www.oeko.de

Öko-Institut

Entwicklungsbegleitende Nachhaltigkeitsanalysen im Querschnittsprojekt zur Fördermaßnahme „Digital GreenTech“ (2. Förderphase)

Freiburg, 03.06.2026

Studie der Öko-Institut Consult GmbH

Autorinnen und Autoren

Dr. Martin Möller
Öko-Institut Consult GmbH

Jens Gröger
Öko-Institut e.V.

Öko-Institut Consult GmbH
info@oeko-consult.de
oeko-consult.de

Büro Freiburg
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

Abkürzungsverzeichnis 7

Zusammenfassung 8

Summary 10

1 Hintergrund und Zielsetzung 12

2 Methodische Vorgehensweise 13

3 Ex-Ante-Analysen und Kriterienentwicklung für die Projektauswahl 15

4 Entwicklung eines Tools für die Selbstevaluierung 17

4.1 Ausgangsbasis und Entwicklungsprozess 17

4.2 Struktur und Funktionalitäten des entwickelten Analysetools 19

4.2.1 Konzeption und Aufbau des Tools 19

4.2.2 Abschätzung des CO_2-Fußabdrucks 20

4.2.3 Modellierung komplexer digitaler Technikobjekte 21

4.2.4 Abschätzung der lebenszyklusbasierten Kosten 22

4.2.5 Ermittlung von Nettoentlastung sowie des Verhältnisses zwischen Einsparung und Aufwand 23

4.2.6 Ermittlung des Break-even-Points 23

4.2.7 Variantenvergleich 24

4.3 Dokumentation 25

5 Pilotanwendung des Selbstevaluierungs-Tools 25

5.1 agents42watermarkets 26

5.1.1 Zielsetzung 26

5.1.2 Methodische Vorgehensweise, grundlegende Annahmen und Ergebnisse der Selbstevaluierung 27

5.1.3 Diskussion und Schlussfolgerungen 28

5.2 DigiKompost 29

5.2.1 Zielsetzung 29

5.2.2 Methodische Vorgehensweise, grundlegende Annahmen und Ergebnisse der Selbstevaluierung 30

5.2.3 Diskussion und Schlussfolgerungen 31

5.3 DigiWaVe - Digitale Lösungen für eine ressourceneffiziente Wasserwiederverwendung im urbanen Raum 32

5.3.1 Zielsetzung 32
5.3.2 Methodische Vorgehensweise, grundlegende Annahmen und Ergebnisse der Selbstevaluierung 33
5.3.3 Diskussion und Schlussfolgerungen 34
5.4 iOLE - intelligente Online-Leckage-Erkennung 35
5.4.1 Zielsetzung und wesentliche Nachhaltigkeitsaspekte des Projekts 35
5.4.2 Methodische Vorgehensweise, grundlegende Annahmen und Ergebnisse der Selbstevaluierung 36
5.4.3 Diskussion und Schlussfolgerungen 37
5.5 LALWeco - Long-term Autonomous Laser Weed Control 39
5.5.1 Zielsetzung und wesentliche Nachhaltigkeitsaspekte des Projekts 39
5.5.2 Methodische Vorgehensweise, grundlegende Annahmen und Ergebnisse der Selbstevaluierung 40
5.5.3 Diskussion und Schlussfolgerungen 41
5.6 Methodische Erkenntnisse aus der Toolanwendung 42
6 Konzeptionierung einer Nachhaltigkeits-Beratungsstelle 44
7 Schlussfolgerungen und Ausblick 45
7.1 Stärken und Grenzen des entwickelten Tools 45
7.2 Einordnung der bei der Selbstevaluierung ermittelten Nachhaltigkeitsgewinne 46
7.3 Prioritärer Forschungs- und Handlungsbedarf 48
Literaturverzeichnis 50
Anhang: Dossiers der Ex-Ante-Analyse 53
1 agents42watermarkets 54
2 Almon5.0 57
3 DigiKompost 60
4 DigiWaVe 63
5 iOLE 66
6 KIMBA 69
7 LALWeco 72
Anlagen 75
Anlage I. Konzeptskizze für eine Nachhaltigkeits-Beratungsstelle (KOMPASS) 75
Anlage II. Selbstevaluierungstool (Version 1.2) 75

Anlage III. Tutorial für das Selbstevaluierungstool 75

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Beispielhafte Abschätzung des CO_2-Fußabdrucks eines Roboters auf Basis der für die Herstellung benötigten Werkstoffe bzw. Komponenten (eigene Darstellung) 22

Abbildung 2: Ergebnisse der Treibhausgas-Emissionen eines hypothetischen Variantenvergleichs (eigene Darstellung) 24

Abbildung 3: Ergebnisse der Verhältnisse zwischen Einsparungen und Aufwand für einen hypothetischen Variantenvergleich sowie Angabe des Break-even-Points (eigene Darstellung) 25

Abkürzungsverzeichnis

BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMFTR	Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt
BoM	Bill of Materials (strukturierte Stückliste der verwendeten Werkstoffe)
CO_2e	CO_2-Äquivalente
DigiWaVe	Digitale Lösungen für eine ressourceneffiziente Wasserwiederverwendung im urbanen Raum
EPD	Environmental Product Declaration
F&E	Forschung und Entwicklung
GI	Gesellschaft für Informatik e.V.
IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
iOLE	intelligente Online-Leckage-Erkennung
KI	Künstliche Intelligenz
KOMPASS	Kompetenzzentrum und Anlaufstelle für eine systemische Selbstevaluierung bei der Nachhaltigkeitsbewertung
LALWeco	Long-term Autonomous Laser Weed Control
NetDGT	Netzwerk Digital GreenTech
SDG	Sustainable Development Goal(s)

Zusammenfassung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die entwicklungsbegleitenden Nachhaltigkeitsanalysen, die in der zweiten Förderphase des wissenschaftlichen Begleitvorhabens „Netzwerk Digital GreenTech“ durchgeführt wurden. Im Zentrum stand dabei die Entwicklung eines Analysetools, um Akteur*innen in F&E-Projekten eine niedrigschwellige, strukturierte und zugleich weitgehend quantitative Selbstevaluierung von Nachhaltigkeitsaspekten digitaler Technologien zu ermöglichen. Methodisch knüpft das Vorgehen an die in der ersten Förderphase etablierte Differenzbetrachtung zwischen einem Digitalisierungsszenario und einem Referenzszenario ohne den Einsatz von Digitaltechnik an. Das Tool soll insbesondere in frühen Entwicklungsphasen eine strukturierte Abschätzung zusätzlicher Aufwendungen und potenzieller Einsparungen ermöglichen, Variantenvergleiche unterstützen und mögliche Zielkonflikte zwischen ökologischen und ökonomischen Aspekten aufzeigen.

Dabei wird deutlich, dass die methodischen und praktischen Anforderungen an eine solche Selbstevaluierung z.T. erheblich sein können. Vor diesem Hintergrund zählen zu den Stärken des entwickelten Analysetools eine datenbankgestützte Bilanzierung von Aufwendungen und Entlastungspotenzialen, die Unterstützung der Modellierung komplexer digitaler Technikobjekte (wie Roboter und Drohnen) sowie die integrierte Betrachtung von CO_2-Fußabdruck und Kostenaspekten. Grenzen des Instruments zeigen sich insbesondere bei der Auswahl geeigneter Datensätze, bei Fragen der Systemgrenzen und Allokation von Einsparpotenzialen. Bei diesen Aspekten werden Vorerfahrungen bei den Anwender*innen vorausgesetzt bzw. es müssen entsprechende Unterstützungsangebote hierfür bereitgehalten werden. Die mit dem Tool erzeugten Ergebnisse sind daher ausdrücklich als orientierende Abschätzungen für interne Zwecke zu verstehen und nicht ohne zusätzliche fachliche Validierung für die externe Kommunikation geeignet.

Die Pilotanwendung des Analysetools durch fünf ausgewählte Verbundforschungsprojekte der zweiten Förderphase des Förderprogramms „Digital GreenTech” hat gezeigt, dass das entwickelte Analyseinstrument die Komplexität der Selbstevaluierung in einer Form aufbereitet, die von den Anwender*innen als hilfreich und benutzerfreundlich eingeschätzt wird. Konkrete Verbesserungsvorschläge aus der Erstanwendung wurden im Zuge der Überarbeitung des Tools aufgegriffen, beispielsweise in Form der Funktion eines Variantenvergleichs. Damit können unterschiedliche technische Auslegungen sowie Best-Case- und Worst-Case-Konstellationen strukturiert gegenübergestellt werden.

Mit Blick auf die inhaltlichen Ergebnisse der Selbstevaluierungen konnten in den meisten Fällen Netto-Entlastungspotenziale bei CO_2-Fußabdruck und Kosten identifiziert werden, deren Größenordnung jedoch stark vom jeweiligen Anwendungskontext und der Skalierung der

Neuentwicklung beeinflusst wird. Besonders relevante Entlastungswirkungen zeigen sich insbesondere dort, wo digitale Lösungen den Einsatz emissionsintensiver Betriebsmittel oder Materialien reduzieren, in großskaligen Infrastrukturen Effizienzgewinne erschließen oder systemische Veränderungen ermöglichen. Die Ergebnisse der Selbstevaluierungen sind jedoch als Potenzialabschätzungen zu interpretieren, deren Tragfähigkeit wesentlich von der konkreten weiteren technischen Ausgestaltung und den Randbedingungen einer erfolgreichen Kommerzialisierung der Neuentwicklung abhängt.

Über die konkrete Toolentwicklung hinaus leistet das Projekt einen Beitrag zur institutionellen und methodischen Weiterentwicklung der Nachhaltigkeitsbewertung in öffentlich geförderten F&E-Projekten. In diesem Zusammenhang wird die Konzeption einer Nachhaltigkeits-Beratungsstelle skizziert, die als Kompetenzzentrum die Projekte bei einer entwicklungsbegleitenden Nachhaltigkeitsbewertung systematisch unterstützen kann.

Insgesamt kommt der Bericht zu dem Ergebnis, dass mit dem entwickelten Analysetool ein wichtiger Baustein für eine frühzeitige, integrierte und praxistaugliche Nachhaltigkeitsbewertung digitaler Technologien geschaffen wurde, der als Ausgangsbasis für eine weitere methodische und anwendungsbezogene Ausgestaltung dienen kann.

Summary

This report documents the sustainability analyses carried out throughout the development process during the second funding phase of the accompanying research project “Netzwerk Digital GreenTech”. Focus was placed on developing an analytical tool to enable actors in R&D projects to conduct a low-threshold, structured and largely quantitative self-assessment of the sustainability aspects of digital technologies. Methodologically, the approach builds on the differential analysis established in the first funding phase between a digitalisation scenario and a reference scenario without the use of digital technology. Particularly in early development phases, the tool is designed to facilitate a structured assessment of additional expenses and potential savings, support comparisons of variants, and indicate possible trade-offs between environmental and economic aspects.

Within this context, it becomes clear that the methodological and practical requirements for such a self-evaluation can be substantial to some degree. Given this, the strengths of the developed analysis tool include database-supported accounting of efforts and potential savings, support for modelling complex digital technology objects (such as robots and drones), and the integrated consideration of carbon footprint and cost aspects. Limitations of the instrument are especially seen in the selection of suitable datasets, questions of system boundaries, and the allocation of savings potential. These aspects require prior experience on the part of users, or appropriate support services must be made available for this purpose. The results generated by the tool should therefore be understood explicitly as indicative estimates for internal purposes and are not suitable for external communication without additional expert validation.

The pilot use of the analysis tool by five selected collaborative research projects from the second funding phase of the “Digital GreenTech” programme showed that the tool renders the complexity of self-evaluation in a helpful and user-friendly way. Specific suggestions for improvement arising from the initial use were incorporated during the revision of the tool, for example in the form of a function for comparing variants. This allows different technical designs, as well as best- and worst-case scenarios, to be compared in a structured manner.

Regarding the substantive results of the self-assessments, net relief potential in terms of both the carbon footprint and costs was identified in most cases. However, the magnitude of this potential is strongly influenced by the specific application context and the upscaling of the new development. Relief effects emerge particularly where digital solutions reduce the use of emission-intensive operating inputs or materials, unlock efficiency gains in large-scale infrastructures, or enable systemic changes. However, the results of the self-assessments should be interpreted as estimates

of potential, the robustness of which depends significantly on the further technical development and the boundary conditions for the successful commercialisation of the new development.

Beyond the development of the tool itself, the project also contributes to the institutional and methodological advancement of sustainability assessment in publicly funded R&D projects. In this context, the report outlines the concept of a sustainability advisory centre, offering systematic support to projects for carrying out development-accompanying sustainability assessments.

Overall, the report concludes that the developed analysis tool constitutes an important building block for an early-stage, integrated, practice-oriented sustainability assessment of digital technologies that can serve as a basis for further methodological and application-related refinement.

1 Hintergrund und Zielsetzung

Mit Digitalisierung und Künstlicher Intelligenz sind große Erwartungen verbunden. So können Innovationen in diesen Bereichen beispielsweise die nachhaltige Transformation von Schlüsselbranchen wie der Energieversorgung und der Landwirtschaft befördern und zudem die Umwelttechnik und die Kreislaufwirtschaft effizienter gestalten. Gleichzeitig wird immer deutlicher, dass der Einsatz digitaler Technologien nicht nur positive Nachhaltigkeitseffekte mit sich bringt, sondern auch in erheblichem Umfang Rohstoffe und Energie erfordert. Vor diesem Hintergrund stellt sich die zentrale Frage, ob die Neuentwicklungen unter Berücksichtigung aller Aufwendungen und möglichen Einsparungseffekte den Rohstoff- und Energiebedarf insgesamt weiter erhöhen oder zu einem Netto-Nachhaltigkeitsgewinn führen.

Um Antworten auf diese Frage zu liefern, hat das Öko-Institut in der 1. Förderphase des wissenschaftlichen Begleitvorhabens „Netzwerk Digital GreenTech“ (NetDGT) im Auftrag der Gesellschaft für Informatik e.V. (GI) die methodischen Grundlagen für eine gestufte, entwicklungsbegleitende Nachhaltigkeitsanalyse konzipiert. Diese methodischen Grundlagen wurden in den Jahren 2021-2023 im Rahmen der BMBF[1]-Fördermaßnahme „Digital GreenTech – Umwelttechnik trifft Digitalisierung“ gemeinsam mit zwölf Verbundprojekten angewendet. Im Fokus standen dabei die Anwendungsfelder Forst- und Wasserwirtschaft sowie Ressourceneffizienz und Kreislaufwirtschaft. Ausgehend von einer Festlegung des Untersuchungsrahmens in einer Ex-Ante-Analyse wurden alle relevanten Nachhaltigkeitsaspekte von den betrachteten Projekten im Rahmen einer Selbstevaluierung untersucht und anschließend für drei ausgewählte Projekte durch vertiefende lebenszyklusbasierte Analysen ergänzt (Möller et al. 2023).

Sowohl bei der Ex-Ante-Analyse als auch bei der Selbstevaluierung haben jedoch die Erfahrungen aus der Praxis gezeigt, dass einige Projekte 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 Projekte gleichermaßen praktisch einsetzbar.

Vor diesem Hintergrund soll im Zuge der vorliegenden 2. Förderphase der Nachhaltigkeitsbewertung von NetDGT mit 14 Langprojekten die Selbstevaluierung auf solche Projekte fokussiert werden, bei denen Entlastungseffekte mit Blick auf die Stoff- und Energieströme erwartet und diese voraussichtlich auch während der Projektlaufzeit quantifiziert werden können. Für die erforderliche Projektauswahl sind daher geeignete Kriterien zu entwickeln.

[1] Damals Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), jetzt Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR).

Darüber hinaus hat die 2. Förderphase von NetDGT zum Ziel, die Praktikabilität von Selbstevaluierungen weiter zu verbessern. Durch die Weiterentwicklung und Integration bestehender Tools und zusätzliche Handreichungen (Leitfaden und Tutorial) soll erreicht werden, dass die zur Verfügung gestellten Instrumente von einem möglichst breiten Anwenderkreis weitgehend selbständig genutzt werden können. Auf diese Weise könnte das weiterentwickelte Instrumentarium als methodische Grundlage für eine „Beratungsstelle“ zur entwicklungsbegleitenden Nachhaltigkeitsbewertung öffentlich geförderter F&E-Projekte dienen. Es wird zudem skizziert, welche flankierenden organisatorischen und institutionellen Rahmenbedingungen für eine solche Beratungsstelle sinnvoll sind. Im Vergleich zur 1. Förderphase von NetDGT setzt die 2. Förderphase folglich einen stärkeren Schwerpunkt auf die *Entwicklung* eines Instrumentariums, dessen Praxistauglichkeit anhand von ausgewählten Pilotanwendungen überprüft wird.

2 Methodische Vorgehensweise

Ziel der Nachhaltigkeitsbewertungen in NetDGT ist eine systematische Gegenüberstellung der Umweltbelastungen durch die jeweils eingesetzte Digitalinfrastruktur und möglicher Entlastungspotenziale in den jeweiligen Anwendungsfeldern der digitalen Technologien. Dabei werden insbesondere der Ressourcenverbrauch bei der Herstellung und der Energiebedarf bei der Nutzung digitaler Hardware berücksichtigt. Zu den positiven Nachhaltigkeitseffekten zählen beispielsweise Effizienzsteigerungen in industriellen Prozessen, die zu Einsparungen von Treibhausgasemissionen führen können.

