | Rechner (B); Sensoren (B); Datentransfer (B); Datenspeicherung (B); Strom (B,E); Aktivkohle (E); Ozon (E) | 857 | 8.450 | 7.593 | 1 Kläranlage (KA Dülmen) | Hochskalierung auf Deutschland wurde in der vertiefenden Nachhaltigkeitsanalyse vorgenommen. |
| DiGeBaSt | X | Rechner (B); Kameras (B); Datenscanner (B); Datentransfer (B); Datenspeicherung (B); Strom (B) Kunststoffplättchen (E); Barcodes (E); Sprühfarbe (E); Kraftstoffe (E) | 54.109 | 602.772 | 548.663 | Baden-Württemberg | Hochskalierung auf Deutschland wurde in der vertiefenden Nachhaltigkeitsanalyse vorgenommen. |
| Diginform | X | Sekundärrohstoffe gemäß Greenhousegass Protokoll Scope 3 | 285 | 77 | 207 | Deutschland | Hochskalierung auf Deutschland schwierig: Ergebnis bezieht sich auf eine beispielhafte Transaktion (Handelsvolumen 1 Tonne einer Chemikalie) |
| DiKueRec | X | vermeidene FCKW-Emissionen (E) | 10.700 | 54.400 | 43.700 | Deutschland | |
| DiRecUB | X | Datenerfassung beim Referenzszenario anspruchsvoll | 536.146 | 49.020.663 | 48.484.516 | Deutschland | Berechnung auf Basis generischer Daten für Aktivmaterial (NCM 811) |
| FORESTCARE | X | HPC-Rechner (B); Drohnen (B); Akkus (B); Datenübertragung (Satelliten) (B); Datenspeicherung (B) Strom (E); Treibstoffe (E); Pestizide (E) | 69.222 | (8.370.000) | (8.300.778) | Deutschland | Die CO ₂ -Einsparungen aus der vermiedenen Produktion von Insektiziden beruhen faktisch auf gesetzlichen Vorgaben und können folglich nicht dem Forschungsprojekt gutgeschrieben werden. |
| iSEWER | X | Herstellung und Betrieb der Rechner zur Erzeugung der Surrogatmodelle (B); Beton und Tiefbauarbeiten für den Bau von Regenrückhaltebecken (E) | 1 | 682 | 681 | 1 Regenrückhaltebecken | |
| K21 | X | Rechner (B); Datenübertragung (B); Datenspeicherung (B); Strom (B,E); Kraftstoffe (B,E) Aktivkohle (E); Ozon (E); Membranen (E) | 60.751 | (8.410.000) | (8.349.249) | Deutschland | Die Entlastungspotenziale beziehen sich auf das Best-Case-Szenario; im Worst-Case-Szenario sind keine Entlastungseffekte zu erwarten. |
| KIKI | X | Rechner (B); Datenübertragung (B); Datenspeicherung (B) Strom (B,E); Kraftstoffe (B,E) | 13.355 | 197.000.000 | 196.986.645 | Deutschland | Hauptgrund für die Nettoentlastung ist der eingesparte Beton durch längere Nutzung der Kanäle. |
| MOVE | X | Herstellung Unterwasserroboter (B); Betrieb Unterwasserroboter und Bildauswertung (B); Substitution von Tauchausrüstungen (E) | 674 | 1.485 | 811 | 1 Monitoring-Einheit | Die Ergebnisse beziehen sich auf die Variante mit nur einem Tauchroboter (Single-Formation). Die Vergleichbarkeit der Monitoring-Ergebnisse der Wasserqualität muss noch genauer untersucht werden. |
| ODIWIP | X | Verifizierung der angestrebten Reduzierung des CO ₂ -Ausstoßes jährlich um 138.000 t | 1.342 | k.A. | k.A. | k.A. | |

Quelle: Eigene Darstellung

Grundsätzlich zeigen die Ergebnisse der Selbstevaluierung, dass die Belastungspotenziale leichter zu quantifizieren waren als die Entlastungspotenziale. Teilweise war aber bereits die Ermittlung der Belastungspotenziale aufwändig und methodisch schwierig, insbesondere im Falle komplexer digitaler Produkte bzw. Dienstleistungen. Ein gutes Beispiel hierfür ist der Tauchroboter im Forschungsvorhaben „MOVE“ (vgl. Kapitel 4.3.4), der über eine Vielzahl verschiedener Komponenten verfügt. Ein weiteres Problem bei der Quantifizierung von Belastungspotenzialen besteht darin, dass der Bedarf an digitalen Geräten während des F&E-Prozesses nur schwer antizipiert werden kann. Auf organisatorischer Ebene kommt hinzu, dass in den einzelnen Forschungsprojekten die Zuständigkeiten und Zugänge zu spezifischen Daten oftmals auf eine Vielzahl von Personen verteilt sind.

Darüber hinaus konnte bei der Selbstevaluierung beobachtet werden, dass im Quervergleich der verschiedenen Anwendungsfelder der Digitalisierung bestimmte Sektoren vor vergleichsweise größeren Herausforderungen stehen als andere. Sowohl bei der Ex-ante-Analyse als auch bei der Selbstevaluierung haben die Erfahrungen aus der Praxis gezeigt, dass einige Forschungsvorhaben bei der Festlegung des Untersuchungsrahmens vor besonderen Herausforderungen hinsichtlich der Bilanzierungsmethoden und der Datenverfügbarkeit stehen. Die für die Selbstevaluierung entwickelten Instrumente waren daher nicht für alle Forschungsvorhaben gleichermaßen praktikabel. Insbesondere die Hochskalierung der Be- und Entlastungspotenziale erwies sich in den Forschungsprojekten aus dem Bereich der Kreislaufwirtschaft als anspruchsvoll, da diese bei den entwickelten Handelsplattformen jeweils vom Verhalten einer Vielzahl unterschiedlicher Marktteilnehmer und Akteure abhängt (vgl. hierzu auch Kapitel 4.2.1). In diesem Zusammenhang kann der methodische Ansatz der Szenariotechnik hilfreich sein. Allerdings wird ein solches Vorgehen im Recyclingsektor schnell sehr komplex und zeitaufwändig.

Unabhängig davon kann aber auch festgehalten werden, dass Umweltentlastungspotenziale zunehmend als Innovationstreiber angeführt werden. Dies birgt aber auch die Gefahr, dass hohe Erwartungen geweckt werden, die im Einzelfall nur schwer durch evidenzbasierte Daten zu belegen sind.

5 Ergebnisse der vertiefenden Nachhaltigkeitsanalysen

Im Anschluss an die Selbstevaluierung durch alle Forschungsvorhaben waren in der dritten Stufe der Nachhaltigkeitsanalysen von NetDGT vertiefende Nachhaltigkeitsanalysen bei drei ausgewählten Forschungsvorhaben vorgesehen, die unter Federführung des Öko-Instituts durchgeführt wurden.

Die Auswahl der Forschungsprojekte für die dritte Phase erfolgte anhand klar definierter Kriterien. Diese beziehen sich auf die methodische Sinnhaftigkeit und Machbarkeit der geplanten ökobilanziellen Untersuchungen sowie auf die Motivation der Forschungsprojekte, sich daran zu beteiligen, v. a. durch Bereitstellung notwendiger Primärdaten.

Unter Anwendung dieser Kriterien wurden in Abstimmung mit dem Fördermittelgeber die Forschungsvorhaben „DecS“, „DiGeBaSt“ und „DiRecLIB“ für die vertiefenden Nachhaltigkeitsanalysen ausgewählt. Mit dieser Auswahl konnte sichergestellt werden, dass alle in der Fördermaßnahme betrachteten Anwendungsfelder (Forst-, Kreislauf- und Wasserwirtschaft) abgedeckt sind.

In den folgenden Kapiteln werden die Ergebnisse der vertiefenden Nachhaltigkeitsanalysen für die drei genannten Forschungsvorhaben dargestellt (vgl. Kapitel 5.1 bis 5.3).

5.1 DecS

5.1.1 Zielsetzung und Abgrenzung zur Selbstevaluierung

Die vertiefende Nachhaltigkeitsanalyse im DecS-Projekt hat zunächst zum Ziel, vorhandene Lücken der vom Forschungsvorhaben durchgeführten Selbstevaluierung (vgl. Kapitel 4.3.1) zu schließen. Dabei handelt es sich v. a. um die Modellierung des WATERTRACE™-Sensor, einem Online-Spurenstoff-Messgerät mit mehreren Systemkomponenten, welches als Kernelement der Neuentwicklung ein kontinuierliches Monitoring des Zu- und Ablaufs der weitergehenden

Abwasserreinigungsstufe von Kläranlagen ermöglicht. Darüber hinaus werden im Rahmen der vertiefenden Nachhaltigkeitsanalyse eine Konsolidierung und Vervollständigung der Entlastungseffekte bei Kläranlagen mit gezielter Spurenstoffelimination und schließlich eine Hochskalierung der auf Kläranlagen-Ebene vorliegenden Ergebnisse auf ganz Deutschland vorgenommen.

5.1.2 Methodische Vorgehensweise und grundlegende Annahmen

Hinsichtlich der methodischen Vorgehensweise und der Grundannahmen der durchgeführten Analysen sollen zunächst die Systemgrenzen, die funktionelle Einheit sowie die verwendeten Wirkungskategorien beschrieben werden.

5.1.2.1 Systemgrenzen

Gegenstand der vertiefenden Nachhaltigkeitsanalysen im DecS-Projekt ist ein Vergleich des Systems mit Digitaltechnologie mit einem Referenzsystem. Bei dem System mit Digitaltechnologie steht hardwaretechnisch die Herstellung des WATERTRACE™-Sensors, die Herstellung und der Betrieb der für die Auswertung der Messergebnisse erforderlichen Rechnerinfrastruktur (inkl. Datentransfers) sowie der für die Anlageneinhausung und -klimatisierung erforderliche Container (mit Klimaanlage) im Mittelpunkt (vgl. Kapitel 4.3.1).

Beim Referenzsystem werden im Vergleich dazu im Zu- und Ablauf der weitergehenden Abwasserreinigungsstufe der Kläranlage nur jeweils eine SAK₂₅₄-Sonde (inkl. Controller) benötigt. Weiterhin werden beim Referenzsystem je nach Verfahrensweise der gezielten Spurenstoffelimination zusätzlich benötigte Mengen an pulverisierter Aktivkohle (PAK) und Ozon berücksichtigt.

5.1.2.2 Funktionelle Einheit

Die funktionelle Einheit stellt die zentrale Bezugsgröße für alle Inputs und Outputs der Analyse dar. Als funktionelle Einheit für die vertiefenden Nachhaltigkeitsanalysen wird (wie schon bei der Selbstevaluierung) der Betrieb einer Kläranlage über einen Zeitraum von einem Jahr betrachtet. Die genaue Definition der Kläranlage ist von der Verfahrensweise der gezielten Spurenstoffelimination (Aktivkohle-Adsorption bzw. Ozonierung) abhängig und kann Kapitel 5.1.3.3 bzw. Kapitel 5.1.3.4 entnommen werden.

5.1.2.3 Wirkungskategorien

Neben dem bereits bei der Selbstevaluierung betrachteten CO₂-Fußabdruck bzw. Treibhauspotenzial (GWP) werden im Rahmen der vertiefenden Nachhaltigkeitsanalyse auch folgende Ökobilanz-Wirkungskategorien bzw. Sachbilanzindikatoren ermittelt:

- Kumulierter Energiebedarf (KEA);
- Abiotischer Ressourcenverbrauch (ADP);
- Versauerungspotenzial (AP);
- Eutrophierungspotenzial (EP);
- Photooxidantienpotenzial (POCP).

Das GWP wird nach IPCC (2021) berechnet, die übrigen Indikatoren (außer KEA) nach PEF v3.0 (Europäische Kommission 2021). Als Ökobilanz-Datenbank kommt bei den Berechnungen Ecoinvent v3.9.1 (Ecoinvent 2023) zum Einsatz.

5.1.3 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der vertiefenden Nachhaltigkeitsanalyse vorgestellt. Dazu wird zunächst auf die Modellierung komplexer digitaler Produkte und Verbrauchsmaterialien eingegangen, die im Rahmen der Selbstevaluierung nicht betrachtet werden konnten (vgl. Kapitel 5.1.3.1). Kapitel 5.1.3.2 enthält die auf dieser Datenbasis aktualisierten und konsolidierten Belastungspotenziale. Anschließend werden die Entlastungspotenziale ermittelt, wobei eine Fallunterscheidung zwischen einer gezielten Spurenstoffelimination mit Aktivkohle-Adsorption (vgl. Kapitel 5.1.3.3) sowie mit Ozonierung (vgl. Kapitel 5.1.3.4) vorgenommen wird. Exemplarisch wird diese Fallunterscheidung anhand der Kläranlagen Dülmen (Adsorption an Pulveraktivkohle) und Bad Sassendorf (Ozonierung) durchgeführt. Schließlich wird in Kapitel 5.1.3.6 ein Ansatz entwickelt, wie die Be- und Entlastungspotenziale auf ganz Deutschland hochgerechnet werden können.

5.1.3.1 Modellierung komplexer digitaler Produkte

Bei den betrachteten komplexen digitalen Produkten handelt es sich zum einen um den WATERTRACE™-Sensor als die zentrale Anlagenkomponente des Systems mit Digitaltechnologie. Dieser wurde einschließlich der zugehörigen peripheren Anlagenkomponenten modelltechnisch abgebildet. Ferner wurden als weitere Bestandteile des Systems mit Digitaltechnologie ein Monitor sowie der für die Datentransfers benötigte Router ökobilanziell untersucht.

WATERTRACE™-Sensor

Für den WATERTRACE™-Sensor existieren keine Datensätze in öffentlichen oder kommerziellen Ökobilanzdatenbanken. Folglich mussten die einzelnen Anlagenkomponenten (Sensor, Controller, Umwälzpumpen und Schaltschrank) entsprechend ihrer werkstofflichen Zusammensetzung modelliert bzw. approximiert werden. Dabei wurde für die beiden Umwälzpumpen mit einem Durchfluss von jeweils 120 - 150 l/h eine Masse von 0,2 kg je Pumpe angenommen; die Umweltbelastungen ihrer Herstellung wurden mit einem vorhandenen Datensatz aus der Ökobilanz-Software-Ecoinvent skaliert. Für den Schaltschrank aus Edelstahl wurde ausgehend von der Gesamtmasse der Anlage und unter Abzug der übrigen Komponenten eine Masse von rund 142 kg ermittelt.

Mit diesen Annahmen konnte der CO₂-Fußabdruck für die Herstellung eines WATERTRACE™-Sensors mit 56 kg CO₂-Äquivalente pro Jahr Nutzungsdauer abgeschätzt werden. Als nutzbare Lebensdauer wurde für den Sensor, den zugehörigen Controller und den Schaltschrank ein Zeitraum von 15 Jahren sowie für die Pumpen ein Zeitraum von fünf Jahren angenommen.

Entsprechend der Wahl der Wirkungskategorien wurden zusätzlich zum CO₂-Fußabdruck auch die Indikatoren KEA, ADP, AP, EP und POCP ermittelt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird auf eine Dokumentation der Einzelergebnisse an dieser Stelle verzichtet; die Untersuchungsergebnisse fließen jedoch in die Gesamtergebnisse (vgl. Kapitel 5.1.3.6) mit ein.

Monitor und Router

Für den Monitor und den Router konnte jeweils auf vorhandene Datensätze der Ökobilanz-Software-Ecoinvent zurückgegriffen werden. Aufgrund der Nutzungsbestimmungen dieser Software können

die Ergebnisse für die berücksichtigten Wirkungskategorien allerdings in dem vorliegenden Bericht nicht pro Einheit ausgewiesen werden. Diese fließen jedoch ebenfalls in die Gesamtergebnisse (vgl. Kapitel 5.1.3.6) mit ein.

5.1.3.2 Aktualisierung und Konsolidierung der Belastungspotenziale

In der folgenden Tabelle werden exemplarisch für den CO₂-Fußabdruck die Ergebnisse der relativen⁶ Belastungspotenziale aus der vertiefenden Nachhaltigkeitsanalyse denen aus der Selbstevaluierung gegenübergestellt. Bezugsrahmen für die Ergebnisse ist jeweils eine Kläranlage mit Reinigungsstufe zur gezielten Spurenstoffelimination.

Tabelle 5-1: Gegenüberstellung der Ergebnisse aus Selbstevaluierung und vertiefender Nachhaltigkeitsanalyse für die Belastungspotenziale am Beispiel des Treibhausgaspotenzials

| Herstellung der Digitalisierungstechnik | | Ergebnisse der Selbstevaluierung | | Ergebnisse der vertiefenden Nachhaltigkeitsanalyse | |
|---|---------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|--|--|
| Produkt / Dienstleistung | kg CO ₂ -Äquivalente | Bezugsgröße | kg CO ₂ -Äquivalente | Bezugsgröße | |
| Computer | 69 | 1 Stück | 44 | 1 Stück | |
| Monitor | k.A. | 1 Stück | 70 | 1 Stück | |
| Watertrace-Sensor (inkl. Controller, Pumpe und Schaltschrank) | 100 | 1 Stück | 56 | 1 Stück | |
| Container | 194 | 1 Stück | 136 | 1 Stück | |
| Klimaanlage | 11 | 1 Stück | 45 | 1 Stück | |
| Router | k.A. | 1 Stück | 22 | 1 Stück | |
| Salzsäure (Verbrauchsmaterial) | k.A. | 0,45 kg / Jahr | 0,2 | 0,45 kg / Jahr | |
| Summe Geräteherstellung | 374 | | 374 | | |

| Nutzung der Digitalisierungstechnik | | Ergebnisse der Selbstevaluierung | | Ergebnisse der vertiefenden Nachhaltigkeitsanalyse | |
|---|---------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|--|--|
| Produkt / Dienstleistung | kg CO ₂ -Äquivalente | Bezugsgröße | kg CO ₂ -Äquivalente | Bezugsgröße | |
| Computer | 38 | 1 Stück | 69 | 1 Stück | |
| Monitor | k.A. | 1 Stück | 74 | 1 Stück | |
| Watertrace-Sensor (inkl. Controller, Pumpe und Schaltschrank) | k.A. | 1 Stück | | 1 Stück | |
| Klimaanlage | 374 | 1 Stück | 433 | 1 Stück | |
| Router | k.A. | 1 Stück | 62 | 1 Stück | |
| Online Datenspeicher | 69 | 500 GB | 81 | 500 GB | |
| Daten-Transfer | 2 | 30 GB/Jahr | 0,03 | 30 GB/Jahr | |
| Summe Gerätenutzung | 483 | | 719 | | |

| | | | | |
|-----------------------------------|------------|--------------------------------------|--------------|--------------------------------------|
| Summe Belastungspotenziale | 857 | kg CO₂-Äquivalente | 1.092 | kg CO₂-Äquivalente |
|-----------------------------------|------------|--------------------------------------|--------------|--------------------------------------|

Quelle: Eigene Darstellung

Zusätzlich zum CO₂-Fußabdruck wurden auch die Indikatoren KEA, ADP, AP, EP und POCP ermittelt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird an dieser Stelle wiederum auf eine Dokumentation der Einzelergebnisse verzichtet; diese sind jedoch ebenfalls in den Gesamtergebnissen (vgl. Kapitel 5.1.3.6) enthalten.

Aus der Tabelle wird ersichtlich, dass die Ergebnisse der vertiefenden Nachhaltigkeitsanalysen bei den Belastungspotenzialen mit rund 1.100 kg CO₂-Äquivalenten insgesamt moderat höher ausfallen als bei der Selbstevaluierung (rund 900 kg CO₂-Äquivalente). Ursache hierfür sind in erster Linie die Datenlücken (z. B. für Herstellung und Betrieb von Monitor und Router), die bei der vertiefenden Nachhaltigkeitsanalyse aufgelöst werden konnten.

⁶ Es werden jeweils die relativen Be- und Entlastungspotenziale im Quervergleich zwischen dem System mit Digitaltechnologie und dem Referenzsystem ausgewiesen.

5.1.3.3 Entlastungspotenziale bei Kläranlagen mit Aktivkohle-Adsorption (Fallbeispiel Kläranlage Dülmen)

Wie eingangs erwähnt ist mit Blick auf die Entlastungspotenziale eine Fallunterscheidung zwischen einer gezielten Spurenstoffelimination mittels Aktivkohle-Adsorption sowie mittels Oxidation mit Ozon erforderlich. Die Entlastungspotenziale bei Kläranlagen mit Aktivkohle-Adsorption werden exemplarisch anhand der Kläranlage Dülmen ermittelt. Die Anlage besitzt eine Ausbaugröße von 55.000 Einwohnerwerten, wobei zusätzlich zur mechanischen und biologischen Reinigung mit gezielter Nährstoffelimination (Stickstoff und Phosphor) eine weitergehende Abwasserreinigung zur gezielten Spurenstoffelimination mittels Aktivkohle-Adsorption betrieben wird (EGLV 2020).

Für diese Kläranlage wird aufgrund von Werten aus dem digitalen Modell davon ausgegangen, dass bei dem System mit Digitaltechnologie im Mittel eine Einsparung von pulverisierter Aktivkohle (PAK) in Höhe von 5 % erzielt werden kann. Pro Jahr entspricht dies einer Masse von rund einer Tonne PAK (Morck 2023).

Zusammen mit den beim Referenzsystem eingesparten SAK₂₅₄-Sensoren ergibt sich für das vorliegende Fallbeispiel ein Entlastungspotenzial in Höhe von insgesamt 8.558 kg CO₂-Äquivalenten (siehe folgende Tabelle). Dieses unterscheidet sich nur unwesentlich von dem Ergebnis der Selbstevaluierung, da dort bereits mit vergleichbaren Annahmen bezüglich der PAK-Einsparung gerechnet wurde.

Tabelle 5-2: Gegenüberstellung der Ergebnisse aus Selbstevaluierung und vertiefender Nachhaltigkeitsanalyse für die Entlastungspotenziale bei Kläranlagen mit Aktivkohle-Behandlung (Fallbeispiel Kläranlage Dülmen)

| Rohstoffe | Ergebnisse der Selbstevaluierung | | Ergebnisse der vertiefenden Nachhaltigkeitsanalyse | |
|---|--|---|--|---|
| | kg CO ₂ -Äquivalente | Bezugsgröße | kg CO ₂ -Äquivalente | Bezugsgröße |
| Einsparung von Aktivkohle | 8.450 | Jährliches Einsparpotenzial bei der Kläranlage Dülmen (55.000 Einwohnerwerte) | 8.549 | Jährliches Einsparpotenzial bei der Kläranlage Dülmen (55.000 Einwohnerwerte) |
| Einsparung des SAK-Sensors beim Referenzsystem (inkl. Controller) | k.A. | 2 Stück | 9 | 2 Stück |
| Summe Entlastungspotenziale | 8.450 kg CO₂-Äquivalente | | 8.558 kg CO₂-Äquivalente | |

Quelle: Eigene Darstellung

5.1.3.4 Entlastungspotenziale bei Kläranlagen mit Ozonierung (Fallbeispiel Kläranlage Bad Sassendorf)

Mit Blick auf die Ermittlung der Entlastungspotenziale bei Kläranlagen mit Ozonierung wird die Kläranlage Bad Sassendorf als Fallbeispiel betrachtet. Diese Anlage verfügt über eine Ausbaugröße von 13.000 Einwohnerwerten. Die gezielte Spurenstoffelimination mittels Ozonbehandlung wird als weitergehende Verfahrensstufe nach der biologischen Reinigung für einen Teilstrom des Abwassers durchgeführt (Bioserve 2023).

Für die Kläranlage Bad Sassendorf wird ebenfalls auf Basis von modellierten Werten angenommen, dass bei dem System mit Digitaltechnologie im Mittel eine Ozon-Einsparung von 5 % bzw. 145 kg pro Jahr erreicht werden kann (Morck 2023).

Analog beziffert sich für das vorliegende Fallbeispiel das Entlastungspotenzial auf 791 kg CO₂-Äquivalente (siehe folgende Tabelle). Aufgrund der geringeren eingesparten Mengen an Ozon sowie des vergleichsweise geringeren spezifischen CO₂-Fußabdrucks fällt dieses deutlich geringer als bei Pulveraktivkohle aus. Ein Vergleich mit der Selbstevaluierung ist nicht möglich, da die Einsparung von Ozon dort nicht betrachtet wurde.

Tabelle 5-3: Gegenüberstellung der Ergebnisse aus Selbstevaluierung und vertiefender Nachhaltigkeitsanalyse für die Entlastungspotenziale bei Kläranlagen mit Ozonierung (Fallbeispiel Kläranlage Bad Sassendorf)

| Spezifizierung Rohstoff | kg CO ₂ -Äquivalente | Bezugsgröße | kg CO ₂ -Äquivalente | Bezugsgröße |
|---|--|---|--|---|
| Einsparung von Ozon | k.A. | Jährliches Einsparpotenzial bei der Kläranlage Bad Sassendorf (13.000 Einwohnerwerte) | 783 | Jährliches Einsparpotenzial bei der Kläranlage Bad Sassendorf (13.000 Einwohnerwerte) |
| Einsparung des SAK-Sensors beim Referenzsystem (inkl. Controller) | k.A. | 2 Stück | 9 | 2 Stück |
| Summe Entlastungspotenziale | 0 kg CO₂-Äquivalente | | 791 kg CO₂-Äquivalente | |

Quelle: Eigene Darstellung

5.1.3.5 Ermittlung der Nettoentlastungen

Auf Grundlage der vorliegenden Ergebnisse für die Be- und Entlastungspotenziale wurden die Nettoentlastungen ermittelt. Diese können der folgenden Tabelle entnommen werden.

Tabelle 5-4: Nettoentlastung für die Fallbeispiele Dülmen (Aktivkohle-Behandlung) und Bad Sassendorf (Ozonierung)

| Wirkungskategorie | Einheit | Aktivkohle-Behandlung (PAK) | Ozonierung |
|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|------------|
| Kumulierte Energieaufwand (KEA) | MJ | 82.867 | -1.602 |
| Treibhausgaspotenzial (GWP) | kg CO ₂ -Äquivalente | 7.466 | -301 |
| ADP | kg Sb-Äquivalente | -4,98E-02 | -4,98E-02 |
| Versauerungspotenzial (AP) | mol H ⁺ -Äquivalente | 57 | -0,79 |
| Eutrophierungspotenzial (EP) | kg P-Äquivalente | 2 | -0,51 |
| Photooxidantienpotenzial (POCP) | kg NMVOC-Äquivalente | 22 | -1,0 |

Quelle: Eigene Darstellung

Bei den betrachteten Kläranlagen kann nur im Falle einer Aktivkohle-Adsorption eine Nettoentlastung erzielt werden, wobei die Wirkungskategorie ADP hierbei ausgenommen ist. Bei einer Ozo-

nierung ergibt sich hingegen bei allen Wirkungskategorien eine Nettobelastung, da die Belastungseffekte (d. h. die Aufwendungen für die Digitalisierungsinfrastruktur) durch die vergleichsweise nur geringen Entlastungseffekte nicht überkompensiert werden.

5.1.3.6 Hochskalierung der Be- und Entlastungspotenziale auf Deutschland

Für die Hochrechnung der Be- und Entlastungspotenziale auf ganz Deutschland wird angenommen, dass die in Kapitel 5.1.3.2 ermittelten Belastungspotenziale linear mit der Anzahl der Kläranlagen skaliert werden können. Mit Blick auf die Entlastungspotenziale ist hingegen davon auszugehen, dass diese in erster Näherung linear mit der in den Kläranlagen behandelten Abwassermenge korrelieren. Als Bezugsgröße für die Hochskalierung wird daher die Jahresabwassermenge herangezogen (siehe folgende Tabelle).

Tabelle 5-5: Anzahl registrierter Kläranlagen und Jahresabwassermenge als Bemessungsgrundlagen für die Hochskalierung der Be- und Entlastungspotenziale

| Größenklasse | Einwohnerwerte | Anzahl registrierter Kläranlagen | Jahresabwassermenge [Mio. m ³ /a] | Anteil |
|---------------|-----------------------|----------------------------------|--|--------|
| GK 1 | <1.000 | | 613 | 12% |
| GK 2 | <5.000 | | | |
| GK 3 | 5.000 - 10.000 | 882 | 521 | 88% |
| GK 4 | A 10.001 – 20.000 | 1.898 | 854 | |
| | B 20.001 – 50.000 | | 1.773 | |
| | C 50.001 – 100.000 | | 1.315 | |
| GK 5 | A 100.001 – 200.000 | 229 | 918 | |
| | B 200.001 – 500.000 | | 1.358 | |
| | C 500.001 – 1.000.000 | | 692 | |
| | D >1.000.000 | | 1.329 | |
| Gesamt | | | 9.374 | |

Quelle: Hillenbrandt et al. (2016)

In Abstimmung mit dem Forschungsvorhaben wurden für die Hochskalierung nur die Größenklassen (GK) 4 und 5 herangezogen. Dabei wurde ferner angenommen, dass jeweils ein Drittel aller Kläranlagen in Deutschland pulverisierte Aktivkohle für die gezielte Spurenstoffelimination verwenden. Ein weiteres Drittel der Kläranlagen verwendet granuliert Aktivkohle. Bei diesen Anlagen ist die Implementierung der Neuentwicklung jedoch aus verfahrenstechnischen Gründen nicht notwendig, weshalb diese folglich bei der Hochskalierung unberücksichtigt bleiben (Parniske 2023).

Mit diesen Annahmen konnten die Ergebnisse für die Be- und Entlastungseffekte sowie die Nettoentlastungen bei allen betrachteten Wirkungskategorien auf Deutschland hochgerechnet werden (siehe folgende Tabelle). Daraus geht hervor, dass bei fast allen Wirkungskategorien z. T. erhebliche Nettoentlastungen erzielt werden können. Beispielsweise betragen diese beim Treibhausgaspotenzial rund 10 Mio. kg CO₂-Äquivalente. Lediglich beim abiotischen Ressourcenverbrauch ergibt sich per Saldo eine geringfügige Nettobelastung, da die Belastungseffekte durch die Ressourceninanspruchnahme der Digitalisierungsinfrastruktur etwas höher ausfallen als die durch Aktivkohle- bzw. Ozonersparungen erzielbaren Entlastungseffekte. In diesem Zusammenhang ist auch zu beachten, dass die Entlastungseffekte linear mit der Jahresabwassermenge korrelieren, während die Belastungseffekte unabhängig von der Kläranlagengröße sind. Daher kommt es im Falle der Ozonierung für Anlagen der GK 5 bei den meisten Wirkungskategorien zu einer Nettoentlastung.