Um die Chancen und Risiken digitaler Technologien frühzeitig erkennen zu können, ist eine entwicklungsbegleitende Auseinandersetzung mit den Nachhaltigkeitsaspekten unverzichtbar. Erfahrungen aus der ersten Förderphase von „Digital GreenTech” haben gezeigt, dass eine Selbstevaluierung durch die Akteur*innen der jeweiligen Verbundprojekte hierfür besonders sinnvoll ist. Wenn die Nachhaltigkeitsanalysen in den Entwicklungsprozess eingebettet sind und von den jeweiligen Akteur*innen selbst durchgeführt werden, lassen sich frühzeitig Lösungen erkennen, die risikoarm sind und gleichzeitig einen positiven Beitrag zu einer nachhaltigen Entwicklung leisten können. Eine große Herausforderung bei der Selbstevaluierung besteht jedoch darin, quantitative Daten zu den Ökoprofilen der verwendeten Materialien und z.T. komplexen Komponenten zusammenzustellen.

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 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).

Positive wie negative Beiträge der einzelnen Verbundprojekte 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.

Aufgrund der Fokussierung der Nachhaltigkeitsanalysen auf die Sustainable Development Goals der Agenda 2030 und damit auf Nachhaltigkeitseffekte zweiter und dritter Ordnung (d. h. auf Effekte, die andere Auswirkungen ermöglichen bzw. auf systemische Effekte) wurde die 2. Förderphase von NetDGT eine zweistufige Vorgehensweise vorgesehen:

- Für alle Verbundprojekte (Langprojekte) der Fördermaßnahme sieht dieser Ansatz eine orientierende Nachhaltigkeitsbetrachtung auf qualitativer Ebene vor. Um relevante Aspekte für die qualitativen Betrachtungen durch die Fördermittelnehmer der Verbundprojekte zu identifizieren, werden seitens des Querschnittsprojekts Ex-Ante-Analysen angefertigt (siehe Kapitel 3).
- Aufbauend auf den Ex-Ante-Analysen wird in einem zweiten Schritt eine Konkretisierung der Nachhaltigkeitsbetrachtung vorgesehen. Dazu wurde ein Excel-basiertes Software-Tool entwickelt und für ausgewählte Verbundprojekte bereitgestellt, das für die relevanten Nachhaltigkeitsaspekte eine Selbstevaluierung auf quantitativer Ebene ermöglicht. Um dabei ggf. auftretende Fragestellungen bei der methodischen Vorgehensweise sowie der Interpretation der Ergebnisse zu klären, wurde im Querschnittsprojekt ein Helpdesk für die ausgewählten Verbundprojekte eingerichtet.

Auf eine vertiefende Nachhaltigkeitsbewertung, wie diese in der 1. Förderphase von NetDGT für drei ausgewählte Projekte durchgeführt wurde, wird im Rahmen der 2. Förderphase aufgrund der veränderten Zielsetzung (Fokus auf Instrumentenentwicklung, s.o.) verzichtet.

3 Ex-Ante-Analysen und Kriterienentwicklung für die Projektauswahl

Analog zur 1. Förderphase der Nachhaltigkeitsbewertung von NetDGT wurde auch für die 2. Förderphase für alle geförderten Verbundprojekte jeweils eine Ex-Ante-Analyse erstellt. Dabei handelt es sich um initiale Untersuchungen seitens des Öko-Instituts, die auf den zu Projektbeginn von den einzelnen F&E-Projekt zur Verfügung gestellten Unterlagen beruhen. Im Einzelnen handelt es ich dabei um die Vorhabensbeschreibung, die Präsentation beim Kick-off-Meeting von „Digital GreenTech” sowie ein ausgefüllter Fragebogen, der vom Öko-Institut entwickelt wurde. Die nach Auswertung der genannten Unterlagen als relevant erachteten Be- und Entlastungspotenziale wurden – sofern möglich – den 169 Unterziele der Sustainable Development Goals der Agenda 2030 (siehe Kapitel 2) zugeordnet. Die Ergebnisse der Ex-Ante-Analyse bildeten schließlich die Grundlage für die Festlegung des Untersuchungsrahmens („Scoping“), mit dem die folgenden Analyseschritte festgelegt sowie erste Arbeitshypothesen zu möglichen Be- und Entlastungspotenzialen aufgestellt wurden.

Die detaillierten Ergebnisse der Ex-Ante-Analysen befinden sich im **Anhang**[2].

Im Anschluss an die Ex-Ante-Analysen wurde für eine Selbstevaluierung bei sieben ausgewählten (von insgesamt 14) Verbundprojekte vorgesehen, die in Kooperation mit dem Öko-Institut durchgeführt wurde. Die Selbstevaluierung hat zum Ziel, die identifizierten Be- und Entlastungseffekte zu konkretisieren und so weit wie möglich zu quantifizieren sowie dabei das weiterentwickelte integrierte Bewertungstool im Sinne eines Praxis-Checks zu testen.

Die Auswahl der Verbundprojekte erfolgte anhand klar definierter Kriterien. Diese beziehen sich auf folgende Aspekte:

- Nachhaltigkeitsclaims (in Projektpräsentation);
- Relevante Belastungseffekte (gemäß Ex-Ante-Analyse);
- Relevante Entlastungseffekte (gemäß Ex-Ante-Analyse), z.B.:
  - Vermeidung direkter Treibhausgasemissionen

[2] Um den Bericht übersichtlich zu halten, sind im Anhang nur die Ex-Ante-Analysen derjenigen Verbundprojekte enthalten, die für die Selbstevaluierung ausgewählt wurden (s.u.).

  - Substitution CO_2-intensiver Werkstoffe bzw. Komponenten und Betriebsstoffe
  - Substitution besonders besorgniserregender Substanzen
  - Energieeinsparung (bei industriellen Prozessen)
- Quantifizierbarkeit der Nachhaltigkeitsaspekte;
- Motivation und personelle Ressourcen;
- Möglichst repräsentative Abdeckung aller vier Projektcluster des Förderprogramms „Digital GreenTech” (Wasserwirtschaft, Geotechnologie, Ressourceneffizienz und Kreislaufwirtschaft sowie Nachhaltiges Landmanagement).

Unter Anwendung der genannten Kriterien wurden die folgenden sieben Verbundprojekte seitens des Öko-Instituts für die Selbstevaluierung vorgeschlagen und nach Rückkopplung mit der GI und dem Projektträger ausgewählt:

- Agents42watermarkets (Wasserwirtschaft): Gegenüberstellung von Herstellung und Betrieb eines Demonstrators vs. geringerer Energieeinsatz zum Betrieb der Wasserinfrastruktur sowie deren Downsizing und Reduzierung des Materialeinsatzes bei Neuerschließungen;
- AImon5.0 (Geotechnologie): Gegenüberstellung von Permanent Laser Scanning vs. Vermeidung von unnötigen Sanierungsmaßnahmen;
- DigiKompost (Ressourceneffizienz und Kreislaufwirtschaft): Gegenüberstellung des Einsatzes von Sensoren, Machine Learning und Cloudservern vs. Reduzierung direkter Treibhausgas-emissionen (Methan) sowie Verringerung des Einsatzes von Torfen;
- DigiWaVe (Wasserwirtschaft): Gegenüberstellung des Einsatzes einer UV-Desinfektionsanlage vs. Einsparung von Fahrten zu Erholungsgebieten;
- iOLE (Wasserwirtschaft): Gegenüberstellung von Weiterentwicklung und Betrieb Leckage-erkennungsalgorithmen vs. vermiedene Aufbereitung von Trinkwasser und eingesparte Hardware-Sensoren;
- KIMBA (Ressourceneffizienz und Kreislaufwirtschaft): Gegenüberstellung des Einsatzes von Sensoren, Machine Learning und Cloudservern vs. Einsparpotential primärer Gesteinskörnungen durch Steigerung des Einsatzes von RC-Baustoffen;

- LALWeco (Nachhaltiges Landmanagement): Gegenüberstellung des Einsatzes von Lasern und Robotern vs. vermiedene Herstellung von Pflanzenschutzmitteln sowie CO_2-Emissionen aus gestörten Böden.

Fünf der sieben Verbundprojekte konnten eine Selbstevaluierung ihrer Neuentwicklung durchführen und erfolgreich abschließen. Die zugehörigen Ergebnisse werden in Kap. 5 vorgestellt. Bei AImon5.0 und KIMBA war eine Selbstevaluierung aufgrund kurzfristig eingetretener Kapazitätsengpässe entgegen der ursprünglichen Planung leider nicht möglich.

4 Entwicklung eines Tools für die Selbstevaluierung

Um eine entwicklungsbegleitende Selbstevaluierung der Nachhaltigkeitsaspekte digitaler Technologien optimal zu unterstützen, wurde vom Öko-Institut ein Excel-basiertes Analysetool entwickelt. Mithilfe dieses Tools sollen die Akteur*innen von F&E-Projekten in die Lage versetzt werden, die für ihre Neuentwicklung relevanten Aufwendungen (z.B. Hardwareeinsatz und Datentransfer) sowie erzielbare Einsparungen (z.B. geringerer Einsatz von Roh- und Betriebsstoffen in den vorgesehenen Zielanwendungen) zu quantifizieren. Im vorliegenden Kapitel wird zunächst der Entwicklungsprozess des Analysetools skizziert (siehe Kap. 4.1), bevor dessen wesentliche Funktionen (siehe Kap. 4.2) detailliert beschrieben und die verfügbaren Dokumentationsmaterialien vorgestellt werden (siehe Kap. 4.3).

4.1 Ausgangsbasis und Entwicklungsprozess

Die Entwicklung des Analysetools knüpft unmittelbar an die Erfahrungen aus der ersten Förderphase von NetDGT an, in der bereits entwicklungsbegleitende Nachhaltigkeitsanalysen für Verbundprojekte der Fördermaßnahme „Digital GreenTech“ konzipiert und durchgeführt wurden. Methodische Grundlage war dabei ein gestufter Ansatz, der qualitative Ex-ante-Analysen, quantitative Selbstevaluierungen und vertiefende, lebenszyklusbasierte Analysen miteinander verband (Möller et al. 2023). Ziel dieses Vorgehens war es, Nachhaltigkeitsaspekte digitaler Innovationen bereits in frühen Forschungs- und Entwicklungsphasen systematisch zu berücksichtigen und die zusätzlichen Belastungen, die mit einer Neuentwicklung verbunden sind, den potenziellen Entlastungseffekten in den jeweiligen Anwendungskontexten gegenüberzustellen.

Eine wesentliche methodische Erkenntnis aus der ersten Förderphase von NetDGT bestand darin, dass Selbstevaluierungen durch die Akteur*innen der F&E-Projekte besonders geeignet sind, um eine strukturierte Auseinandersetzung mit Belastungs- und Entlastungspotenzialen frühzeitig anzustoßen. Zugleich zeigte sich, dass hierfür niedrigschwellige, integrierte und zugleich flexible Instrumente benötigt werden, um diese projektnahen Informationen in eine nachvollziehbare, möglichst quantitative Nachhaltigkeitsbewertung zu überführen. Methodisch prägend war zudem die

in der ersten Förderphase bereits eingeführte Differenzbetrachtung zwischen einem Digitalisierungsszenario und einem Referenzszenario. Dabei werden nur diejenigen Stoff- und Energieströme bilanziert, die sich durch den Einsatz der digitalen Lösung verändern. Diese Gegenüberstellung von zusätzlichem Aufwand und möglicher Entlastung bildete die konzeptionelle Grundlage für die Entwicklung des neuen Tools. Die Selbstevaluierungen in der ersten Förderphase machten jedoch auch deutlich, dass trotz des hohen Nutzens dieses Ansatzes spezielle methodische Herausforderungen bestehen. Dazu zählen insbesondere die Modellierung komplexer digitaler Technikobjekte (z.B. von Robotern oder Drohnen) sowie der Umgang mit Datenlücken hinsichtlich der Umweltauswirkungen der verwendeten Hardware und unsicheren Annahmen zu den späteren Einsparpotenzialen. Diese Erfahrungen verdeutlichten den Bedarf nach einem Instrument, das eine stärker standardisierte und zugleich flexible Erfassung und Bewertung solcher Einflussgrößen ermöglicht.

Das im Rahmen der zweiten Förderphase von NetDGT entwickelte Analysetool ist daher als methodische Weiterentwicklung der im Vorgängerprojekt erprobten Ansätze zu verstehen. Es überführt die in der ersten Förderphase verwendeten Einzelinstrumente in ein integriertes, benutzerfreundliches Instrument, das insbesondere die Quantifizierung des CO_2-Fußabdrucks und der lebenszyklusbezogenen Kosten unterstützt und um zusätzliche Funktionalitäten erweitert.

Bei der Neuentwicklung wurde besonderes Augenmerk auf die orientierende Ermittlung des CO_2-Fußabdrucks und die dafür erforderliche Datengrundlage gelegt. Als Basis für die Berechnung der CO_2-Emissionen wurde die frei verfügbare Ökobilanzdatenbank Idemat eingebunden (Idemat 2026). Die an der TU Delft entwickelte Datenbank enthält Umweltkennwerte für eine große Bandbreite an Materialien, Prozessen, Energieträgern und weiteren Bilanzierungsobjekten. Sie wird insbesondere in frühen Design- und Entwicklungsphasen genutzt, um nachhaltigere Material- und Konstruktionsentscheidungen zu ermöglichen. Durch die Einbindung der Datenbank in das Tool können die Anwender*innen für typische Aufwands- und Einsparpositionen auf eine einheitliche und unmittelbar nutzbare Datengrundlage zurückgreifen, ohne dass sie die erforderlichen Emissionsfaktoren selbst recherchieren müssen.

Neben einer benutzerfreundlichen Oberfläche und einer vereinfachten Auswahl geeigneter Datensätze wurde das Tool so konzipiert, dass auch individuelle Eingaben sowie die Modellierung komplexer Komponenten oder Produkte möglich sind. Dies ist insbesondere für digitale Technologien relevant, die sich nicht auf Einzelkomponenten reduzieren lassen, sondern aus mehreren Bauteilen und Subsystemen bestehen. Ergänzend zur CO_2-Bilanzierung wurde außerdem eine lebenszyklusbezogene Kostenanalyse integriert, bei der sowohl Investitions- als auch Betriebskosten berücksichtigt werden können. Nach erfolgter Dateneingabe lassen sich damit Aufwendungen und Einsparungen sowohl für den CO_2-Fußabdruck als auch für die Kosten

betrachten und vorhandene Nettoentlastungen quantifizieren. Darüber hinaus ist das Tool so konzipiert, dass auch bei unvollständiger Datenlage orientierende Aussagen zu den Bedingungen einer Amortisation möglich sind, beispielsweise in Form von Break-even-Betrachtungen.

Die Entwicklung des Analysetools erfolgte nicht isoliert, sondern in einem iterativen Prozess unter Einbeziehung von fünf ausgewählten Verbundprojekten der zweiten Förderphase von NetDGT (vgl. Kap. 3). In zwei Workshops und verschiedenen weiteren Austauschformaten wurden die Anforderungen an die Benutzerführung, die Datenerfassung und die Auswertungslogik frühzeitig identifiziert und direkt in die Toolentwicklung einbezogen. Hierzu wurde der Erstentwurf des Analysetools von den ausgewählten Verbundprojekten im Rahmen ihrer Selbstevaluierungen eingesetzt und erprobt. Das Feedback aus diesen Praxiserfahrungen wurde aufgegriffen und für die Weiterentwicklung genutzt. Ein besonders relevantes Feedback aus der Anwendungspraxis betraf die Möglichkeit, unterschiedliche Projektkonfigurationen aus dem laufenden Entwicklungsprozess systematisch miteinander zu vergleichen. Vor diesem Hintergrund wurde die Funktion des Variantenvergleichs (siehe Kap. 4.2.7) in das Tool integriert, die in einer frühen Entwurfsfassung noch nicht enthalten war.

4.2 Struktur und Funktionalitäten des entwickelten Analysetools

Im Zentrum des entwickelten Analysetools steht eine praxisnahe und zugleich ausreichend differenzierte Abschätzung der positiven wie negativen Nachhaltigkeitswirkungen der eingesetzten Digitaltechnik in ihrem jeweiligen Anwendungskontext. Dieses Tool erlaubt es, bereits in frühen Entwicklungsphasen Gestaltungsoptionen zu bewerten, Varianten zu vergleichen und ggf. vorhandene Zielkonflikte transparent zu machen.