Tabelle 5-6: Ergebnisse der Hochskalierung der Be- und Entlastungspotenziale sowie der Nettoentlastungen auf Deutschland

| | GWP [kg CO ₂ -Äq.] | | | | KEA [MJ] | | | | ADP [kg Sb-Äq.] | | | |
|-----------------------|-------------------------------|-----------|------------|---------|-----------------------|------------|------------|------------|-----------------------|------|------------|------|
| | Aktivkohle-Behandlung | | Ozonierung | | Aktivkohle-Behandlung | | Ozonierung | | Aktivkohle-Behandlung | | Ozonierung | |
| | GK 4 | GK 5 | GK 4 | GK 5 | GK 4 | GK 5 | GK 4 | GK 5 | GK 4 | GK 5 | GK 4 | GK 5 |
| Belastungspotenziale | 700.000 | 100.000 | 700.000 | 100.000 | 15.000.000 | 2.000.000 | 15.000.000 | 2.000.000 | 34,4 | 4,2 | 34,4 | 4,2 |
| Entlastungspotenziale | 5.000.000 | 5.500.000 | 600.000 | 700.000 | 63.000.000 | 68.000.000 | 17.000.000 | 19.000.000 | 2,7 | 3,0 | 3,6 | 3,9 |
| Nettoentlastung | 4.300.000 | 5.400.000 | -100.000 | 600.000 | 48.000.000 | 66.000.000 | 2.000.000 | 17.000.000 | -31,7 | -1,2 | -30,8 | -0,2 |
| Summe Nettoentlastung | 9.700.000 | | 500.000 | | 114.000.000 | | 19.000.000 | | -32,9 | | -31,0 | |
| Gesamtergebnis | 10.200.000 | | | | 133.000.000 | | | | -63,9 | | | |

| | AP [mol H ⁺ -Äq.] | | | | EP [kg P-Äq.] | | | | POCP [kg NMVOC-Äq.] | | | |
|-----------------------|------------------------------|--------|------------|-------|-----------------------|-------|------------|------|-----------------------|--------|------------|-------|
| | Aktivkohle-Behandlung | | Ozonierung | | Aktivkohle-Behandlung | | Ozonierung | | Aktivkohle-Behandlung | | Ozonierung | |
| | GK 4 | GK 5 | GK 4 | GK 5 | GK 4 | GK 5 | GK 4 | GK 5 | GK 4 | GK 5 | GK 4 | GK 5 |
| Belastungspotenziale | 3.100 | 400 | 3.100 | 400 | 800 | 100 | 800 | 100 | 1.900 | 200 | 1.900 | 200 |
| Entlastungspotenziale | 36.400 | 39.700 | 3.200 | 3.400 | 2.000 | 2.200 | 600 | 600 | 15.000 | 16.300 | 1.600 | 1.800 |
| Nettoentlastung | 33.300 | 39.300 | 100 | 3.100 | 1.300 | 2.100 | -200 | 500 | 13.000 | 16.100 | -300 | 1.500 |
| Summe Nettoentlastung | 72.600 | | 3.200 | | 3.400 | | 300 | | 29.100 | | 1.200 | |
| Gesamtergebnis | 75.800 | | | | 3.700 | | | | 30.300 | | | |

Quelle: Eigene Darstellung

5.1.4 Diskussion der Ergebnisse

Aus den Ergebnissen der vertiefenden Nachhaltigkeitsanalyse geht klar hervor, dass die möglichen Einsparungen bei der Verfahrensvariante mit pulverisierter Aktivkohle der bestimmende Faktor für die Gesamtbilanz sind. Im Falle einer erfolgreichen Hochskalierung der Neuentwicklung auf ganz Deutschland ergeben sich daraus bei fast allen betrachteten Wirkungskategorien z. T. erhebliche Nettoentlastungen.

Im Vergleich dazu fallen die bei der Ozonierung durch Ozon-Einsparungen erzielbaren Entlastungspotenziale deutlich geringer aus. Daraus lässt sich mit Blick auf eine Kommerzialisierung der Neuentwicklung die Empfehlung ableiten, diese prioritär auf Kläranlagen mit weitergehenden Abwasserreinigungsstufen zu implementieren, deren gezielte Spurenstoffelimination auf einer Adsorption an Pulveraktivkohle basiert. In diesem Zusammenhang ist jedoch zu beachten, dass eine mögliche Substitution von Pulveraktivkohle aus fossilen Quellen durch biobasierte Aktivkohle aufgrund des damit einhergehenden geringeren spezifischen CO₂-Fußabdrucks voraussichtlich auch zu einer Verringerung der Nettoentlastungen infolge Implementierung der Neuentwicklung führen wird.

Schließlich bleibt aus methodischer Sicht anzumerken, dass die vertiefende Nachhaltigkeitsanalyse die wesentlichen Ergebnisse der Selbstevaluierung (vgl. Kapitel 4.3.1) reproduziert und damit deren Richtungssicherheit bestätigt.

5.2 DiGeBaST

5.2.1 Zielsetzung und Abgrenzung zur Selbstevaluierung

Die vertiefende Nachhaltigkeitsanalyse im DiGeBaSt-Projekt verfolgt zum einen das Ziel, wesentliche Lücken der Selbstevaluierung zu schließen (vgl. Kapitel 4.1.1). Dabei handelte es sich v. a. um die Modellierung der Sprayfarbe für die Holzmarkierung (beim Referenzsystem) und einiger komplexer Digitalisierungsprodukte (v. a. Kameras und Blitzgeräte). Weitere wichtige Aspekte sind zum anderen die Modellierung der durch den Einsatz von Digitaltechnologie induzierbaren Holzmobiliarisierung und vermiedener Holzverluste sowie die Hochskalierung der Ergebnisse von Baden-Württemberg auf Deutschland.

5.2.2 Methodische Vorgehensweise und grundlegende Annahmen

Mit Blick auf die methodische Vorgehensweise und grundlegende Annahmen der durchgeführten Analysen wird zunächst auf die Wahl der Systemgrenzen sowie die funktionelle Einheit eingegangen.

5.2.2.1 Systemgrenzen

Gegenstand der vertiefenden Nachhaltigkeitsanalysen im DiGeBaST-Projekt ist ein Vergleich des Systems mit Digitaltechnologie mit einem Referenzsystem. Bei dem System mit Digitaltechnologie steht hardwaretechnisch die Cloud-basierte Rückverfolgung im Mittelpunkt: Mittels einer am Vollernter montierten Kamera wird bei jedem Baumstamm bzw. Stammabschnitt unmittelbar nach der Ernte eine Aufnahme der Holzschnittfläche erstellt, die ähnlich einem digitalen Fingerabdruck eine eindeutige Identifikation ermöglicht (vgl. Kapitel 4.1.1). Zusätzlich zu der Kamera wird jeweils ein Blitzgerät benötigt. Bei der späteren Rückverfolgung des Baumstamms bzw. Stammabschnitts wird im Sägewerk ebenfalls eine Kamera-Blitzlicht-Kombination benötigt. Für die Erstellung und Zuweisung eines digitalen Zwillings sind ferner mehrere Rechner erforderlich: Dabei handelt es sich um einen zentralen Server, jeweils einen Laptop-Rechner bei den Vollerntern sowie einen Desktop-Rechner mit Monitor in den Sägewerken.

Im Gegensatz dazu wird beim Referenzsystem auf Digitaltechnik bei der Rückverfolgung des Holzes weitgehend verzichtet. Zur Markierung wird v. a. Neon-Markierfarbe aus Spraydosen verwendet, die direkt auf das Holz aufgetragen wird. Darüber hinaus kommen auch Kunststoffplättchen und Barcodes zum Einsatz. Diese werden im Rahmen der vertiefenden Nachhaltigkeitsanalysen aufgrund fehlender Daten bzw. wegen ihrer nachrangigen Bedeutung nicht näher betrachtet. Aufgrund der vergleichsweise schlechteren Rückverfolgbarkeit des Holzes wird ferner davon ausgegangen, dass beim Referenzsystem ein zusätzlicher Kraftstoffaufwand für Suchfahrten erforderlich ist, um die in den Forstgebieten verteilten Polter wieder aufzufinden.

Die vorgelagerten Prozesse der Herstellung von Holzernte- und Transportmaschinen werden in dieser Studie hingegen nicht betrachtet, da im Quervergleich zwischen dem System mit Digitaltechnologie und dem Referenzsystem keine Änderungen ersichtlich sind. Aus diesem Grund werden auch die nachgelagerten Prozesse zur Reparatur und Entsorgung der Maschinen sowie der Transport der Waldarbeitenden und Maschinen zum Hiebsort nicht berücksichtigt.

5.2.2.2 Funktionelle Einheit

Die funktionelle Einheit ist die zentrale Bezugsgröße für alle Inputs und Outputs der Analyse.

In der Forst-Holz-Kette wird üblicherweise die Bezugsgröße Festmeter mit Rinde verwendet, während im Rahmen der vorliegenden Studie mit der Bezugsgröße Festmeter (fm) ohne Rinde (o.R.) gerechnet wird, da diese die Verkaufseinheit für die Sägeindustrie darstellt. Ein Festmeter entspricht einem Kubikmeter Holz.

Als funktionelle Einheit für die vertiefenden Nachhaltigkeitsanalysen wird (wie schon bei der Selbstevaluierung) der Holzeinschlag von Fichten-Stammholz im Staatswald Baden-Württemberg verwendet. Im Jahr 2021 betrug dieser Parameter 486.641 fm o. R. für die motormanuelle Ernte und 581.755 fm o. R. für die teil- und vollmechanisierte Ernte (Last 2023). Die Gesamt-Einschlagszahlen betragen somit 1.068.396 fm o. R. Bei einer Holzdichte von 485 kg/m³ entspricht dies rund 518 Mio. kg Holz.

5.2.2.3 Wirkungskategorien

Wie bereits bei der Selbstevaluierung fokussiert auch die vertiefende Nachhaltigkeitsanalyse auf den CO₂-Fußabdruck bzw. das Treibhauspotenzial (GWP), das nach IPCC (2021) berechnet wird.

Bedingt durch die Schwerpunktsetzung der vertiefenden Nachhaltigkeitsanalyse mit Blick auf die mittels Digitaltechnologie induzierbare Holzmobilisierung sowie die Vermeidung von Holzverlusten werden keine weiteren Ökobilanz-Wirkungskategorien (z. B. abiotischer Ressourcenverbrauch, Eutrophierungspotenzial, Versauerungspotenzial) betrachtet. Grund hierfür ist, dass die genannten Umweltaspekte für die gewählte Schwerpunktsetzung von untergeordneter Bedeutung sind. Darüber hinaus ist davon auszugehen, dass eine Inventarisierung der weiteren Wirkungskategorien für die im Rahmen der Systemgrenzen betrachteten Prozesse aufgrund bestehender Datenlücken nicht sinnvoll ist.

5.2.3 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der vertiefenden Nachhaltigkeitsanalyse vorgestellt. Dazu wird zunächst auf die Modellierung komplexer digitaler Produkte und Verbrauchsmaterialien eingegangen, die im Rahmen der Selbstevaluierung nicht betrachtet wurden (vgl. Kapitel 5.2.3.1). Ein weiterer wichtiger Aspekt war die Modellierung von Verlustholz, das im Referenzsystem anfällt und beim System mit Digitaltechnik reduziert werden kann (vgl. Kapitel 5.2.3.2). Anschließend werden in Kapitel 5.2.3.3 die Be- und Entlastungspotenziale für Baden-Württemberg aktualisiert und konsolidiert und in Kapitel 5.2.3.4 ein Ansatz entwickelt, wie diese auf ganz Deutschland hochgerechnet werden können.

5.2.3.1 Modellierung komplexer digitaler Produkte und Verbrauchsmaterialien

Bei den betrachteten komplexen digitalen Produkten und Verbrauchsmaterialien handelt es sich um die Kameras und Blitzgeräte, die bei den Vollerntern bzw. bei den Sägewerken jeweils zum Einsatz kommen, sowie die Sprayfarbe zur Markierung der Baumstämme bzw. Stammabschnitte.

Kamera

Für die bei der Aufnahme der Holzschnittflächen⁷ verwendete Kamera vom Typ „Manta GigE Vision“ (Allied Vision Technologies 2021) existieren keine Datensätze in öffentlichen oder kommerziellen Ökobilanzdatenbanken. Folglich wurde der CO₂-Fußabdruck der Kamera mit den publizierten Ergebnissen für eine Nachtsichtkamera der Firma Autoliv (Munnwer et al. 2012) approximiert. Da die beiden Kameras sich mit Blick auf ihre Masse unterscheiden, wurde der CO₂-Fußabdruck der Nachtsichtkamera in Höhe von 20,48 kg CO₂-Äquivalente pro Kamera entsprechend der Massenverhältnisse⁸ skaliert.

Der CO₂-Fußabdruck für die Herstellung der „Manta GigE Vision“ beläuft sich folglich auf 11,47 kg CO₂-Äquivalente pro Kamera. Für den gesamten Staatswald in Baden-Württemberg werden 71 Kameras benötigt (Last 2023). Wie bei allen anderen Technikkomponenten wurde die nutzbare Lebensdauer der Kamera mit fünf Jahren angenommen.

Blitzring (für Vollernter)

Der für die Aufnahme der Holzschnittfläche zusätzlich erforderliche Blitzring des Typs „Lumimax Ringbeleuchtung CRC100FL-ALD-R“ ist ebenfalls nicht in den verfügbaren Ökobilanzdatenbanken enthalten. Da auch keine Publikationen zum CO₂-Fußabdruck von Blitzringen existieren, musste dieses Produkt entsprechend den verwendeten Bauteilen und Komponenten modelliert werden. Gemäß Produktdatenblatt verfügt der Blitzring über eine Masse von 550 Gramm (IIM 2023). Er enthält 120 LEDs der Standardgröße 5 mm und einer Masse von jeweils 0,35 Gramm. Daraus resultiert für die LEDs eine Masse von 42 Gramm. Diese LEDs können mit einem passenden Datensatz⁹ aus Ecoinvent (2022) abgebildet werden. Die LEDs sind auf eine Leiterplatte montiert und befinden sich in einem Gehäuse, das aus eloxiertem Aluminium besteht und von einer durchsichtigen Scheibe aus dem Kunststoff Polymethylmethacrylat (PMMA) abgeschlossen wird. Bei der Leiterplatte wird angenommen, dass diese aus dem Standardmaterial FR-4 besteht und über eine Masse von 50 Gramm verfügt. Der CO₂-Fußabdruck von FR-4-Leiterplatten-Basismaterial wird in Jiva (o.J.) mit 17,7 kg CO₂-Äquivalente pro Quadratmeter Leiterplattenfläche angegeben. Für das Aluminium-Gehäuse wird eine Masse von 308 Gramm und für die PMMA-Scheibe eine Masse von 150 Gramm angenommen. Das Aluminium-Gehäuse wird mit einem Datensatz für Aluminium-Profile aus Ökobaudat (2021) approximiert (10,7 kg CO₂-Äquivalente/kg). Die Anodisierung des Aluminium-Gehäuses kann aufgrund der vergleichsweise geringen Fläche vernachlässigt werden. Für die PMMA-Scheibe existiert ein passender Datensatz in Idemat (2023); der CO₂-Fußabdruck beträgt 4,5 kg CO₂-Äquivalente/kg.

Daraus ergibt sich für die Herstellung des Blitzrings ein CO₂-Fußabdruck von ca. 16 kg CO₂-Äquivalente pro Einheit. Für den gesamten Staatswald in Baden-Württemberg werden insgesamt 19 Blitzringe benötigt (Last 2023). Die nutzbare Lebensdauer der Blitzringe wurde ebenfalls mit fünf Jahren angenommen.

Blitzgeräte (in den Messkästen der Sägewerke)

In den Sägewerken kommen andere Blitzgeräte zum Einsatz. Diese sind vom Typ „XR256 High-Speed Strobelight“ (SmartVisionLights 2020). Diese Blitzgeräte sind mit einer Masse von

⁷ Vergleiche DiGeBaSt-Projektbeschreibung in Kap. 4.1.1.

⁸ Die Masse der Manta GigE Vision beträgt 210 Gramm, während die Autoliv Nachtsichtkamera über eine Masse von 375 Gramm verfügt."

⁹ Der Datensatz hat die Bezeichnung „light emitting diode production, GLO“.

1.820 Gramm deutlich schwerer als der zuvor behandelte Blitzring, jedoch wird angenommen, dass der konstruktive Aufbau ähnlich ist. Daher wird der Datensatz des Blitzring des Typs „Lumimax Ringbeleuchtung CRC100FL-ALD-R“ verwendet und entsprechend des Massenverhältnisses skaliert.

Daraus folgt für die Herstellung der Blitzgeräte für die Sägewerke ein CO₂-Fußabdruck von ca. 52 kg CO₂-Äquivalente pro Einheit. Für den gesamten Staatswald in Baden-Württemberg werden insgesamt 104 Blitzgeräte benötigt (Last 2023). Auch hier wird von einer nutzbaren Lebensdauer von fünf Jahren ausgegangen.

Markierfarbe

Bei den Markierungsarbeiten von ForstBW wird Neon-Markierfarbe mit der Handelsbezeichnung „ÖKO-Marker der Firma ECS Chemical Solutions in Spraydosen mit einer Füllmenge von 500 ml verwendet (Last 2023). Es wird davon ausgegangen, dass mit dem Inhalt einer Spraydose eine Fläche von 2 m² besprüht werden kann. An einem Polter wird ungefähr eine Fläche von 25 cm x 25 cm besprüht. Bei insgesamt 28.982 Fichtenpoltern im Staatswald Baden-Württemberg ergibt sich eine zu besprühende Gesamtfläche von 1.811 m². Für diese Fläche werden 906 Spraydosen benötigt; dies entspricht 453 Litern Sprühfarbe (Last 2023).

Für die Herstellung der benötigten Markierfarbe kann auf einen geeigneten Datensatz¹⁰ aus Eco-invent (2022) zurückgegriffen werden. Die Herstellung der Spraydosen wurde in Ermangelung spezifischer Ökobilanzdaten mit einer Getränke-Weißblechdose (500 ml) approximiert. Krüger et al. (2010) geben hierfür einen CO₂-Fußabdruck von rund 220 kg CO₂-Äquivalente pro 1.000 Liter Füllmenge an.

Insgesamt beträgt daher für Baden-Württemberg als geographischer Bezugsrahmen der CO₂-Fußabdruck für die eingesparte Markierfarbe (inklusive Sprühdosen) rund 1.890 kg CO₂-Äquivalente.

5.2.3.2 Vermeidung von Verlustholz

Verluste von bereits gefällttem Holz können u.a. durch das Nicht-Auffinden von Poltern, unzugängliche bzw. unzugänglich gewordene Transportwege sowie Gewichtsbegrenzungen der Holz-Transporter entstehen. Der Umfang von Verlustholz ist allerdings schwer abschätzbar, da hierfür keine Aufzeichnungen existieren. In der forstwirtschaftlichen Praxis treten diese Verluste jedoch regelmäßig auf (Last 2023).

Im Rahmen der vertiefenden Nachhaltigkeitsanalyse wurde in Abstimmung mit den Verantwortlichen des DiGeBaSt-Projekts ein Anteil von 0,1% des Gesamt-Einschlags angenommen, d. h. 1.068 fm o.R. bzw. ca. 518.000 kg Holz. Bei 210 Revieren im Staatswald Baden-Württemberg würden folglich rund 5 fm pro Revier als unauffindbar im Wald verbleiben. Dies wird als eine realistische Annahme eingeschätzt (Hensel 2023).

Modelltechnisch ist dieses vermiedene Verlustholz unter Berücksichtigung von Fehrenbach et al. (2022) ähnlich zu behandeln wie zusätzlicher Holzeinschlag (vgl. Kapitel 4.1.1). Analog ist auf der Ebene der Belastungspotenziale ein zusätzlicher Aufwand für Abtransport zu berücksichtigen.

¹⁰ Der Datensatz trägt die Bezeichnung „alkyd paint production, white, solvent-based, product in 60 % solution state, RER“.

5.2.3.3 Aktualisierung und Konsolidierung der Be- und Entlastungspotenziale für Baden-Württemberg

In den folgenden beiden Tabellen werden die Ergebnisse der relativen¹¹ Be- und Entlastungspotenziale aus der vertiefenden Nachhaltigkeitsanalyse mit denen aus der Selbstevaluierung verglichen. Geographischer Bezugsrahmen für die Ergebnisse ist jeweils Baden-Württemberg.

Tabelle 5-7: Gegenüberstellung der Ergebnisse aus Selbstevaluierung und vertiefender Nachhaltigkeitsanalyse für die Belastungspotenziale

| Herstellung der Digitalisierungstechnik | Ergebnisse der Selbstevaluierung | | Ergebnisse der vertiefenden Nachhaltigkeitsanalyse | |
|--|----------------------------------|-------------|--|-------------|
| Produkt / Dienstleistung | kg CO ₂ -Äquivalente | Bezugsgröße | kg CO ₂ -Äquivalente | Bezugsgröße |
| Kamera | k.A. | 71 Stück | 163 | 71 Stück |
| Blitzring Vollernter | k.A. | 19 Stück | 59 | 19 Stück |
| Blitze in den Messkästen der Sägewerke | k.A. | 104 Stück | 1.074 | 104 Stück |
| Desktop-Computer mit Monitor für die Sägewerke | 2.932 | 26 Stück | 2.932 | 26 Stück |
| Laptops für Vollernter | 1.182 | 19 Stück | 1.182 | 19 Stück |
| Grafikkarte | k.A. | 1 | 94 | 1 |
| Zentraler Server | 116 | 1 Stück | 116 | 1 Stück |
| Summe Geräteherstellung | 4.230 | | 5.620 | |

| Nutzung der Digitalisierungstechnik | Ergebnisse der Selbstevaluierung | | Ergebnisse der vertiefenden Nachhaltigkeitsanalyse | |
|--|----------------------------------|-----------------------------|--|-----------------------------|
| Produkt / Dienstleistung | kg CO ₂ -Äquivalente | Bezugsgröße | kg CO ₂ -Äquivalente | Bezugsgröße |
| Kamera | 172 | 71 Stück | 172 | 71 Stück |
| Blitzring im Messarm Vollernter | 0,00117 | 19 Stück | 0,00 | 19 Stück |
| Laptops in Vollerntern zur Fotoaufnahme | 3.999 | 19 Stück | 3.999 | 19 Stück |
| Blitze im Messkasten Sägewerk | 0,78 | 104 Stück | 0,78 | 104 Stück |
| Desktop-Computer mit Monitor zur Fotoaufnahme und Fingerprint-Abgleich | 19.812 | 26 Stück | 19.812 | 26 Stück |
| Zentraler Server zum Datenabgleich | 1.025 | 1 Stück | 1.025 | 1 Stück |
| Datenübertragung im mobilen Internet (Szenario 1) | 610 | 40.716 GB/a | 610 | 40.716 GB/a |
| Datenübertragung im kabelgebundenen Internet (Szenario 1) | 76 | 81.432 GB/a | 76 | 81.432 GB/a |
| Grafikkarte zum Datenabgleich | 59 | 1 Stück | 59 | 1 Stück |
| Online Speicher | 16.896 | 122.148 GB/a | 16.896 | 122.148 GB/a |
| Treibstoffe für Holzernte, Rückung und Transport der zusätzlichen Holzmengen | 7.229 | 1.068,4 m ³ Holz | 14.458 | 2.136,8 m ³ Holz |
| Summe Gerätenutzung | 49.879 | | 57.108 | |

| | | |
|-----------------------------------|---|---|
| Summe Belastungspotenziale | 54.109 kg CO₂-Äquivalente | 62.728 kg CO₂-Äquivalente |
|-----------------------------------|---|---|

Quelle: Eigene Darstellung

¹¹ Es werden jeweils die relativen Be- und Entlastungspotenziale im Quervergleich zwischen dem System mit Digitaltechnologie und dem Referenzsystem ausgewiesen.

Tabelle 5-8: Gegenüberstellung der Ergebnisse aus Selbstevaluierung und vertiefender Nachhaltigkeitsanalyse für die Entlastungspotenziale

| Rohstoffe | Ergebnisse der Selbstevaluierung | | Ergebnisse der vertiefenden Nachhaltigkeitsanalyse | |
|--|----------------------------------|-----------------|--|-----------------|
| Spezifizierung Rohstoff | kg CO ₂ -Äquivalente | Bezugsgröße | kg CO ₂ -Äquivalente | Bezugsgröße |
| Zusätzlicher Holzeinschlag (0,1% des Holzeinschlags) | 582.115 | 518.174 kg Holz | 582.115 | 518.174 kg Holz |
| Nutzung bislang verloren gegangenen Holzes (0,1% des Holzeinschlags) | k.A. | | 582.115 | 518.174 kg Holz |
| Summe Rohstoffe | 582.115 | | 1.164.229 | |

| Betriebsstoffe / Energie | Ergebnisse der Selbstevaluierung | | Ergebnisse der vertiefenden Nachhaltigkeitsanalyse | |
|---|----------------------------------|----------------|--|----------------|
| Spezifizierung Betriebsstoff / Energie | kg CO ₂ -Äquivalente | Bezugsgröße | kg CO ₂ -Äquivalente | Bezugsgröße |
| Eingesparte Sprayfarbe | k.A. | | 1.894 | 453 Liter |
| Eingesparte Treibstoffe für Suchfahrten | 20.657 | 7.795 l Benzin | 20.657 | 7.795 l Benzin |
| Summe Betriebsstoffe / Energie | 20.657 | | 22.551 | |

| | | |
|------------------------------------|--|--|
| Summe Entlastungspotenziale | 602.772 kg CO₂-Äquivalente | 1.186.780 kg CO₂-Äquivalente |
|------------------------------------|--|--|

Quelle: Eigene Darstellung

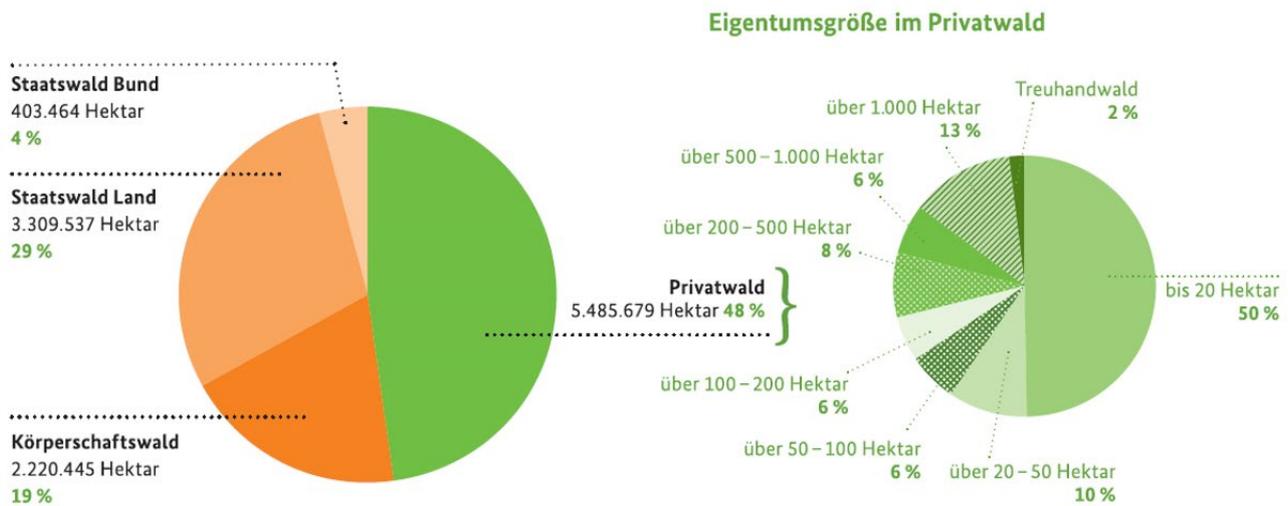
Den Tabellen kann entnommen werden, dass die Ergebnisse der vertiefenden Nachhaltigkeitsanalyse sowohl bei den Belastungs- als auch bei den Entlastungspotenzialen jeweils höher ausfallen als bei der Selbstevaluierung. Ursache hierfür sind die Datenlücken bzw. Modellierungsprobleme, die bei der vertiefenden Nachhaltigkeitsanalyse gefüllt bzw. gelöst werden konnten. Während die Belastungspotenziale nur moderat von rund 54.000 kg CO₂-Äquivalente auf ca. 63.000 kg CO₂-Äquivalente steigen, verdoppeln sich die Entlastungspotenziale von ca. 603.000 kg CO₂-Äquivalente beinahe auf rund 1.187.000 kg CO₂-Äquivalente. Hauptgrund hierfür ist die Annahme, dass beim System mit Digitaltechnologie die Nutzung bislang verloren gegangener Holzmengen (vgl. Kapitel 5.2.3.2) quantifiziert werden konnte.

Folglich vergrößert sich die bei der vertiefenden Nachhaltigkeitsanalyse ermittelte Nettoentlastung auf ca. 1.124.000 kg CO₂-Äquivalente. Im Vergleich dazu geht die Selbstevaluierung von einer Nettoentlastung in Höhe von 549.000 kg CO₂-Äquivalenten aus (vgl. Kapitel 4.1.1).

5.2.3.4 Hochskalierung der Be- und Entlastungspotenziale auf Deutschland

Für die Hochskalierung der Be- und Entlastungspotenziale der Neuentwicklung auf Deutschland ist es erforderlich, die Waldflächen in Deutschland und deren Differenzierung nach Eigentumsart zu betrachten (vgl. folgende Abbildung).

Abbildung 5-1: Waldflächen in Deutschland und deren Differenzierung nach Eigentumsart



Quelle: (BMEL 2012)

Daraus geht hervor, dass der Staatswald aller Bundesländer eine Fläche ($A_{SW,BL}$) von insgesamt 3.309.537 ha umfasst. Im Vergleich dazu beträgt laut 3. Bundeswaldinventur (2012) die Waldfläche in Baden-Württemberg 1.371.886 ha (ForstBW 2023). Der Staatswald im Landeseigentum hat daran einen Anteil in Höhe von 23,6 %, d. h. die zugehörige Fläche ($A_{SW,BW}$) beträgt 323.764 ha.

Weiterhin ist bei der Hochskalierung zu berücksichtigen, dass sich der verfügbare Holzvorrat im Staatswald Baden-Württemberg von dem entsprechenden Durchschnittswert für den Staatswald in Deutschland erheblich unterscheidet: So beträgt der Holzvorrat ($H_{SW,BW}$) im Staatswald Baden-Württemberg 344 m³/ha, während der Holzvorrat im Staatswald im Landesbesitz ($H_{SW,BL}$) im Bundesdurchschnitt 261 m³/ha beträgt (Last 2023).

Es wird davon ausgegangen, dass für die Hochrechnung der für Baden-Württemberg ermittelten Belastungspotenziale auf ganz Deutschland in erster Linie die Verhältnisse der Staatswaldflächen relevant sind. Dies beruht auf der Annahme, dass für eine Hochskalierung des Systems mit Digitaltechnik in linearer Abhängigkeit von den zusätzlichen Waldflächen entsprechend mehr Digitaltechnik (d. h. Kameras, Blitzgeräte und Rechner) angeschafft werden müssen.

Folglich ergibt sich für die Hochrechnung der Belastungspotenziale folgender Skalierungsfaktor:

$$\text{Skalierungsfaktor BP} = \frac{A(SW, BL)}{A(SW, BW)} = \frac{3.309.537 \text{ ha}}{323.764 \text{ ha}} = 10,2$$

Bei der Hochrechnung der Entlastungspotenziale wird hingegen angenommen, dass zusätzlich zu den Flächenverhältnissen auch die Verhältnisse der jeweiligen Holzvorräte mitberücksichtigt werden müssen, da die für die Entlastungspotenziale relevanten zusätzlichen Holzeinschlagmengen von den Holzvorräten abhängig sind (vgl. Kapitel 5.2.3.3).