Ein besonderer Schwerpunkt liegt dabei auf der orientierenden Ermittlung des CO_2-Fußabdrucks digitaler Technologien. Darüber hinaus ermöglicht das Tool eine lebenszyklusbasierte Kostenanalyse, sodass ökologische und ökonomische Effekte parallel betrachtet werden können. Dieser integrierte Ansatz ist insbesondere beim Einsatz in F&E-Projekten relevant, da neue digitale Lösungen häufig nicht nur zusätzliche Hardware, Energieverbräuche oder Datentransfers verursachen, sondern zugleich Einsparungen in bestehenden Prozessen, Produkten oder Dienstleistungen ermöglichen sollen. Im Folgenden wird zunächst die grundlegende Konzeption sowie der Aufbau des Tools skizziert und anschließend die bereitgestellten Funktionalitäten im Einzelnen erläutert.

4.2.1 Konzeption und Aufbau des Tools

Das Tool ist als interaktive Excel-Datei aufgebaut und verbindet eine benutzerfreundliche Eingabemaske mit einer hinterlegten Datenbasis für CO_2-Emissionsfaktoren. Die Datei ist so

strukturiert, dass Anwender*innen zunächst relevante Datensätze in einer Datenbank auswählen und diese anschließend in einer Bilanzierungsmaske mit projektspezifischen Mengen-, Zeit- und Kostendaten hinterlegen. Inhaltlich unterscheidet das Tool vier Bilanzbereiche:

- Zusatzaufwand für Investitionsgüter
- Zusatzaufwand für Betriebsstoffe
- Einsparung bei Investitionsgütern
- Einsparung bei Betriebsstoffen

Diese Struktur ermöglicht eine klare Trennung zwischen den zusätzlich verursachten Aufwendungen der betrachteten digitalen Neuentwicklung und den potenziell durch ihre Nutzung erzielbaren Einsparungen. Gleichzeitig wird zwischen investiven und betrieblichen Effekten differenziert. Dadurch lassen sich sowohl einmalige bzw. langfristig wirksame Hardware- und Infrastruktureffekte als auch laufende Verbräuche, etwa von Energie, Materialien oder Dienstleistungen, berücksichtigen.

Die Grundidee der Bilanzierung besteht darin, für alle relevanten Positionen Emissions- und ggf. Kostenfaktoren mit projektspezifischen Daten zu verknüpfen. Die Ergebnisse werden anschließend aggregiert und den Einsparpotenzialen gegenübergestellt. So kann nicht nur der absolute CO_2-Fußabdruck bzw. die absolute Kostenwirkung eines Projekts, sondern auch dessen Nettoentlastung abgeschätzt werden.

4.2.2 Abschätzung des CO_2-Fußabdrucks

Die Abschätzung des CO_2-Fußabdrucks basiert auf den hinterlegten Datensätzen der Idemat-Datenbank (s.o.). Diese enthalten Emissionsinformationen zu Produkten, Prozessen, Dienstleistungen, Energieträgern und Stoffen und bilden damit die zentrale Datengrundlage für die Bilanzierung. Durch die Einbindung dieser etablierten Datenbank müssen Anwender*innen nicht für jede Bilanzposition eigene Emissionsfaktoren recherchieren, sondern können auf bereits strukturierte und standardisierte Datensätze zurückgreifen. Dies senkt die Komplexität der Anwendung und erhöht zudem die Vergleichbarkeit der Ergebnisse.

Im Tabellenblatt „Datenbank“ können Nutzer*innen gezielt nach den Datensätzen suchen, die sie für die Modellierung ihrer Neuentwicklung benötigen. Um die Suche zu erleichtern, sind verschiedene Filtermöglichkeiten vorgesehen. Diese Funktionalität erleichtert es, schrittweise verschiedene Suchstrategien anzuwenden oder den Datenbestand iterativ zu durchsuchen. Sobald ein geeigneter Datensatz ausgewählt wurde, wird dieser mit einer eindeutigen Identifikationsbezeichnung automatisch in das Tabellenblatt „Bilanz“ übernommen. Die Zuordnung erfolgt je nach Auswahl direkt in einen der vier Bilanzbereiche (siehe Kapitel 4.2.1), je nachdem, ob es sich um

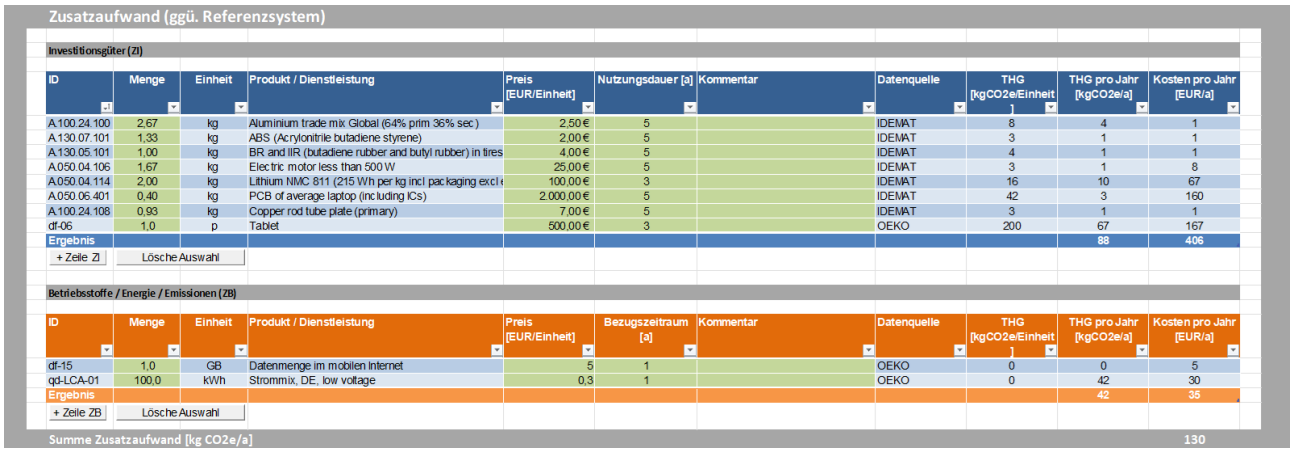
zusätzlichen Aufwand oder Einsparungen bzw. um Investitionsgüter oder Betriebsstoffe handelt. Die Anwender*innen können diesen Vorgang wiederholen, bis alle relevanten Aufwendungen und Einsparungen für das betrachtete Projekt zusammengestellt sind.

Die aus der Datenbank übernommenen Datensätze bilden die Grundlage für die Bilanzierung, reichen jedoch für die Berechnung des CO2-Fußabdrucks noch nicht aus. Zusätzlich müssen für alle ausgewählten Produkte Mengenangaben eingetragen werden, und zwar jeweils entsprechend der im Datensatz angegebenen Einheit. Auf diese Weise wird der hinterlegte Emissionsfaktor mit der tatsächlich im Projekt benötigten Menge verknüpft. Diese Differenzierung ist aus methodischer Sicht wichtig, da Investitionen (z.B. für Hardware wie Rechner, Sensoren oder Netzwerktechnik) entsprechend der angenommenen Nutzungsdauer bzw. der Abschreibungszeiträume typischerweise über mehrere Jahre verteilt werden müssen. Aufwendungen während der Nutzung (z.B. Stromverbrauch für die Nutzung der Hardware bzw. Datentransfer und -speicherung) liegen dagegen meist als periodische Verbräuche (z.B. pro Jahr) vor. In den Zielanwendungen der betrachteten Digitaltechnik (z.B. abfall- oder wasserwirtschaftliche Infrastruktur) können ebenfalls laufende oder investive Einsparungen erzielt werden, z.B. durch geringeren Werkstoffeinsatz oder effizientere Prozessführung. Das Tool übersetzt diese Eingaben schließlich in jährliche Treibhausgasemissionen und schafft damit eine einheitliche Vergleichsbasis zwischen den verschiedenen Arten von Aufwendungen und Einsparungen. Die Ergebnisse werden in CO_2-Äquivalente (CO_2e) pro Jahr angegeben.

4.2.3 Modellierung komplexer digitaler Technikobjekte

Die Unterstützung bei der Modellierung digitaltechnischer Komponenten oder Systeme – beispielsweise von Robotern oder Drohnen – erweitert die Anwendbarkeit des Tools erheblich. Schließlich greifen zahlreiche digitale Innovationen auf solche komplexen Technikobjekte zurück, die jedoch üblicherweise nicht in bestehenden Datenbanken enthalten sind.

Voraussetzung für eine solche Modellierung ist das Vorliegen einer Bill of Materials (BoM), also einer strukturierten Stückliste der verbauten Komponenten bzw. Werkstoffe. Auf dieser Grundlage können die einzelnen Bestandteile des Systems schrittweise mit geeigneten Datensätzen aus der Datenbank verknüpft werden. Dadurch lässt sich der CO_2-Fußabdruck auch von beliebig komplexen Technikobjekten modular abbilden, wobei beispielsweise Gehäuse, Elektronik, Sensorik, Antrieb oder Kommunikationsmodule separat berücksichtigt werden müssen. Die folgende Abbildung veranschaulicht die Modellierung komplexer digitaler Technikobjekte am Beispiel eines selbstfahrenden Roboters.



Zusatzaufwand (ggü. Referenzsystem)

Investitionsgüter (ZI)

ID	Menge	Einheit	Produkt / Dienstleistung	Preis [EUR/Einheit]	Nutzungsdauer [a]	Kommentar	Datenquelle	THG [kgCO2e/Einheit]	THG pro Jahr [kgCO2e/a]	Kosten pro Jahr [EUR/a]
A.100.24.100	2,67	kg	Aluminium trade mix Global (64% prim 36% sec)	2,50 €	5		IDEMAT	8	4	1
A.130.07.101	1,33	kg	ABS (Acrylonitrile butadiene styrene)	2,00 €	5		IDEMAT	3	1	1
A.130.05.101	1,00	kg	BR and IIR (butadiene rubber and butyl rubber) in tires	4,00 €	5		IDEMAT	4	1	1
A.050.04.106	1,67	kg	Electric motor less than 500 W	25,00 €	5		IDEMAT	3	1	8
A.050.04.114	2,00	kg	Lithium NMC 811 (215 Wh per kg incl packaging excl	100,00 €	3		IDEMAT	16	10	67
A.050.06.401	0,40	kg	PCB of average laptop (including ICs)	2.000,00 €	5		IDEMAT	42	3	160
A.100.24.108	0,93	kg	Copper rod tube plate (primary)	7,00 €	5		IDEMAT	3	1	1
df-06	1,0	p	Tablet	500,00 €	3		OEKO	200	67	167
Ergebnis									88	406

+ Zeile ZI | Lösche Auswahl

Betriebsstoffe / Energie / Emissionen (ZB)

ID	Menge	Einheit	Produkt / Dienstleistung	Preis [EUR/Einheit]	Bezugszeitraum [a]	Kommentar	Datenquelle	THG [kgCO2e/Einheit]	THG pro Jahr [kgCO2e/a]	Kosten pro Jahr [EUR/a]
df-15	1,0	GB	Datenmenge im mobilen Internet	5	1		OEKO	0	0	5
qd-LCA-01	100,0	kWh	Strommix, DE, low voltage	0,3	1		OEKO	0	42	30
Ergebnis									42	35

+ Zeile ZB | Lösche Auswahl

Summe Zusatzaufwand [kg CO2e/a] 130

Abbildung 1: Beispielhafte Abschätzung des CO_2-Fußabdrucks eines Roboters auf Basis der für die Herstellung benötigten Werkstoffe bzw. Komponenten (eigene Darstellung)

Diese Funktion ist insbesondere für eine entwicklungsbegleitende Analyse von Bedeutung, da sich die genaue Konfiguration komplexer Systeme in frühen Entwicklungsphasen häufig noch verändert. Dadurch können beispielsweise alternative Auslegungen eines Roboters oder einer Drohne im Vergleich betrachtet und analysiert werden, welche Auswirkungen Änderungen beim Gehäusematerial, bei der Sensorik oder der Akkukapazität auf den gesamten CO_2-Fußabdruck haben. Damit wird das Analysetool zu einem Instrument für ein an Nachhaltigkeitsaspekten ausgerichtetes Innovationsdesign.

4.2.4 Abschätzung der lebenszyklusbasierten Kosten

Parallel zur Abschätzung des CO_2-Fußabdrucks ermöglicht das Tool auch eine lebenszyklusbasierte Kostenanalyse. Dadurch wird die ökologische Nachhaltigkeitsbewertung der Neuentwicklung um die ökonomische Perspektive ergänzt. Für viele Entwicklungsprojekte ist diese Kopplung unverzichtbar, da Nachhaltigkeitsentscheidungen in der Praxis nicht nur auf Basis von Emissionswirkungen, sondern auch unter Berücksichtigung der wirtschaftlichen Tragfähigkeit und der Amortisationszeiten getroffen werden.

Analog zur Berechnung der jährlichen Treibhausgasemissionen sind für die Kostenermittlung zusätzliche Eingaben erforderlich. Konkret sind die Kosten bzw. Preise für alle betrachteten Positionen (z.B. verwendete Hardware, Stromverbrauch während der Nutzung) pro Einheit einzutragen.

Wie bei der Ermittlung des CO_2-Fußabdrucks bietet der lebenszyklusbasierte Ansatz auch auf der Kostenebene die Möglichkeit, zwischen investiven und laufenden Positionen zu unterscheiden. Einmalige Investitionen in zusätzliche Hardware lassen sich auf die Nutzungsdauer verteilen, während laufende Kosten für Energie, Verbrauchsmaterialien oder Dienstleistungen direkt in die

jährliche Betrachtung eingehen. Auf der Einsparungsseite können entsprechend vermiedene Investitionen oder reduzierte Betriebskosten abgebildet werden. Dadurch entsteht eine strukturierte Gegenüberstellung von Zusatzaufwand und Einsparungen – sowohl für den CO_2-Fußabdruck als auch für die Kosten.

4.2.5 Ermittlung von Nettoentlastung sowie des Verhältnisses zwischen Einsparung und Aufwand

Eine weitere wichtige Funktion des Analysetools besteht darin, dass Aufwendungen und Einsparungen nicht isoliert ausgewiesen, sondern in Relation zueinander gebracht werden. Nach der Dateneingabe werden sowohl für den CO_2-Fußabdruck als auch für die Kosten die zusätzlichen Belastungen und die potenziellen Entlastungen saldiert. So lässt sich ermitteln, ob und ggf. in welchem Umfang eine Nettoentlastung vorliegt.

Dies ist für die Bewertung digitaler Technologien besonders relevant, da diese oftmals ambivalente Nachhaltigkeitswirkungen aufweisen. Beispielsweise kann eine Innovation mit einem vergleichsweise hohen Hardwareaufwand zunächst zusätzliche Emissionen verursachen, gleichzeitig aber in ihrer Anwendung erhebliche Ressourceneinsparungen ermöglichen. Erst die Gegenüberstellung beider Seiten erlaubt eine fundierte Einschätzung, ob die Technologie insgesamt zu einer Verbesserung und somit zu einem Netto-Nachhaltigkeitsgewinn führt.

Ergänzend ermöglicht das Analysetool die Ermittlung des Verhältnisses der Einsparungspotenziale zum Aufwand. Diese Kennzahl verdichtet die Ergebnisse und erlaubt eine Bewertung der Größenordnung der möglichen Entlastung im Verhältnis zum erforderlichen Ressourceneinsatz. Dadurch wird insbesondere eine Priorisierung von Entwicklungsoptionen erleichtert, wenn mehrere Maßnahmen mit unterschiedlichen Aufwand-Nutzen-Profilen zur Auswahl stehen.

4.2.6 Ermittlung des Break-even-Points

Falls Daten zu den Einsparungseffekten nicht oder nur unvollständig vorliegen, bietet das Tool mit der Ermittlung des Break-even-Points eine weitere wichtige Funktion. Dieser kann mittels der in Excel hinterlegten Zielwertsuche sowohl für den CO_2-Fußabdruck als auch für die Kosten berechnet werden. Der Break-even-Point gibt an, unter welchen Voraussetzungen sich die zusätzlichen Aufwendungen amortisieren, d.h. ab welchem Umfang an Einsparungen die Bilanz mindestens ausgeglichen ist. Für eine entwicklungsbegleitende Selbstevaluierung ist dies besonders hilfreich, da sich reale Einsparwirkungen in frühen Entwicklungsphasen oft noch nicht präzise quantifizieren lassen. Anstelle einer nur unzureichend belastbaren Prognose für die eventuell erzielbaren Entlastungspotenziale bzw. Netto-Nachhaltigkeitsgewinne kann dann zumindest abgeschätzt

werden, welche Schwellenwerte bei den Entlastungspotenzialen erreicht werden müssten, damit die Neuentwicklung aus ökologischer bzw. ökonomischer Sicht tragfähig wird.

4.2.7 Variantenvergleich

Neben der eigentlichen Bilanzierung bietet das Tool auch Funktionen für die Szenarienbildung und den Variantenvergleich. Mithilfe des Variantenvergleichs können die Bilanz-Ergebnisse verschiedener Berechnungen direkt gegenüberstellt werden. Dadurch ist es möglich, unterschiedliche Konfigurationen eines digitalen Szenarios zu analysieren, beispielsweise Modifikationen beim Hardwareeinsatz, den Verbrauchskosten oder den erwarteten Einsparungspotenzialen. Dies erlaubt eine vergleichende Bewertung technischer Auslegungen oder Nutzungsszenarien und unterstützt somit Entscheidungsprozesse in der F&E-Projektsteuerung. Dabei ist es grundsätzlich auch möglich, für einen besonders relevanten Parameter Best-Case- bzw. Worst-Case-Szenarien zu entwickeln und diese direkt miteinander zu vergleichen.

Diese Funktion kann im Tabellenblatt „Bilanz“ über den Button „Variante duplizieren“ aktiviert werden. Die duplizierten Varianten lassen sich anschließend weiterbearbeiten. Dabei können Mengen und Preise angepasst sowie neue Zeilen für weitere Systembestandteile manuell ergänzt werden. Die Ergebnisse des Variantenvergleichs werden schließlich in einem separaten Tabellenblatt des Analysetools in grafischer Form gegenübergestellt. Dort werden die Einzelergebnisse für den Zusatzaufwand durch die verwendete Digitaltechnik sowie die realisierbaren Einsparpotenziale separat ausgewiesen (siehe folgende Abbildung).

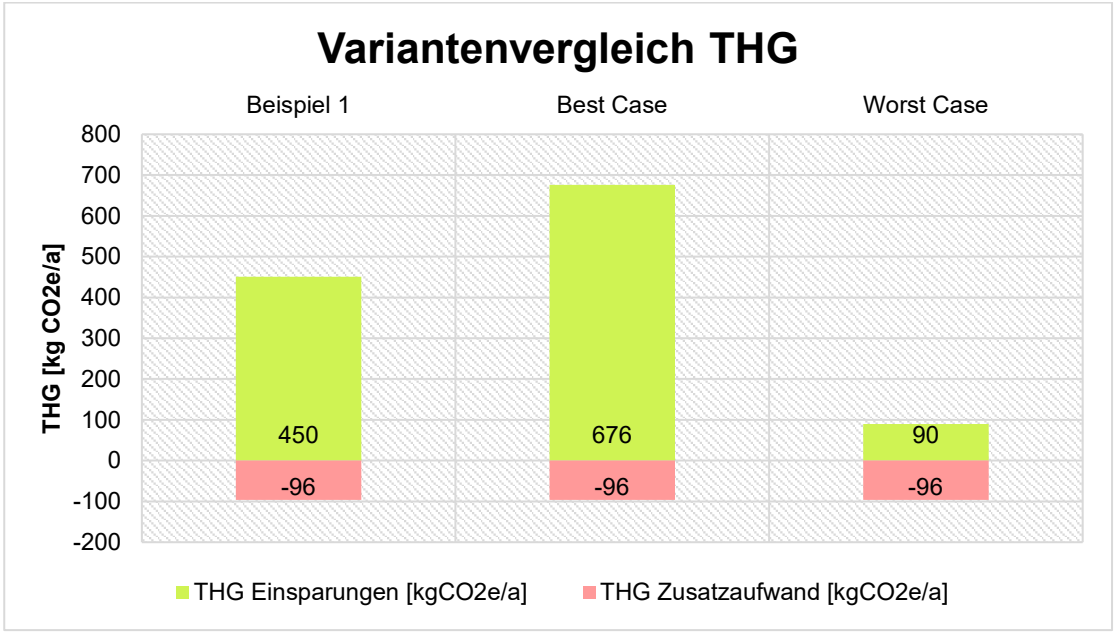


Abbildung 2: Ergebnisse der Treibhausgas-Emissionen eines hypothetischen Variantenvergleichs (eigene Darstellung)

Zusätzlich zur grafischen Darstellung der Ergebnisse für die betrachteten Varianten werden im Analysetool für jede Variante auch die jeweiligen Verhältnisse zwischen Einsparung und Aufwand (siehe Kap. 4.2.5) sowie der ermittelte Break-even-Point (siehe Kap. 4.2.6) dargestellt.

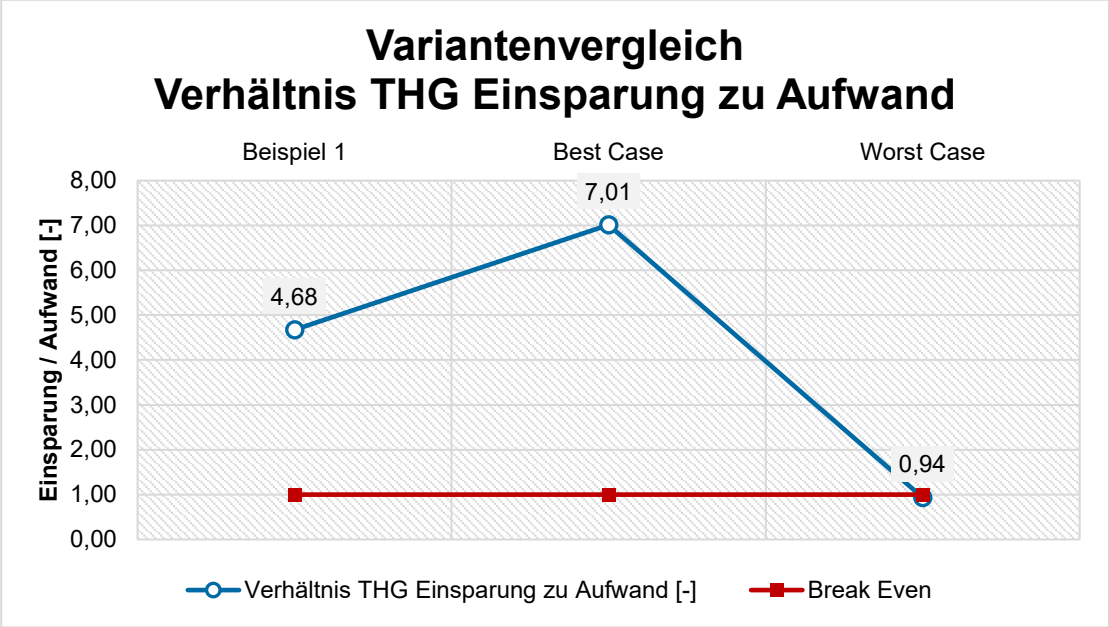


Abbildung 3: Ergebnisse der Verhältnisse zwischen Einsparungen und Aufwand für einen hypothetischen Variantenvergleich sowie Angabe des Break-even-Points (eigene Darstellung)

4.3 Dokumentation

Eine Bedienungsanleitung zur Nutzung des Analysetools befindet sich direkt im Tool auf dem Tabellenblatt „Anleitung“ (siehe Anlage II).

Mithilfe des zusätzlich bereitgestellten Tutorials (siehe Anlage III) kann das Analysetool von einem breiten Anwenderkreis weitgehend selbstständig genutzt werden.

5 Pilotanwendung des Selbstevaluierungs-Tools

Das vom Öko-Institut entwickelte Analysetool wurde von fünf ausgewählten Verbundprojekten (vgl. Kap. 3) im Rahmen ihrer Selbstevaluierung eingesetzt und erprobt. Im Folgenden werden die jeweiligen Ergebnisse der Selbstevaluierung vorgestellt (siehe Kap. 5.1 - 5.5) und die aus der Anwendung des Tools gewonnenen Erkenntnisse sowie die daraus gezogenen Rückschlüsse für seine Optimierung zusammengefasst (siehe Kap. 5.6).

5.1 agents42watermarkets

5.1.1 Zielsetzung

Das von der TU Darmstadt koordinierte Verbundprojekt agents42watermarkets widmet sich den strukturellen Herausforderungen öffentlicher Wasserversorgungssysteme, die sich aus zunehmenden Trockenperioden, hohen Lastspitzen und einer alternden Infrastruktur ergeben. Der Fokus liegt dabei auf Versorgungsengpässen in Hitzeperioden, einem energetisch nicht optimalen Betrieb und Wasserverlusten durch Leckagen. Vor diesem Hintergrund besteht ein Bedarf an flexiblen und ressourcenschonenden Betriebsstrategien, die neben Wasser auch den Energie- und Kostenaufwand berücksichtigen. Zugleich weist das Projekt auf die Grenzen datenbasierter Verfahren der künstlichen Intelligenz hin, insbesondere dort, wo Nachvollziehbarkeit, Transparenz und Genehmigungsfähigkeit für den Einsatz in kritischen Infrastrukturen erforderlich sind. Vor diesem Hintergrund werden marktwirtschaftlich organisierte und agentenbasierte Ansätze als Grundlage einer bedarfsgerechten und robusten Wasserbewirtschaftung untersucht. (Digital GreenTech 2026a; Technische Universität Darmstadt 2026)

Kern der Neuentwicklung ist die Konzeption einer cyber-physischen Wassermarktwirtschaft, in der die relevanten technischen Komponenten eines Wasserversorgungsnetzes (z.B. Pumpen und Ventile) als autonom agierende Agenten modelliert werden. Diese Agenten kommunizieren innerhalb eines vorgegebenen Handlungsrahmens miteinander und koordinieren ihr Verhalten über den Austausch zukünftiger Leistungsversprechen, die im System mit einem internen Wertmaßstab verknüpft sind. Ziel ist es, marktbasierte Mechanismen für die dezentrale Koordination von Netzkomponenten nutzbar zu machen und so die Allokation von Ressourcen innerhalb der Infrastruktur effizienter zu gestalten. Der Ansatz wird in Form eines Multiagentensystems umgesetzt und an einem realen Demonstratorsystem erprobt, in das unter anderem Pumpen und Ventile als dezentrale Regeleinheiten integriert sind. Auf diese Weise kann untersucht werden, inwieweit sich Versorgungssysteme flexibler, effizienter und robuster betreiben lassen. Ergänzend zur technischen Systemebene integriert das Projekt eine soziale Perspektive auf Wasserknappheit und Ressourcenzuteilung. In diesen werden unterschiedliche Akteursgruppen der Wasserwirtschaft durch Personen-Agenten repräsentiert; dazu zählen Haushalte, Betreiber, Versorger sowie politische und regulatorische Institutionen. Insbesondere wird untersucht, in welchem Umfang Preis- und Anreizmechanismen geeignet sind, Wasserverbräuche zu verschieben oder zu reduzieren. Durch die Verbindung von technischer und sozialer Modellierung soll der Wassermarkt in seiner infrastrukturellen und institutionellen Dimension abgebildet werden. (Digital GreenTech 2026a; Technische Universität Darmstadt 2026)

Die Nachhaltigkeitsrelevanz des Projekts zeigt sich vor allem in der angestrebten Reduzierung von Wasserverlusten, einer effizienteren Allokation knapper Wasserressourcen, einer Minderung des

Energieeinsatzes im Betrieb der Wasserinfrastruktur und einer erhöhten Robustheit gegenüber Trockenperioden und Lastspitzen. Darüber hinaus ist eine Ausrichtung auf nachvollziehbare und regulierbare Entscheidungsstrukturen von Bedeutung, da diese für den Einsatz autonomer Systeme in der Wasserwirtschaft unerlässlich sind. Damit wird Nachhaltigkeit sowohl auf der Ebene der technischen Ressourceneffizienz als auch auf der Ebene institutioneller Steuerbarkeit und Resilienz adressiert. (Digital GreenTech 2026a; Technische Universität Darmstadt 2026)

5.1.2 Methodische Vorgehensweise, grundlegende Annahmen und Ergebnisse der Selbstevaluierung

Im Rahmen der Selbstevaluierung wurde das neu entwickelte Multiagentensystem als digitales Szenario mit einem Referenzsystem auf Basis konventioneller Regelstrategien verglichen. Dabei erfolgte eine Gegenüberstellung des zusätzlichen Aufwands für das digitale Szenario mit den möglichen Einsparpotenzialen bei Treibhausgasemissionen und Kosten. (agents42watermarkets 2025)

Der CO_2-Fußabdruck aus Herstellung und Betrieb der beim digitalen Szenario benötigten Systemkomponenten wurde mit 1.734 kg CO_2e abgeschätzt. Davon entfallen 1.720 kg CO_2e pro Jahr auf die Herstellung der Systemkomponenten und 14 kg CO_2e auf deren Betrieb (Stromverbrauch). Innerhalb des Herstellungsaufwands dominieren die physischen Anlagenteile: Die benötigten Kreiselpumpen verursachen 780 kg CO_2e, die Asynchronmotoren 560 kg CO_2e und die Frequenzumrichter (zur Regelung von Drehzahl und Drehmoment der Elektromotoren) 130 kg CO_2e. Die ebenfalls benötigten IKT-Geräte (v.a. Desktop-Computer) tragen mit 110 kg CO_2e nur in geringem Umfang zu dem CO_2-Fußabdruck des digitalen Szenarios bei. Der Zusatzaufwand des digitalen Szenarios ist somit überwiegend auf die anlagentechnischen Komponenten des Systems zurückzuführen und nur in untergeordnetem Maß auf die eigentliche Informations- und Kommunikationstechnik. (agents42watermarkets 2025)

Für den Stromverbrauch der Wasserverteilung wurde im analysierten System eine Einsparung von 125 kWh pro Tag ermittelt. Dies entspricht einer Reduktion um rund 10 % gegenüber dem Referenzsystem. Hieraus ergibt sich eine zusätzliche Treibhausgasentlastung von rund 20 t CO_2e pro Jahr (agents42watermarkets 2025). Den zusätzlichen Aufwendungen stehen erhebliche Einsparpotenziale gegenüber. Mit Blick auf die Einsparpotenziale durch eine verbrauerseitige Einsparung von Trinkwasser wurde eine Reduktion um 0,688 % angesetzt[3]. Ausgehend von einem Wasserbedarf von Haushalten und kleinen Betrieben in Deutschland in Höhe von insgesamt 3,8 Mrd. m³ (Stand: 2022) ergibt sich daraus ein Einsparpotenzial von 26,2 Mio. m³ Trinkwasser pro

[3] Dieser Wert ergibt sich aus einer im Projekt durchgeführten Multi-Agenten-Simulation zur Analyse der Auswirkungen veränderter Preisstrukturen im deutschen Wasserbepreisungssystem.

Jahr. Die damit verbundene Treibhausgasminderung beläuft sich auf 6.333 t CO_2e. (agents42watermarkets 2025)

Insgesamt weist das digitale Szenario ein jährliches Einsparpotenzial von 6.353 t CO_2e auf. Nach Abzug der zusätzlichen Aufwendungen für das digitale Szenario verbleibt eine Nettoentlastung von 6.351 t CO_2e pro Jahr. (agents42watermarkets 2025)

Auf der Kostenebene stehen jährlichen Aufwendungen von 64.000 Euro Entlastungen von 59.675.000 Euro gegenüber. Daraus ergibt sich ein jährliches Netto-Einsparpotenzial von 59.611.000 Euro. (agents42watermarkets 2025)

5.1.3 Diskussion und Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der Selbstevaluierung zeigen, dass die Neuentwicklung trotz zusätzlicher Aufwendungen für Anlagen- und Digitaltechnik ein deutliches Nettoentlastungspotenzial bei den Treibhausgasemissionen aufweist. Die bilanzierten Zusatzaufwendungen des digitalen Szenarios werden durch die potenziellen Einsparungen beim Trinkwasserverbrauch und beim Strombedarf der Wasserverteilung deutlich überkompensiert.

Allerdings zeigt die Analyse auch, dass die Höhe dieses Beitrags wesentlich von den Systemgrenzen, den zugrunde gelegten Annahmen sowie der konkreten technischen Ausgestaltung der Lösung abhängt. Für die Einordnung der Ergebnisse muss daher berücksichtigt werden, dass die ausgewiesenen Entlastungen vor allem als Potenzialabschätzung zu verstehen sind. Für die Weiterentwicklung und Kommerzialisierung der Neuentwicklung ist es folglich entscheidend, die agentenbasierten Regelstrategien unter unterschiedlichen Randbedingungen und Anwendungsfällen zu testen und die Einsparpotenziale robuster abzusichern. Dies betrifft auch die Frage, in welchen Anwendungsfällen die größten Umweltentlastungen erzielt werden können, beispielsweise bei Netzen mit hohen Lastschwankungen, erhöhtem Leckagerisiko oder besonders energieintensivem Pumpbetrieb.

Auch hinsichtlich der Auswirkungen des digitalen Szenarios auf den Wasserverbrauch besteht weiterer Präzisierungs- und Optimierungsbedarf. Die abgeleiteten Einsparungen basieren auf einer modellierten Verbrauchsreduktion und einer Hochrechnung auf den nationalen Wasserbedarf von Haushalten und kleinen Betrieben. Für eine fundierte Bewertung wäre es sinnvoll, die Annahmen stärker auszudifferenzieren und mit empirischen Nutzungs- und Verbrauchsdaten aus unterschiedlichen Versorgungsgebieten zu untermauern.

Auf methodischer Ebene hat die Selbstevaluierung im Projekt ergeben, dass das bereitgestellte Bewertungstool die Komplexität des betrachteten Systems gut abdecken kann. Für die ökobilanzielle Modellierung der eingesetzten Komponenten haben sich Environmental Product Declarations (EPD)

als wertvolle Datenquelle für die Bestimmung des CO_2-Fußabdrucks erwiesen. Dies gilt insbesondere für komplexe Systemkomponenten wie die Kreiselpumpen und Frequenzumrichter, deren Herstellungsaufwand jeweils einen relevanten Beitrag zur Gesamtbilanz bildet.