Der Skalierungsfaktor für die Hochrechnung der Entlastungspotenziale lässt sich daher wie folgt bestimmen:

$$\text{Skalierungsfaktor EP} = \frac{A(\text{SW, BL}) \cdot H(\text{SW, BL})}{A(\text{SW, BW}) \cdot H(\text{SW, BW})} = \frac{3.309.537 \text{ ha} \cdot 261 \text{ m}^3/\text{ha}}{323.764 \text{ ha} \cdot 344 \text{ m}^3/\text{ha}} = 7,8$$

Daraus ergeben sich für den Staatswald in Deutschland als geographischem Bezugsrahmen Belastungseffekte in Höhe von ca. 640.000 kg CO₂-Äquivalente und Entlastungseffekte in Höhe von ca. 9.204.000 kg CO₂-Äquivalente. Die Nettoentlastung beträgt folglich rund 8,6 Mio. kg CO₂-Äquivalente.

5.2.4 Diskussion der Ergebnisse

Die Ergebnisse der vertiefenden Nachhaltigkeitsanalyse zeigen deutlich, dass eine durch das System mit Digitaltechnologie induzierte Holzmobilisierung der bestimmende Faktor für die Gesamtbilanz ist. Mit 0,1 % zusätzlicher Holzmobilisierung wurde ein vergleichsweise moderater Wert angenommen. Falls eine zusätzliche Mobilisierung in Höhe von 1 % der gesamten Holzeinschlagsmenge erreicht werden kann, erhöhen sich – ceteris paribus – die Nettoentlastungseffekte im Falle einer erfolgreichen Hochskalierung der Neuentwicklung auf ganz Deutschland auf rund 49 Mio. kg CO₂-Äquivalente.

Weiterhin ist bei der Hochrechnung der Nettoentlastungseffekte zu beachten, dass diese sich nur auf den Staatswald im Landeseigentum bezieht. Der Staatswald in Bundeseigentum, der Körperschaftswald und der Privatwald wurde aufgrund fehlender Vergleichbarkeit mit der Struktur und Bewirtschaftung des Staatswalds in Landeseigentum bei der Hochskalierung bislang nicht berücksichtigt. Unbestritten ist jedoch, dass die im DiGeBaSt-Projekt entwickelte Rückverfolgbarkeit von Baumstämmen bzw. Stammabschnitten mittels eines digitalen „Fingerabdrucks“ auch in diesen Forstgebieten grundsätzlich zum Einsatz kommen kann und voraussichtlich auch dort zu einer Nettoentlastung führen wird. Vor diesem Hintergrund kann davon ausgegangen werden, dass die Nettoentlastung insgesamt größer ausfallen wird.

5.3 DiRecLIB

5.3.1 Zielsetzung und Abgrenzung zur Selbstevaluierung

Für das Projekt DiRecLIB erfolgte die vertiefende Nachhaltigkeitsanalyse in Abstimmung mit den Projektverantwortlichen in Form eines Referenzszenarios für klassische Recyclingverfahren von Lithium-Ionen-Batterien (Traktionsbatterien). Dieses Referenzszenario ergänzt die im Projekt DiRecLIB durchgeführte Ökobilanz für das neu entwickelte hydromechanische Aufbereitungsverfahren. Ziel der Analyse des Referenzszenarios ist es, eine Vergleichsbasis für die Ökobilanzergebnisse des DiRecLIB-Verfahrens zu schaffen und daraus das ökologische Verbesserungspotenzial gegenüber dem Stand der Technik zu ermitteln.

5.3.2 Methodische Vorgehensweise und grundlegende Annahmen

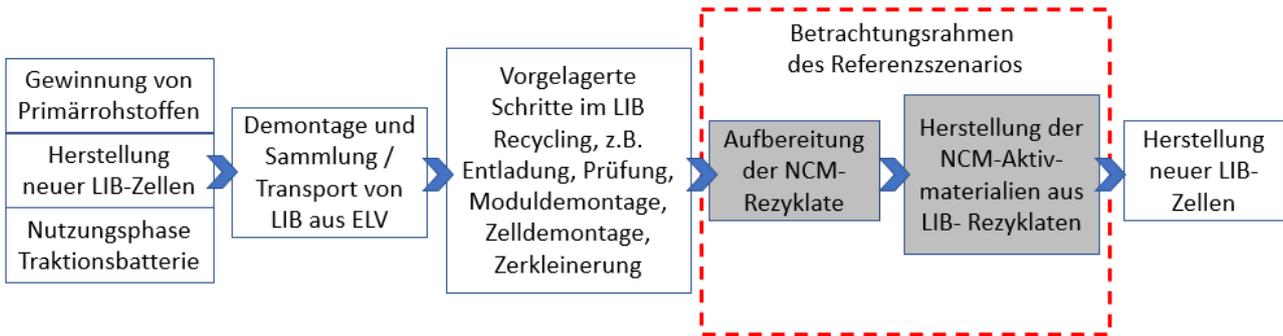
5.3.2.1 Systemgrenzen

Das Referenzszenario wurde auf Basis einer Literaturrecherche über öffentlich verfügbare ökobilanzielle Bewertungen zu klassischen LIB-Recyclingverfahren erstellt. Dabei wurden insbesondere wissenschaftliche Publikationen und Reporte in Betracht gezogen.

Für die vertiefende Nachhaltigkeitsanalyse im Projekt DiRecLIB ist ein Vergleich der ökobilanziell ermittelten Umweltwirkungen des hydromechanischen Aufbereitungsprozesses mit Prozessschritten in klassischen Aufbereitungsverfahren für LIB-Wirkstoffe erforderlich. Dieses Referenzsystem soll trotz technischer und logistischer Unterschiede zum DiRecLIB-Verfahren möglichst äquivalente Systemgrenzen aufweisen, um eine Vergleichbarkeit der Umweltwirkungen zu gewährleisten. Besonderes Augenmerk wird dabei auf den Einsatz digitaler Technologien bei DiRecLIB gelegt, da diese ein zentrales Funktionsmerkmal und Erfolgsfaktor des neu entwickelten Verfahrens darstellen. Digitale Technologien werden jedoch auch bei klassischen Aufbereitungsverfahren in LIB-Recyclingprozessen eingesetzt, ohne dass den digitalen Komponenten in bestehenden Ökobilanzstudien üblicherweise besondere Aufmerksamkeit geschenkt wird. Es ist daher sinnvoll, die im DiRecLIB-Verfahren eingesetzten digitalen Technologien in die Sachbilanz einzubeziehen, unter der Annahme, dass dies auch in Ökobilanzen zu klassischen LIB-Recyclingverfahren geschieht. In der Literatur werden Ökobilanzergebnisse jedoch selten so detailliert aufgeschlüsselt, dass ein Vergleich auf der Ebene einzelner technischer Systemkomponenten möglich ist.

Darüber hinaus stellt das DiRecLIB-Verfahren nur einen Teil der gesamten Prozesskette des Recyclings von LIB-Traktionsbatterien dar. Im Wesentlichen handelt es sich bei DiRecLIB um die Aufbereitung von NCM-Aktivmaterialien, die mittels hydromechanischer Separation von anderen Komponenten wie Anodengraphit, polymeren Bindern und Membranen getrennt werden. Dieses Verfahren erfordert vorgeschaltete Aufbereitungsschritte (Sammlung, Sortierung, Demontage, Entladung, Zerkleinerung usw.). Die mit DiRecLIB erzeugten NCM-Rezyklate können im Gegensatz zu den mit den meisten klassischen LIB-Recyclingverfahren gewonnenen Rezyklaten direkt wieder als NCM-Aktivmaterial für die Produktion neuer LIB-Traktionsbatterien eingesetzt werden. Daher umfasst die Systemgrenze des Referenzszenarios auch die Herstellung von NCM-Aktivmaterial aus Primärrohstoffen bzw. Rezyklaten. Dieser Umstand wird durch Umrechnungen auf das hier betrachtete Aktivmaterial NCM811 (Lithium-Nickel-Cobalt-Mangan-Oxid $\text{LiNi}_{0,8}\text{Co}_{0,1}\text{Mn}_{0,1}\text{O}_2$) berücksichtigt. Dieses Material steht in DiRecLib als Proxy für eine in der Praxis zu erwartende Materialvielfalt zukünftig im Recycling anzutreffender LIB-Typen (Xin et al. 2020).

Abbildung 5-2 Systemgrenze des Referenzszenarios für das DiRecLIB-Verfahren



Quelle: Eigene Darstellung

5.3.2 Funktionelle Einheit

Als funktionelle Einheit für das Referenzszenario wird entsprechend der vertiefenden Nachhaltigkeitsanalyse des DiRecLIB-Projekts **1 Tonne NCM811 Aktivmaterialrezyklat** betrachtet. Da die in der verfügbaren Literatur beschriebenen Ökobilanzen für klassische LIB-Recyclingverfahren jeweils andere funktionelle Einheiten angeben, werden die dort dargestellten Ergebnisse zu den Umweltauswirkungen nach Möglichkeit auf die oben genannte funktionelle Einheit des Referenzszenarios umgerechnet.

5.3.3 Ergebnisse

Die in Kapitel 4.2.4 dargestellten Ergebnisse der Selbstevaluierung haben gezeigt, dass die Anwendung des hydromechanischen DiRecLIB Verfahrens das Potenzial hat, erhebliche Umweltentlastungspotenziale zu erschließen. Für die Verarbeitung der bundesweit im LIB-Recycling angenommenen Menge von 2.500 Tonnen NCM-Aktivmaterial mit dem DiRecLIB-Verfahren wurde ein Entlastungspotenzial von ca. 49 Mio. kg CO₂-Äquivalenten pro Jahr ermittelt. Dem gegenüber steht ein Belastungspotenzial von etwa 4 Mio. kg CO₂-Äquivalenten pro Jahr für den Betrieb der hydromechanischen Trennanlage inklusive deren digitaler Prozesssteuerung mittels KI-System. Die mit DiRecLIB erzielbare Nettoentlastung wurde auf 45 Mio. kg CO₂-Äquivalente pro Jahr geschätzt. Dieses Ergebnis bezieht sich auf die vermiedenen THG-Emissionen infolge einer Substitution von Primärrohstoffen durch Rezyklate bei der Herstellung neuer LIB-Traktionsbatterien. Zusätzlich wird ein Einspareffekt für Prozesschemikalien (Säuren, Laugen, Fällungsmittel) erwartet.

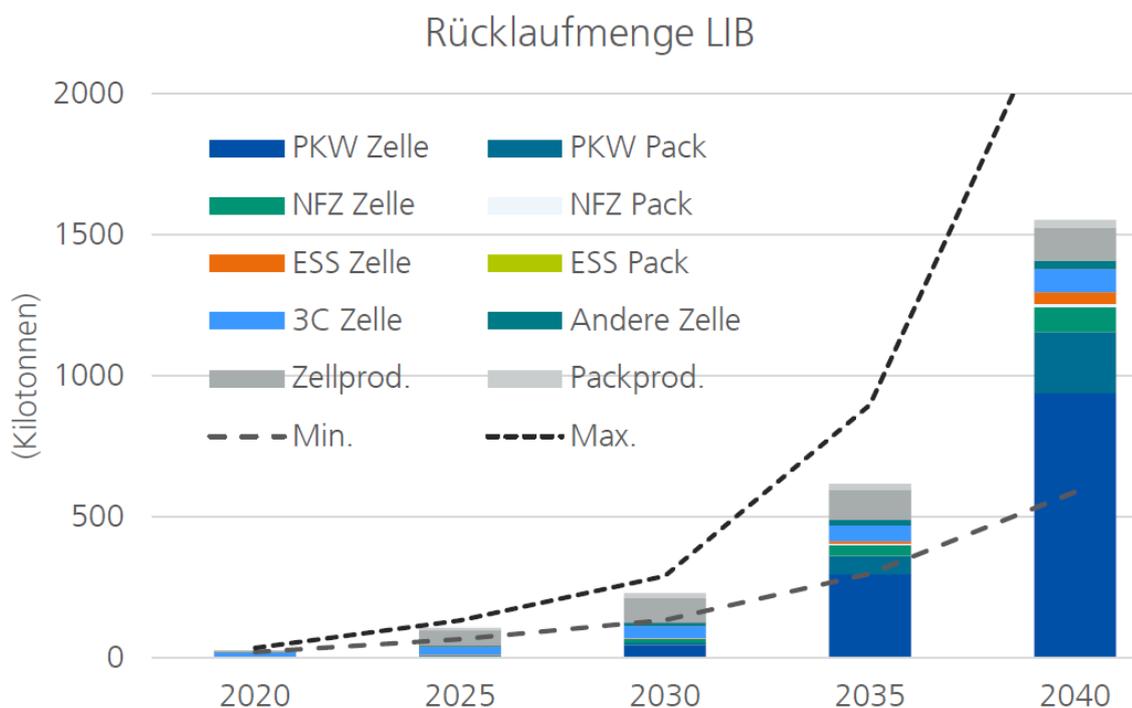
Die vorliegende vertiefende Nachhaltigkeitsanalyse soll die Ergebnisse der Selbstevaluation verifizieren und kontextualisieren. Insbesondere soll das Umweltentlastungspotenzial im Vergleich zu den klassischen Recyclingtechnologien für LIB-Aktivstoffe aufgezeigt werden. Dies sind insbesondere pyro- und hydrometallurgische Verfahren, die bereits in verschiedenen industriellen Prozessvarianten eingesetzt werden.

5.3.3.1 Kurzbeschreibung klassischer LIB-Recyclingverfahren

Das LIB-Recycling, vor allem für Traktionsbatterien, die in Fahrzeugen eingesetzt werden, ist gegenwärtig noch in einer nicht vollständig ausgereiften Entwicklungsphase. Es sind eine Vielzahl unterschiedlicher Prozessvarianten in der Erprobung und Optimierung, die sich grob in direkte (mechanische), thermische und hydrochemische Technologien unterscheiden lassen. Obwohl bereits zahl-

reiche Recyclingunternehmen über Pilotanlagen für das LIB-Recycling verfügen, sind diese bis auf weiteres noch nicht auf großindustrielles Niveau hochskaliert. Dies liegt zum einen an der bislang noch geringen Menge an Traktionsbatterien, die ihr Lebensende schon erreicht haben und andererseits an der noch nicht etablierten Rücknahme- und Verwertungslogistik für Traktionsbatterien aus ELV. Neef et al. (2021) geben die EU-weite Gesamtkapazität der vorhandenen und geplanten LIB-Recyclinganlagen auf 33 Kilotonnen pro Jahr an. Abhängig von den zukünftigen Zulassungszahlen für Elektrofahrzeuge kann mit einigen Jahren Verzögerung mit einem wesentlich höheren Bedarf für LIB-Recyclingkapazitäten gerechnet werden. Neef et al. (2021) prognostizieren für 2040 eine stark zunehmende Rücklaufmenge gebrauchter LIB in einer Bandbreite von 600 - 2500 Kilotonnen pro Jahr (Abbildung 5-3). Traktionsbatterien aus PKW werden davon voraussichtlich den größten Anteil stellen. Es ist demzufolge davon auszugehen, dass die LIB-Recyclingkapazitäten stark erweitert werden müssen.

Abbildung 5-3 Prognose zur Rücklaufmenge gebrauchter LIB aus unterschiedlichen Anwendungen



Quelle: (Neef et al. 2021)

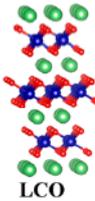
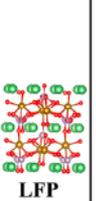
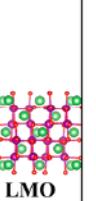
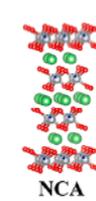
Das Recyclingpotenzial für Sekundärrohstoffe aus LIB-Traktionsbatterien ist zunächst davon abhängig, welche LIB-Typen sich in diesem Anwendungsbereich durchsetzen werden. Es stehen verschiedene Zelltypen mit spezifischen Materialinventaren zur Verfügung. Als Aktivmaterial für die Kathoden werden für Traktionsbatterien im Wesentlichen die folgenden LIB-Typen verwendet (Baum et al. 2022) (Abbildung 5-4):

- LCO: Lithium-Cobalt Oxid
- LFP: Lithium-Eisen-Phosphat
- LMO: Lithium-Mangan Oxid
- NCA: Lithium- Nickel-Cobalt-Aluminium

• NCM: Lithium- Nickel-Cobalt-Mangan

Als Anodenmaterial findet gegenwärtig fast ausschließlich Graphit Anwendung, welchem in einigen Batterietypen bis zu 11 % Silizium beigemischt werden (Heimes et al. 2021). Hinzu kommt der Elektrolyt und polymere Binder sowie Polymermembranen (Separator). Die Zellen und Batteriepacks enthalten zudem metallische Komponenten wie z. B. Kupferkabel, Edelstahl-Gehäuse.

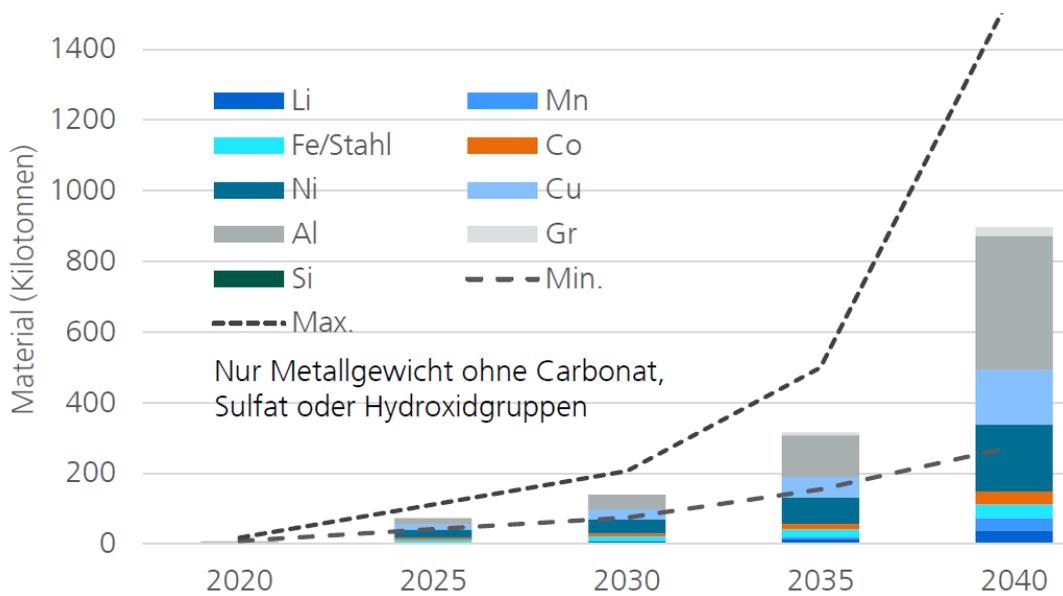
Abbildung 5-4 In kommerziellen LIB verwendete Kathodenmaterialien und deren typische Recyclingmethoden

| Structure |  LCO |  LFP |  LMO |  NCA |  NCM |
|--|--|--|--|--|--|
| Composition | LiCoO ₂ | LiFePO ₄ | LiMn ₂ O ₄ | LiAl _x Co _y Ni _{1-x-y} O ₂ | LiCo _x Mn _y Ni _{1-x-y} O ₂ |
| Energy Density/ Wh kg ⁻¹ | 624 | 544 | 410 | 740 | 592-740 |
| Material price/ \$ (kWh) ⁻¹ | 88 | 32 | 26 | 39 | 40-50 |
| Battery price/ \$ (kWh) ⁻¹ | 357 | 222 | 251 | 199 | 145-230 |
| Publications on Direct Recovery | 110 | 98 | 43 | 9 | 56 |
| Economical Recycling Pathways | H, P, D | D | D | H, P, D | H, P, D |

^acyan **H**: hydrometallurgy; red **P**: pyrometallurgy; black **D**: direct recycling).

Quelle: (Baum et al. 2022)

Abbildung 5-5 Rezyklatmengen aus LIB-Recycling in der EU nach Material

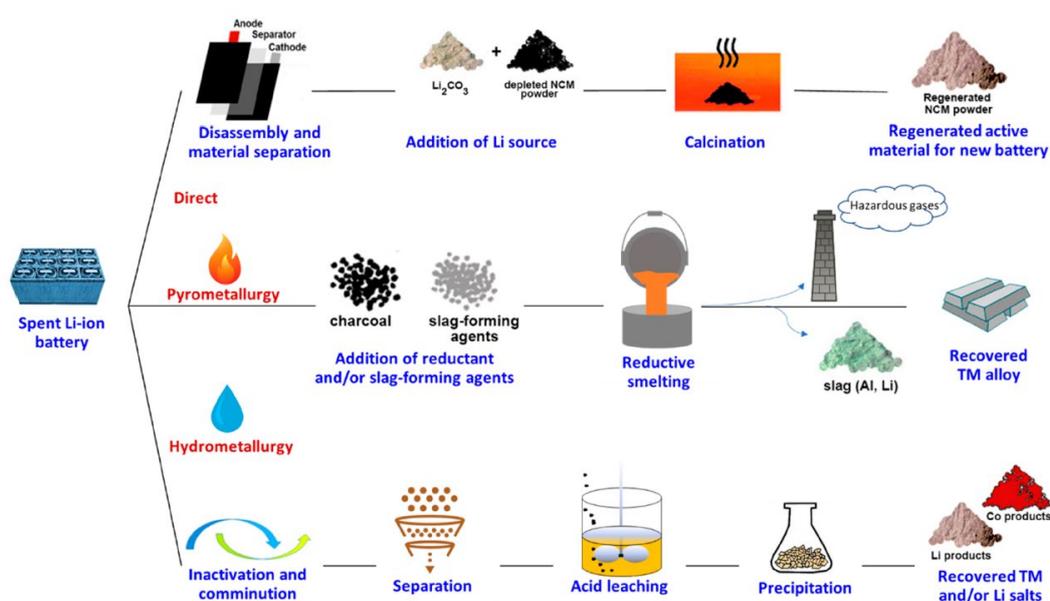


Quelle: (Neef et al. 2021)

Das gesamte Recyclingpotenzial für Metalle in LIB-Traktionsbatterien im Jahr 2030 wird von Neef et al. (2021) anhand von Szenarien zur künftigen Marktentwicklung auf Mengen zwischen 100 und 200 Kilotonnen beziffert (vgl. Abbildung 5-5).

Für die Rückgewinnung der in LIB enthaltenen Wertstoffe kommt in der Regel eine Abfolge von Verarbeitungsprozessen zum Einsatz. Dabei werden betreiberspezifische Logistikkonzepte und Verfahrensvarianten kombiniert und unterschiedliche Endprodukte erzeugt (Abbildung 5-6).

Abbildung 5-6 Grundsätzliche Prozessrouten beim klassischen LIB-Recyclingverfahren

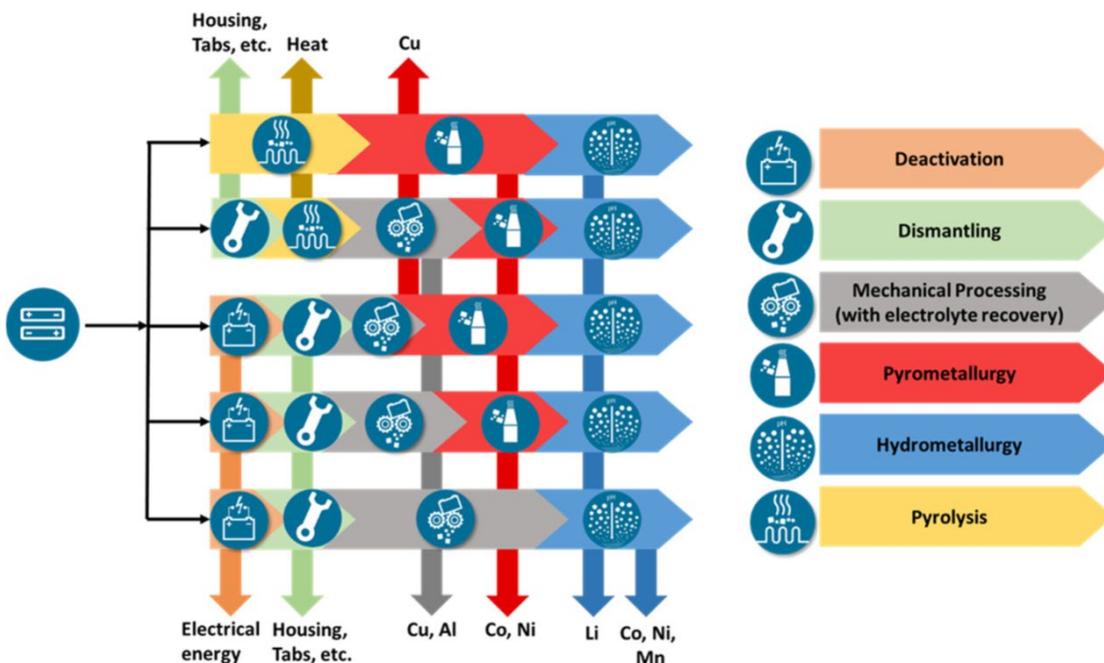


Quelle: (Baum et al. 2022)

Im Folgenden werden die grundsätzlichen Prozessrouten des LIB-Recyclings rudimentär skizziert. Es sei angemerkt, dass die mannigfaltigen Verfahrensdetails der verschiedenen Prozessrouten im Rahmen dieser Literaturstudie nicht vertieft werden können. Das LIB-Recycling startet üblicherweise mit einer Deaktivierung der Alt-LIB durch Entladung von Restkapazitäten, welche aus Sicherheitsgründen (Vermeidung der Brandgefahr bei Zerstörung der LIB-Zellen) erforderlich ist. Nach der Entladung erfolgen üblicherweise eine Demontage und Zerlegung der Batteriemodule (Entfernung von Gehäusen und elektrischen Leiter). Die daran anschließenden Prozessschritte richten sich nach den Erfordernissen bzw. Fähigkeiten der anschließend eingesetzten Trennverfahren (vgl. Abbildung 5-7). Im Falle einer direkten mechanischen Aufbereitung ist zunächst ein Aufschluss der Bestandteile von LIB-Zellen erforderlich. Dies erfolgt meist durch Schreddern und Mahlen der LIB. In diesem Schritt werden auch die volatilen Bestandteile (Elektrolyt) abgeschieden. Das entstehende Zwischenprodukt (als „Schwarzmasse bezeichnet) enthält das Kathodenmaterial (Aktivmaterial) und das Anodenmaterial (Grafit) sowie Separatorenmembranen und Metalle (Kontakte, Stromsammle, Gehäuseteile). Bei den meisten LIB enthält die Schwarzmasse zudem ein Bindemittel auf Polymerbasis, welches im Zuge der weiteren Aufbereitung entfernt werden muss. Die Abtrennung von Metallen und Kunststofffragmenten kann entweder mechanisch (z. B. durch Sieben) oder hydromechanisch erfolgen. Für die weitere Separation von Aktivmaterialien und Grafit kommen in klassischen Recyclingverfahren letztlich meist hydrometallurgische Prozesse (z. B. Säureaufschluss der Metalloxide) mit anschließender Ausfällung zum Einsatz.

Bei pyrometallurgischen Recyclingprozessen kann anstelle oder zusätzlich zur Zerkleinerung der Zellen mittels Schreddern eine vorgeschaltete Pyrolyse erfolgen. Die thermische Vorbehandlung dient der Konditionierung des Materials für die anschließende Weiterbehandlung in thermischen Reduktionsprozessen, welche die Zufuhr von Energie und Zuschlagstoffen (z. B. Reduktionsmittel, Schlackebildner) erfordern. Dabei werden polymere Bestandteile der Zellen und der Elektrolyt sowie das Grafit aus dem Anodenmaterial verbrannt. Die erzeugten Reaktionsprodukte werden zumeist einer weiteren hydrometallurgischen Raffination der einzelnen Wertstoffe unterzogen.

Abbildung 5-7 Kombinationen und Abfolge verschiedener LIB-Recyclingverfahren



Quelle: (Doose et al, 2021)

Pyrometallurgische Verfahren zur Rückgewinnung von LIB-Aktivmaterialien

Bei pyrometallurgischen Recyclingprozessen werden die LIB-Module in einen Schachtofen oder Drehrohrofen gegeben. Dabei durchlaufen die Zellen verschiedene Temperaturbereiche, in denen zunächst die organischen Bestandteile (Polymere Binder, Elektrolyt) verdampft, pyrolysiert und energetisch genutzt werden. Anschließend werden die in den LIB-Aktivmaterialien enthaltenen Metalloxide durch Erhitzen auf Temperaturen über 1.000°C in Metalle oder Metalllegierungen (Kobalt, Nickel, Kupfer, Ferro-Mangan) umgewandelt. Außerdem entsteht durch Zugabe von Schlackebildnern eine lithium- und aluminiumhaltige Schlacke, welche bislang zumeist nicht weiter stofflich verwertet werden kann (d. h. es erfolgt keine Rückgewinnung des darin gebundenen Lithiums). Beim reduktiven Rösten (Schmelzen) werden die Batteriematerialien (nach einer Vorbehandlung) im Vakuum oder in einer inerten Atmosphäre erhitzt, um die Metalloxide in eine gemischte Metalllegierung umzuwandeln. Nach Angaben von Doose et al. (2021) erfordert die pyrometallurgische Verarbeitung 4,68 MJ elektrische Energie pro kg LIB-Inputmaterial.

In der Regel werden heute zur weiteren Aufbereitung der pyrometallurgisch erzeugten Metallrezyklate hydrometallurgische Veredelungsprozesse (Elektrorefination) nachgeschaltet.

Der Vorteil pyrometallurgischer Verfahren ist eine einfachere und kostengünstigere Vorbehandlung durch Zerkleinern oder Zermahlen. Dabei lassen sich auch LIB-Gemische unterschiedlicher Typen Materialzusammensetzung, Form und Größe verarbeiten (Doose et al. 2021). Dies reduziert den Aufwand der Vorsortierung und mechanischen Vordemontage. Ein weiterer Vorteil der pyrometallurgischen Verfahren ist die Nutzung bestehender großindustrieller Anlagen (z. B. Umicore-Verfahren), wodurch das LIB-Recycling mit vergleichsweise geringen Neuinvestitionen in eine spezialisierte Anlagentechnik erfolgen kann. Außerdem stehen etablierte Weiterverarbeitungsrouten für die erzeugten Metallrezyklate zur Verfügung. Die Rezyklate gelangen letztendlich auf den generellen Markt für Technologiemetalle.