5.2 DigiKompost

5.2.1 Zielsetzung

Das Verbundprojekt DigiKompost befasst sich mit der technischen Kompostierung von Bio- und Grünabfällen. Bislang erfolgt die Prozessüberwachung in bestehenden Kompostierungsanlagen vielfach nur punktuell und überwiegend manuell, insbesondere über Temperaturmessungen zur Dokumentation der Hygienisierung. Eine solche nachsteuernde und erfahrungsbasierte Betriebsweise begrenzt jedoch die frühzeitige Erkennung anaerober Zustände innerhalb der Kompostmieten. Diese sind jedoch mit relevanten Methanemissionen verbunden und somit für die Prozessstabilität sowie die Treibhausgasbilanz der Kompostierung von Bedeutung. (Digital GreenTech 2026b; Fraunhofer IKTS 2026)

Vor diesem Hintergrund zielt DigiKompost auf die Entwicklung und Erprobung eines dezentralen Sensorsystems zur KI-gestützten Steuerung von Kompostmieten. Die vom Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS) koordinierte Neuentwicklung soll die bislang begrenzte Datengrundlage der Prozessführung erweitern und insbesondere gasförmige Mess- und Steuergrößen systematisch in die Betriebssteuerung integrieren. Dadurch wird eine vorausschauende Prozessführung ermöglicht, sodass Eingriffe in den Rotteprozess nicht erst reaktiv, sondern auf prognosegestützter Grundlage erfolgen. Betreibende von Kompostieranlagen sollen dadurch befähigt werden, die Betriebsabläufe, den Personaleinsatz und den Maschineneinsatz sowie emissionsschutzbezogene Maßnahmen mit zeitlichem Vorlauf zu planen, umzusetzen und zu dokumentieren. Die entwickelten Lösungen sind für unterschiedliche Anlagenkonfigurationen und Einsatzstoffe vorgesehen und wurden im technischen Maßstab erprobt und bewertet. (Digital GreenTech 2026b; Fraunhofer IKTS 2026)

Die wesentlichen Nachhaltigkeitsaspekte des Vorhabens liegen in der Minderung prozessbedingter Treibhausgasemissionen, der Verbesserung der Prozesskontrolle und der Unterstützung einer qualitätsgesicherten stofflichen Verwertung organischer Reststoffe. Laut den Projektangaben können durch eine frühzeitige, prognosebasierte Steuerung anaerobe Milieubedingungen vermieden und der Treibhausgasausstoß durch vermiedene Methanemissionen um 50 - 90 % reduziert werden. Angesichts eines jährlichen Behandlungsvolumens von rund sieben Millionen Tonnen organischer Reststoffe in Deutschland wird das Vorhaben als Beitrag zur emissionsärmeren und datenbasierten Weiterentwicklung der Kreislaufwirtschaft eingeordnet. (Digital GreenTech 2026b; Fraunhofer IKTS 2026)

5.2.2 Methodische Vorgehensweise, grundlegende Annahmen und Ergebnisse der Selbstevaluierung

Bei der Selbstevaluierung von DigiKompost wurde zwischen einem konventionellen Referenzszenario und einem digitalen Szenario unterschieden. Im Referenzszenario findet keine messtechnische Steuerung des Kompostierungsprozesses statt, abgesehen von einer teilweise durchgeführten Temperaturaufzeichnung. Das Umsetzen der Mieten basiert auf betrieblicher Erfahrung sowie weiteren Randbedingungen des Anlagenbetriebs. Unter diesen Bedingungen können während des Rotteprozesses Methan- und Lachgasemissionen auftreten. Demgegenüber basiert das digitale Szenario auf einem sensor- und KI-gestützten Mess- und Prognosesystem, das der Überwachung und Steuerung der Abbauprozesse dient. Das Ziel besteht darin, Methanemissionen zu reduzieren; darüber hinaus ist grundsätzlich auch eine Verringerung von Lachgasemissionen möglich. Für beide Szenarien wird angenommen, dass der Aufwand für das Umsetzen der Mieten vergleichbar bleibt und die gewonnene Komposterde eine Substitution von Torfprodukten im gleichen Umfang ermöglicht. (DigiKompost 2025)

Der zusätzliche technische Aufwand im digitalen Szenario umfasst insbesondere Sensorlanzen zur Erfassung relevanter Prozessdaten, die Übertragung der Daten an einen Server zur KI-basierten Auswertung sowie die Bereitstellung von Steuerungsempfehlungen auf den mobilen oder stationären Endgeräten der Anlagenfahrer, d.h. auf Mobiltelefonen oder Laptops. Für die Bilanzierung wurde eine Beispielanlage in Kyhna zugrunde gelegt. Diese weist einen Jahresdurchsatz von 9.900 Tonnen Grünschnitt auf und betreibt drei Kompostmieten parallel. (DigiKompost 2025)

Die durch Herstellung und Betrieb der digitalen Systemkomponenten verursachten Treibhausgasemissionen sind im Verhältnis zur erzielbaren Emissionsminderung vergleichsweise gering. Für die Herstellung der benötigten Komponenten werden rund 29 kg CO_2e pro Jahr angesetzt. Den größten Beitrag verursachen die für die Sensorlanzen benötigten Aluminiumprofile mit etwa 9 kg CO_2e, gefolgt von den Keramikfiltern mit rund 6 kg CO_2e sowie der Herstellung des Routers mit ebenfalls etwa 6 kg CO_2e. Der zusätzliche Betriebsaufwand beträgt rund 64 kg CO_2e pro Jahr. Maßgeblich sind hierbei vor allem der Serverbetrieb mit etwa 32 kg CO_2e sowie der Routerbetrieb mit rund 30 kg CO_2e. Insgesamt ergibt sich für das DigiKompost-System somit ein jährlicher Zusatzaufwand von rund 93 kg CO_2e pro bilanzierter Miete mit 3.300 t Inputmaterial. (DigiKompost 2025)

Dem steht eine potenziell erhebliche Emissionsminderung gegenüber. Bei einer konventionell betriebenen Kompostierung wird davon ausgegangen, dass pro Tonne Inputmaterial bis zu 1.667 g Methan freigesetzt werden. Bezogen auf die Beispielmiete mit einem Jahresdurchsatz von 3.300 t entspricht dies einer Methanmenge von rund 5,5 t Methan pro Jahr. Unter Zugrundelegung der angegebenen Umrechnung ergibt sich daraus ein Treibhausgaspotenzial von 148,5 t CO_2e pro Jahr.

Lachgasemissionen werden in dieser Bilanzierung nicht berücksichtigt, obwohl auch sie im Referenzszenario auftreten können und grundsätzlich zusätzliches Minderungspotenzial darstellen würden. Da die Einsparungen bei Torfprodukten in beiden Szenarien als gleich angesetzt und auch der Arbeitsaufwand für das Umsetzen als identisch unterstellt werden, resultiert die Nettoentlastung nahezu vollständig aus den vermiedenen Methanemissionen. Nach Abzug des digitalen Zusatzaufwands verbleibt eine Nettoentlastung von rund 148,4 t CO_2e pro Jahr und 3.300 Tonnen Inputmaterial. (DigiKompost 2025)

Die Bedeutung dieses Potenzials wird bei einer Hochrechnung auf den Gesamtsektor deutlich: Bei einer Übertragung auf 7,5 Millionen Tonnen Inputstoffe in RAL-zertifizierten Kompostanlagen ergibt sich eine mögliche Einsparung von rund 336.000 Tonnen CO_2e. (DigiKompost 2025)

5.2.3 Diskussion und Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der Selbstevaluierung zeigen, dass die bei DigiKompost erzielte Neuentwicklung ein erhebliches Potenzial zur Minderung der prozessbedingten Treibhausgasemissionen im Bereich der offenen Mietenkompostierung aufweist. Den zusätzlichen Aufwendungen für Sensorik, Datenübertragung und KI-basierte Auswertung stehen bei der betrachteten Beispielmiete Einsparungen durch vermiedene Methanemissionen von mindestens drei Zehnerpotenzen gegenüber. Die Nachhaltigkeitsgewinne der Neuentwicklung resultieren somit hauptsächlich aus der Vermeidung anaerober Prozesszustände, während der zusätzliche Aufwand durch die eingesetzte Digitaltechnik bilanziell von untergeordneter Bedeutung ist.

Dementsprechend liegen mögliche Optimierungspotenziale der Neuentwicklung in einer Erweiterung der emissionsbezogenen Prozessüberwachung. Ein zentraler Ansatzpunkt wäre dabei eine Ausweitung der Sensorik auf Lachgas. Die vorliegenden Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die Vermeidung von Methanemissionen. Da im Referenzszenario jedoch auch Lachgasemissionen auftreten können, sollte geprüft werden, inwieweit diese künftig messtechnisch erfasst oder über geeignete Prozessindikatoren abgebildet werden können. Aufgrund der hohen spezifischen Klimarelevanz von Lachgasemissionen könnte durch eine solche Erweiterung das CO_2-Minderungspotenzial der Neuentwicklung wesentlich gesteigert werden.

Für die Einordnung der Neuentwicklung können darüber hinaus auch die ökonomischen Rahmenbedingungen von Bedeutung sein. Laut den Ergebnissen der vorliegenden Selbstevaluierung entstehen durch DigiKompost aktuell keine direkten Kosteneinsparungen, sofern die vermiedenen Treibhausgasemissionen nicht monetär berücksichtigt werden. Derzeit werden Treibhausgasemissionen aus Kompostieranlagen in bestehenden Emissionshandelssystemen nicht direkt erfasst. Weder das EU-Emissionshandelssystem noch der deutsche nationale Emissionshandel beziehen biologische Abfallbehandlungsprozesse wie die Kompostierung explizit

ein. Im Abfallbereich steht aktuell vor allem die thermische Behandlung im Fokus. Allerdings dürfte der Abfallsektor in Zukunft regulatorisch stärker in den Fokus rücken, sodass insbesondere methanrelevante Emissionen perspektivisch intensiver überwacht, bilanziert und möglicherweise auch ökonomisch adressiert werden. Gerade dann würden messbare, dokumentierbare und verifizierbare Emissionsminderungen deutlich an Bedeutung gewinnen.

5.3 DigiWaVe - Digitale Lösungen für eine ressourceneffiziente Wasserwiederverwendung im urbanen Raum

5.3.1 Zielsetzung

Das Verbundprojekt DigiWaVe („Digitale Lösungen für eine ressourceneffiziente Wasserwiederverwendung im urbanen Raum“) befasst sich mit den wachsenden Anforderungen an die Bewässerung urbaner Grünflächen unter Bedingungen zunehmender sommerlicher Trockenheit und sinkender Wasserverfügbarkeit. Vor dem Hintergrund längerer und intensiverer Hitze- und Trockenperioden steigt der Bewässerungsbedarf insbesondere für Jungbäume und andere städtische Vegetationsflächen, während zugleich Nutzungskonkurrenzen bei der Trinkwasserversorgung zunehmen. Die Wasserwiederverwendung wird in diesem Zusammenhang als Ansatz betrachtet, um die Grünflächenbewässerung teilweise von der Trinkwasserversorgung zu entkoppeln und die Handlungsoptionen der Kommunen im Umgang mit Wasserknappheit zu erweitern. (Digital Greentech 2026c; KWB 2026)

Ziel des vom Kompetenzzentrum Wasser Berlin (KWB) koordinierten Projekts ist die Entwicklung und Erprobung digital gestützter Instrumente zur Planung, Umsetzung und Betriebsoptimierung der urbanen Wasserwiederverwendung. Die Arbeiten erfolgen am Modellstandort Bad Oeynhausen und verbinden technische, datenbasierte und organisatorische Ansätze, um kommunale Anwendungen zu unterstützen (KWB 2026).

Die Neuentwicklung umfasst vier Lösungsbausteine (Digital Greentech 2026c; KWB 2026):

- Erstens ein datengetriebenes Echtzeitprognosemodell mit zwei Komponenten:
  - i) Vorhersage der mikrobiellen Wasserqualität im Zulauf von UV-Anlagen anhand von Betriebsdaten der Kläranlage und
  - ii) Berechnung der benötigten UV-Dosis zur Erreichung der Reinigungsziele.
- Zweitens ein cloudbasiertes Datenmanagement zur Zusammenführung heterogener Datenquellen und zur Unterstützung vernetzter Betriebsprozesse.

- Drittens ein Modell zur Prognose des Bewässerungsbedarfs urbaner Grünflächen auf Basis bestehender Datenquellen, insbesondere Wetter-, Vegetations- und Copernicus-Satellitendaten, validiert durch Bodenfeuchtemessungen an Referenzstandorten.
- Viertens ein Instrument zur automatisierten Routenplanung für Bewässerungsfahrzeuge sowie zur Optimierung der Positionierung von Wasserentnahmepunkten.

Die Nachhaltigkeitsrelevanz des Projekts liegt in erster Linie in der effizienteren Nutzung verfügbarer Wasserressourcen, der Minderung des Trinkwasserbedarfs für Bewässerungszwecke und der Unterstützung einer an das Klima angepassten Stadtgrünbewirtschaftung. Darüber hinaus können Sekundäreffekte vitaler urbaner Grünflächen hinzukommen, z.B. in Form von eingesparten Fahrten in Erholungsgebiete. Aufgrund der verfügbaren Datenbasis lag der Fokus der durchgeführten Selbstevaluierung jedoch auf Effizienzsteigerungen, die durch digitale Echtzeitprognosemodelle beim Betrieb von UV-Anlagen möglich sind (s.o.). (Digital Greentech 2026c; KWB 2026)

5.3.2 Methodische Vorgehensweise, grundlegende Annahmen und Ergebnisse der Selbstevaluierung

Im Rahmen der Selbstevaluierung von DigiWaVe wurde der Einsatz digitaler Technik exemplarisch für eine UV-Anlage mit Echtzeitprognose der mikrobiologischen Wasserqualität untersucht. Vergleichsmaßstab war ein Basisszenario, bei dem die UV-Anlage ohne zusätzliche digitale Komponenten betrieben wird. Demgegenüber stand ein digitales Szenario, in dem der Anlagenbetrieb durch digitale Mess-, Auswerte- und Prognoseinstrumente unterstützt und dadurch optimiert wird. Die Analyse verfolgte damit das Ziel, die zusätzlichen Aufwendungen der Digitaltechnik den hierdurch ermöglichten Einsparpotenzialen bei Treibhausgasemissionen und Kosten gegenüberzustellen. (DGT Konferenz 2025)

Die zusätzlichen Aufwendungen des digitalen Szenarios umfassen zunächst die erforderlichen technischen und organisatorischen Komponenten. Hierzu gehören das Online-Messgerät „aquaBio” für die Bestimmung von *E. coli*, ergänzende Labormessungen, die Entwicklung und Anpassung des Prognosemodells, ein Desktop-PC für die Datenverarbeitung und Modellanwendung sowie laufende Wartungsaufwendungen. Diese Elemente bedeuten im Vergleich zum Basisszenario zusätzliche materielle, energetische und betriebliche Aufwendungen, die bei der Selbstevaluierung bilanziert wurden. (DGT Konferenz 2025)

Beim digitalen Szenario wurde für die Herstellung und Nutzung der digitalen Ausrüstung ein jährlicher CO_2-Fußabdruck in Höhe von insgesamt rund 710 kg CO_2e ermittelt. Den mit Abstand größten Einzelbeitrag liefert dabei die Nutzung des Desktop-Computers mit 476 kg CO_2e pro Jahr. Weitere Beiträge entfallen auf die Herstellung des Desktop-Computers (69 kg CO_2e), die Nutzung des aquaBio-Systems (32 kg CO_2e), die Herstellung des aquaBio-Messgeräts (30 kg CO_2e), die

Abholung und Logistik von Laborproben (ebenfalls 30 kg CO_2e) sowie die Herstellung des Routers (15 kg CO_2e). Die Ergebnisse verdeutlichen, dass der ökologische Zusatzaufwand der digitalen Lösung maßgeblich durch den laufenden Energiebedarf der IT-Komponenten sowie durch flankierende Labor- und Logistikprozesse geprägt wird. (DGT Konferenz 2025)

Demgegenüber stehen die durch die Digitaltechnik ermöglichten Einsparungen im Anlagenbetrieb. Für das untersuchte digitale Szenario wurde angenommen, dass während eines Viertels der Betriebszeit eine Reduktion der erforderlichen UV-Dosis um 30 % möglich ist. Dies führt bei gleichzeitiger Einhaltung der notwendigen mikrobiologischen Sicherheitsstandards zu einer Verringerung des Stromverbrauchs der UV-Anlage um 50 %. Aus dieser effizienteren Betriebsweise ergibt sich ein jährliches Einsparpotenzial von rund 560 kg CO_2e. Die digitale Technik ermöglicht somit eine substanzielle Entlastung durch einen bedarfsgerechteren und effizienteren Betrieb der UV-Anlage. (DGT Konferenz 2025)

Die Gegenüberstellung von Zusatzaufwand und Einsparung zeigt jedoch, dass sich für die betrachtete kleine UV-Anlage mit 1,2 kW Leistung kein Netto-Vorteil ergibt. Die durch die Digitaltechnik verursachten jährlichen Emissionen von rund 710 kg CO_2e übersteigen das Einsparpotenzial von ca. 560 kg CO_2e. Auch auf Kostenebene kommt die Selbstevaluierung bei der betrachteten Anlage per Saldo zu einem negativen Ergebnis. (DGT Konferenz 2025)

Gleichzeitig macht die Analyse deutlich, dass dieser Befund stark von der Größe der Anlage abhängt. Für die Treibhausgasbilanz wurde ein Break-even-Point bei einer UV-Lampenleistung von etwa 1,5 kW ermittelt. Somit könnte die digitale Lösung bereits bei etwas größeren, jedoch weiterhin vergleichsweise kleinen Anlagen zu einer Netto-Minderung der Emissionen führen. Auf der Kostenseite liegt der Break-even-Point dagegen erheblich höher, nämlich bei etwa 60 kW UV-Lampenleistung. Da Anlagen dieser Größenordnung in Deutschland existieren, erscheint die wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit digital gestützter Betriebsoptimierung bei größeren Anwendungen realistisch. (DGT Konferenz 2025)

5.3.3 Diskussion und Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der Selbstevaluierung machen deutlich, dass die ökologische und ökonomische Vorteilhaftigkeit einer digitalen Neuentwicklung maßgeblich vom Anwendungsmaßstab beeinflusst wird. So konnte für die untersuchte UV-Anlage mit einer Leistung von 1,2 kW trotz nachgewiesener betrieblicher Effizienzgewinne kein Netto-Vorteil bei Treibhausgasemissionen oder Kosten festgestellt werden, da die zusätzlichen Aufwendungen für die digitale Infrastruktur die Einsparungen noch leicht übersteigen. Daraus folgt jedoch nicht, dass der digitale Ansatz grundsätzlich ineffizient ist, sondern vielmehr, dass sich das betrachtete Beispiel auf eine vergleichsweise kleine Anlage bezieht. Bei größeren UV-Anlagen fallen die Energieeinsparungen absolut tendenziell höher aus,

sodass dort deutlich höhere Entlastungspotenziale zu erwarten sind. Die Ergebnisse unterstreichen somit, dass die Skalierung ein zentraler Faktor für die Bewertung digitaler Lösungen ist.

Für die Weiterentwicklung von DigiWaVe ergibt sich daraus zunächst ein wesentliches Optimierungspotenzial in der gezielten Ausrichtung auf größere oder energieintensivere Anwendungsfälle. Während kleine Anlagen nur begrenzte Einsparpotenziale aufweisen, kann die digitale Steuerung bei höherer UV-Lampenleistung einen deutlich größeren Effekt entfalten. Dies spricht dafür, künftige Anwendungen und Demonstrationen stärker auf Anlagentypen auszurichten, bei denen die digitale Optimierung eine höhere Hebelwirkung besitzt. Aus wissenschaftlicher Sicht bedeutet dies, dass die Bewertung digitaler Innovationen nicht losgelöst vom technischen Maßstab erfolgen sollte.

Ein weiterer Ansatzpunkt zur Optimierung ist die Reduzierung des Aufwands für die digitale Infrastruktur. Da die Nutzung des Desktop-Computers einen erheblichen Anteil am ökologischen Fußabdruck des digitalen Szenarios ausmacht, ist es sinnvoll, vor allem bei dieser Systemkomponente Anpassungen vorzunehmen. Denkbar sind eine schlankere digitale Architektur mit ressourcen- und energieeffizienterer Hardware oder eine reduzierte Betriebsdauer. Auch bei den ergänzenden Labor- und Logistikprozessen könnten Effizienzsteigerungen dazu beitragen, den zusätzlichen Ressourcenaufwand weiter zu senken.

Das im DigiWaVe-Projekt eingesetzte Excel-Tool zur Selbstevaluierung wurde positiv bewertet. Selbst Anwender ohne Erfahrung im Bereich der Lebenszyklusanalyse bewerteten es als niedrigschwellig und benutzerfreundlich. Für eine erste Bewertung wurde das Tool als gut geeignet empfunden. Möglichkeiten zu seiner Weiterentwicklung wurden in der hinterlegten Datenbank gesehen, die noch umfangreicher sein könnte. (DGT Konferenz 2025)

5.4 iOLE - intelligente Online-Leckage-Erkennung

5.4.1 Zielsetzung und wesentliche Nachhaltigkeitsaspekte des Projekts

Das Verbundprojekt iOLE („intelligente Online-Leckage-Erkennung“) ist im Kontext steigender Anforderungen an eine ressourceneffiziente und resilientere Wasserinfrastruktur einzuordnen. Ausgangspunkt ist die Problematik von Leckagen in Trinkwassernetzwerken, die zu Wasserverlusten, einem erhöhten Energie- und Ressourcenaufwand sowie potenziell zusätzlichen Belastungen für den Betrieb und die Instandhaltung führen. Vor diesem Hintergrund verfolgt iOLE das Ziel, digitale Verfahren für die Wasserwirtschaft weiterzuentwickeln, sodass Leckagen möglichst frühzeitig, automatisiert und zuverlässig erkannt und lokalisiert werden können. (Daniel et al. 2024; Digital GreenTech 2026d; Einstein Center Digital Future 2026)

Die Neuentwicklung – koordiniert vom Fachgebiet Digitale Wassersysteme an der Technischen Universität Berlin – besteht aus einer Softwareplattform zur Online-Leckageerkennung, die zwei methodisch unterschiedliche Ansätze zusammenführt: Einerseits wird ein datengetriebener Algorithmus eingebunden, der ausschließlich Messdaten von Drucksensoren auswertet. Dieser Ansatz ermöglicht die Erkennung von Auffälligkeiten direkt aus den Sensordaten, bei der Lokalisierung ist er jedoch an die Positionen der Sensorik gebunden (Daniel et al. 2022; Digital GreenTech 2026d; Steins et al. 2026). Andererseits integriert iOLE mit DualModel einen modellbasierten Ansatz, der ein hydraulisches Netzwerkmodell nutzt. Dadurch ist eine räumlich präzisere Eingrenzung von Leckagen bis auf die Ebene einzelner Rohre möglich (Digital GreenTech 2026d; Einstein Center Digital Future 2026; Steffelbauer et al. 2022). Die Innovation liegt somit nicht allein in den einzelnen Algorithmen, sondern vor allem in deren kombinierter, anwendungsorientierter Integration in eine gemeinsame Softwareumgebung. Ein zentrales Entwicklungsziel ist die Überführung wissenschaftlicher Verfahren in ein praxistaugliches Werkzeug für Wasserversorgungsunternehmen. Das Problem besteht darin, dass datenbasierte Analyseverfahren in ihrer Rohform typischerweise spezialisiertes Wissen in der Programmierung und Datenanalyse voraussetzen. iOLE adressiert diese Hürde durch eine konsequent nutzerorientierte Gestaltung der Anwendung. Dabei werden insbesondere Benutzerfreundlichkeit, Automatisierung und Integration als leitende Entwicklungsprinzipien hervorgehoben. Die Plattform soll im Dauereinsatz praktikabel sein, technische Anforderungen an Funktionalität und Robustheit erfüllen und eine Bedienung durch Betriebs- und Instandhaltungspersonal ermöglichen. Ergänzend ist eine intuitive Visualisierung unter Einbindung von GIS-Daten vorgesehen, um die erkannten Anomalien räumlich einzuordnen und die Entscheidungsfindung im Betrieb zu unterstützen (Digital GreenTech 2026d; Einstein Center Digital Future 2026).

Die wesentlichen Nachhaltigkeitsaspekte des Projekts liegen in der Reduzierung von Wasserverlusten und einer effizienteren Bewirtschaftung der zur Trinkwassergewinnung benötigten technischen Infrastruktur. Durch die frühzeitige Erkennung und Lokalisierung von Leckagen kann die Ressource Trinkwasser geschont werden. Zugleich lassen sich die Folgen von Netzschäden begrenzen und Betriebsprozesse effizienter und resilienter gestalten. (Digital GreenTech 2026d; Einstein Center Digital Future 2026)

5.4.2 Methodische Vorgehensweise, grundlegende Annahmen und Ergebnisse der Selbstevaluierung

Im Rahmen der Selbstevaluierung wurde dem digitalen Szenario mit implementierter Online-Leckageerkennung ein Basisszenario ohne digitale Leckageerkennung gegenübergestellt. Im Basisszenario wird ein Wasserverlust von weniger als 3 % im Verteilnetz angesetzt; dieser Wert ist konservativ gewählt und liegt unter dem als Referenz genannten Wert von ca. 7 % für Deutschland.

Aufgrund derzeit fehlender belastbarer Daten zu den Einsparpotenzialen durch Online-Leckageerkennung fokussiert die Analyse auf eine Bestimmung des Break-even-Punktes, ab dem die durch die digitale Technik verursachten Emissionen und Kosten durch vermiedene Wasserverluste ausgeglichen werden. Das Basisszenario geht zudem davon aus, dass die für die Leckageerkennung erforderlichen Drucksensoren und das Hydraulikmodell dem Wasserversorger bereits zur Verfügung stehen. (DGT Konferenz 2025)

Die durch iOLE verursachten Aufwendungen der Digitaltechnik umfassen Hardware, Stromverbrauch, Datenübertragung und Datenspeicherung. Unter konservativen Annahmen, bei denen der erforderliche Hardwareeinsatz eher überschätzt wurde, ergeben sich für das digitale Szenario jährliche Treibhausgasemissionen von insgesamt ca. 4.970 kg CO_2e. Davon entfallen rund 2.060 kg CO_2e auf die Hardware für Rechenressourcen, einschließlich eines neu vorgesehenen Arbeitsplatzrechners beim Wasserversorger, ca. 490 kg CO_2e auf den Stromverbrauch der eingesetzten Hardware und für die Datenübertragung sowie etwa 2.420 kg CO_2e auf die Datenspeicherung. In Ergänzung zu den Treibhausgasemissionen wurden die jährlichen Gesamtkosten des digitalen Szenarios auf ca. 7.840 EUR geschätzt (unter vereinfachten Annahmen zu den Kosten für Softwarelizenzen). (DGT Konferenz 2025)

Um die ermittelten jährlichen Treibhausgasemissionen des digitalen Szenarios zu kompensieren, müssten lediglich Wasserverluste in Höhe von rund 22.000 m^3 pro Jahr reduziert werden. Dies entspricht 0,24 % der derzeitigen Wasserverluste. Zur Deckung der jährlichen Kosten wäre eine Reduktion der Wasserverluste um 9.800 m^3 pro Jahr ausreichend, was 0,11 % der derzeitigen Verluste entsprechen würde. Damit zeigt die Break-even-Betrachtung, dass bereits eine vergleichsweise kleine Verringerung bestehender Leckageverluste ausreicht, um die zusätzlichen Aufwendungen der Digitaltechnik sowohl aus Klima- als auch aus Kostensicht zu kompensieren. (DGT Konferenz 2025)

5.4.3 Diskussion und Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der Selbstevaluierung deuten darauf hin, dass die entwickelte Online-Leckageerkennung grundsätzlich ein günstiges Verhältnis zwischen digitalem Zusatzaufwand und potenzieller Einsparwirkung aufweist. Mit Blick auf die Aussagekraft und Belastbarkeit der Ergebnisse ist jedoch zu berücksichtigen, dass die Berechnungen auf einem Prototypen basieren. Daher können die Ergebnisse im jeweiligen Anwendungskontext in erheblichem Maße von den ermittelten Ergebnissen abweichen. Unterschiede in Netzgröße, verwendeter Sensorik und IT-Infrastruktur sowie in der Betriebsorganisation können die Ergebnisse wesentlich beeinflussen. Die vorliegenden Resultate sind daher in erster Linie als belastbare Orientierung für das untersuchte Anwendungsszenario zu verstehen, nicht als unmittelbar verallgemeinerbare Kennwerte.

Eine detaillierte Betrachtung der Ergebnisse zeigt, dass die Datenspeicherung den größten Beitrag zu den durch die Digitaltechnik verursachten Treibhausgasemissionen verursacht. Daraus ergibt sich ein zentrales Optimierungspotenzial für die Weiterentwicklung der Online-Leckageerkennung: Eine Minderung der Umweltauswirkungen kann insbesondere dann erreicht werden, wenn Umfang, Dauer und Frequenz der Datenspeicherung stärker an den tatsächlichen betrieblichen Bedarf angepasst werden. Mögliche Ansatzpunkte können eine restriktivere Datenhaltung, effizientere Speicherarchitekturen, die Aggregation oder Verdichtung historischer Daten sowie klar definierte Lösch- und Archivierungsroutinen sein. Ergänzend wäre zu prüfen, inwieweit sich die Datenverarbeitung stärker lokal, anlassbezogen oder mit abgestuften Speicherklassen organisieren lässt, um den Speicherbedarf dauerhaft zu senken, ohne die Funktionalität der Leckageerkennung zu beeinträchtigen.

Eine weitere wichtige Schlussfolgerung betrifft die Methodik der Bewertung selbst. Laut Einschätzung des Verbundkoordinators von iOLE liegt ein wesentlicher Mehrwert der Selbstevaluation und des bereitgestellten Excel-Tools darin, dass die Nutzenden dazu angehalten werden, die Systemgrenzen sorgfältig zu definieren. Anschließend können Szenarien gebildet und bewertet werden. Dieses Vorgehen führt zu einem transparenten und quantifizierbaren Bewertungsprozess, in dem Annahmen, Einflussgrößen und Ergebnislogiken klar nachvollziehbar sind. Auf dieser Grundlage kann es sinnvoll sein, im nächsten Schritt eine differenziertere und methodisch vertiefte Bewertung vorzunehmen. Eine weiterführende Analyse könnte zusätzliche Nutzungsszenarien, Sensitivitäten zentraler Annahmen sowie unterschiedliche technische Implementierungsvarianten einbeziehen. Dadurch ließe sich genauer bestimmen, unter welchen Randbedingungen die ökologische und ökonomische Vorteilhaftigkeit besonders ausgeprägt ist und welche Systemkomponenten die Gesamtergebnisse dominieren. (DGT Konferenz 2025)

Mit Blick auf das bereitgestellte Excel-Tool wurden insbesondere der strukturierte Workflow und die intuitive Bedienlogik für die schrittweise Berechnung der Aufwendungen und Einsparungen der verwendeten Digitaltechnik hervorgehoben. Ebenfalls positiv bewertet wurde die weitgehende Vollständigkeit der hinterlegten Datenbasis. Gleichwohl wurden zwei funktionale Erweiterungen als sinnvoll erachtet:

Erstens könnte eine interaktive Benutzerführung in der Benutzeroberfläche die Anwendung weiter unterstützen, insbesondere bei der Eingabe von Annahmen, der Definition von Systemgrenzen und der Interpretation von Ergebnissen. Zweitens erscheinen Möglichkeiten zur Sensitivitätsanalyse sinnvoll, um die Auswirkungen veränderter Annahmen unmittelbar sichtbar zu machen. Gerade bei versorgerspezifischen Randbedingungen würde dies die Robustheit der Bewertung erhöhen und die Übertragbarkeit auf unterschiedliche Einsatzkontexte verbessern. (DGT Konferenz 2025)

5.5 LALWeco - Long-term Autonomous Laser Weed Control

5.5.1 Zielsetzung und wesentliche Nachhaltigkeitsaspekte des Projekts

Das Verbundprojekt LALWeco („Long-term Autonomous Laser Weed Control“) befasst sich mit der Entwicklung nicht-chemischer autonomer Verfahren zur Beikrautregulierung in der Landwirtschaft. Ausgangspunkt sind regulatorischer Druck zur Reduktion chemisch-synthetischer Pflanzenschutzmittel, politische Zielsetzungen zum Ausbau des ökologischen Landbaus, zunehmender Arbeitskräftemangel und steigender Automatisierungsbedarf in der Landwirtschaft sowie die Notwendigkeit, landwirtschaftliche Eingriffe präziser an Pflanzenbestand und Standortbedingungen anzupassen. Vor diesem Hintergrund verfolgt LALWeco das Ziel, ein autonom arbeitendes System zur selektiven, minimalinvasiven Regulierung von Beikräutern zu entwickeln. Dieses kombiniert eine laserbasierte Behandlung mit sensor- und KI-gestützter Feldwahrnehmung. (Digital GreenTech 2026e; DFKI 2026)

Bei der vom Deutschen Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz (DFKI) koordinierten Neuentwicklung wurde der autonom navigierende Feldroboter *Lero* des Startups *Nature Robots* mit einer modularen Lasereinheit vom Laser-Zentrum-Hannover (LZH) zur Beikrautregulierung kombiniert. Das System fährt autonom durch Beetreihen, erfasst Kulturpflanzen und Beikräuter während der Fahrt und reguliert mittels Laser die Beikräuter im Pflanzenbestand. Die Identifikation der Zielpflanzen erfolgt auf Basis von hochauflösenden 2D-Kamera- und 3D-LiDAR-Daten, die für die 3D-Kartierung, Segmentierung und Analyse genutzt werden. Parallel zur Beikrauterkennung ist ein Langzeitmonitoring der Kulturpflanzen vorgesehen, sodass neben einer punktgenauen Behandlung auch eine fortlaufende Datenerfassung über die Pflanzenentwicklung und den Bestandszustand möglich wird. Die Auswertung dieser Sensordaten erfolgt mithilfe von KI-Perzeptionsverfahren. Das technische Konzept verbindet somit Sensorik, autonome Navigation, rechnergestützte Bild- und Umgebungsanalyse sowie eine physikalische Form der Einzelpflanzenbehandlung in einem integrierten System. (Digital GreenTech 2026e; DFKI 2026)

Die wesentlichen Nachhaltigkeitsaspekte des Vorhabens liegen in der Reduzierung des Aufwands für die mechanische Bodenbearbeitung und in der Reduzierung der Bodenverdichtung (v.a. durch Traktoren) und der Vermeidung von CO_2-Freisetzungen aus gestörten Böden. Hinzu kommt das Potenzial, Arbeitsprozesse in arbeitsintensiven Kulturen zu automatisieren und somit die betriebliche Umsetzung einer nicht-chemischen Beikrautregulierung zu verbessern. Insgesamt ist LALWeco somit im Kontext einer präzisionsorientierten Landwirtschaft zu verorten. (Digital GreenTech 2026e; Digital GreenTech 2026f; DFKI 2026)

5.5.2 Methodische Vorgehensweise, grundlegende Annahmen und Ergebnisse der Selbstevaluierung

Im Rahmen der Selbstevaluierung wurde seitens des LALWeco-Projekts sowohl die mit der Digitaltechnik verbundenen Aufwendungen als auch die dadurch ermöglichten Treibhausgasminderungen berücksichtigt. Die Aufwendungen entstehen hauptsächlich durch die Herstellung des Roboterchassis, der elektronischen Komponenten und der Energiespeicher sowie durch den laufenden Strombedarf für den Betrieb und das Laden der Batterien. Dem stehen Einsparungen gegenüber, die sich auf drei Effektebenen ergeben: durch den Ersatz traktorbasierter Bodenbearbeitung, durch die Unterstützung von Direktsaatverfahren und durch geringere Lachgasemissionen infolge reduzierter Bodenverdichtung.