Hydrometallurgische Verfahren zur Rückgewinnung von LIB-Aktivmaterialien

Hydrometallurgische Verfahren umfassen Teilprozesse wie Laugung, Extraktion, Kristallisation und Fällung. Ziel dieser Verfahrensschritte ist die selektive Auflösung der verschiedenen Metalloxide und die Reduzierung von Verunreinigungen und organischen Rückständen. Ein typischer hydrometallurgischer Recyclingprozess besteht im ersten Schritt aus der Laugung der durch mechanische Verfahren vorbehandelten Schwarzmasse, wobei die Übergangsmetallverbindungen in anorganischen oder organischen Säuren gelöst werden, um die nachfolgenden Trennschritte vorzubereiten. Dazu werden üblicherweise anorganische Säuren wie Schwefelsäure (H_2SO_4), Salpetersäure (HNO_3) oder Salzsäure (HCl) in Kombination oder stufenweise zugesetzt. Häufig auch zudem Wasserstoffperoxid (H_2O_2) als Reduktionsmittel zugegeben, um die Effizienz der Laugung zu erhöhen. Die hydrometallurgische Verarbeitung erfordert nach Doose et al. (2021) 0,125 MJ elektrische Energie pro kg LIB-Inputmaterial.

Die Reaktionsprodukte dieser Laugung sind zumeist Metallsalze, die in wässriger Lösung vorliegen und durch selektive Kristallisation und Fällung voneinander getrennt werden können. Die Weiterverarbeitung dieser Zwischenprodukte hängt von der gewünschten Qualität der Recyclate ab. Einerseits können die Reaktionsprodukte auf dem allgemeinen Markt für Industriechemikalien verkauft werden oder es erfolgt eine Refination der einzelnen Metalle für den allgemeinen Markt für Technologiemetalle. Eine Schließung des LIB-Kreislaufes erfordert die erneute Bildung der Aktivmaterialien aus den Sekundärrohstoffen.

Es werden aber auch hydrometallurgische Verfahren entwickelt, die die Auflösung der Metalle umgehen und die Wertstoffe in ihrer technisch nutzbaren Form erhalten. Es existieren Verfahren, wie z. B. der von Sloop et al. (2020) untersuchte „Scalable Cathode-healing Process“ und das Revolt Verfahren (Balsvik, 2021), mit denen das Aktivmaterial, wie z. B. NCM, direkt regenerieren lässt, so dass für den Wiedereinsatz als LIB-Kathodenmaterial kein Umweg über die Reduktion zu Metallen erforderlich ist. Dazu müssen insbesondere die im Rezyklat enthaltenen Verunreinigungen und Gefügedefizite/Inhomogenitäten reduziert werden.

Abbildung 5-8 Beispiel für ein hydrochemisches Recyclingverfahren für Lithium-Ionen-Batterien: „Scalable Cathode-healing Process“

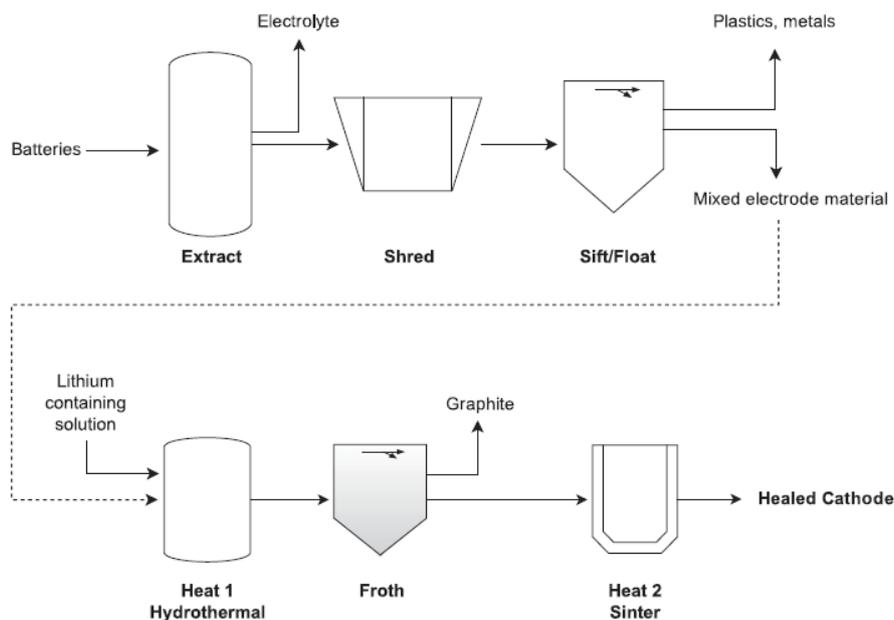


Fig. 1. Scalable Cathode-healing™ process. Electrolyte from Li-ion batteries is extracted with CO₂, then the cells are safely shredded. Battery components such as plastics and metals are separated, and electrodes undergo hydrothermal treatment. Froth flotation separates cathode and anode, and the cathode material is heated to produced healed cathodes.

Quelle: (Sloop et al. 2020)

5.3.4 Umweltauswirkungen klassischer LIB-Recyclingverfahren

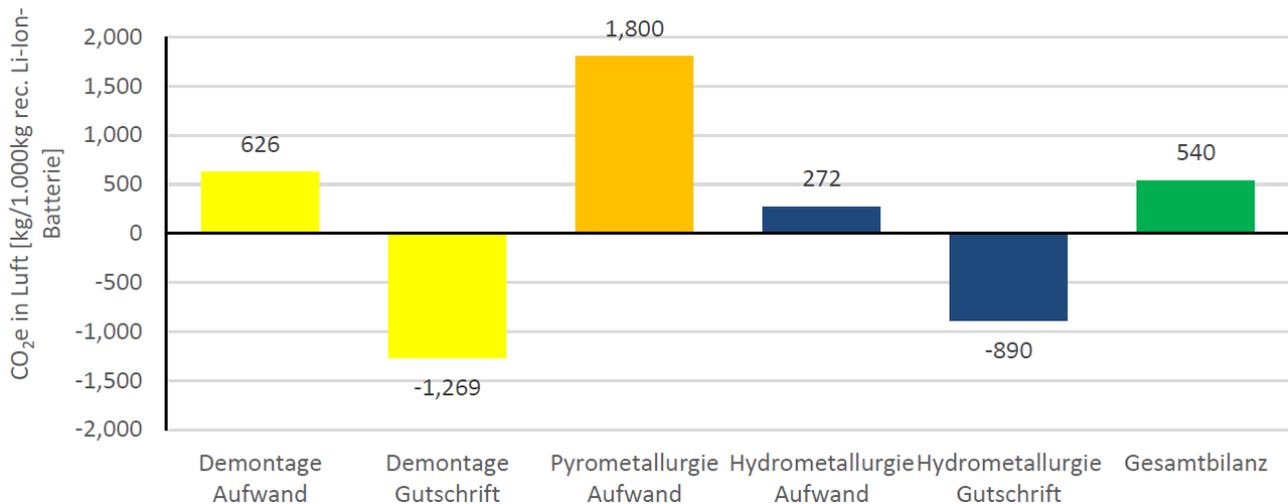
In der öffentlich verfügbaren Literaturbasis sind eine Vielzahl von Studien zu den Ressourcen- und Umweltauswirkungen des LIB-Recyclings zu finden. Allerdings beziehen sich die meisten der vorhandenen Studien auf das Recycling unterschiedlicher bzw. nicht genauer spezifizierten LIB-Inputmaterialien, so dass eine direkte Vergleichbarkeit bezogen auf den Output an Sekundärrohstoffen, und insbesondere die regenerierten Aktivmaterialien, schwierig ist. Darüber hinaus umfassen die betrachteten Systemgrenzen vieler Studien Verfahrensrouten mit heterogen verknüpften Abfolgen mechanischer, pyrometallurgischer und hydrometallurgischer Teilprozesse. Deren jeweilige Anteile an der Gesamtumweltauswirkung (Beitragsanalyse) ist nicht immer hinreichend in absoluten Resultaten dargestellt.

Kiemel et al. (2020) untersuchen in einer vergleichenden Ökobilanz die Umweltauswirkungen zweier Szenarien des LIB-Recyclings mit Schwerpunktsetzung auf eine pyrometallurgisch dominierte Variante und eine hydrometallurgische Verfahrensrouten. Demzufolge schneidet das pyrometallurgische Verfahren mit einer THG-Nettoemission von 540 kg CO₂-Äquivalente pro 1000 kg LIB-

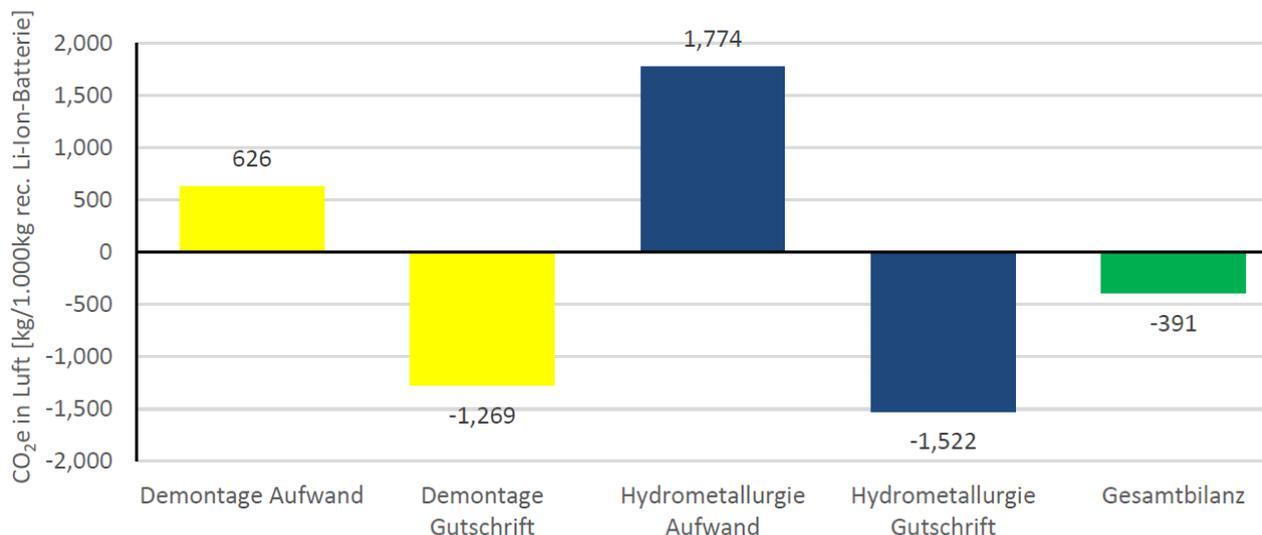
Inputmaterialien deutlich schlechter ab als die hydrometallurgische Verfahrensrouten mit -391 kg CO₂-Äquivalente (was einer Nettoeinsparung von THG-Emissionen infolge von Gutschriften entspricht) (vgl. Abbildung 5-9). Jedoch hat das pyrometallurgische Verfahren in anderen Umweltwirkungskategorien wiederum Vorteile gegenüber dem hydrometallurgischen Recycling (vgl. Abbildung 5-9).

Abbildung 5-9 Ökobilanzieller Vergleich pyrometallurgischer und hydrometallurgischer Verfahrensrouten des LIB-Recyclings

Treibhausgaspotential (GWP100) nach IPCC (2013) für einen Mischprozess aus Pyro- und Hydrometallurgie



Treibhausgaspotential (GWP100) nach IPCC (2013) für einen rein hydrometallurgischen Prozess



Quelle: (Kiemel et al. 2020)

Aus den oben gezeigten Ergebnissen der Studie von Kiemel et al. (2020) lässt sich ableiten, dass die reinen THG-Lasten pro Tonne Inputmaterial beim pyrometallurgischen Prozess mit 1.800 kg CO₂-Äquivalente etwas höher ausfallen als beim hydrometallurgischen Prozess mit 1.774 kg CO₂-Äquivalente. Hinzu kommen bei der pyrometallurgischen Prozessroute noch 272 kg CO₂-Äquivalente für die nachfolgende hydrometallurgische Raffination der erzeugten Sekundärmaterialien. Beim ausschließlich hydrometallurgischen Prozess wiederum können

Gutschriften für vermiedene THG-Emissionen in Höhe von 1.522 kg CO₂-Äquivalente angerechnet werden.

Tabelle 5-9: Gegenüberstellung der LCA-Ergebnisse für pyrometallurgische und hydrometallurgische Verfahrensrouten des LIB-Recyclings

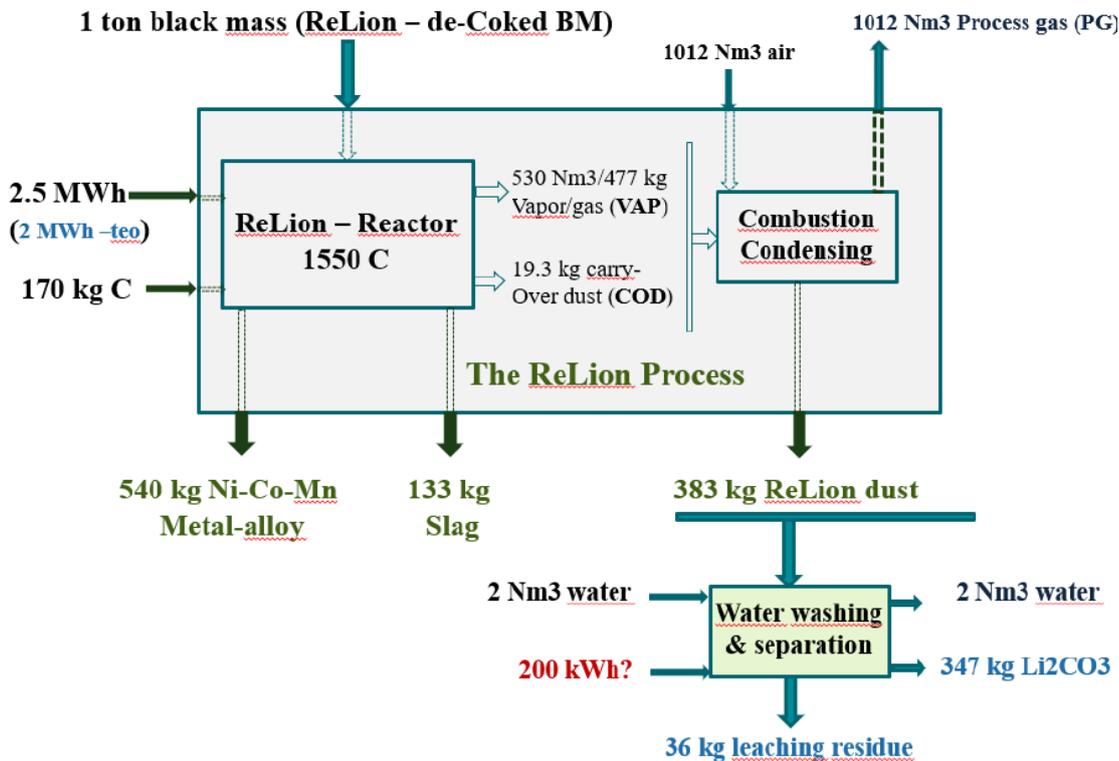
| Wirkkategorie | Kürzel | Methode | Pyro- metallurgische Prozessroute | Hydro- metallurgische Prozessroute | Einheit |
|---|--------|--|---|--|----------------------|
| | | | Route 1 | Route 2 | |
| Treibhaus-potential | GWP | IPCC 2013: Climate Change | 540 | -391 | kg CO ₂ e |
| Kumulierter Energieverbrauch | CED | Cumulative Energy Demand | -7.650 | -2.462 | MJ Heizwert |
| Eutrophierungs- potential | FEP | ReCiPe 2008 (H) V1.13: Freshwater Eutrophication | -3,55 | -4.27 | kg P Äquivalent |
| | MEP | ReCiPe 2008 (H) V1.13: Marine Eutrophication | -0.87 | 1.93 | kg N Äquivalent |
| Ressourcen- schwund Metall | MED | ReCiPe 2008 (H) V1.13: Metal Depletion | -3.856 | -5.286 | kg Fe Äquivalent |
| Photochemisches Oxidantien-potential | POF | ReCiPe 2008 (H) V1.13: Photochemical Oxidant Formation | -15,5 | -12,97 | kg NMVOCs |
| Versauerungs- potential | TEA | ReCiPe 2008 (H) V1.13: Terrestrial Acidification | -82,86 | -73,53 | kg SO ₂ e |

Quelle: (Kiemel et al. 2020)

5.3.4.1 Umweltauswirkungen pyrometallurgischer Verfahrensrouten

Der von Zackrisson (2019) untersuchte ReLion-Prozess des Schwedischen Unternehmens Swerim beinhaltet im Wesentlichen eine pyrometallurgische Schmelzreduktion bei Temperaturen um 1550°C, bei dem die Schwarzmasse (gemischtes Kathoden- und Anodenmaterial) thermisch getrennt wird, wobei polymere Bestandteile und das Graphit verbrennen. Dabei erfolgt eine Rückgewinnung der Kathodenmetalle als Ni-Co-Mn-Legierung, während das Lithium als Flugstaub abgeschieden wird und anschließend in einem wässrigen Verfahren rückgewonnen wird (vgl. Abbildung 5-10).

Abbildung 5-10 Beispiel für pyrometallurgisches LIB-Recycling: ReLion Verfahren



Quelle: (Zackrisson, 2019)

Die Ergebnisse von Zackrisson (2019) zeigen, dass die pyrometallurgische Prozessroute nach ReLion einen Carbon Footprint von -3.89 kg CO₂/kg LIB-Zellen aufweist (basierend auf Europäischem Strommix). Das heißt, es tritt infolge von Gutschriften für die durch das Recycling vermiedenen Umweltlasten für Primärrohstoffe eine Nettoumweltentlastung auf. Den größten Anteil daran hat die Gutschrift für rezykliertes Aluminium (welches als Bestandteil von LIB-Modulen, nicht jedoch in LIB-Zellen vorhanden ist).

5.3.4.2 Umweltauswirkungen hydrometallurgischer Verfahrensrouten

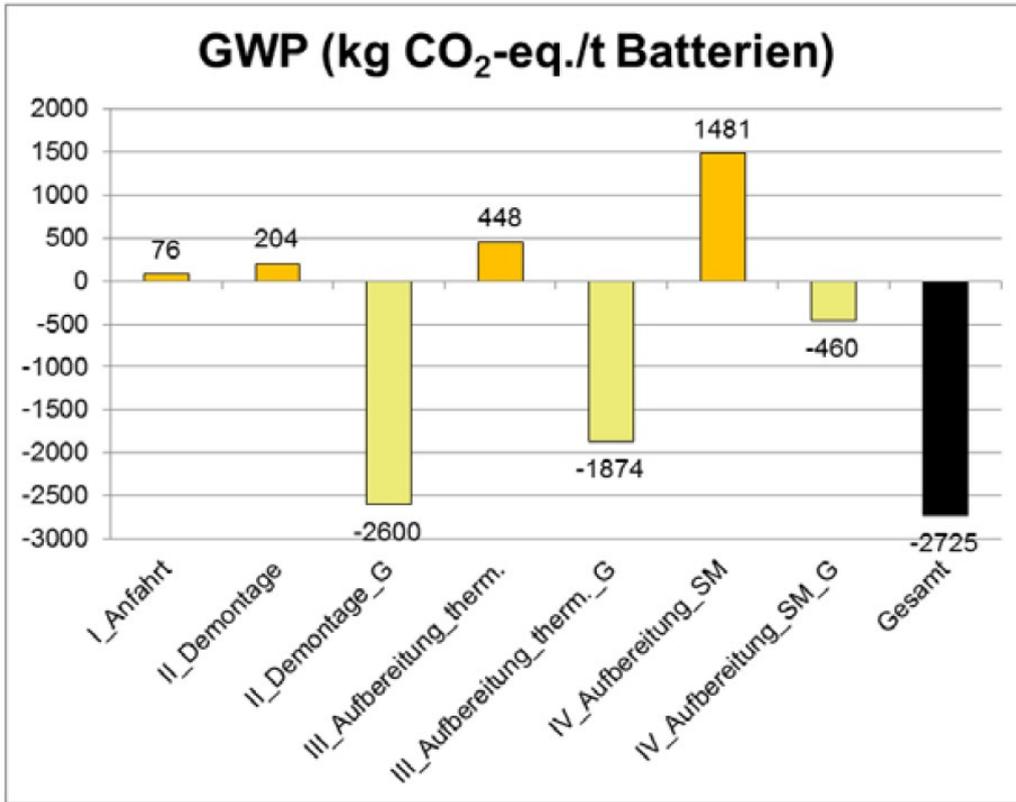
Beim von Buchert und Sutter (2016) ökobilanziell untersuchten LithoRec II - Recyclingverfahren handelt es sich um eine hydrometallurgische Verfahrensvariante zur Verarbeitung von LIB-Modulen (in einem Aluminiumgehäuse), die die folgenden Prozessschritte umfasst:

- Entladung und Zerlegung der Batteriesysteme bis auf Zellebene
- Zellerlegung und Separation des Aktivmaterials
- hydrometallurgische Aufbereitung.

In der hydrometallurgischen Aufbereitung werden die Aktivmaterialien aus der Beschichtung als batteriefähige Materialien zurückgewonnen. Zunächst werden andere Bestandteile der Beschichtung abgetrennt. Dann folgt die Abtrennung von Kobalt, Nickel und Mangan in einer Sulfatlösung, in der die drei Metalle gemischt (fast im stöchiometrischen Verhältnis) vorliegen. Das Lithium wird (bei beiden Kathodentypen) in weiteren Schritten aufgereinigt und als Lithiumhydroxid gewonnen. Der Prozess benötigt Hilfsstoffe und Energie.

Die von Buchert und Sutter (2016) berechneten Umweltauswirkungen beziehen sich auf eine funktionelle Einheit von 1.000 kg NMC-Batterien (Modulebene). Es wurde ermittelt, dass das gesamte THG-Potenzial des LithoRec II – Recyclingverfahrens bei -2,747 kg CO₂/kg NCM-Inputmaterial liegt (Abbildung 5-11) und (Tabelle 5-10).

Abbildung 5-11 Treibhausgaspotenzial des LithoRec II Verfahren für NMC-Batterien mit Aluminiumgehäuse



Quelle: (Buchert und Sutter, 2016)

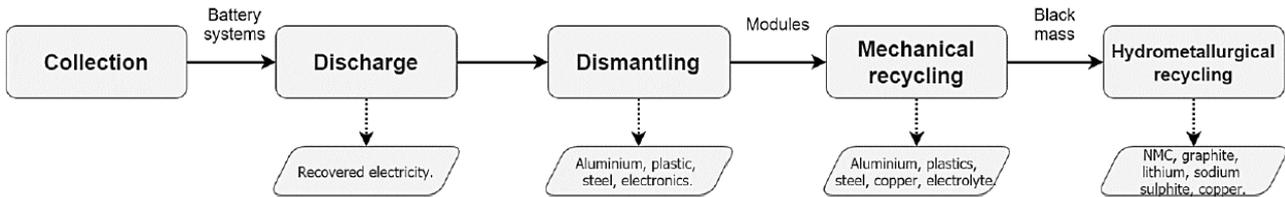
Tabelle 5-10: Vergleich der Ökobilanz-Ergebnisse des LithoRec II Verfahren für 2015 und 2016

| Wirkungskategorie | 2015 | 2016 |
|--|--------|--------|
| GWP (kg CO ₂ -eq./t) | -1835 | -2747 |
| AP (kg SO ₂ -eq./t) | -69 | -67 |
| EP (kg PO ₄ -eq./t) | -2,4 | -4,8 |
| POCP (kg ethyl.-eq./t) | -3,6 | -3,5 |
| ADP_{elem.} (kg Sb-eq./t) | -0,35 | -0,31 |
| CED_{total} (MJ/t) | -41115 | -47014 |

Quelle: (Buchert und Sutter, 2016)

Balsvik (2021) untersuchte den bereits industriell hochskalierten „Revolt Prozess“ der Schwedischen Firma Northvolt mit Hilfe einer ökobilanziellen Bewertung. Der Revolt-Prozess kombiniert mechanische Prozesse mit einem hydrometallurgischen Aufschluss, der NCM und Lithium für die Produktion neuer Batteriezellen zurückgewinnt. Allerdings werden lediglich relative Anteile der Umweltauswirkungen angegeben, Angaben über absolute Resultate fehlen (siehe Abbildung 5-13).

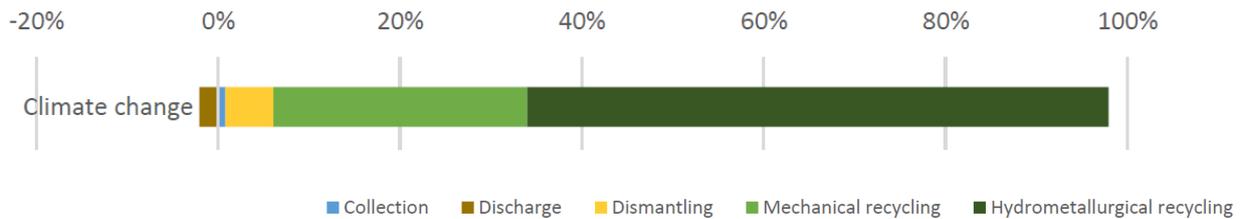
Abbildung 5-12 Beispiel für hydrochemisches LIB-Recycling: Revolt Verfahren



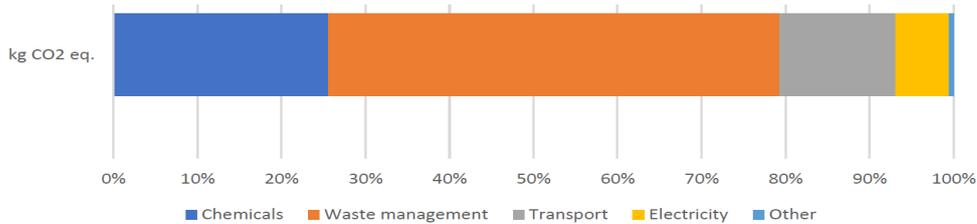
Quelle: (Balsvik, 2021)

Abbildung 5-13 Relative Anteile der verschiedenen Prozessschritte an den Umweltauswirkungen des Revolt Verfahrens nach ReCiPe 2016 v1.1

Relative Anteile der einzelnen Prozessschritte:



Relative THG-Anteile nach aggregierten Prozesstypen:



Relative THG-Anteile der mechanischen Teilprozesse:



Relative THG-Anteile des hydrometallurgischen Teilprozesses:



Quelle: (Balsvik, 2021)

5.3.5 Diskussion der Ergebnisse

Die in öffentlich verfügbaren LCA-Studien ersichtlichen Ergebnisse zu den Umweltauswirkungen des LIB-Recyclings zeigen einen Umweltentlastungseffekt durch die Substitution der Primärrohstoffe durch Rezyklate. Dabei schneidet die hydrometallurgische Prozessroute besser ab als die pyrometallurgische Prozessroute. Jedoch beziehen sich die genannten Resultate zumeist auf eine funktionelle Einheit, die Inputmaterialien auf Gemische aus gebrauchten LIB mit uneinheitlicher Zusammensetzung. Dies erschwert die Vergleichbarkeit der vorliegenden Studien. Weiterhin ist eine Beitragsanalyse der jeweiligen Prozessschritte zum Gesamtergebnis schwierig abzuleiten, da die Ergebnisse in den meisten Studien nicht hinreichend genau aufgeschlüsselt dargestellt werden. Es war daher im Rahmen dieser Kurzstudie nicht möglich, Referenzwerte zu Umweltauswirkungen eines NCM811 Aktivmaterial-Rezyklats auf Basis hydrometallurgischer oder pyrometallurgischer Prozessrouten abzuleiten.

6 Schlussfolgerungen und Ausblick

Ausgehend von den Ergebnissen der Ex-ante-Analysen, der Selbstevaluationen und der vertiefenden Nachhaltigkeitsanalysen werden in diesem Kapitel zunächst die ermittelten Nachhaltigkeitsgewinne inhaltlich eingeordnet (vgl. Kapitel 6.1). Anschließend werden das methodische Vorgehen kritisch reflektiert (vgl. Kapitel 6.2) und Schlussfolgerungen für prioritären Forschungsbedarf gezogen (vgl. Kapitel 6.3).

6.1 Einordnung der Nachhaltigkeitsgewinne der betrachteten Forschungsvorhaben

In der Gesamtschau der Nachhaltigkeitsanalysen zu den betrachteten Forschungsvorhaben zeigt sich, dass zwar in fast allen Fällen Nachhaltigkeitsgewinne in Form von Treibhausgasreduktionen zu erwarten sind, die Größenordnungen der Entlastungspotenziale jedoch stark variieren. Besonders große Hebelwirkungen im Hinblick auf Treibhausgasreduktionen ergeben sich bei Digitaltechnologien, die eine Reduzierung des Einsatzes CO₂-intensiver Materialien und Betriebsstoffe (z. B. Beton, Aktivkohle) oder die Optimierung industrieller Prozesse (z. B. Recycling von Kühlgeräten und Lithium-Ionen-Batterien) ermöglichen. Diesbezüglich weisen die Ergebnisse der Selbstevaluierungen (vgl. Kap. 4) bzw. der vertiefenden Nachhaltigkeitsanalysen (vgl. Kap. 5) darauf hin, dass im Falle einer erfolgreichen Hochskalierung der Neuentwicklung auf ganz Deutschland Treibhausgasreduktionen bis in den dreistelligen Millionenbereich (bezogen auf *Kilogramm* CO₂-Äquivalente) möglich sind.

Die genannten Treibhausgasreduktionen relativieren sich jedoch, wenn man sie in Relation zu den notwendigen CO₂-Einsparungen setzt, um die für Deutschland geltenden Klimaschutzziele zu erreichen. Demnach müssen im Zeitraum bis 2025 jährlich 23 Mio. *Tonnen* CO₂-Äquivalente eingespart werden, im Zeitraum 2026 bis 2030 steigt die notwendige CO₂-Reduktion sogar auf 46 Mio. *Tonnen* CO₂-Äquivalente pro Jahr (Repenning et al. 2023). Vor dem Hintergrund der genannten Reduktionsziele wird deutlich, dass die in den Nachhaltigkeitsanalysen betrachteten Digitaltechnologien jeweils nur einen Beitrag im Promillebereich leisten können.

Dennoch ist jeder Beitrag in diesem Zusammenhang wertvoll und unverzichtbar, insbesondere dann, wenn durch die Neuentwicklung weitere Nachhaltigkeitsgewinne entstehen können. In diesem Zusammenhang ist z.B. eine durch digitale Technologien ermöglichte Reduktion des Insektizid-

einsatzes in Waldgebieten zu nennen. Mit Blick auf die ökonomische Dimension der Nachhaltigkeit konnten zudem einige Forschungsprojekte (z.B. i-SEWER und K2I) im Rahmen der Selbstevaluierung geringere Lebenszykluskosten als bei der vorherrschenden Referenztechnologie ermitteln.

6.2 Reflektionen und Rückschlüsse zur methodischen Vorgehensweise

Durch die konsequente Ausrichtung an der Agenda 2030 verbindet der methodische Ansatz der Nachhaltigkeitsanalysen eine hohe Verbindlichkeit der Indikatoren mit einem pragmatischen Ansatz der Selbstreflexion.