Die jährlichen Aufwendungen des Roboters setzen sich zunächst aus den verwendeten Werkstoffen sowie den benötigten Elektronik-Komponenten zusammen. Für die Herstellung der Werkstoffe (v.a. Stahl und Aluminium) wird ein jährlicher Carbon Footprint von rund 194 kg CO_2e angesetzt. Hinzu kommen rund 116 kg CO_2e pro Jahr für Elektronik, Sensorik, Solarmodule sowie die verwendeten Lithium-Eisenphosphat-Batterien. Zusammen ergibt sich damit für Materialien und digitale Komponenten ein jährlicher Sockel von etwa 310 kg CO_2e. (DGT Konferenz 2025)

Zusätzlich fallen Treibhausgasemissionen aus dem laufenden Betrieb an. Der Strombedarf für Laser, Recheneinheit und Traktion wurde mit etwa 5.000 kWh pro Jahr abgeschätzt. Da zur Ladung der Batterien ergänzend zu dem auf dem Roboter installierten Solarmodul auch elektrischer Strom aus dem Netz erforderlich ist, hängt die Höhe der betrieblichen Emissionen stark von der Herkunft des eingesetzten Stroms ab. Bei Strom aus dem allgemeinen Netz werden für den Elektrizitätsbedarf rund 2.440 kg CO_2e pro Jahr veranschlagt. Zusammen mit den material- und komponentenbezogenen Emissionen ergibt sich damit ein jährlicher CO_2-Fußabdruck von etwa 2.750 kg CO_2e bei allgemeinem Strommix bzw. rund 370 kg CO_2e bei Versorgung durch Solarstrom oder Offshore-Windstrom. Bezogen auf eine jährliche Betriebsfläche von 800 ha entspricht dies rund 3,44 kg CO_2e/ha im Fall des allgemeinen Strommixes sowie etwa 0,46 kg CO_2e/ha bei Solar- oder Offshore-Windstrom; der Mittelwert zwischen dem niedrigsten und höchsten Ansatz liegt bei 1,95 kg CO_2e/ha. (DGT Konferenz 2025)

Diesen Aufwendungen stehen Treibhausgasminderungen auf den o.g. drei Effektebenen gegenüber. Auf der ersten Effektebene werden Emissionen aus der klassischen Bodenbearbeitung mit dem Traktor vermieden. Für die konventionelle Bearbeitung werden 7 Liter Dieselkraftstoff pro Hektar und ein Emissionsfaktor von 3,29 kg CO_2e/L angesetzt; für die Bilanzierung wird ein Einsparwert von 138 kg CO_2e/ha/a verwendet. Bei einer jährlichen Bewirtschaftungsfläche von 133 ha pro Roboter ergeben sich daraus Einsparungen von rund 19 t CO_2e pro Roboter und Jahr.

Diese erste Ebene beschreibt somit die direkte Substitution eines fossil betriebenen Arbeitsgangs durch ein elektrifiziertes, autonomes System. (DGT Konferenz 2025)

Die zweite Effektebene betrifft den Beitrag des Roboters zu No-till-Verfahren. Aufgrund seines kompakten Aufbaus und der Möglichkeit, Beikrautregulierung ohne flächige Bodenbearbeitung durchzuführen, kann der mit einem Laser-Weeding-Modul ausgestattete Roboter *Lero* Beikräuter nicht-invasiv entfernen. Für diesen Effekt wird ein Einsparpotenzial von 1,925 t CO_2e/ha angesetzt. Bei einer von einem Roboter bearbeiteten Fläche von 133 ha pro Jahr resultieren daraus Einsparungen von etwa 256 t CO_2e pro Roboter und Jahr. Diese Wirkung geht deutlich über die Einsparung von Kraftstoff hinaus, da sie mit einer veränderten Form der Bewirtschaftung verbunden ist. (DGT Konferenz 2025)

Die dritte Effektebene bezieht sich auf verringerte Lachgasemissionen infolge geringerer Bodenverdichtung. Das vergleichsweise geringe Gewicht des Roboters reduziert die mechanische Belastung des Bodens gegenüber konventionellen Maschinen. Für unverdichtete Böden werden 7 kg N_2O-N/ha/Jahr, für verdichtete Böden 15 kg N_2O-N/ha/Jahr angesetzt; daraus ergibt sich eine Differenz von 8 kg N_2O-N/ha/Jahr. Unter Verwendung des vorgegebenen Umrechnungsansatzes wird daraus ein Minderungspotenzial von 2,384 t CO_2e/ha/Jahr abgeleitet. Bezogen auf 133 ha pro Jahr ergeben sich damit Einsparungen von rund 317 t CO_2e pro Roboter und Jahr. (DGT Konferenz 2025)

Insgesamt ergeben sich damit Einsparungen von rund 592 t CO_2e pro Roboter und Jahr. Dem stehen, je nach Stromquelle, jährliche Aufwendungen von 0,364 bis 2,752 t CO_2e gegenüber. Die Nettoeinsparung bleibt damit in allen betrachteten Stromszenarien deutlich positiv. (DGT Konferenz 2025)

5.5.3 Diskussion und Schlussfolgerungen

Aus den vorliegenden Analyseergebnissen der Selbstevaluierung lässt sich schlussfolgern, dass die Klimabilanz des selbstfahrenden LALWeco-Roboters *Lero* insgesamt sehr deutlich positiv ausfällt, die tatsächliche Höhe der Treibhausgasminderung jedoch in starkem Maß von den Randbedingungen des Betriebs abhängt. Besonders hervorzuheben ist, dass die Aufwendungen der Digitaltechnik im engeren Sinne – also Materialien, Elektronik, Sensorik und Batteriesysteme – im Verhältnis zu den erzielbaren Einsparungen vergleichsweise gering bleiben. Der zentrale Einflussfaktor auf die verbleibenden Emissionen ist vielmehr die Strombereitstellung für die Batterieladung. Daraus ergibt sich zugleich das wichtigste Optimierungspotenzial des Systems.

Für die Weiterentwicklung des Roboters ist daher die Dekarbonisierung der Energieversorgung von vorrangiger Bedeutung. Der wirksamste Hebel besteht darin, den Ladebetrieb vollständig auf

erneuerbare Stromquellen umzustellen. Bereits die Nutzung von Solar- oder Windstrom reduziert den klimabezogenen Fußabdruck des Roboters gegenüber einem allgemeinen Strommix um mehr als 80 %. Ergänzend dazu erscheint eine technische Optimierung der bordseitigen Photovoltaik sinnvoll, etwa durch größere oder effizientere Solarmodule, um den externen Ladebedarf weiter zu senken. Für den Langzeitbetrieb bedeutet dies, dass nicht in erster Linie zusätzliche Materialeinsparungen, sondern vor allem eine möglichst emissionsarme und robuste Energieversorgung über die ökologische Leistungsfähigkeit des Systems entscheidet.

Ein zweites Optimierungspotenzial liegt in der systemischen Einbettung des Roboters in bodenschonende Bewirtschaftungsverfahren. Die größten Treibhausgaseffekte ergeben sich nicht aus der Einsparung beim Betrieb von Traktoren, sondern aus den indirekten Wirkungen durch die Unterstützung des No-till-Verfahrens, geringere Bodenverdichtung und damit verbundene Minderungen von Lachgasemissionen. Die maßgeblichen Treibhausgas-Einsparungen hängen nicht zuletzt von der ökonomischen Skalierung und der Anzahl der real im Feld agierenden Roboter ab.

5.6 Methodische Erkenntnisse aus der Toolanwendung

Die Ergebnisse der Pilotanwendungen zeigen, dass intuitive Einschätzungen zu den Nachhaltigkeitsaspekten digitaler Technologien nicht ausreichen. Gerade im Bereich der Digitaltechnik und der Künstlichen Intelligenz besteht oftmals die Annahme, dass eine effiziente Steuerung, datenbasierte Optimierung oder automatisierte Prozessführung in den jeweiligen Zielanwendungen automatisch zu ökologischen Vorteilen führt. Die vorliegendem Selbstevaluierungen zeigen jedoch deutlich, dass eine belastbare Einordnung erst durch eine systematische Analyse möglich wird, in der der Aufwand für Herstellung und Nutzung der verwendeten Digitaltechnik sowie potenzielle Einsparungen strukturiert gegenübergestellt werden. Ohne eine solche differenzierte Betrachtung sind keine fundierten Aussagen darüber möglich, ob eine digitale Lösung tatsächlich zu einem Netto-Nachhaltigkeitsgewinn führt oder ob die Aufwendungen aus den verwendeten Werkstoffen bzw. Energiebedarf und Datenverarbeitung die erwarteten Vorteile teilweise oder vollständig aufzehren.

Zugleich demonstrieren die Pilotanwendungen des Analysetools, dass eine Selbstevaluierung in der Regel anspruchsvoll ist. So müssen bei der Bilanzierung zahlreiche Einzelaspekte geklärt werden, z.B. der Herstellungsaufwand der Hardware, der Stromverbrauch in der Nutzungsphase, sowie die Frage, welche Einsparungen im jeweiligen Anwendungskontext tatsächlich zurechenbar sind. Hinzu kommen Anforderungen an die Festlegung geeigneter Systemgrenzen, an die Modellierung von Referenz- und Digitalisierungsszenarien sowie an den Umgang mit unsicheren oder nur eingeschränkt verfügbaren Daten. Die Pilotanwendungen bestätigen somit, dass entwicklungs-

begleitende Nachhaltigkeitsbewertungen zwar möglich und sinnvoll sind, jedoch eine methodisch strukturierte Vorgehensweise sowie geeignete Hilfsmittel und Unterstützungsangebote voraussetzen.

Ein zentrales Ergebnis der Toolanwendung besteht darin, dass das entwickelte Analyseinstrument die Komplexität in einer Form aufbereitet, die von den Anwender*innen grundsätzlich als niederschwellig und benutzerfreundlich eingeschätzt wird. In dem Feedback aus den Verbundprojekten wurde insbesondere hervorgehoben, dass das Analysetool auch ohne vertiefte Vorkenntnisse im Bereich der Lebenszyklusanalyse eine erste strukturierte Bewertung ermöglicht. Positiv bewertet wurden dabei vor allem die klare Eingabelogik, der schrittweise Arbeitsablauf und die Möglichkeit, Aufwendungen und Einsparungen sowohl für den CO_2-Fußabdruck als auch für lebenszyklusbezogene Kosten integriert zu betrachten. Diese Rückmeldung ist sowohl aus wissenschaftlicher als auch aus praktischer Sicht insofern wertvoll, da sie zeigt, dass auch methodisch anspruchsvolle Nachhaltigkeitsbewertungen mit geeigneten Werkzeugen zugänglich gemacht werden können.

Daraus resultiert ein beträchtliches Potenzial des Analysetools für frühe Entwicklungsphasen von F&E-Projekten. Gerade dort, wo technologische Auslegungen, Anwendungskontexte und Einsparpotenziale noch nicht abschließend feststehen, kann das Instrument dazu beitragen, Umweltwirkungen und Kosten systematisch einzuordnen. Es bietet somit nicht nur Unterstützung bei der nachträglichen Bewertung bereits abgeschlossener Neuentwicklungen, sondern insbesondere auch bei wesentlichen Entwicklungsentscheidungen während des Innovationprozesses. Dies entspricht der grundlegenden Zielsetzung des Tools, Aufwendungen, Einsparungen, Varianten und Amortisationsbedingungen frühzeitig sichtbar und damit relevante Zielkonflikte transparent zu machen.

Die Rückmeldungen aus der Erprobung verdeutlichen gleichzeitig aber auch, an welchen Stellen Weiterentwicklungsbedarf bestand bzw. noch besteht. Ein besonders relevantes Feedback in diesem Zusammenhang bezieht sich auf die Möglichkeit, unterschiedliche Varianten der Neuentwicklung systematisch abzubilden und miteinander vergleichen zu können. Diese Anforderung wurde im Zuge der Überarbeitung des Tools mit der Funktion des Variantenvergleichs bzw. der Szenarienbildung bereits aufgegriffen. Damit können unterschiedliche technische Auslegungen sowie Best-Case- und Worst-Case-Konstellationen strukturiert gegenübergestellt werden.

Weitere Hinweise aus der Anwendungspraxis betreffen eine noch bessere Benutzerführung innerhalb der Oberfläche sowie die kontinuierliche Pflege und Erweiterung der hinterlegten Datenbank. Insbesondere mit Blick auf die Eingabe von Annahmen, die Definition von Systemgrenzen und die Interpretation der Ergebnisse kann eine stärker geführte Anwendung die

Qualität und Konsistenz der Selbstevaluierungen weiter verbessern. Die Datenbasis wurde zwar insgesamt positiv bewertet, aber gleichzeitig als Bereich benannt, in dem eine Erweiterung sinnvoll erscheint. Diese Punkte verweisen auf verbleibenden Forschungs- und Entwicklungsbedarf, der in Kap. 7.3 nochmals aufgegriffen wird und auch bei der Konzeptionierung der vorgeschlagenen Nachhaltigkeits-Beratungsstelle entsprechend berücksichtigt wurde (vgl. Kap 6).

6 Konzeptionierung einer Nachhaltigkeits-Beratungsstelle

In den vergangenen Jahren wurden wichtige Grundlagen für eine entwicklungsbegleitende Nachhaltigkeitsbewertung von F&E-Verbundprojekten geschaffen. Dazu zählen Analyseinstrumente wie Tools zur Ermittlung des CO_2-Fußabdrucks, Leitfäden und punktuelle Beratungssprechstunden. In der Praxis zeigt sich jedoch eine zentrale Schwachstelle: Die bloße Bereitstellung von Tools und Instrumenten reicht nicht aus, um deren sachgerechte und kontinuierliche Anwendung in F&E-Projekten sicherzustellen. Projektteams sehen sich bei der Nutzung der Tools regelmäßig mit methodischen Herausforderungen konfrontiert. Beispiele hierfür sind die Festlegung von Systemgrenzen, die Modellierung komplexer Innovationsobjekte oder das Schließen von Datenlücken. Ad-hoc-Sprechstunden können hier nur punktuell Abhilfe schaffen. Was fehlt, ist eine kontinuierliche, kompetente Begleitung. Diese sollte Projektteams nicht nur beim Einstieg in eine Selbstevaluierung unterstützen, sondern sie über die gesamte Projektlaufzeit methodisch begleiten, ihre Zwischenergebnisse einordnen und den Wissenstransfer zwischen den Verbundprojekten systematisch fördern.

Vor diesem Hintergrund wird die Einrichtung einer Nachhaltigkeits-Beratungsstelle vorgeschlagen. Diese soll als Kompetenzzentrum öffentlich geförderte F&E-Verbundprojekten bei einer entwicklungsbegleitenden Nachhaltigkeitsbewertung systematisch begleiten und die jeweiligen Projektteams befähigen und unterstützen, die Nachhaltigkeitswirkungen ihrer Innovationen möglichst eigenständig erkennen, bewerten und dokumentieren zu können.