Die Erfahrungen aus der Anwendung dieses Methodikansatzes im Rahmen der NetDGT-Nachhaltigkeitsanalysen zeigen, dass eine Selbstevaluierung durch die Akteure in den jeweiligen Forschungsprojekten besonders förderlich für eine frühzeitige Auseinandersetzung mit Be- und Entlastungspotenzialen ist. Dies gilt insbesondere im Hinblick auf vorhandene Bezüge zu den normativen Vorgaben der Agenda 2030. Für den Ansatz einer Selbstevaluierung spricht ferner die Tatsache, dass quantitative Daten für eine substantielle Nachhaltigkeitsanalyse zuallererst in den Forschungsvorhaben selbst verfügbar werden. Durch die Bereitstellung niedrigschwelliger Instrumente können mithilfe dieser Daten richtungsweisende Impulse für die laufenden Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in den Forschungsprojekten gesetzt werden.

Der Nutzen der durchgeführten Analysen liegt somit zum einen darin, dass die gewonnenen Erkenntnisse über besondere Entlastungs- und Belastungspotenziale eine wichtige Anregung für die Akteure in den Forschungsvorhaben bieten, nach neuen Lösungen zu suchen und einzelne Aspekte eines Forschungsvorhabens konstruktiv zu hinterfragen. Darüber hinaus tragen die Selbstevaluierungen zum Aufbau eigener Modellierungs- und Evaluierungskompetenzen in den jeweiligen Forschungsverbänden bei. Ein solches „Capacity Building“ zu Nachhaltigkeitsthemen kann darüber hinaus für die Inwertsetzung der Neuentwicklung, aber auch für Weiterentwicklungen und Folgeprojekte hilfreich sein. Schließlich können die Ergebnisse von Nachhaltigkeitsanalysen auch für Fördermittelgeber handlungsleitend bei der Auswahl von Forschungsprojekten bzw. deren Weiterführung sein.

Allerdings ist die erfolgreiche Durchführung von Selbstevaluierungen auch mit einer Reihe von Herausforderungen verbunden. Dazu gehören beispielsweise die Identifikation der relevanten Nachhaltigkeitsaspekte, die sachgerechte Definition der Systemgrenzen sowie der Umgang mit vorhandenen Datenlücken. Sowohl bei der Ex-ante-Analyse als auch bei der Selbstevaluierung haben die Erfahrungen aus der Praxis gezeigt, dass einige Forschungsvorhaben bei der Festlegung des Untersuchungsrahmens vor besonderen Herausforderungen bezüglich der Bilanzierungsmethoden und der Datenverfügbarkeit stehen. Die für die Selbstevaluierung entwickelten Instrumente waren daher nicht für alle Forschungsvorhaben gleichermaßen praktisch einsetzbar. Dies betrifft insbesondere Neuentwicklungen digitaler Instrumente, die ihre Wirksamkeit erst in der Interaktion mit Dritten bzw. in ihrem späteren Anwendungskontext entfalten. Hier haben die Projektbeteiligten oft Schwierigkeiten, das Nachhaltigkeitspotenzial zu antizipieren, da die zugrunde liegenden sozioökonomischen Einflussfaktoren oft außerhalb der Expertise der Technologieentwicklerinnen und -entwickler liegen. Um diese Herausforderungen zu meistern, hat sich die Begleitung der Nachhaltigkeitsanalysen durch einen „externen Challenger“ als hilfreich erwiesen. Für die Nachhaltigkeitsanalysen im Querschnittsprojekt NetDGT wurde diese Rolle durch das Öko-Institut wahrgenommen. Eine solche externe Begleitung der Selbstevaluierungen kann je nach

Komplexität und Ergebnissen der Analyse eine vertiefte Auseinandersetzung wesentlich anregen und unterstützen.

Schließlich bleibt aus methodischer Sicht festzuhalten, dass die durchgeführten vertiefenden Nachhaltigkeitsanalysen die wesentlichen Ergebnisse der Selbstevaluierung nicht nur ergänzt, sondern auch reproduziert und damit in ihrer Richtungssicherheit bestätigt haben.

6.3 Ausblick und prioritärer Forschungsbedarf

Es besteht ein großer Bedarf an Strategien und Konzepten, um die Digitalisierung in den Dienst einer nachhaltigen Entwicklung zu stellen (Cieslewicz et al. 2023). Vor diesem Hintergrund zeigt der methodische Ansatz des vorliegenden Projekts Wege auf, wie Nachhaltigkeitsaspekte von Digital-GreenTech-Innovationsprojekten bereits während des Entwicklungsprozesses analysiert werden können. Mit einem hybriden Ansatz aus Ex-ante-Analysen zur Festlegung des Untersuchungsrahmens, Selbstevaluierungen durch die Akteure der Forschungsvorhaben und anschließenden vertiefenden Nachhaltigkeitsanalysen durch das Öko-Institut konnten Wege aufgezeigt werden, wie ggf. vorhandene Nachhaltigkeitsgewinne identifiziert und bestmöglich realisiert werden können.

Wie bereits zuvor erwähnt, besteht jedoch eine große Herausforderung für die Selbstevaluierung darin, quantitative Daten zu den Ökopprofilen der verwendeten Materialien und Komponenten zu recherchieren und auf die wesentlichen Aspekte zu fokussieren. Dies gilt insbesondere dann, wenn es sich um komplexe Produkte oder Technologien mit einer Vielzahl unterschiedlicher Komponenten handelt. Vor diesem Hintergrund besteht ein großer Bedarf an gut dokumentierten, frei verfügbaren und leicht interpretierbaren Daten zu Nachhaltigkeitsaspekten. Die in Kapitel 4.3.4 genannten Datenbanken bieten hier eine gute Ausgangsbasis. Perspektivisch wäre jedoch eine stärkere Verbreitung von Softwaretools wünschenswert, die eine automatische Verknüpfung von Daten z.B. aus dem Computer Aided Design mit entsprechenden Daten zum Carbon Footprint ermöglichen.

Bezüglich der eingangs genannten Green Claims der Digitalisierung (vgl. Kapitel 1) ist anzumerken, dass die Hebelwirkungen der verschiedenen digitalen Technologiekonzepte in puncto Nachhaltigkeitsgewinne stark unterschiedlich ausgeprägt sind und zum Teil hinter den gesteckten Erwartungen zurückbleiben. Vor diesem Hintergrund wäre es wünschenswert, zukünftig für jedes Technologiekonzept einen Ex-ante-Vergleich der jeweils möglichen Anwendungsfelder im Sinne eines Benchmarkings durchzuführen, um die Green Claims nachvollziehbar zu begründen. Zentrale Forschungsfrage wäre dabei, in welchem Anwendungsfeld ein bestimmtes Technologiekonzept die größte Hebelwirkung erzielen kann. Mit einem solchen Ansatz ließen sich beispielsweise interessante Schlussfolgerungen für die weitere Fokussierung der öffentlichen Forschungsförderung ableiten und strategische Roadmaps für einen möglichst nachhaltigen digitalen Transformationsprozess entwickeln.

Forschungsbedarf besteht auch hinsichtlich einer noch besseren Institutionalisierung entwicklungsbegleitender Nachhaltigkeitsanalysen im Innovationsprozess digitaler Technologien bzw. Systemlösungen. Dazu gehört beispielsweise eine weitere Verbesserung der Nutzerfreundlichkeit und allgemeinen Anwendbarkeit von Instrumenten zur Selbstevaluierung. Durch zusätzliche Handreichungen (beispielsweise in Form von Leitfäden und Tutorials) kann erreicht werden, dass die zur Verfügung gestellten Instrumente von einem möglichst breiten Nutzerkreis weitgehend eigenständig angewendet werden können. Auf diese Weise könnte das weiterentwickelte Instrumentarium die methodische Grundlage für eine noch zu schaffende allgemeine „Beratungsstelle“ zur entwicklungsbegleitenden Nachhaltigkeitsbewertung öffentlich geförderter F&E-Projekte bilden.

Literaturverzeichnis

Allied Vision Technologies (2021): Allied Vision Technologies (2021), GigE Vision Cameras, Manta Technical Manual V8.1.0.

https://ads-img.co.jp/mv/wp-content/uploads/2021/04/Manta_TechMan_v8.1.0.pdf

Baum, Z., Bird, R., Yu, X., Ma, Y. (2022): Lithium-Ion Battery Recycling - Overview of Techniques and Trends. ACS Energy Lett. (7), S.712–719 <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.1c02602>

Bioserve 2023: Bioserve (2023). Bad Sassendorf: Lippeverband setzt erstmals Ozon zur Abwasserreinigung ein. <https://klaerwerk.info/nuetzliches/allgemeine-meldungen-und-berichte/bad-sassendorf-lippeverband-setzt-erstmal-ozon-zur-abwasserreinigung-ein/>

Bitkom (2023): Digitalisierung senkt den CO₂-Ausstoß der deutschen Wirtschaft. Im Internet unter: <https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Digitalisierung-senkt-CO2-Ausstoss-deutscher-Wirtschaft>

Balsvik, J. (2021): Life cycle assessment of industrialized lithium-ion battery recycling. Mechanical and hydrometallurgical treatment from an ex-ante perspective. KTH Royal Institute of Technology

BMEL (2012): Thünen-Institut (Hrsg.). (2012). Dritte Bundeswaldinventur – Ergebnisdatenbank. <https://bwi.info>

Buchert, M., und Sutter, J., (2016): Aktualisierte Ökobilanzen zum Recyclingverfahren LithoRec II für Lithium-Ionen-Batterien (Stand 09/2016)

Bundesregierung (2022): Digitalstrategie - Gemeinsam digitale Werte schöpfen. Im Internet unter: <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/K/presse/063-digitalstrategie.pdf?%20%0Bblob>

Cieslewicz, K. et al. 2022: Cieslewicz, K. et al. Der europäische Weg. In: Ökologisches Wirtschaften 37(1): 8–9.

DigitalGreentech (2023a): Digitaler Fingerabdruck: Markierungsfreie Rückverfolgung vom gefälltten Baumstamm bis ins Sägewerk.

https://digitalgreentech.de/projekte/detail?tx_gicampaign_projects%5Baction%5D=detail&tx_gicampaign_projects%5Bcontroller%5D=Project&tx_gicampaign_projects%5Bproject%5D=87&cHash=215f772bec1263fab53f8194efdf87b1

DigitalGreentech (2023b): Einzelbaumbasiertes, satellitengestütztes Waldökosystemmonitoring mittels autoadaptiver Hyperdimensions-Geodatenanalyse.

https://digitalgreentech.de/projekte/detail?tx_gicampaign_projects%5Baction%5D=detail&tx_gicampaign_projects%5Bcontroller%5D=Project&tx_gicampaign_projects%5Bproject%5D=80&cHash=d98649d5a5052e4dd3bf3975f7f9e673

DigitalGreentech (2023c): CYCLOPS - Circularity Optimisation for Plastics.

https://digitalgreentech.de/projekte/detail?tx_gicampaign_projects%5Baction%5D=detail&tx_gicampaign_projects%5Bcontroller%5D=Project&tx_gicampaign_projects%5Bproject%5D=90&cHash=67293f1347d595c6eba72acb15746b0f

DigitalGreentech (2023d): DigInform - Digitales Informationsmanagement in der Akteurskette der Kreislaufwirtschaft in der produzierenden Industrie

https://digitalgreentech.de/projekte/detail?tx_gicampaign_projects%5Baction%5D=detail&tx_gicampaign_projects%5Bcontroller%5D=Project&tx_gicampaign_projects%5Bproject%5D=88&cHash=2739ccd66010ab346a741622b4a06c69

DigitalGreentech (2023e): DiKueRec - Nutzung digitaler Abbilder zur effizienten Steuerung von Aufbereitungsprozessen der Kreislaufwirtschaft am Beispiel von Kühlgeräterecyclinganlagen.

https://digitalgreentech.de/projekte/detail?tx_gicampaign_projects%5Baction%5D=detail&tx_gicampaign_projects%5Bcontroller%5D=Project&tx_gicampaign_projects%5Bproject%5D=86&cHash=3436166e7409ee84355278f86fe98c06

DigitalGreentech (2023f): DiRecLIB - Direktes Recycling von Aktivmaterialien aus Lithium-Ionen-Batterien und dessen Optimierung durch digitale Verfahren.

https://digitalgreentech.de/projekte/detail?tx_gicampaign_projects%5Baction%5D=detail&tx_gicampaign_projects%5Bcontroller%5D=Project&tx_gicampaign_projects%5Bproject%5D=85&cHash=06dd165415c83ccb56d020930b91a2c

DigitalGreentech (2023g): ODiWiP – Optimierter Wertstoffkreislauf in der Papierindustrie: Ressourcenschonung beim Recycling von Altpapier und der Papierproduktion durch Digitalisierung.

https://digitalgreentech.de/projekte/detail?tx_gicampaign_projects%5Baction%5D=detail&tx_gicampaign_projects%5Bcontroller%5D=Project&tx_gicampaign_projects%5Bproject%5D=91&cHash=908f6c12047def2b5ba9d3457c95da66

DigitalGreentech (2023h): Decoding Spurenstoffe - Implementierung einer intelligenten Monitoring- und Steuerungszentrale für eine ressourceneffiziente Spurenstoffelimination aus Abwasser.

https://digitalgreentech.de/projekte/detail?tx_gicampaign_projects%5Baction%5D=detail&tx_gicampaign_projects%5Bcontroller%5D=Project&tx_gicampaign_projects%5Bproject%5D=89&cHash=fd006bcb8b40d74df1b10f00d2fef227

DigitalGreentech (2023i): Künstliche und kollektive Intelligenz zum Spurenstoff-Tracking in Oberflächenwasser für eine nachhaltige Trinkwassergewinnung.

https://digitalgreentech.de/projekte/detail?tx_gicampaign_projects%5Baction%5D=detail&tx_gicampaign_projects%5Bcontroller%5D=Project&tx_gicampaign_projects%5Bproject%5D=84&cHash=768d1901d48d23be754e97ede905cba5

DigitalGreentech (2023j): KI-basiertes Kanalstandhaltungsmanagement.

https://digitalgreentech.de/projekte/detail?tx_gicampaign_projects%5Baction%5D=detail&tx_gicampaign_projects%5Bcontroller%5D=Project&tx_gicampaign_projects%5Bproject%5D=81&cHash=298a1533e5bf1e838f06e0d3f478eb1e

DigitalGreentech (2023k): Monitoring von Vegetation und Wasserqualität in Seen mit Unterwasser-Roboterschwärmen.

https://digitalgreentech.de/projekte/detail?tx_gicampaign_projects%5Baction%5D=detail&tx_gicampaign_projects%5Bcontroller%5D=Project&tx_gicampaign_projects%5Bproject%5D=155&cHash=6e9339081a8e3aa6188374d60dbfe284

DigitalGreentech (2023l): Die nächste Generation der Kanalnetzsteuerung.

https://digitalgreentech.de/projekte/detail?tx_gicampaign_projects%5Baction%5D=detail&tx_gicampaign_projects%5Bcontroller%5D=Project&tx_gicampaign_projects%5Bproject%5D=156&cHash=ef6d34e1f1d9c0f07c10b1d68b8ceb5b

Doose, S.; Mayer, J.K.; Michalowski, P.; Kwade, A. (2021): Challenges in Ecofriendly Battery Recycling and Closed Material Cycles: A Perspective on Future Lithium Battery Generations. *Metals*, 11, 291. <https://doi.org/10.3390/met11020291>

Ecoinvent 2022: Ecoinvent-Datenbank Version 3.9 (2022)

Ecoinvent 2023: Ecoinvent-Datenbank Version 3.9.1 (2023)

EGLV 2020: Emschergenossenschaft und Lippeverband (2020). Kläranlage Dülmen wurde vor 25 Jahren eingeweiht. <https://www.eqlv.de/medien/klaeranlage-duelmen-wurde-vor-25-jahren-eingeweiht/>

Europäische Kommission 2019: Der europäische Grüne Deal. COM(2019) 640.

Europäische Kommission (2021): Commission Recommendation (EU) 2021/2279 of 15 December 2021 on the use of the Environmental Footprint methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of products and organisations. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32021H2279>

Europäische Kommission (2023): A Green Deal Industrial Plan for the Net-Zero Age. COM(2023) 62.

Fehrenbach, H., Bischoff, M., Böttcher, H., Reise, J., & Hennenberg, K. (2022). The missing limb: including impacts of biomass extraction on forest carbon stocks in greenhouse gas balances of wood use. *Forests*, 13, S. 365. doi:10.3390/f13030365

ForstBW (2023): Der Wald in Baden-Württemberg. <https://www.forstbw.de/schuetzen-bewahren/waldinventur/bundeswaldinventur/bwi3/>

Gossen, M. et al. 2021: A Marriage Story of Digitalisation and Sustainability? In: *Ökologisches Wirtschaften* 36 (O1): 4–8.

Heimes, H., Kampker, A., Offermanns, C., Kreisköther, K., Kwade, A., Doose, S., Ahuis, M., Michalowski, P., Michaelis, S., Rahimzei, E., Brückner, S., Rottnick, K. (2021): Recycling von Lithium-Ionen-Batterien. RWTH Aachen und VDMA

Heimpel et al. 2013: Heimpel G. E., Yang Y., Hill J. D., Ragsdale D. W. (2013). Environmental consequences of invasive species: greenhouse gas emissions of insecticide use and the role of biological control in reducing emissions. *PLoS One*. 8(8):e72293. DOI: 10.1371/journal.pone.0072293

Hensel 2023: Hensel, S. (2023). E-Mail-Nachricht vom 30.05.2023

Hillenbrandt et al. 2016: Hillenbrandt et al. (2016). Maßnahmen zur Verminderung des Eintrages von Mikroschadstoffen in die Gewässer – Phase 2, UBA-Texte 60/2016. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/377/publikationen/mikroschadstoffen_in_die_gewasser-phase_2.pdf

Idemat (2023): Indicator system eco-cost. <https://www.ecocostsvalue.com>

IIM (2023): iim AG (Hrsg.). Ringbeleuchtung CRC100-ALD-R / 101.0014.02.01.00. Datenblatt. https://www.iimag.de/fileadmin/user_upload/lumimax/produkte/artikel/datenblatt/101.0014.02.01.00.pdf

IPCC (2021): Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Intergovernmental Panel on Climate Change (Hg.).

https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Full_Report.pdf

Jiva o.J.: ReCollect. Efficient Manufacturing of Recyclable Composite Laminates for Electrical Goods.

https://instct.org/images/stories/journal/vol_13/vol_13_3/ICT/201119_ReCollect_ICT_Autumn_Webinar_Slides.pdf

Jungblut, S.-I. (2021): Artificial Intelligence for Environmental and Climate Protection. In: Ökologisches Wirtschaften, 36(O1): 41–43.

Kampffmeyer, N., & Gensch, C.-O. (2019). Nachhaltiger Konsum durch Digitalisierung? Öko-Institut Working Paper 4/2019. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/WP-Konsum-Digitalisierung.pdf>

Kiemel, S., Koller, J., Kaus, D., Singh, S., Full, J., Weeber, M., Miehe R., Ehrenberger, S., Österle, I., Senzeybek, M., Stickel, S. (2020): Untersuchung: Kreislaufstrategien für Batteriesysteme in Baden-Württemberg. Fraunhofer Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA / Stuttgart, Deutschland

Köhler, A.R. et al. (2018): Energie- und Ressourcenverbräuche der Digitalisierung, Expertise für das WBGU-Hauptgutachten „Unsere gemeinsame digitale Zukunft“.

Krüger et al. (2010): Krüger, M., Theis, S., Kunze, S., Detzel, A. (2010). Ökobilanzielle Untersuchung verschiedener Verpackungssysteme für Bier.

https://www.duh.de/fileadmin/user_upload/download/100406_IFEU_BCME_LCA_Oekobilanz.pdf

Last 2023: Last, C. (2023). Berechnungen und Szenarien Bildung der Nachhaltigkeitsanalyse. Arbeitspapier zur Selbstevaluierung im DiGeBaSt-Projekt. Mai 2023.

Liebau 2023: Liebau, U. (2023). Nachhaltigkeitseffekte durch den Einsatz von künstlicher Intelligenz in der Kanalinspektion. In: gwf Wasser+Abwasser 2/2023: 32-34.

Liu, R. et al. (2019): Impacts of the digital transformation on the environment and sustainability. Issue Paper under Task 3 from the “Service contract on future EU environment policy”.

Nachhaltigkeitseffekte durch den Einsatz von künstlicher Intelligenz in der Kanalinspektion. In: gwf Wasser+Abwasser 2/2023: 32-34.

Morck, T. (2023): Schriftliche persönliche Mitteilung.

Munnwer et al. 2012: Munnwer, H., Ghullam, M., Akhtar, H. (2021). Life cycle assessment of Autoliv's Night vision camera. International Journal of Environmental Sciences, Volume 3, No. 1, 498-508

Neef, C., Schmaltz, T., Thielmann, A. (2021): Dr. Axel Recycling von Lithium-Ionen-Batterien: Chancen und Herausforderungen für den Maschinen- und Anlagenbau. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI

Ökobaudat 2021: ÖKOBAUDAT - Informationsportal Nachhaltiges Bauen. Im Internet unter:

https://www.oekobaudat.de/no_cache/datenbank/suche.html

Parniske, J. (2023). Mündliche persönliche Mitteilung.

ProBas (2023): Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagementsysteme. Im Internet unter:
<https://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php>

Repenning, J., Harthan, R. Blanck, R. et al. (2023). Klimaschutzinstrumente-Szenario 2030 (KIS-2030) zur Erreichung der Klimaschutzziele 2030. Climate Change 30/2023.
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/2023_07_04_climate_change_30_2023_klimaschutzinstrumente.pdf

Sloop, S., Cradon, L., Allen, M., Koetje, K., Reed, L., Gaines, L., Sirisaksoontorn, W., Lerner, M. (2020): A direct recycling case study from a lithium-ion battery recall. Sustainable Materials and Technologies, (25), doi:10.1016/j.susmat.2020.e00152

SmartVisionLights (2020): SmartVisionLights (Hrsg.). XR256 High-Speed Strobe Light Overdrive. Product Data Sheet. https://smartvisionlights.com/wp-content/uploads/XR256_Datasheet-1.pdf

UNDP (2016): What are the Sustainable Development Goals? United Nations Development Programme. <https://www.undp.org/content/undp/en/home/sustainable-development-goals.html>

United Nations (2015): Transforming our world: the 2030 Agenda for sustainable development (Resolution A/RES/70/1 adopted by the General Assembly on 25 September 2015). United Nations. https://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A_RES_70_1_E.pdf

Xin Sun, Xiaoli Luo, Zhan Zhang, Fanran Meng, Jianxin Yang (2020): Life cycle assessment of lithium nickel cobalt manganese oxide (NCM) batteries for electric passenger vehicles. In: Journal of Cleaner Production. Band 273. S.123006, doi:10.1016/j.jclepro.2020.123006.

Zackrisson, M. (2019): Life cycle assessment of lithium ion battery recycling - The ReLion process. RISE IVF AB

Anhang

Anhang I. Dossiers der Ex-Ante-Analyse für die Forschungsvorhaben des Projektclusters "Forstwirtschaft"

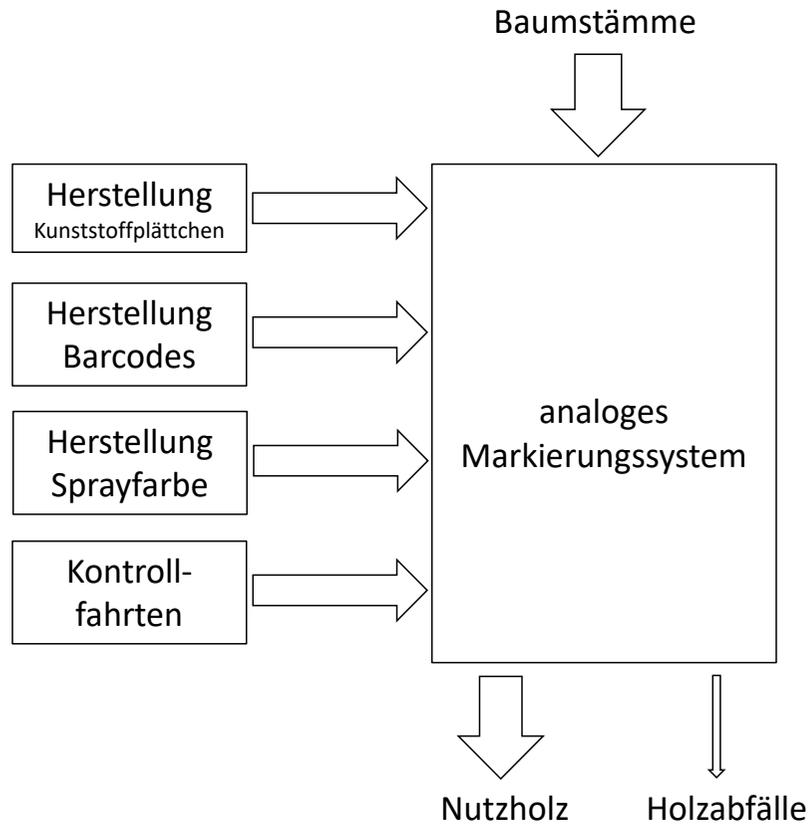
Ex-Ante-Analyse für das Langprojekt „DiGeBaSt“

| | Entlastungspotenziale | | | Belastungspotenziale | | |
|--------------------------------|--|-----------|----------|--|-----------|----------|
| | Effekt | SDG-Bezug | Relevanz | Effekt | SDG-Bezug | Relevanz |
| Effekte erster Ordnung | | | | Rohstoffaufwand für die Herstellung der Digitaltechnologien (v.a. Messkopf mit Kamera am Vollernter, Messgeräte bei Transport und im Sägewerk) [4] | SDG 8.4 | A |
| | | | | Stromverbrauch für den Betrieb der Digitalisierungstechnologien (v.a. Übertragung Fingerprint-Bitfolge, Betrieb Cloudrechner) [1,4] | SDG 7.3 | B |
| Effekte zweiter Ordnung | Ressourcenschonung durch Verzicht auf physische Markierung (Nummernplättchen, Barcodes, Sprayfarbe) | SDG 8.4 | A | | | |
| | Ressourcenschonung durch - Vermeidung der Verunreinigung von Sägerestholz - Optimierung des Reklamationswesens (einzelstammweise Zuordnung von Volumen und Qualität) - Optimierte Kaskadennutzung | SDG 8.4 | B | | | |
| | verbesserte CO ₂ -Bindung von Waldbeständen [1,3] | SDG 13.1 | A | | | |
| | Rückverfolgung von nachhaltig produziertem Holz entlang der Lieferkette [1,2] | SDG 15.2 | B | | | |

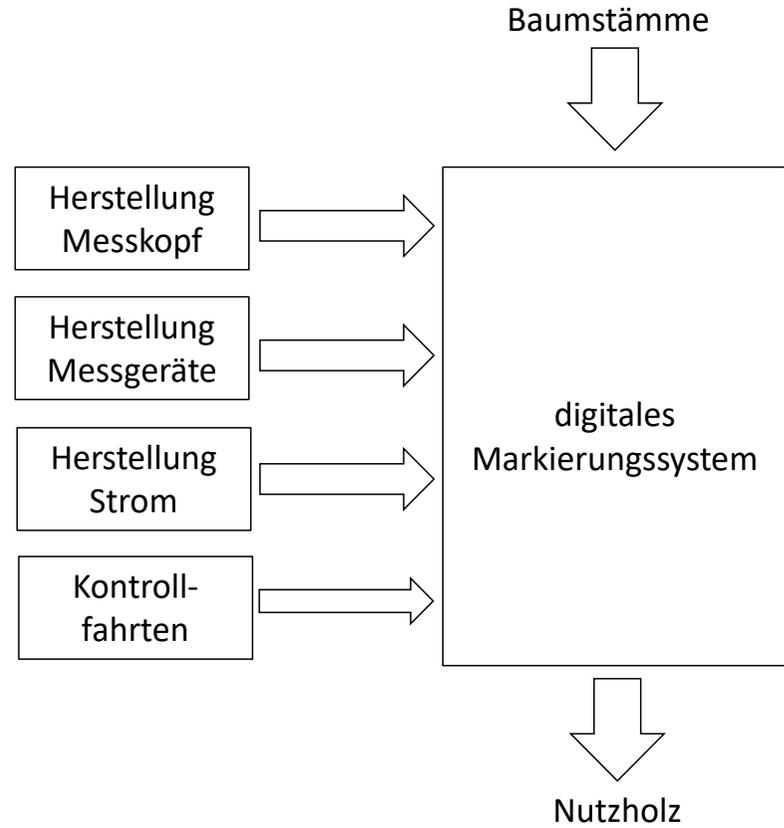
| | | | | | | |
|--------------------------------|---|------------|---|--|--|--|
| Effekte dritter Ordnung | gesteigerte Bereitschaft zur Holzmobilisierung, insbesondere in Kleinprivatwäldern [1] | SDG 15.2 | A | | | |
| | Prozessoptimierung und – Modernisierung der Holz-Wertschöpfungskette des umweltverträglichen Rohstoffs - Optimierung der Logistik (Ausnutzen der Transportkapazitäten) und der Lagerung im Wald - Vermeidung/Verminderung von Holzmasseverlusten - Vermeidung von Qualitätsverlusten aufgrund zu langer Lagerdauer - Vermeidung von „Suchfahrten“ im Wald, um verlorengegangenes Holz zu finden | SDG 9.4 | A | | | |
| | Beitrag zur Anpassung von Waldbau-Strategien an klimatische Veränderungen [1] | SDG 13.2 | B | | | |
| | Akzeptanz- und Nachfragesteigerung von nachhaltig produziertem Holz [4] | (SDG 12.2) | B | | | |
| | Kontrollmechanismus für flächenscharfe Naturalbuchführung / Erschwerung der Einfuhr von Holz illegaler Herkunft | SDG 15.7 | C | | | |
| | | | | | | |

Arbeitshypothese zum Untersuchungsrahmen (Scoping)

System mit Referenztechnologie



System mit Digitalisierungstechnologie



Quelle: Eigene Darstellung

Definitionen / Referenzen:

| | |
|-------------------------|---|
| Effekte erster Ordnung | Direkter Ressourcen- und Energiebedarf der verwendeten Digitalisierungstechnologien (Infrastruktur und Geräte) einschließlich der Umweltleistung von vorgelagerten Prozessen wie Hardwareherstellung und Energiebereitstellung |
| Effekte zweiter Ordnung | Unmittelbare Auswirkungen der Digitalisierungstechnologien auf die Nachhaltigkeitsperformance anderer (bereits bestehender) Produkt- / Dienstleistungssysteme |
| Effekte dritter Ordnung | Mittelbare Auswirkungen auf Nachhaltigkeitsaspekte infolge der Nutzung von Digitalisierungstechnologien und deren Einfluss auf Werte, Leitbilder, Produktions-, Arbeits- und Konsumgewohnheiten, etc. |
| SDG-Bezug | Zutreffendes SDG, falls möglich Konkretisierung auf der Ebene der SDG-Unterziele |
| Relevanzbewertung | A: Highlight / Hotspot erwartet; Betrachtung im Rahmen der Selbstevaluierung obligatorisch; möglichst mit quantitativen Angaben hinterlegen B: wesentlicher Aspekt; qualitative Betrachtung im Rahmen der Selbstevaluierung ausreichend C: Aspekt von untergeordneter Bedeutung; kann im Rahmen der Selbstevaluierung vernachlässigt werden |
| Quellenangaben | [1] Projektfragebogen [2] Projektpräsentation beim Kick-off-Meeting [3] Ergebnisse aus dem Workshop "Nachhaltigkeitsgewinne" [4] Experteneinschätzungen Projektteam Öko-Institut [5] Sonstiges (mittels Kommentar in der jeweiligen Zelle dokumentieren) |

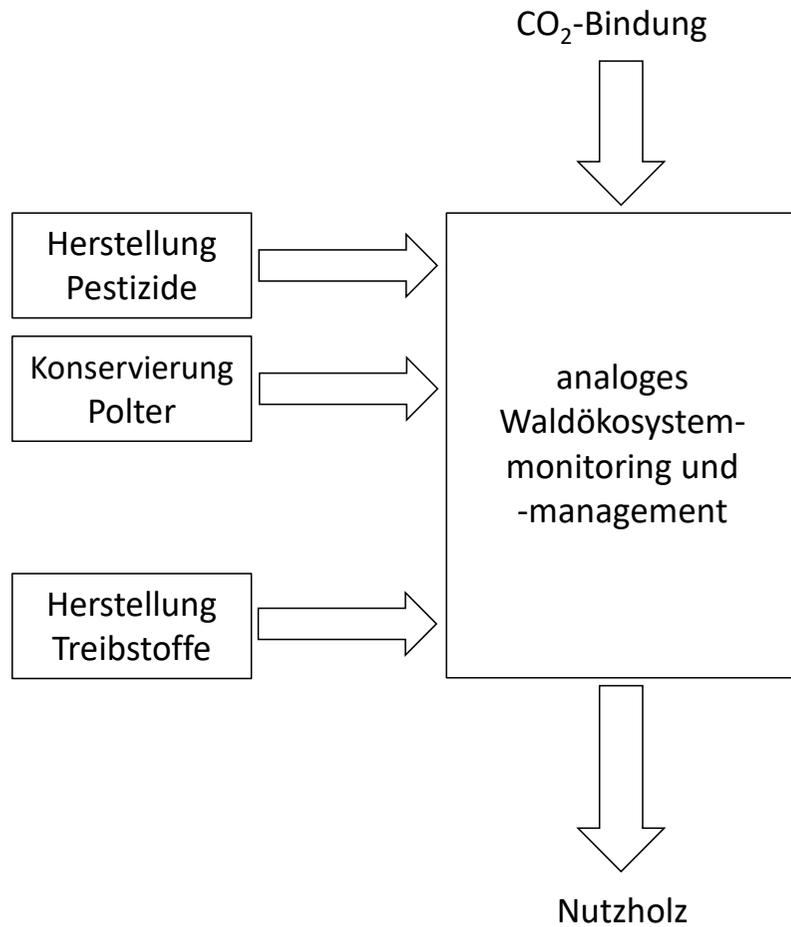
Stand: 11.02.2022

Ex-Ante-Analyse für das Langprojekt „FORESTCARE“

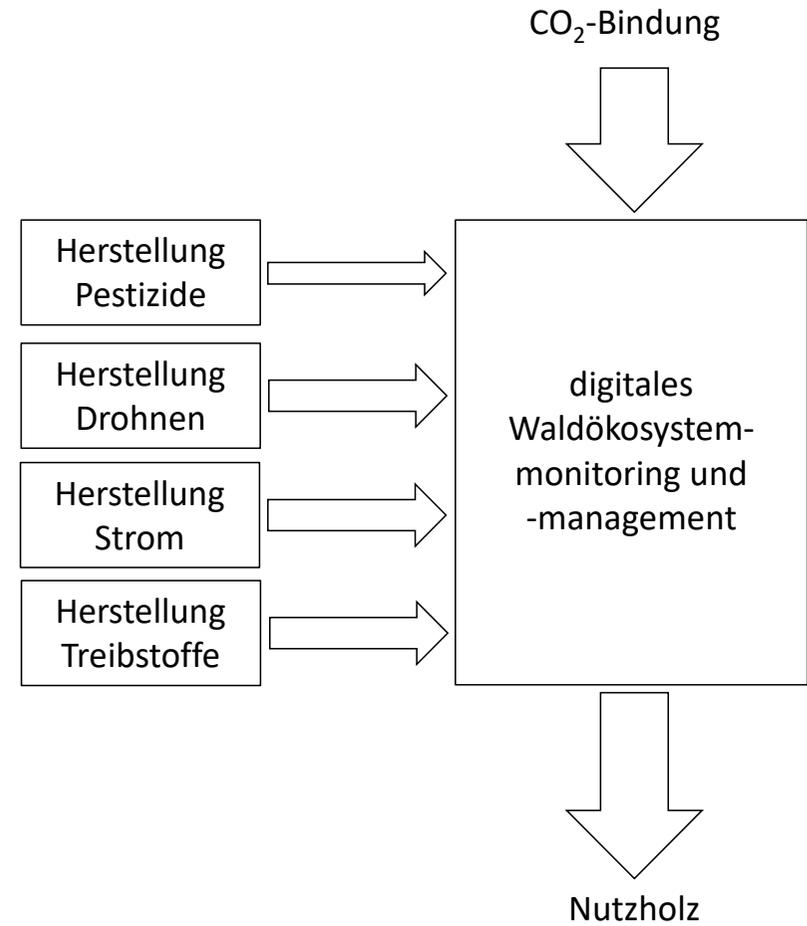
| | Entlastungspotenziale | | | Belastungspotenziale | | |
|--------------------------------|--|----------------------------------|----------|---|-----------|----------|
| | Effekt | SDG-Bezug | Relevanz | Effekt | SDG-Bezug | Relevanz |
| Effekte erster Ordnung | | | | Rohstoffaufwand für die Herstellung der Digitalisierungstechnologien (v.a. „Electric Nose“-Drohnen inkl. Akkus) [1,3] | SDG 8.4 | A |
| | | | | Stromverbrauch für den Betrieb der Digitalisierungstechnologien (v.a. „Electric Nose“-Drohnen, Datenübertragung von Satelliten sowie HPC-Rechner) [1] | SDG 7.3 | A |
| | | | | Kraftstoffverbrauch der Messfahrzeuge für die Einzelbaumaufnahme vor Ort [1] | SDG 7.3 | C |
| Effekte zweiter Ordnung | verbesserte CO ₂ -Bindung von Waldbeständen [1,3] | SDG 13.1 | A | | | |
| | größere nachhaltig nutzbare Holzmenge [1] | SDG 15.2 | A | | | |
| | Verringerung des Pestizideinsatzes [1] | SDG 3.9; SDG 6.3; SDG 12.4 | B | | | |
| | Wegfall von Aufforstungsmaßnahmen nach Kalamitäten [1] | SDG 15.2 | A | | | |
| Effekte dritter Ordnung | verbesserte Stabilität des Waldökosystems / Verstärkung Artenvielfalt / Kühlungseffekt [1,5] | SDG 6.6; SDG 15.1 | B | Risiko des Know-how-Verlusts der „analogen“ Waldbeobachtung bei Förstern? [4] | SDG 15.2 | B |
| | Verhinderung von Bodenerosionen [1] | SDG 2.4 | B | | | |
| | Überflutungsschutz [1] | SDG 2.4; SDG 11.5 | B | | | |
| | Erhöhung der Trinkwasserqualität [1] | SDG 6.6 | C | | | |
| | Erholungsraum [5] | - | C | | | |

Arbeitshypothese zum Untersuchungsrahmen (Scoping) – gilt für Steady-State-Zustand

System mit Referenztechnologie



System mit Digitalisierungstechnologie



Definitionen / Referenzen:

| | |
|-------------------------|---|
| Effekte erster Ordnung | Direkter Ressourcen- und Energiebedarf der verwendeten Digitalisierungstechnologien (Infrastruktur und Geräte) einschließlich der Umweltleistung von vorgelagerten Prozessen wie Hardwareherstellung und Energiebereitstellung |
| Effekte zweiter Ordnung | Unmittelbare Auswirkungen der Digitalisierungstechnologien auf die Nachhaltigkeitsperformance anderer (bereits bestehender) Produkt- / Dienstleistungssysteme |
| Effekte dritter Ordnung | Mittelbare Auswirkungen auf Nachhaltigkeitsaspekte infolge der Nutzung von Digitalisierungstechnologien und deren Einfluss auf Werte, Leitbilder, Produktions-, Arbeits- und Konsumgewohnheiten, etc. |
| SDG-Bezug | Zutreffendes SDG, falls möglich Konkretisierung auf der Ebene der SDG-Unterziele |
| Relevanzbewertung | A: Highlight / Hotspot erwartet; Betrachtung im Rahmen der Selbstevaluierung obligatorisch; möglichst mit quantitativen Angaben hinterlegen B: wesentlicher Aspekt; qualitative Betrachtung im Rahmen der Selbstevaluierung ausreichend C: Aspekt von untergeordneter Bedeutung; kann im Rahmen der Selbstevaluierung vernachlässigt werden |
| Quellenangaben | [1] Projektfragebogen [2] Projektpräsentation beim Kick-off-Meeting [3] Ergebnisse aus dem Workshop "Nachhaltigkeitsgewinne" [4] Experteneinschätzungen Projektteam Öko-Institut [5] Gespräch mit Herrn Paczkowski am 11.02.2022 |

Stand: 11.02.2022

Anhang II. Dossiers der Ex-Ante-Analyse für die Forschungsvorhaben des Projektclusters "Kreislaufwirtschaft"

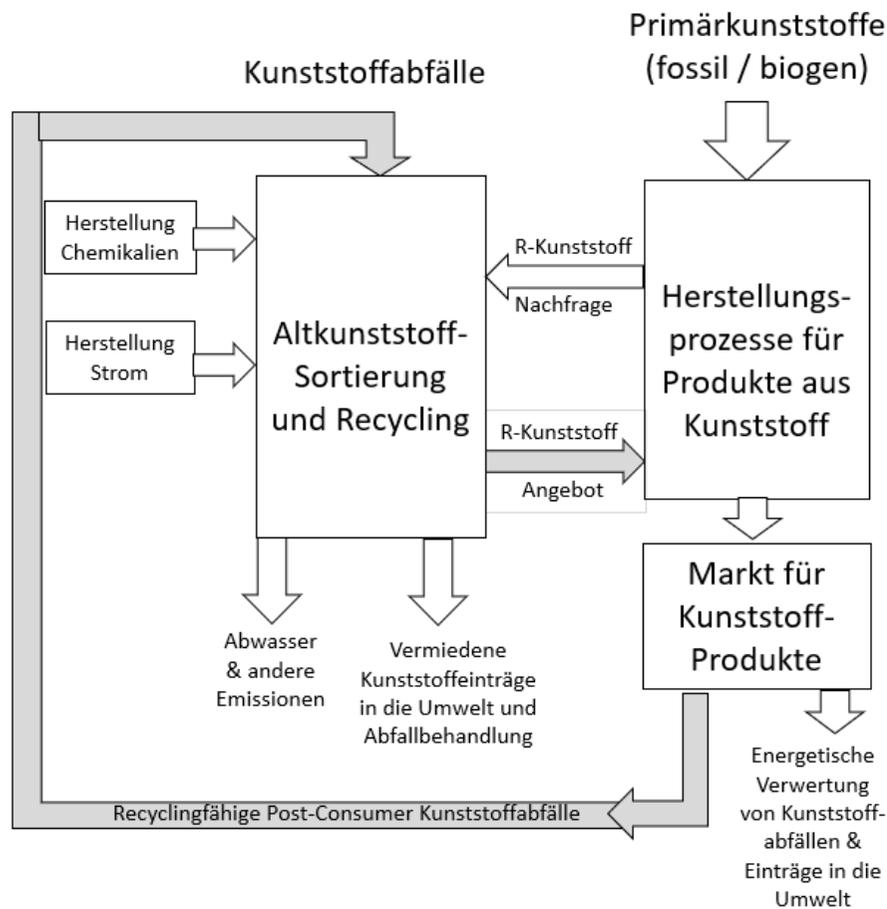
Ex-Ante-Analyse für das Langprojekt „CYCLOPS“

| | Entlastungspotenziale | | | Belastungspotenziale | | |
|-------------------------|--|-----------|----------|--|-----------|----------|
| | Effekt | SDG-Bezug | Relevanz | Effekt | SDG-Bezug | Relevanz |
| Effekte erster Ordnung | | | | Rohstoffaufwand für die Herstellung der Digitalisierungstechnologien (v.a. Sensorik, Datacenter & Netzwerke) [4] | SDG 8.4 | B |
| | | | | Energieaufwand für den Betrieb der Software mit Digitalem Zwilling (v.a. Training der KI) [4] | SDG 7.3 | B |
| | | | | | | |
| Effekte zweiter Ordnung | Optimierung der Wertstoffkreislauf von Kunststoffabfällen von der Sammlung und Sortierung bis zur Produktion von Produkten aus rPlastik [1, 2] | SDG 12.5 | A | | | |
| | Reduzierung der benötigten Mengen an primär-Plastik aus Rohöl durch verbesserte Bereitstellung von Rezyklat- Plastik [1, 2] | SDG 12.2 | A | | | |
| | | | | Potenziell Mehrverbrauch der benötigten Mengen an Chemikalien und für das Plastikrecycling und die Herstellung neuer Kunststoffprodukte infolge größerer Durchsatzmenge [1, 2] | SDG 12.4 | A |
| | | | | Potenziell Mehrverbrauch für das Plastikrecycling [4] | SDG 7.3 | A |
| | CO ₂ -Ausstoßes aus der Energiebereitstellung (inkl. Kunststoff-Importe aus dem Ausland) [4] | SDG 9.4.1 | A | CO ₂ -Ausstoßes aus der Energiebereitstellung (inkl. Kunststoff-Importe aus dem Ausland) [4] | SDG 9.4.1 | A |

| | | | | | | |
|--------------------------------|--|----------|---|---|----------|---|
| | Ressourcen- und Energieeinsparungen in der Kunststoffindustrie [4] | SDG 12.2 | B | Ressourcen- und Energieeinsparungen in der Kunststoffindustrie [4] | SDG 12.2 | B |
| Effekte dritter Ordnung | Verstärkung des Substitutionseffekts durch kostengünstige r-Kunststoffe kann Circular Economy Konzept unterstützen [4] | SDG 12.6 | C | Durch Marktmechanismen könnte die gesteigerte Verfügbarkeit kostengünstiger r-Kunststoffe den Plastikverbrauch insgesamt vergrößern [4] | SDG 12.2 | C |
| | Diversifizierung, Konzentration auf mit hoher Wertschöpfung verbundene, arbeitsintensive Sektoren [1] | SDG 8.2 | B | | | |
| | Reduzierung der Entstehung von nicht-recyclebaren Plastikabfällen und deren Entsorgung [4] | SDG 12.6 | C | | | |
| | Reduzierung der Freisetzung von Plastikabfällen in die Umwelt [4] | SDG 14.1 | C | | | |
| | | | | Prüfbedarf: Legal Compliance von KI-generierten Carbon Footprint Kennzahlen (Green Claims) | | B |

Arbeitshypothese zum Untersuchungsrahmen (Scoping)

Kunststoffrecycling status quo



Digitale Transformation mit CYCLOPS



Quelle: Eigene Darstellung

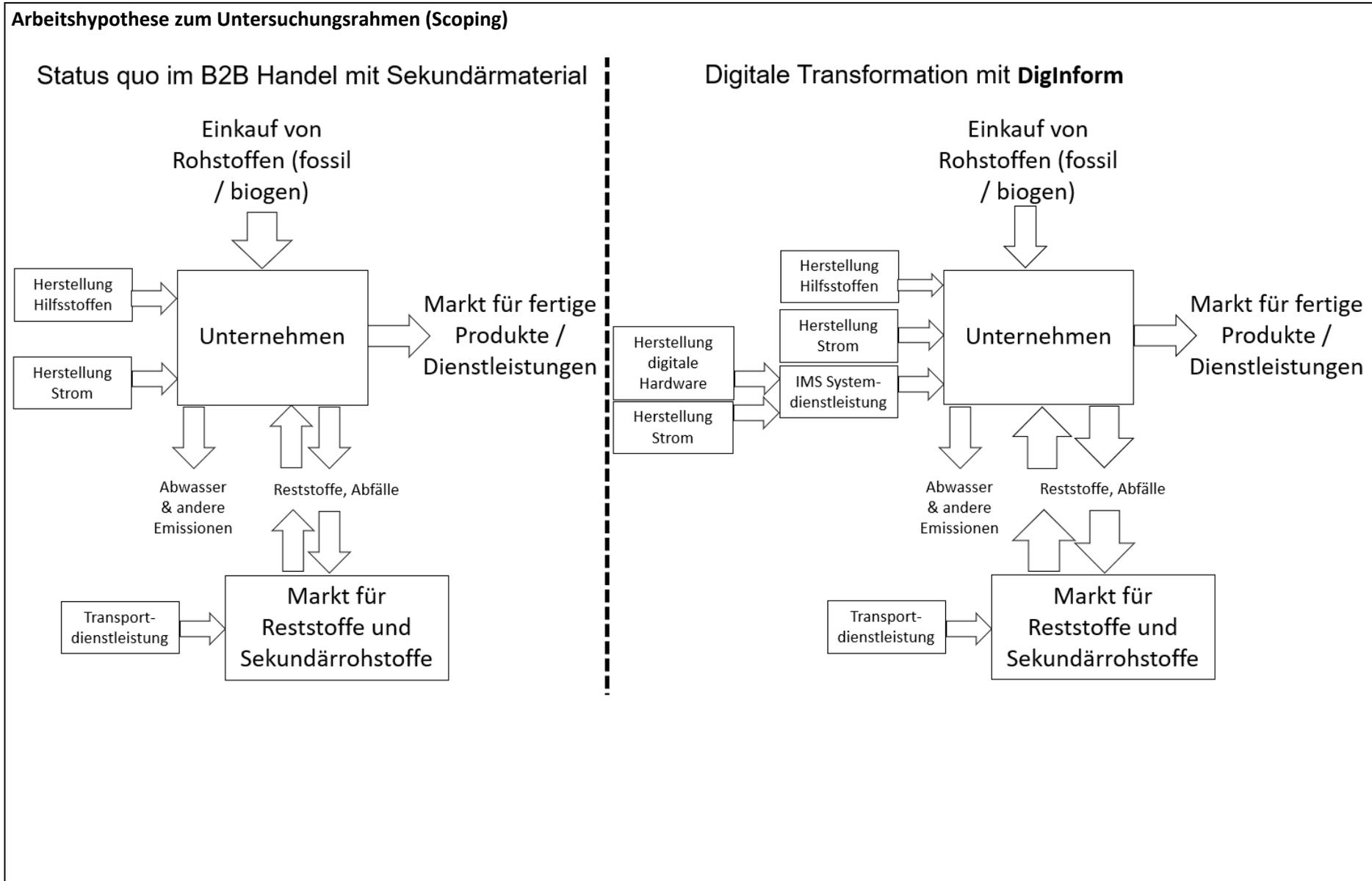
Definitionen / Referenzen:

| | |
|-------------------------|---|
| Effekte erster Ordnung | Direkter Ressourcen- und Energiebedarf der verwendeten Digitalisierungstechnologien (Infrastruktur und Geräte) einschließlich der Umweltleistung von vorgelagerten Prozessen wie Hardwareherstellung und Energiebereitstellung |
| Effekte zweiter Ordnung | Unmittelbare Auswirkungen der Digitalisierungstechnologien auf die Nachhaltigkeitsperformance anderer (bereits bestehender) Produkt- / Dienstleistungssysteme |
| Effekte dritter Ordnung | Mittelbare Auswirkungen auf Nachhaltigkeitsaspekte infolge der Nutzung von Digitalisierungstechnologien und deren Einfluss auf Werte, Leitbilder, Produktions-, Arbeits- und Konsumgewohnheiten, etc. |
| SDG-Bezug | Zutreffendes SDG, falls möglich Konkretisierung auf der Ebene der SDG-Unterziele |
| Relevanzbewertung | A: Highlight / Hotspot erwartet; Betrachtung im Rahmen der Selbstevaluierung obligatorisch; möglichst mit quantitativen Angaben hinterlegen B: wesentlicher Aspekt; qualitative Betrachtung im Rahmen der Selbstevaluierung ausreichend C: Aspekt von untergeordneter Bedeutung; kann im Rahmen der Selbstevaluierung vernachlässigt werden |
| Quellenangaben | [1] Projektfragebogen [2] Projektpräsentation beim Kick-off-Meeting [3] Ergebnisse aus dem Workshop "Nachhaltigkeitsgewinne" [4] Experteneinschätzungen Projektteam Öko-Institut [5] Sonstiges (als Kommentar in der jeweiligen Zelle dokumentiert) |

Ex-Ante-Analyse für das Langprojekt „DigInform“

| | Entlastungspotenziale | | | Belastungspotenziale | | |
|-------------------------|--|----------------|----------|--|-----------|----------|
| | Effekt | SDG-Bezug | Relevanz | Effekt | SDG-Bezug | Relevanz |
| Effekte erster Ordnung | | | | Rohstoffaufwand für die Herstellung der Digitalisierungstechnologien (v.a. Sensorik, Datacenter & Netzwerke) | SDG 8.4 | B |
| | | | | Energieaufwand für die Digitalisierungstechnologien (v.a. Messsensorik und Steuerungszentrale) [4] | SDG 7.3 | B |
| Effekte zweiter Ordnung | bestehende Verwertungswege für Sekundärrohstoffe können effizienter gestaltet werden [1] | SDG 9.4 | A | | | |
| | neue Verwertungsmöglichkeiten für Sekundärrohstoffe können erschlossen werden. [1] | SDG 9.4 & 12.5 | A | | | |
| | Unternehmen können Abfall vermeiden und Kosten senken [4] | 12.5 | A | | | |
| | Verbessertes Management von Compliance-Anforderungen in End-of-Waste Geschäften [4] | SDG 12.4 | | | | |
| | | | | | | |
| Effekte dritter Ordnung | IMS soll Vernetzung der Akteure in der Kreislaufwirtschaft / Industrial Ecology effizienter machen und kann dadurch Akzeptanz (durch Effizienz) steigern | SDG 9.4 & 12.5 | B | | | |
| | Netzwerkbildung von Nutzern -> Zusammenarbeit fördern [5] | SDG 9.2 & 9.3 | B | | | |
| | Vertrauenswürdiger und sicheres Datenmanagement kann Akzeptanz für Informationsaustausch zwischen | SDG 9.4 & 12.5 | B | | | |

| | | | | | | |
|--|---|----------------|---|--|--|--|
| | Wirtschaftsakteuren der Kreislaufwirtschaft steigern | | | | | |
| | Unternehmenskunden & Konsumenten können durch digitale Signaturen einen vertrauenswürdigen Nachweis über Herkunft und Qualität der in Materialien enthaltenen Produkten erhalten (digitaler Produktpassport) -> Akzeptanzsteigerung durch Transparenz [4] | SDG 9.4 & 12.5 | B | | | |



Quelle: Eigene Darstellung

Definitionen / Referenzen:

| | |
|-------------------------|---|
| Effekte erster Ordnung | Direkter Ressourcen- und Energiebedarf der verwendeten Digitalisierungstechnologien (Infrastruktur und Geräte) einschließlich der Umweltleistung von vorgelagerten Prozessen wie Hardwareherstellung und Energiebereitstellung |
| Effekte zweiter Ordnung | Unmittelbare Auswirkungen der Digitalisierungstechnologien auf die Nachhaltigkeitsperformance anderer (bereits bestehender) Produkt- / Dienstleistungssysteme |
| Effekte dritter Ordnung | Mittelbare Auswirkungen auf Nachhaltigkeitsaspekte infolge der Nutzung von Digitalisierungstechnologien und deren Einfluss auf Werte, Leitbilder, Produktions-, Arbeits- und Konsumgewohnheiten, etc. |
| SDG-Bezug | Zutreffendes SDG, falls möglich Konkretisierung auf der Ebene der SDG-Unterziele |
| Relevanzbewertung | A: Highlight / Hotspot erwartet; Betrachtung im Rahmen der Selbstevaluierung obligatorisch; möglichst mit quantitativen Angaben hinterlegen B: wesentlicher Aspekt; qualitative Betrachtung im Rahmen der Selbstevaluierung ausreichend C: Aspekt von untergeordneter Bedeutung; kann im Rahmen der Selbstevaluierung vernachlässigt werden |
| Quellenangaben | [1] Projektfragebogen [2] Projektpräsentation beim Kick-off-Meeting [3] Ergebnisse aus dem Workshop "Nachhaltigkeitsgewinne" [4] Experteneinschätzungen Projektteam Öko-Institut [5] Sonstiges (als Kommentar in der jeweiligen Zelle dokumentiert) |

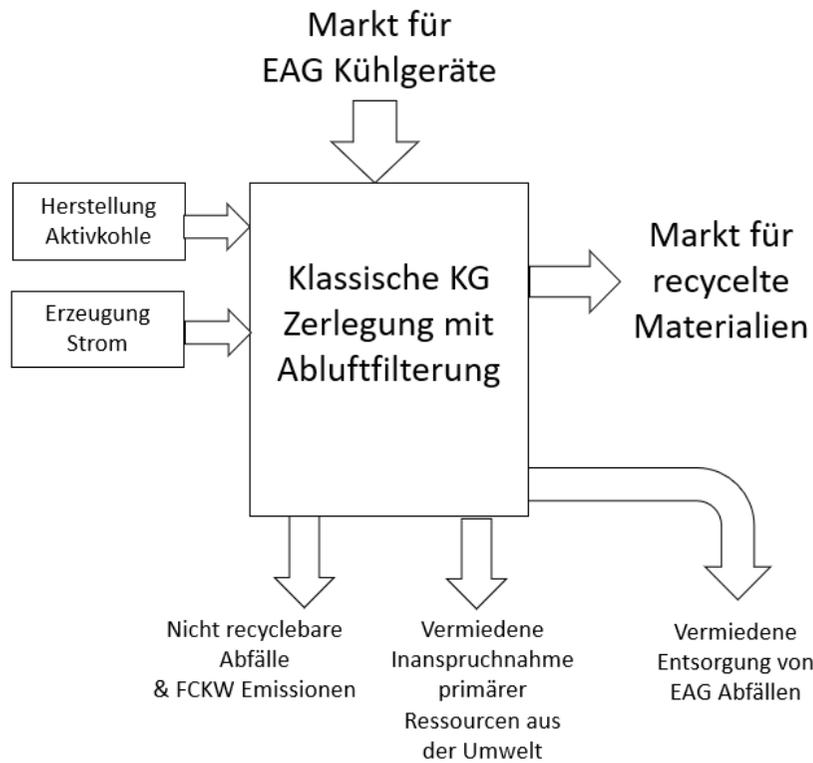
x-Ante-Analyse für das Langprojekt „DiKueRec“

| | Entlastungspotenziale | | | Belastungspotenziale | | |
|--------------------------------|---|--|----------|---|--|----------|
| | Effekt | SDG-Bezug | Relevanz | Effekt | SDG-Bezug | Relevanz |
| Effekte erster Ordnung | | | | Rohstoffaufwand für die Herstellung der Digitalisierungstechnologien (v.a. Sensorik, Datacenter & Netzwerke) | SDG 8.4 | B |
| | | | | Energieaufwand für die Digitalisierungstechnologien (v.a. Messsensorik und Steuerungszentrale) [4] | SDG 7.3 | B |
| Effekte zweiter Ordnung | Effizientere Steuerung der Kühlgeräte-Recyclinganlagen -> Energieeinsparung | 7.3: Steigerung der Energieeffizienz 8.2: technologische Modernisierung | A | Bei Fehlfunktion der digitalen Prozessmodellierung (dig. twin) kann die Anlage fehlerhafte Steuerungsbefehle erhalten -> beeinträchtigt die Effektivität & Effizienz des Altgeräterecycling | | C |
| | Bessere Erkennung der angelieferten Kühlgeräte ermöglicht eine Vorsortierung bzw. individuelle Zuordnung zu Behandlungsschritt, je nach Kältemittel | 8.2: technologische Modernisierung | B | Schlechte Sensitivität bzw. schlechte Datenqualität der Referenzbibliothek zu Altgeräten kann falsche Behandlung der Altgeräte bewirken -> Risiko von FCKW-Emissionen | 6.3: Freisetzung gefährlicher Chemikalien minimieren | B |
| | Geringeres Risiko einer Freisetzung von klimaschädlichen Treib- und Kältemittel aus dem Aktivkohle-Adsorber infolge Überladung. | 12.4: umweltverträglicher Umgang mit Chemikalien | A | Risiko von FCKW-Emissionen durch falsche Einschätzung der Adsorber-Beladung durch das KI-System | 6.3: Freisetzung gefährlicher Chemikalien minimieren | B |
| | Verringerung der energieintensiven Regeneration beladener Aktivkohle durch bessere Beladungskontrolle | 7.3: Steigerung der Energieeffizienz | A | | | |
| | Einsparung von Aktivkohle in der Abluftreinigung durch besseres Management der Beladungs-/Regenerationszyklen | 12.2: nachhaltige Bewirtschaftung und effiziente Nutzung der | A | | | |

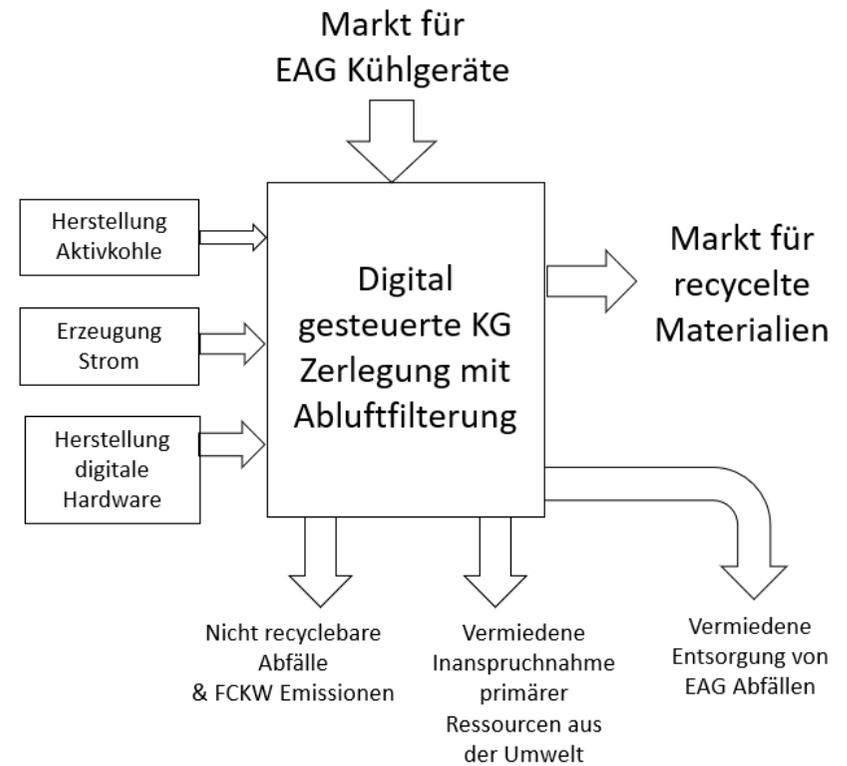
| | | natürlichen Ressourcen | | | | |
|--------------------------------|--|------------------------------------|---|--|--|---|
| Effekte dritter Ordnung | Fälschungssichere und transparente digitale Dokumentation der Zerlegung und Verwertung verhindert Entsorgungsbetrug und illegale Exporte | | A | Datenverlust oder Missbrauch des IT-Systems kann die Effektivität der digitalen Abrechnung behandelter Altgeräte unterminieren -> mögliche Zunahme illegaler Exporte | | C |
| | Vermiedene Umweltkriminalität infolge illegaler Wieder-Inverkehrbringung von Altgeräten | | B | | | |
| | Aufwertung Arbeitsplatz Qualität | 8.2: technologische Modernisierung | A | | | |

Arbeitshypothese zum Untersuchungsrahmen (Scoping)

Status quo



Digitale Transformation DiKueRec



Quelle: Eigene Darstellung

Definitionen / Referenzen:

| | |
|-------------------------|--|
| Effekte erster Ordnung | Direkter Ressourcen- und Energiebedarf der verwendeten Digitalisierungstechnologien (Infrastruktur und Geräte) einschließlich der Umweltleistung von vorgelagerten Prozessen wie Hardwareherstellung und Energiebereitstellung |
| Effekte zweiter Ordnung | Unmittelbare Auswirkungen der Digitalisierungstechnologien auf die Umweltleistung anderer (bereits bestehender) Produkt- / Dienstleistungssysteme |
| Effekte dritter Ordnung | Mittelbare Umweltauswirkungen infolge der Nutzung von Digitalisierungstechnologien und dessen Einfluss auf Werte, Leitbilder, Produktions-, Arbeits-, Konsum- und Entsorgungsgewohnheiten, etc. |
| SDG-Bezug | Zutreffendes SDG eingeben; falls möglich Konkretisierung auf der Ebene der SDG-Unterziele |
| Relevanzbewertung | A: Highlight/ Hotspot erwartet; Betrachtung im Rahmen der Selbstevaluierung obligatorisch; möglichst mit quantitativen Angaben hinterlegen B: wesentlicher Aspekt; qualitative Betrachtung im Rahmen der Selbstevaluierung ausreichend C: Aspekt von untergeordneter Bedeutung; kann im Rahmen der Selbstevaluierung vernachlässigt werden |
| Quellenangaben | [1] Online-Survey [2] Projektpräsentation beim Kick-off-Meeting [3] Ergebnisse aus dem Workshop "Nachhaltigkeitsgewinne" [4] Experteneinschätzungen Projektteam Öko-Institut [5] Sonstiges (als Kommentar in der jeweiligen Zelle dokumentiert) |

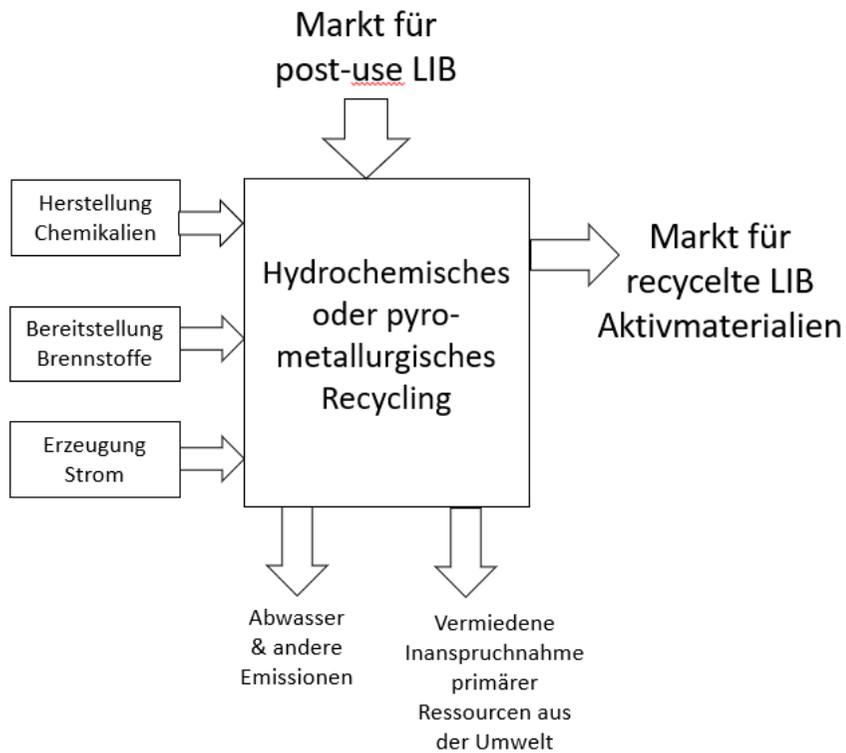
Ex-Ante-Analyse für das Langprojekt „DiRecLib“

| | Entlastungspotenziale | | | Belastungspotenziale | | |
|-------------------------|---|--|----------|--|-----------|----------|
| | Effekt | SDG-Bezug | Relevanz | Effekt | SDG-Bezug | Relevanz |
| Effekte erster Ordnung | | | | Rohstoffaufwand für die Herstellung der Digitalisierungstechnologien (v.a. Sensorik, Datacenter & Netzwerke) [4] | SDG 8.4 | C |
| | | | | Energieaufwand für die Digitalisierungstechnologien (v.a. Messsensorik und Steuerungszentrale) [4] | SDG 7.3 | C |
| Effekte zweiter Ordnung | Substitution hydrometallurgischer Prozesse und Chemikalien [1] [2] -> Reduktion von Emissionen in Luft und Wasser, geringerer Energiebedarf | 6.3: Freisetzung gefährlicher Chemikalien minimieren 12.4: umweltverträglicher Umgang mit Chemikalien | A | | | |
| | Substitution pyrometallurgischer Prozesse -> Energieeinsparung + Einsparung Scope-1 THG-Emissionen [1] [2] | 7.3: Steigerung der Energieeffizienz | A | | | |
| | Geringere Menge des benötigten Prozesswassers -> Ressourcenschonung [1] [2] | 6.4: Effizienz der Wassernutzung steigern | B | | | |
| | Später ist noch eine Optimierung der Zentrifugen möglich -> Energieeinsparung [1] [2] | 7.3: Steigerung der Energieeffizienz | B | | | |
| | Effizientere Steuerung der - Recyclinganlage [1] [2] -> Energieeinsparung (Bisher noch nicht im Fokus) Steigerung der Prozesseffizienz durch verfahrenstechnische Ermöglichung | 7.3: Steigerung der Energieeffizienz 8.2: technologische Modernisierung | C | | | |

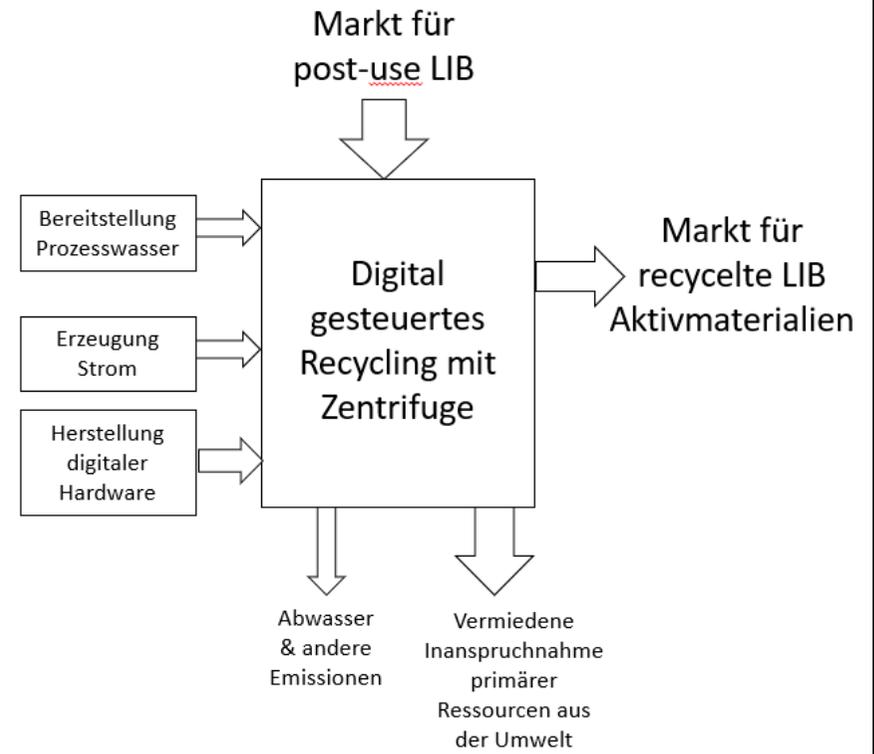
| | | | | | | |
|-------------------------|--|---------|---|--|--|--|
| | | | | | | |
| Effekte dritter Ordnung | Reduktion der Kosten für rezyklierte Aktivmaterialien kann Beitrag zum Erfolg der Circular Economy leisten [4] | | B | | | |
| | Verringerung der Abhängigkeit vom primären Rohstoffmarkt | | B | | | |
| | Verbesserung der Marktverfügbarkeit von rezyklierten LIB-Aktivmaterialien [4] -> Verringerung der Abhängigkeit von importierten Konfliktrohstoffen (z.B. Cobalt) | SDG 16? | B | | | |

Arbeitshypothese zum Untersuchungsrahmen (Scoping)

Status quo



Digitale Transformation **DiRecLib**



Quelle: Eigene Darstellung

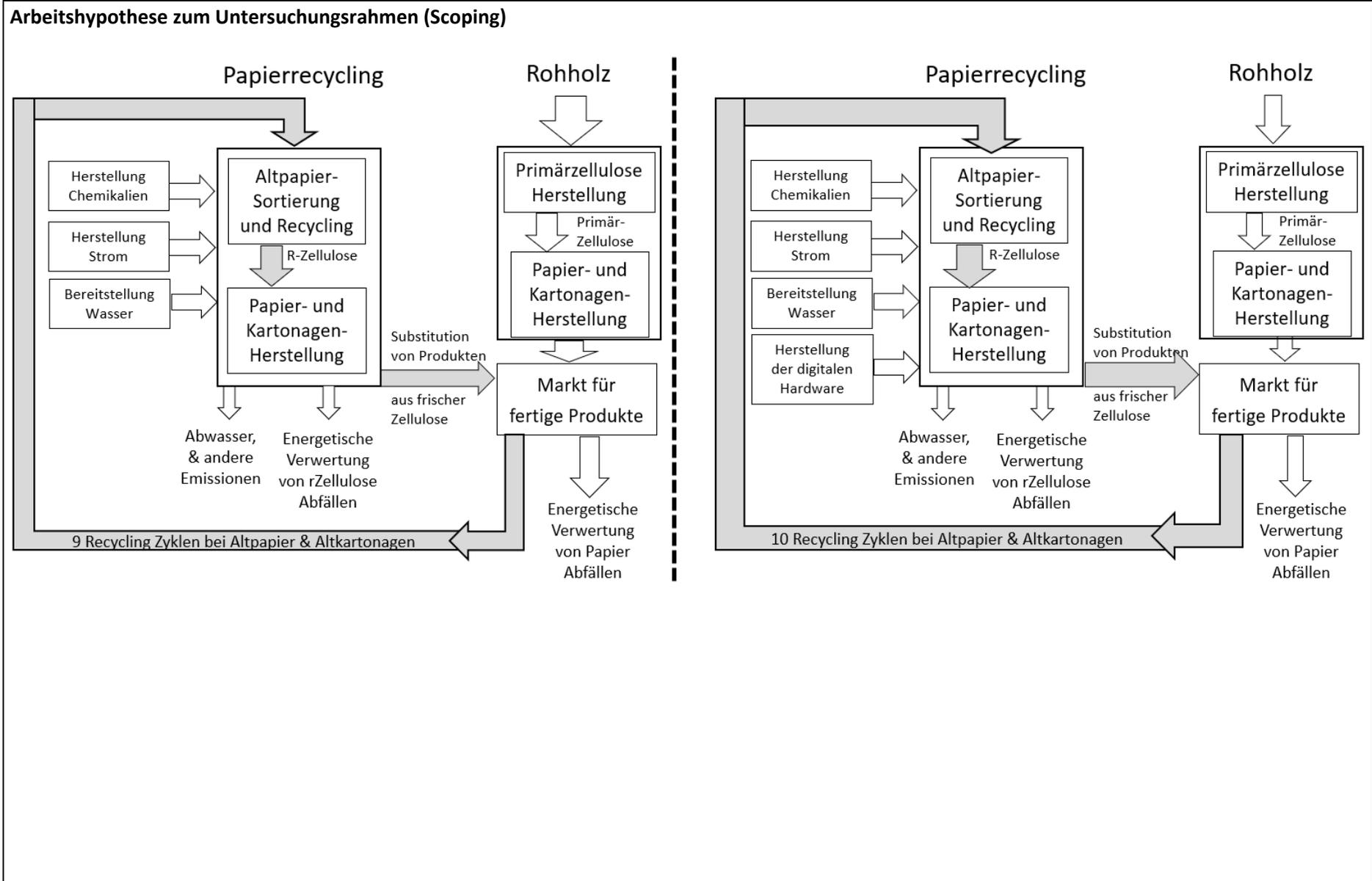
Definitionen / Referenzen:

| | |
|-------------------------|--|
| Effekte erster Ordnung | Direkter Ressourcen- und Energiebedarf der verwendeten Digitalisierungstechnologien (Infrastruktur und Geräte) einschließlich der Umweltleistung von vorgelagerten Prozessen wie Hardwareherstellung und Energiebereitstellung |
| Effekte zweiter Ordnung | Unmittelbare Auswirkungen der Digitalisierungstechnologien auf die Umweltleistung anderer (bereits bestehender) Produkt- / Dienstleistungssysteme |
| Effekte dritter Ordnung | Mittelbare Umweltauswirkungen infolge der Nutzung von Digitalisierungstechnologien und dessen Einfluss auf Werte, Leitbilder, Produktions-, Arbeits-, Konsum- und Wohngewohnheiten, etc. |
| SDG-Bezug | Zutreffendes SDG eingeben; falls möglich Konkretisierung auf der Ebene der SDG-Unterziele |
| Relevanzbewertung | A: Highlight/ Hotspot erwartet; Betrachtung im Rahmen der Selbstevaluierung obligatorisch; möglichst mit quantitativen Angaben hinterlegen B: wesentlicher Aspekt; qualitative Betrachtung im Rahmen der Selbstevaluierung ausreichend C: Aspekt von untergeordneter Bedeutung; kann im Rahmen der Selbstevaluierung vernachlässigt werden |
| Quellenangaben | [1] Online-Survey [2] Projektpräsentation beim Kick-off-Meeting [3] Ergebnisse aus dem Workshop "Nachhaltigkeitsgewinne" [4] Experteneinschätzungen Projektteam Öko-Institut [5] Sonstiges (als Kommentar in der jeweiligen Zelle dokumentiert) |

Ex-Ante-Analyse für das Langprojekt „ODiWiP“

| | Entlastungspotenziale | | | Belastungspotenziale | | |
|-------------------------|---|--|----------|--|-----------|----------|
| | Effekt | SDG-Bezug | Relevanz | Effekt | SDG-Bezug | Relevanz |
| Effekte erster Ordnung | | | | Rohstoffaufwand für die Digitalisierungstechnologien (v.a. Sensorik & Netzwerke) [4] | SDG 8.4 | B |
| | | | | Energieaufwand für die Digitalisierungstechnologien (v.a. Training der KI) [4] | SDG 7.3 | B |
| Effekte zweiter Ordnung | Assistenzsystem ermöglicht eine Verbesserte Sortiererergebnisse bei Altpapier durch bessere Altpapiererkennung [1, 2, 3] | SDG 9.4 | A | | | |
| | Optimierung des Wertstoffkreislaufs von Altpapier (Sammlung und Sortierung bis zur Produktion des Papierprodukts) [1, 2, 3] Erhöhung der Zyklenzahl von Zellulosefasern von 9 auf 10 | SDG 12.5 | A | | | |
| | Reduzierung der benötigten Mengen an Rohholz durch Substitution von Produkten aus Primärzellulose durch solche aus Rezyklat-Zellulose [2, 3] | SDG 12.2 & 15.2 | A | | | |
| | Reduzierung der benötigten Mengen an Chemikalien und Wasser für die Papierherstellung: Potenzial: je 1% Effizienzsteigerung lassen sich jährlich ca. 600.000 MWh Energie und 3.900 t Prozesschemikalien und 34.000 t Zusatzstoffe einsparen. | SDG 6 SDG 12.4 Reduzierung des Einsatzes von Chemikalien, Wasser | A | | | |

| | | | | | | |
|--------------------------------|--|--|---|---|----------|---|
| | Erwartet wird eine 3% Senkung des Chemikalieneinsatzes -> ca. 750 t Prozesschemikalien, 4.800 t weitere Zusatzstoffe (Füllstoffe, Streichpigmente, Latex und Stärke) [1] | | | | | |
| | Reduzierung der benötigten Energiemengen für die Papierherstellung: Erwartet wird eine 5% Senkung des Energiebedarfs -> ca. 108000 MWh [1] | SDG 7.3 | A | | | |
| | Reduzierung des CO ₂ -Ausstoßes jährlich um 138.000 t [1, 2] | SDG 9.4.1 | A | | | |
| | Ressourcen- und Energieeinsparungen bei anderen Industrieprozessen [4] | SDG 12.2 | B | | | |
| | | | | Änderung des Flächenbedarfs für Zwischenlagerung von Altpapierchargen [4] | SDG 12.2 | C |
| | Reduktion der Abwasserentstehung in der Primärproduktion von Zellstoff [4] | SDG 6.3 | | | | |
| Effekte dritter Ordnung | Verstärkung des Substitutionseffekts durch kostengünstige r-Zellulose kann Circular Economy Konzept unterstützen [4] | SDG 12.5 Industrie, Innovation und Infrastruktur | B | Durch Marktmechanismen könnte die gesteigerte Verfügbarkeit kostengünstiger r-Zellulose den Zelluloseverbrauch insgesamt vergrößern [4] | SDG 12 | C |
| | | | | | | |



Quelle: Eigene Darstellung

Definitionen / Referenzen:

| | |
|-------------------------|---|
| Effekte erster Ordnung | Direkter Ressourcen- und Energiebedarf der verwendeten Digitalisierungstechnologien (Infrastruktur und Geräte) einschließlich der Umweltleistung von vorgelagerten Prozessen wie Hardwareherstellung und Energiebereitstellung |
| Effekte zweiter Ordnung | Unmittelbare Auswirkungen der Digitalisierungstechnologien auf die Nachhaltigkeitsperformance anderer (bereits bestehender) Produkt- / Dienstleistungssysteme |
| Effekte dritter Ordnung | Mittelbare Auswirkungen auf Nachhaltigkeitsaspekte infolge der Nutzung von Digitalisierungstechnologien und deren Einfluss auf Werte, Leitbilder, Produktions-, Arbeits- und Konsumgewohnheiten, etc. |
| SDG-Bezug | Zutreffendes SDG, falls möglich Konkretisierung auf der Ebene der SDG-Unterziele |
| Relevanzbewertung | A: Highlight / Hotspot erwartet; Betrachtung im Rahmen der Selbstevaluierung obligatorisch; möglichst mit quantitativen Angaben hinterlegen B: wesentlicher Aspekt; qualitative Betrachtung im Rahmen der Selbstevaluierung ausreichend C: Aspekt von untergeordneter Bedeutung; kann im Rahmen der Selbstevaluierung vernachlässigt werden |
| Quellenangaben | [1] Projektfragebogen [2] Projektpräsentation beim Kick-off-Meeting [3] Ergebnisse aus dem Workshop "Nachhaltigkeitsgewinne" [4] Experteneinschätzungen Projektteam Öko-Institut [5] Sonstiges (als Kommentar in der jeweiligen Zelle dokumentiert) [6] Projektwebsite https://odiwip.de/ |

Anhang III. Dossiers der Ex-Ante-Analyse für die Forschungsvorhaben des Projektclusters "Wasserlaufwirtschaft"

Ex-Ante-Analyse für das Langprojekt „Blue2035“

| | Entlastungspotenziale | | | Belastungspotenziale | | |
|--------------------------------|--|---------------------------------|----------|----------------------|-----------|----------|
| | Effekt | SDG-Bezug | Relevanz | Effekt | SDG-Bezug | Relevanz |
| Effekte erster Ordnung | | | | ? | | |
| Effekte zweiter Ordnung | Verringerung des Flächenverbrauch im stark urbanisierten Raum | SDG 11.1 | | | | |
| | Verringerung des Ressourcenverbrauchs | SDG 9.4 | | | | |
| Effekte dritter Ordnung | Sicherstellung einer resilienten Wasser- und Sanitärversorgung | SDG 6.1; SDG 6.2; SDG 9.1 | | | | |

Arbeitshypothese zum Untersuchungsrahmen (Scoping)

Nicht anwendbar, da keine KI-Entwicklung im technischen Sinne und kein Referenzsystem vorhanden.

Quelle: Eigene Darstellung

Definitionen / Referenzen:

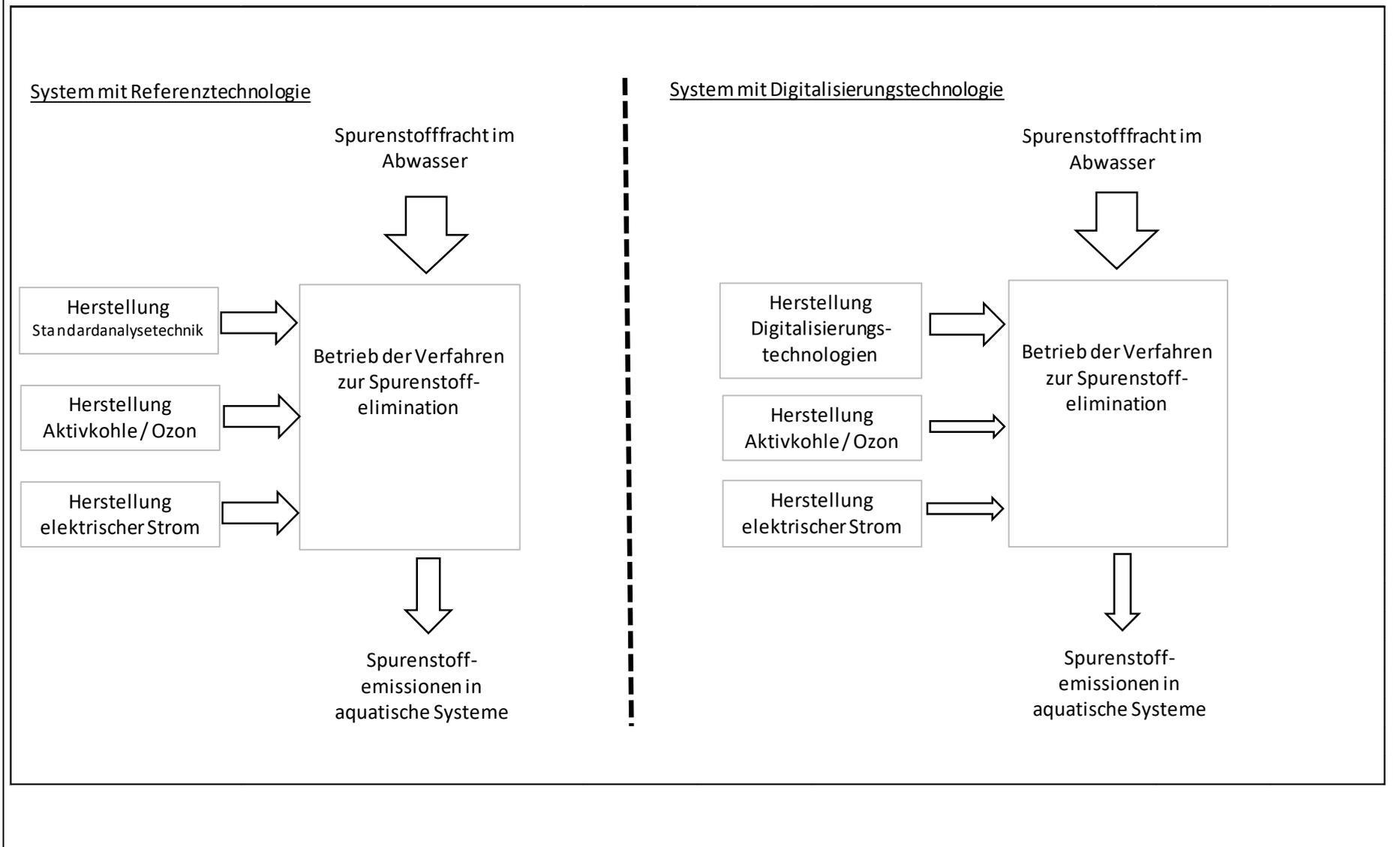
| | |
|-------------------------|---|
| Effekte erster Ordnung | Direkter Ressourcen- und Energiebedarf der verwendeten Digitalisierungstechnologien (Infrastruktur und Geräte) einschließlich der Umweltleistung von vorgelagerten Prozessen wie Hardwareherstellung und Energiebereitstellung |
| Effekte zweiter Ordnung | Unmittelbare Auswirkungen der Digitalisierungstechnologien auf die Nachhaltigkeitsperformance anderer (bereits bestehender) Produkt- / Dienstleistungssysteme |
| Effekte dritter Ordnung | Mittelbare Auswirkungen auf Nachhaltigkeitsaspekte infolge der Nutzung von Digitalisierungstechnologien und deren Einfluss auf Werte, Leitbilder, Produktions-, Arbeits- und Konsumgewohnheiten, etc. |
| SDG-Bezug | Zutreffendes SDG, falls möglich Konkretisierung auf der Ebene der SDG-Unterziele |
| Relevanzbewertung | A: Highlight / Hotspot erwartet; Betrachtung im Rahmen der Selbstevaluierung obligatorisch; möglichst mit quantitativen Angaben hinterlegen B: wesentlicher Aspekt; qualitative Betrachtung im Rahmen der Selbstevaluierung ausreichend C: Aspekt von untergeordneter Bedeutung; kann im Rahmen der Selbstevaluierung vernachlässigt werden |
| Quellenangaben | [1] Projektfragebogen [2] Projektpräsentation beim Kick-off-Meeting [3] Ergebnisse aus dem Workshop "Nachhaltigkeitsgewinne" [4] Experteneinschätzungen Projektteam Öko-Institut [5] Sonstiges (mittels Kommentar in der jeweiligen Zelle dokumentieren) |

Stand: 24.01.2022

Ex-Ante-Analyse für das Langprojekt „DecS“

| | Entlastungspotenziale | | | Belastungspotenziale | | |
|-------------------------|---|-----------------------------|----------|---|-----------|----------|
| | Effekt | SDG-Bezug | Relevanz | Effekt | SDG-Bezug | Relevanz |
| Effekte erster Ordnung | | | | Rohstoffaufwand für die Digitalisierungstechnologien (v.a. Messsensorik und Steuerungszentrale) [4] | SDG 8.4 | B |
| | | | | Energieaufwand für die Digitalisierungstechnologien (v.a. Messsensorik und Steuerungszentrale) [4] | SDG 7.3 | B |
| Effekte zweiter Ordnung | Verringerung der Einträge von Spurenstoffen in aquatische Systeme [1] | SDG 6.3, SDG 14.1 | A | | | |
| | Einsparung von Aktivkohle und Ozon bei Verfahren zur gezielten Spurenstoffelimination [1] | SDG 8.4 | A | | | |
| | Verringerung des Energiebedarfs bei Verfahren zur gezielten Spurenstoffelimination [1] | SDG 7.3 | B | | | |
| Effekte dritter Ordnung | Verringerung von Erkrankungen aufgrund gefährlicher Chemikalien [3] | SDG 3.9 | B | | | |
| | Schutz der Intaktheit von Ökosystemen [3] | SDG 6.6, SDG 14.2, SDG 15.1 | B | | | |
| | Übertragbarkeit des Technologieansatzes auf andere Anwendungsbereiche [3] | n.a. | C | | | |

Arbeitshypothese zum Untersuchungsrahmen (Scoping)



Quelle: Eigene Darstellung

Definitionen / Referenzen:

| | |
|-------------------------|---|
| Effekte erster Ordnung | Direkter Ressourcen- und Energiebedarf der verwendeten Digitalisierungstechnologien (Infrastruktur und Geräte) einschließlich der Umweltleistung von vorgelagerten Prozessen wie Hardwareherstellung und Energiebereitstellung |
| Effekte zweiter Ordnung | Unmittelbare Auswirkungen der Digitalisierungstechnologien auf die Nachhaltigkeitsperformance anderer (bereits bestehender) Produkt- / Dienstleistungssysteme |
| Effekte dritter Ordnung | Mittelbare Auswirkungen auf Nachhaltigkeitsaspekte infolge der Nutzung von Digitalisierungstechnologien und deren Einfluss auf Werte, Leitbilder, Produktions-, Arbeits- und Konsumgewohnheiten, etc. |
| SDG-Bezug | Zutreffendes SDG, falls möglich Konkretisierung auf der Ebene der SDG-Unterziele |
| Relevanzbewertung | A: Highlight / Hotspot erwartet; Betrachtung im Rahmen der Selbstevaluierung obligatorisch; möglichst mit quantitativen Angaben hinterlegen B: wesentlicher Aspekt; qualitative Betrachtung im Rahmen der Selbstevaluierung ausreichend C: Aspekt von untergeordneter Bedeutung; kann im Rahmen der Selbstevaluierung vernachlässigt werden |
| Quellenangaben | [1] Projektfragebogen [2] Projektpräsentation beim Kick-off-Meeting [3] Ergebnisse aus dem Workshop "Nachhaltigkeitsgewinne" [4] Experteneinschätzungen Projektteam Öko-Institut [5] Sonstiges (mittels Kommentar in der jeweiligen Zelle dokumentieren) |

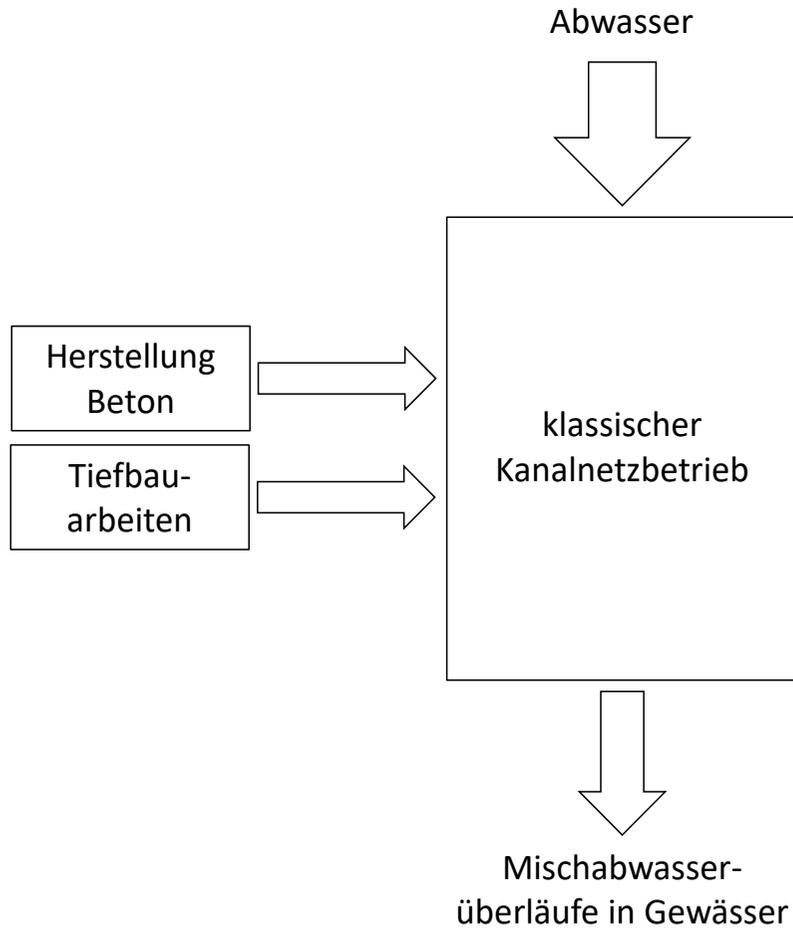
Stand: 24.01.2022

Ex-Ante-Analyse für das Langprojekt „i-SEWER“

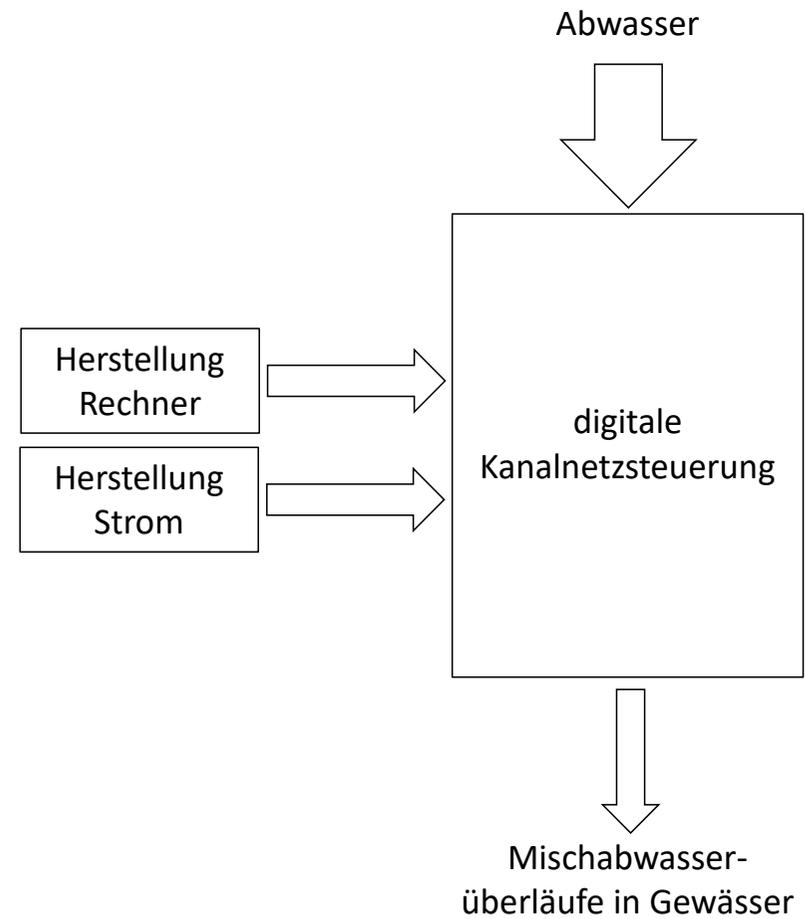
| | Entlastungspotenziale | | | Belastungspotenziale | | |
|-------------------------|---|-----------------------------|----------|---|-----------|----------|
| | Effekt | SDG-Bezug | Relevanz | Effekt | SDG-Bezug | Relevanz |
| Effekte erster Ordnung | | | | Rohstoffaufwand für die Digitalisierungstechnologien (v.a. für die Herstellung der Rechner zur Erzeugung der Surrogatmodelle) [2] | SDG 8.4 | B |
| | | | | Energieaufwand für die Digitalisierungstechnologien (v.a. für den Betrieb der Rechner zur Erzeugung der Surrogatmodelle) [2] | SDG 7.3 | B |
| Effekte zweiter Ordnung | Verbesserung der Wasserqualität durch Reduzierung von Mischwasserüberläufen in Oberflächengewässer sowie erhöhter Reinigungseffizienz bei Kläranlagen [1] | SDG 6.3 | A | | | |
| | Ersatz bzw. Reduzierung des Baus von Regenrückhaltebecken [1] / | SDG 8.4 | A | | | |
| | Reduzierung innerstädtischer Flächeninanspruchnahme durch Reduzierung des Baus von Regenrückhaltebecken [3] | SDG 11.3 | A | | | |
| | Kosteneinsparungen infolge erhöhter Reinigungseffizienz von Kläranlagen [1] | SDG 9.1 | A | | | |
| Effekte dritter Ordnung | Schutz der Intaktheit von Ökosystemen durch Reduzierung von Mischwasserüberläufen [1] | SDG 6.6, SDG 14.2, SDG 15.1 | B | | | |
| | Sicherung der Versorgung mit bezahlbarem Trinkwasser / Verringerung Kostensteigerungen bei Abwasser [1] | SDG 6.1 | B | | | |
| | Schutz vor Überschwemmungen durch Reduzierung von Mischwasserüberläufen [1] | SDG 11.5 | B | | | |

Arbeitshypothese zum Untersuchungsrahmen (Scoping)

System mit Referenztechnologie



System mit Digitalisierungstechnologie



Quelle: Eigene Darstellung

Definitionen / Referenzen:

| | |
|-------------------------|---|
| Effekte erster Ordnung | Direkter Ressourcen- und Energiebedarf der verwendeten Digitalisierungstechnologien (Infrastruktur und Geräte) einschließlich der Umweltleistung von vorgelagerten Prozessen wie Hardwareherstellung und Energiebereitstellung |
| Effekte zweiter Ordnung | Unmittelbare Auswirkungen der Digitalisierungstechnologien auf die Nachhaltigkeitsperformance anderer (bereits bestehender) Produkt- / Dienstleistungssysteme |
| Effekte dritter Ordnung | Mittelbare Auswirkungen auf Nachhaltigkeitsaspekte infolge der Nutzung von Digitalisierungstechnologien und deren Einfluss auf Werte, Leitbilder, Produktions-, Arbeits- und Konsumgewohnheiten, etc. |
| SDG-Bezug | Zutreffendes SDG, falls möglich Konkretisierung auf der Ebene der SDG-Unterziele |
| Relevanzbewertung | A: Highlight / Hotspot erwartet; Betrachtung im Rahmen der Selbstevaluierung obligatorisch; möglichst mit quantitativen Angaben hinterlegen B: wesentlicher Aspekt; qualitative Betrachtung im Rahmen der Selbstevaluierung ausreichend C: Aspekt von untergeordneter Bedeutung; kann im Rahmen der Selbstevaluierung vernachlässigt werden |
| Quellenangaben | [1] Projektfragebogen [2] Experteneinschätzungen Projektteam Öko-Institut [3]: Gespräch mit Herrn Grimm am 25.08.2022 [4] Sonstiges (mittels Kommentar in der jeweiligen Zelle dokumentieren) |

Stand: 26.08.2022

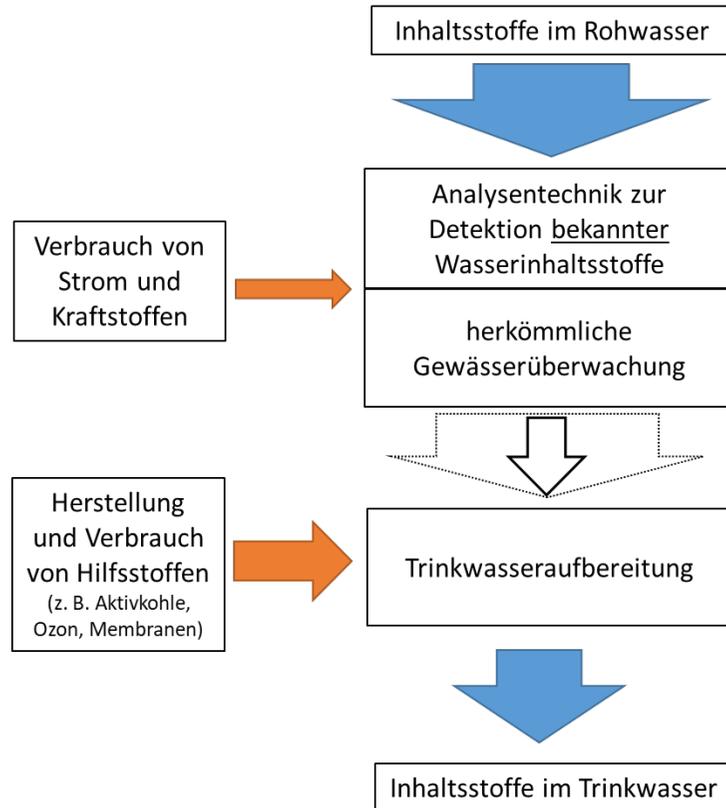
Ex-Ante-Analyse für das Langprojekt „K2I“

| | Entlastungspotenziale | | | Belastungspotenziale | | |
|--------------------------------|--|---------------------|----------|---|-----------|----------|
| | Effekt | SDG-Bezug | Relevanz | Effekt | SDG-Bezug | Relevanz |
| Effekte erster Ordnung | | | | Rohstoffaufwand für die Digitalisierungstechnologien (v.a. Rechneinheit für die zentrale Datenbank) [4] | SDG 8.4 | B |
| | | | | Energieaufwand für die Digitalisierungstechnologien (v.a. Austausch der umfangreichen Datenfiles) [4] | SDG 7.3 | B |
| Effekte zweiter Ordnung | Grundwasserschutz durch Vermeiden der Emission von bekannten bzw. unbekanntem Spurenstoffen (z.B. Arzneimittel) [1] | SDG 6.3 | A | | | |
| | Relative Einsparung von Aktivkohle und Ozon (Verringerung zukünftiger Anstiege bzw. effizienterer Einsatz) bzw. Verwendung der Umkehrosmose bei Verfahren zur gezielten Spurenstoffelimination [1] | SDG 8.4 | A | | | |
| | Sicherung der Gesundheit der Bevölkerung [1] | SDG 3.3; SDG 3.9 | B | | | |
| | Relative Kosteneinsparung bei der Wasseraufbereitung durch zielgerichtete Maßnahmen in den Wasserwerken (Verringerung von Kostensteigerungen) / Sicherung der Versorgung mit bezahlbarem Trinkwasser [1] | SDG 6.1 | B | | | |
| Effekte dritter Ordnung | Anpassung der Trinkwasserverordnung (Aufnahme weiterer Substanzen) | SDG 6.3 | B | | | |

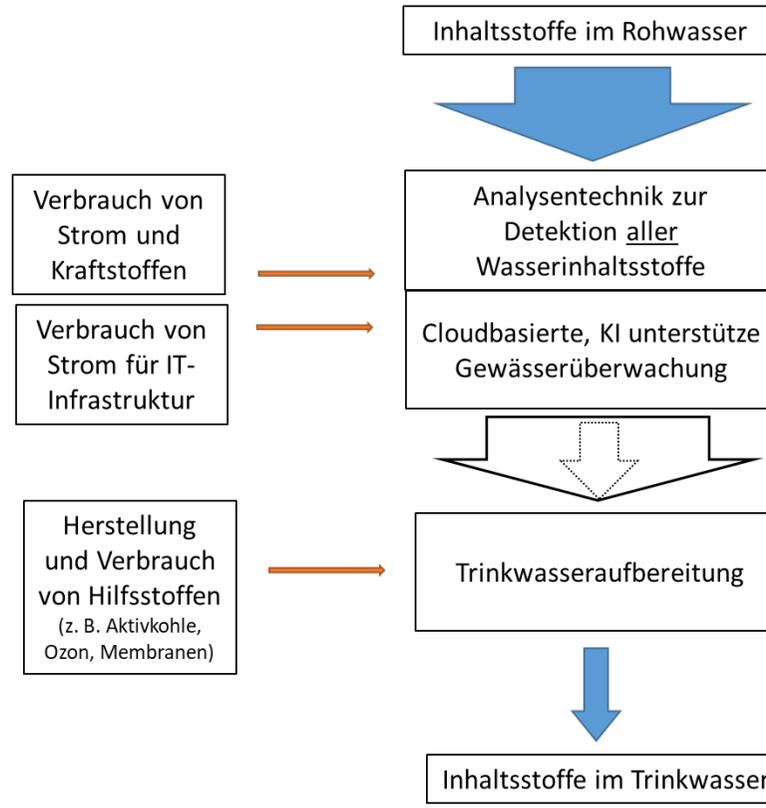
| | | | | | | |
|--|---|----------|---|--|--|--|
| | | | | | | |
| | Sensibilisierung von Chemikalienherstellern und -anwendern zu Schadstoffeinträgen | SDG 12.4 | B | | | |

Arbeitshypothese zum Untersuchungsrahmen (Scoping)

System mit Referenztechnologie



System mit Digitalisierungstechnologie



Quelle: Eigene Darstellung

Definitionen / Referenzen:

| | |
|-------------------------|---|
| Effekte erster Ordnung | Direkter Ressourcen- und Energiebedarf der verwendeten Digitalisierungstechnologien (Infrastruktur und Geräte) einschließlich der Umweltleistung von vorgelagerten Prozessen wie Hardwareherstellung und Energiebereitstellung |
| Effekte zweiter Ordnung | Unmittelbare Auswirkungen der Digitalisierungstechnologien auf die Nachhaltigkeitsperformance anderer (bereits bestehender) Produkt- / Dienstleistungssysteme |
| Effekte dritter Ordnung | Mittelbare Auswirkungen auf Nachhaltigkeitsaspekte infolge der Nutzung von Digitalisierungstechnologien und deren Einfluss auf Werte, Leitbilder, Produktions-, Arbeits- und Konsumgewohnheiten, etc. |
| SDG-Bezug | Zutreffendes SDG, falls möglich Konkretisierung auf der Ebene der SDG-Unterziele |
| Relevanzbewertung | A: Highlight / Hotspot erwartet; Betrachtung im Rahmen der Selbstevaluierung obligatorisch; möglichst mit quantitativen Angaben hinterlegen B: wesentlicher Aspekt; qualitative Betrachtung im Rahmen der Selbstevaluierung ausreichend C: Aspekt von untergeordneter Bedeutung; kann im Rahmen der Selbstevaluierung vernachlässigt werden |
| Quellenangaben | [1] Projektfragebogen [2] Projektpräsentation beim Kick-off-Meeting [3] Ergebnisse aus dem Workshop "Nachhaltigkeitsgewinne" [4] Experteneinschätzungen Projektteam Öko-Institut [5] Sonstiges (mittels Kommentar in der jeweiligen Zelle dokumentieren) |

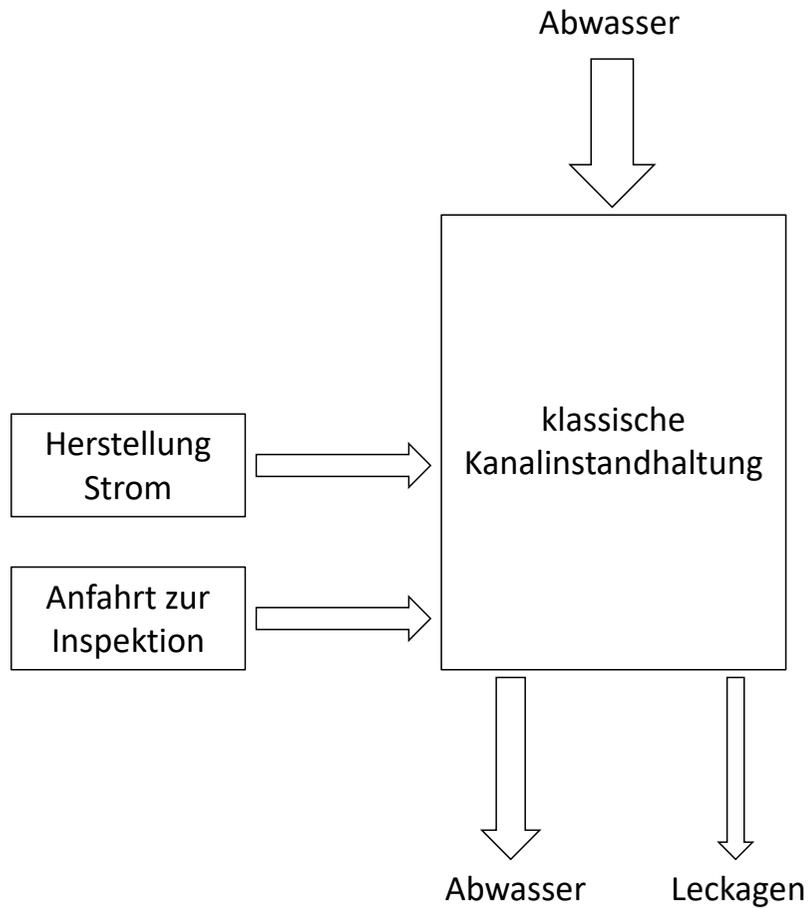
Stand: 08.03.2022

Ex-Ante-Analyse für das Langprojekt „KIKI“

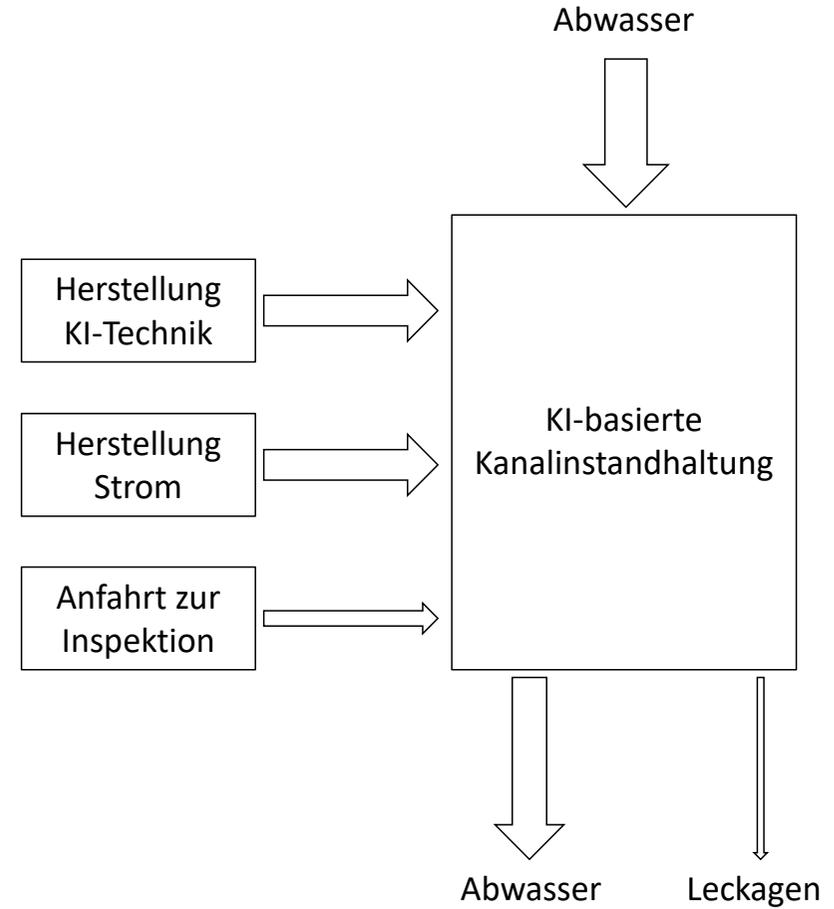
| | Entlastungspotenziale | | | Belastungspotenziale | | |
|-------------------------|---|---------------------|----------|--|-----------|----------|
| | Effekt | SDG-Bezug | Relevanz | Effekt | SDG-Bezug | Relevanz |
| Effekte erster Ordnung | | | | Rohstoffaufwand für die Digitalisierungstechnologien (v.a. für zentrale bzw. dezentrale Rechner zur Auswertung der Inspektionsfilme) [4] | SDG 8.4 | B |
| | | | | Energieaufwand für die Digitalisierungstechnologien (v.a. bei der Übertragung der Inspektionsfilme zu einem Zentralrechner) [4] | SDG 7.3 | B |
| Effekte zweiter Ordnung | Grundwasserschutz durch Vermeiden der Versickerung von ungeklärtem Abwasser [1] | SDG 6.3 | A | | | |
| Effekte dritter Ordnung | Sicherung der Gesundheit der Bevölkerung [1] | SDG 3.3; SDG 3.9 | B | | | |
| | Sicherung der Versorgung mit bezahlbarem Trinkwasser / Verringerung Kostensteigerungen bei Abwasser [4] | SDG 6.1 | A | | | |

Arbeitshypothese zum Untersuchungsrahmen (Scoping)

System mit Referenztechnologie



System mit Digitalisierungstechnologie



Definitionen / Referenzen:

| | |
|-------------------------|---|
| Effekte erster Ordnung | Direkter Ressourcen- und Energiebedarf der verwendeten Digitalisierungstechnologien (Infrastruktur und Geräte) einschließlich der Umweltleistung von vorgelagerten Prozessen wie Hardwareherstellung und Energiebereitstellung |
| Effekte zweiter Ordnung | Unmittelbare Auswirkungen der Digitalisierungstechnologien auf die Nachhaltigkeitsperformance anderer (bereits bestehender) Produkt- / Dienstleistungssysteme |
| Effekte dritter Ordnung | Mittelbare Auswirkungen auf Nachhaltigkeitsaspekte infolge der Nutzung von Digitalisierungstechnologien und deren Einfluss auf Werte, Leitbilder, Produktions-, Arbeits- und Konsumgewohnheiten, etc. |
| SDG-Bezug | Zutreffendes SDG, falls möglich Konkretisierung auf der Ebene der SDG-Unterziele |
| Relevanzbewertung | A: Highlight / Hotspot erwartet; Betrachtung im Rahmen der Selbstevaluierung obligatorisch; möglichst mit quantitativen Angaben hinterlegen B: wesentlicher Aspekt; qualitative Betrachtung im Rahmen der Selbstevaluierung ausreichend C: Aspekt von untergeordneter Bedeutung; kann im Rahmen der Selbstevaluierung vernachlässigt werden |
| Quellenangaben | [1] Projektfragebogen [2] Projektpräsentation beim Kick-off-Meeting [3] Ergebnisse aus dem Workshop "Nachhaltigkeitsgewinne" [4] Experteneinschätzungen Projektteam Öko-Institut [5] Sonstiges (mittels Kommentar in der jeweiligen Zelle dokumentieren) |

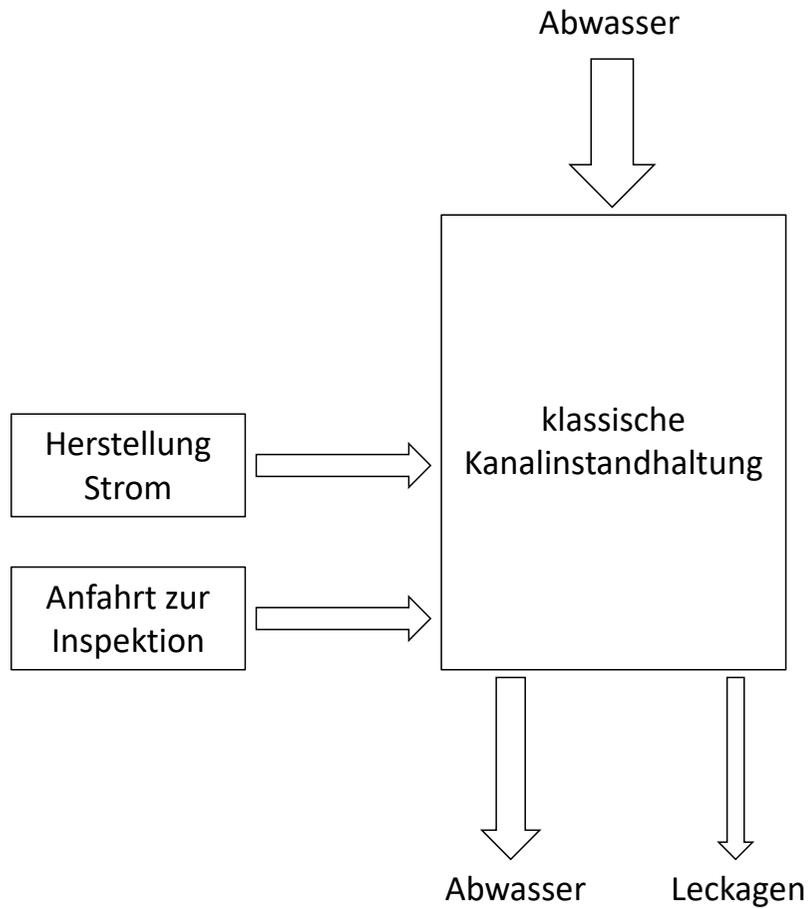
Stand: 09.02.2022

Ex-Ante-Analyse für das Langprojekt „KIKI“

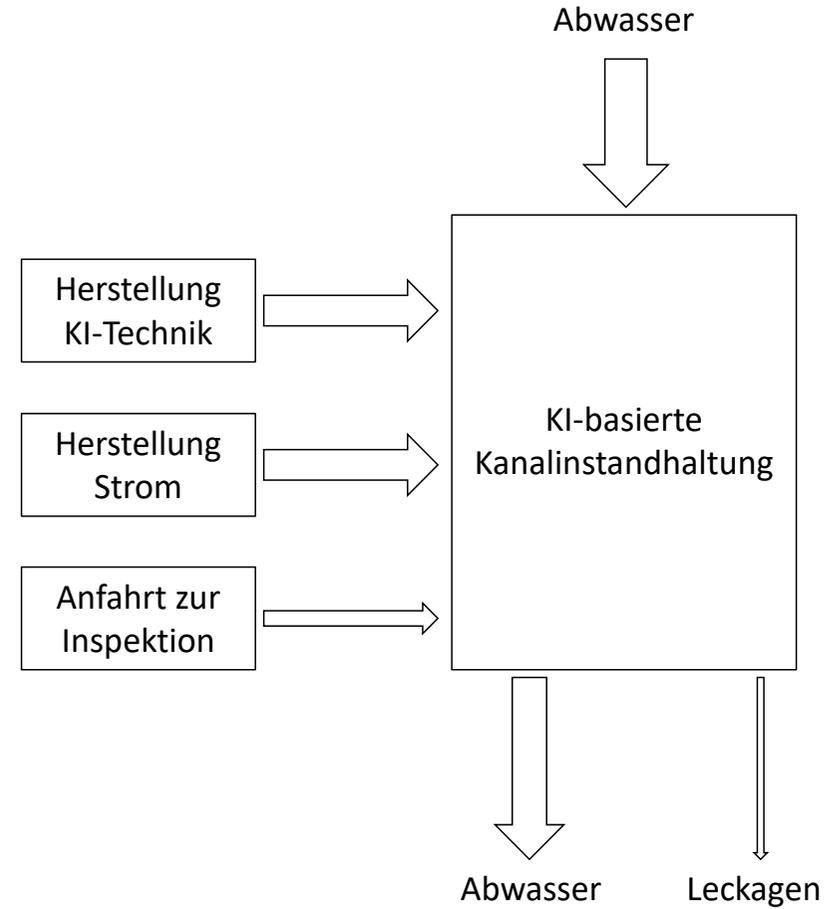
| | Entlastungspotenziale | | | Belastungspotenziale | | |
|-------------------------|---|---------------------|----------|--|-----------|----------|
| | Effekt | SDG-Bezug | Relevanz | Effekt | SDG-Bezug | Relevanz |
| Effekte erster Ordnung | | | | Rohstoffaufwand für die Digitalisierungstechnologien (v.a. für zentrale bzw. dezentrale Rechner zur Auswertung der Inspektionsfilme) [4] | SDG 8.4 | B |
| | | | | Energieaufwand für die Digitalisierungstechnologien (v.a. bei der Übertragung der Inspektionsfilme zu einem Zentralrechner) [4] | SDG 7.3 | B |
| Effekte zweiter Ordnung | Grundwasserschutz durch Vermeiden der Versickerung von ungeklärtem Abwasser [1] | SDG 6.3 | A | | | |
| Effekte dritter Ordnung | Sicherung der Gesundheit der Bevölkerung [1] | SDG 3.3; SDG 3.9 | B | | | |
| | Sicherung der Versorgung mit bezahlbarem Trinkwasser / Verringerung Kostensteigerungen bei Abwasser [4] | SDG 6.1 | A | | | |

Arbeitshypothese zum Untersuchungsrahmen (Scoping)

System mit Referenztechnologie



System mit Digitalisierungstechnologie



Quelle: Eigene Darstellung

Definitionen / Referenzen:

| | |
|-------------------------|---|
| Effekte erster Ordnung | Direkter Ressourcen- und Energiebedarf der verwendeten Digitalisierungstechnologien (Infrastruktur und Geräte) einschließlich der Umweltleistung von vorgelagerten Prozessen wie Hardwareherstellung und Energiebereitstellung |
| Effekte zweiter Ordnung | Unmittelbare Auswirkungen der Digitalisierungstechnologien auf die Nachhaltigkeitsperformance anderer (bereits bestehender) Produkt- / Dienstleistungssysteme |
| Effekte dritter Ordnung | Mittelbare Auswirkungen auf Nachhaltigkeitsaspekte infolge der Nutzung von Digitalisierungstechnologien und deren Einfluss auf Werte, Leitbilder, Produktions-, Arbeits- und Konsumgewohnheiten, etc. |
| SDG-Bezug | Zutreffendes SDG, falls möglich Konkretisierung auf der Ebene der SDG-Unterziele |
| Relevanzbewertung | A: Highlight / Hotspot erwartet; Betrachtung im Rahmen der Selbstevaluierung obligatorisch; möglichst mit quantitativen Angaben hinterlegen B: wesentlicher Aspekt; qualitative Betrachtung im Rahmen der Selbstevaluierung ausreichend C: Aspekt von untergeordneter Bedeutung; kann im Rahmen der Selbstevaluierung vernachlässigt werden |
| Quellenangaben | [1] Projektfragebogen [2] Projektpräsentation beim Kick-off-Meeting [3] Ergebnisse aus dem Workshop "Nachhaltigkeitsgewinne" [4] Experteneinschätzungen Projektteam Öko-Institut [5] Sonstiges (mittels Kommentar in der jeweiligen Zelle dokumentieren) |

Stand: 09.02.2022