Im Zusammenhang mit der Ausgestaltung einer solchen Beratungsstelle ergeben sich eine Reihe konzeptioneller Fragen, die vor einer Implementierung geklärt werden müssen:

- Welches Leistungsspektrum sollte eine solche Beratungsstelle abdecken – und wo sind ihre Grenzen?
- Welche Expertise braucht ein belastbares Beratungsteam?
- Wie lässt sich das Angebot so institutionell verankern, dass Unabhängigkeit und Glaubwürdigkeit gewahrt bleiben?

In Anlage I werden diese Klärungsbedarfe aufgegriffen und ein konkretes Konzept für eine Nachhaltigkeits-Beratungsstelle entwickelt.

7 Schlussfolgerungen und Ausblick

7.1 Stärken und Grenzen des entwickelten Tools

Das entwickelte Analysetool wurde konzipiert, um Akteur*innen in F&E-Projekten eine niedrigschwellige, strukturierte und zugleich weitgehend quantitative Selbstevaluierung von Nachhaltigkeitsaspekten digitaler Technologien zu ermöglichen. Es dient insbesondere dazu, die zusätzlichen Aufwendungen einer digitalen Neuentwicklung sowie die potenziellen Einsparungen in den vorgesehenen Zielanwendungen systematisch zu erfassen und hinsichtlich des CO_2-Fußabdrucks und der Kosten einander gegenüberzustellen. Aus seiner Konzeption ergeben sich sowohl Stärken als auch methodisch bedingte Grenzen, die bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen sind.

Eine zentrale Stärke des Tools ist die integrierte Betrachtung von CO_2-Fußabdruck und Kosten. Dadurch können ökologische und ökonomische Aspekte innerhalb eines gemeinsamen Bilanzierungsrahmens parallel erfasst werden. Dies ist für F&E-Projekte von besonderer Relevanz, da Entscheidungen über die Ausgestaltung digitaler Technologien in der Praxis selten ausschließlich anhand von Umweltwirkungen getroffen werden, sondern regelmäßig auch Investitions- und Betriebskosten eine wichtige Rolle spielen. Die parallele Betrachtung beider Dimensionen ermöglicht es, ggf. existierende Zielkonflikte frühzeitig sichtbar zu machen und Varianten nicht nur hinsichtlich ihrer Emissionswirkungen, sondern auch mit Blick auf ihre wirtschaftliche Tragfähigkeit zu bewerten.

Ein weiterer Vorteil des Analysetools ist seine datenbankgestützte Funktionsweise, die zugleich für projektspezifische Ergänzungen offen ist. Durch die Einbindung der Datensätze aus der Idemat-Datenbank wird die Bilanzierung deutlich erleichtert, da Anwender*innen für viele relevante Produkte, Prozesse, Energieträger oder Emissionen auf bereits verfügbare Daten zurückgreifen können. Dies reduziert den Rechercheaufwand erheblich und sorgt für eine einheitlichere Datengrundlage. Gleichzeitig ist die Dateneingabe im Analysetool flexibel gestaltet, sodass diese durch individuelle, projektbezogene Datensätze ergänzt werden kann. Diese Offenheit ist besonders wichtig, da innovative digitale Technologien häufig Komponenten oder Systeme verwenden, die in allgemeinen Datenbanken nicht oder nicht spezifisch genug abgebildet sind.

Darüber hinaus liegt eine Stärke des Tools in seiner Eignung für die entwicklungsbegleitende Anwendung. Es unterstützt keine vollständige Ökobilanz, sondern eine strukturierte Abschätzung, die bereits in frühen Phasen eines Entwicklungsprozesses eingesetzt werden kann. Gerade in dieser Phase sind die Gestaltungsspielräume besonders groß, während die Datenlage zugleich noch begrenzt ist. Das Tool ermöglicht unter diesen Bedingungen eine erste Quantifizierung von Aufwendungen und Einsparungen. Dadurch kann es dazu beitragen, potenzielle Belastungs-

schwerpunkte, aber auch mögliche Einsparpotenziale frühzeitig zu erkennen und relevante Optimierungsansätze herauszuarbeiten.

Trotz dieser Stärken sind bei der Anwendung des Tools auch Grenzen und Einschränkungen zu berücksichtigen. Eine wesentliche Einschränkung betrifft beispielsweise die Auswahl geeigneter Datensätze. Zwar erleichtert die hinterlegte Datenbank die Bilanzierung erheblich, doch setzt die sachgerechte Auswahl des jeweils passenden Datensatzes ausreichende physikalisch-chemische Kenntnisse und entsprechende Erfahrungen voraus. Dies gilt insbesondere dann, wenn mehrere ähnliche Datensätze zur Auswahl stehen, die Systemgrenzen nicht unmittelbar vergleichbar sind oder unklar ist, welcher Datensatz eine bestimmte Komponente oder einen konkreten Prozess am besten repräsentiert.

Hinzu kommen grundlegende methodische Schwierigkeiten bei der Nachhaltigkeitsbewertung, die durch das Tool nicht aufgelöst werden können. Dazu zählen insbesondere Fragen der Allokation, also der verursachungsgerechten Zuordnung von Umweltwirkungen auf verschiedene Kuppelprodukte. Solche methodischen Entscheidungen sind in der Ökobilanz-Methodik grundsätzlich anspruchsvoll und können die Ergebnisse erheblich beeinflussen. Ähnliches gilt für die Festlegung von Systemgrenzen und die Modellierung indirekter Einsparpotenziale.

Eine weitere wichtige Limitierung besteht darin, dass das Analysetool keine exakte Berechnung im Sinne einer vollumfänglich belastbaren wissenschaftlichen Analyse liefert, sondern eine orientierende Abschätzung für interne Zwecke darstellt. Die Ergebnisse sind folglich als indikative Werte zu verstehen, die im jeweiligen Projektkontext auf Plausibilität geprüft und durch vertiefende Analysen, ggf. mit externer Unterstützung, verifiziert werden sollten.

Die mit dem Analysetool erzeugten Ergebnisse sind daher nicht ohne Weiteres für eine externe Kommunikation geeignet, insbesondere dann nicht, wenn vergleichende Aussagen getroffen werden sollen. Vor einer externen Veröffentlichung oder Nutzung zu Kommunikationszwecken ist daher eine zusätzliche fachliche Validierung unbedingt erforderlich, z.B. durch Hinzuziehung einer externen, unabhängigen Partei im Sinne eines Critical Reviews (DIN EN ISO 14040). Nur so kann sichergestellt werden, dass die zugrunde liegenden Systemgrenzen, Annahmen und Datensätze angemessen geprüft wurden und die Ergebnisse in der erforderlichen Form abgesichert sind.

7.2 Einordnung der bei der Selbstevaluierung ermittelten Nachhaltigkeitsgewinne

In der Gesamtschau der in Kap. 5 dargestellten Selbstevaluierungen zeigt sich, dass die untersuchten digitalen Neuentwicklungen zwar überwiegend mit Nachhaltigkeitsgewinnen verbunden sein können, die Größenordnungen der Entlastungspotenziale jedoch deutlich variieren. Wie bereits in der ersten Förderphase von NetDGT wird auch diesmal deutlich, dass besonders

relevante Treibhausgasreduktionen vor allem dort zu erwarten sind, wo digitale Technologien nicht nur begrenzte Effizienzsteigerungen innerhalb bestehender Prozesse bewirken, sondern Veränderungen in materiell oder energetisch aufwändigen Anwendungssystemen ermöglichen (vgl. Möller et al. 2023). Dies betrifft insbesondere Applikationen, bei denen durch digitale Steuerung, Prozessoptimierung oder verbesserte Informationsverfügbarkeit der Energieverbrauch gesenkt, Betriebsmittel substituiert oder systemische Änderungen der Stoff- und Energieströme in der Zielanwendung herbeigeführt werden können. Gleichzeitig bestätigen die Ergebnisse, dass die ausgewiesenen Nachhaltigkeitsgewinne nicht als isolierte Eigenschaft der eingesetzten Digitaltechnik verstanden werden dürfen. Vielmehr entstehen relevante Entlastungspotenziale erst im Zusammenwirken von digitaler Lösung, Anwendungskontext und Skalierung der Neuentwicklung.

Ein besonders aussagekräftiges Beispiel hierfür ist das Projekt „DigiKompost”. Die Selbstevaluierung deutet darauf hin, dass die digitale Erfassung und Regelung zentraler Prozessparameter bei der Kompostierung erhebliche ökologische Vorteile erschließen kann, insbesondere wenn dadurch direkte Treibhausgasemissionen verringert werden. Der besondere Stellenwert des Projekts liegt darin, dass die digitale Lösung bei einer Zielanwendung mit hohem Treibhausgaspotenzial ansetzt. Bereits vergleichsweise geringe zusätzliche Aufwendungen für Sensorik, Machine Learning und Cloudnutzung können hier potenziell zu erheblichen Emissionsminderungen führen. So fällt im konkreten Beispiel das Entlastungspotenzial durch die eingesparten Methanemissionen um mindestens drei Zehnerpotenzen größer aus als die Aufwendungen für die eingesetzte Digitaltechnik. DigiKompost verweist somit auf ein Anwendungsfeld, in dem digitale Umwelttechnik eine besonders hohe Hebelwirkung entfalten kann.

Ein weiterer wichtiger Aspekt zeigt sich bei „iOLE“. Der Nutzen der digitalen Leckageerkennung besteht darin, dass Wasserverluste früher identifiziert und somit Aufwendungen für die Aufbereitung und Verteilung von Trinkwasser vermieden werden können. Hinzu kommt das Potenzial, zusätzliche Hardware-Sensorik einzusparen. Die Stärke dieses Ansatzes liegt darin, dass digitale Informationen hier unmittelbar in Ressourcenschonung überführt werden: Vermiedene Wasserverluste steigern dabei nicht nur den effizienten Einsatz der Rohstoffe selbst, sondern auch die mit Förderung, Aufbereitung und Verteilung verbundenen Energie- und Materialaufwände. iOLE verdeutlicht somit, dass digitale Lösungen insbesondere in langfristig ausgelegten Infrastrukturen zu relevanten Nachhaltigkeitsgewinnen führen können.

Beim Verbundprojekt „LALWeco“ zeigen sich darüber hinaus systemische Ansatzpunkte zur Erschließung von Nachhaltigkeitsgewinnen. Die Entlastungspotenziale liegen hierbei nicht nur in der Einsparung einzelner Betriebsstoffe (wie beispielsweise Dieselkraftstoff für Traktoren), sondern auch in der Möglichkeit, emissionsärmere und bodenschonendere Bewirtschaftungsformen in der Landwirtschaft zu unterstützen. Der Nachhaltigkeitsgewinn besteht somit v.a. in mittelbaren Effekten

wie einer geringeren Bodenverdichtung und den damit verbundenen Minderungen von Treibhausgasemissionen.

Insgesamt lässt sich damit aus den vorliegenden Ergebnissen der Selbstevaluierungen ableiten, dass besonders herausragende Entlastungspotenziale insbesondere dort auftreten, wo digitale Lösungen den Einsatz emissionsintensiver Betriebsmittel oder Materialien reduzieren, in großskaligen Infrastrukturen Effizienzgewinne erschließen oder systemische Veränderungen ermöglichen. Die Ergebnisse machen jedoch auch deutlich, dass die ermittelten Nachhaltigkeitsgewinne als orientierende Potenzialabschätzungen zu verstehen sind, deren tatsächliche Relevanz von der weiteren technischen Ausgestaltung, der Praxiseinführung und der späteren Marktdurchdringung der jeweiligen Lösungen abhängt. Auch wenn die untersuchten Projekte für sich genommen jeweils nur begrenzt zu den gesamtgesellschaftlich erforderlichen Emissionsminderungen beitragen können, zeigen sie doch, dass digitale Umwelttechnik in besonders geeigneten Anwendungsfeldern einen substanziellen Beitrag zur Transformation bestehender Systeme leisten kann.

7.3 Prioritärer Forschungs- und Handlungsbedarf

Mit dem entwickelten Analysetool steht ein praxiserprobtes Instrument zur Verfügung, das die entwicklungsbegleitende Selbstevaluierung von Nachhaltigkeitsaspekten digitaler Technologien in strukturierter Form unterstützt. Zugleich zeigen der erreichte Entwicklungsstand des Tools sowie die im praktischen Einsatz sichtbar gewordenen Stärken und Grenzen, dass weiterhin Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht, um das Instrument methodisch weiter abzusichern, seine Anwendbarkeit zu verbreitern und es für zusätzliche Nutzungskontexte zu erschließen.

Ein zentraler Weiterentwicklungsbedarf betrifft dabei die Qualitätssicherung bei der Modellierung der relevanten Nachhaltigkeitsaspekte und der Auswahl der hierfür erforderlichen Datensätze. Zwar erleichtert das Tool die Bilanzierung durch die Bereitstellung einer Datenbank, es setzt jedoch voraus, dass Anwender*innen den jeweils sachgerechten Datensatz auswählen und auf den konkreten Projektkontext übertragen können. In der Praxis erfordert dies oftmals Vorkenntnisse und Erfahrungswissen, insbesondere dann, wenn komplexe Technikobjekte und neuartige Nutzungskontexte modelliert werden sollen. Eine kontinuierliche Weiterentwicklung des Tools und flankierende Unterstützungsangebote sollten daher darauf ausgerichtet sein, die Nutzerführung weiter zu verbessern. Denkbar sind beispielsweise standardisierte Entscheidungsregeln zur Datensatzauswahl oder die in Kapitel 6 skizzierte Nachhaltigkeits-Beratungsstelle mit geeigneten Unterstützungsangeboten wie Helpdesk-Strukturen, Anwendungsleitfäden, Schulungen oder projektübergreifenden Austauschformaten.

Ein weiterer wesentlicher Entwicklungsbedarf besteht in der Fortschreibung der Datengrundlagen. Die Einbindung der Idemat-Datenbank bildet hierfür eine solide Ausgangsbasis, deckt jedoch nicht alle im Kontext digitaler Technologien relevanten Fragestellungen in ausreichender Tiefe ab. Insbesondere für spezifische Komponenten der Informations- und Kommunikationstechnik, für digitale Infrastrukturen, Rechenprozesse, Datenübertragung oder cloudbasierte Dienste besteht weiterhin Bedarf an spezifischen, konsistenten und praxistauglichen Datensätzen. Hier wäre sowohl eine Erweiterung der hinterlegten Datenbasis als auch eine systematische Verknüpfung mit weiteren geeigneten Datenquellen sinnvoll. Dabei stellt sich forschungsseitig die Frage, wie unterschiedliche Datenqualitäten, Systemgrenzen und methodische Konventionen so zusammengeführt werden können, dass sie in einem niedrigschwelligen Tool nutzbar und aktuell bleiben.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass mit dem entwickelten Analysetool ein wichtiger Schritt hin zu einer praktikablen, integrierten und entwicklungsbegleitenden Nachhaltigkeitsbewertung digitaler Technologien erreicht wurde. Der verbleibende Forschungs- und Entwicklungsbedarf liegt vor allem darin, die methodische Robustheit zu erhöhen, die Datengrundlage zu verbreitern, die Modellierung komplexer Systeme zu erleichtern, Unsicherheiten systematischer abzubilden und die Anschlussfähigkeit an externe Kommunikationsanforderungen zu verbessern. Vor diesem Hintergrund ist das Tool nicht als abgeschlossene Lösung zu verstehen, sondern vielmehr als Ausgangsbasis für eine weitere methodische und anwendungsbezogene Ausgestaltung.

Literaturverzeichnis

agents42watermarkets 2025: Ausgefülltes Analysetool zur Selbstevaluierung, Stand 25.08.2025

Daniel et al. 2022: Daniel, I., Pesantez, J., Letzgus, S., Khaksar Fasaee, M.A., Alghamdi, F., Berglund, E., Mahinthakumar, G., & Cominola, A., 2022. A sequential pressure-based algorithm for data-driven leakage identification and model-based localization in water distribution networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, *148*(6), p.04022025.

Daniel et al. 2024: Daniel, I., Steffelbauer, D., Steins, E., Schorr, J., Persigehl, S., Campbell, E., Koslowski, J., Kley-Holsteg, J., Lindemann, B., & Cominola, A., 2024. iOLE—Human-Centered Software Design for Leakage Detection in Water Distribution Networks. *Engineering Proceedings*, *69*(1), p.207.

DFKI 2026: LALWeco – Long-term Autonomous Laser Weed Control, online verfügbar unter: https://www.dfki.de/web/forschung/projekte-publikationen/projekt/lalweco (zuletzt abgerufen am 11.05.2026).

DGT Konferenz 2025: Digital GreenTech Konferenz 2025, Livestream Tag 1, online verfügbar unter: https://www.youtube.com/watch?v=DTYMs7Wdj0c (zuletzt abgerufen am 11.05.2026).

DigiKompost 2025: Präsentation des Abschlussworkshops zur Selbstevaluierung vom 25.08.2025.

Digital GreenTech 2026a: Auf dem Weg zu einer effizienten, bedarfsgerechten und robusten sozio-technischen Wassermarktwirtschaft, online verfügbar unter: https://digitalgreentech.de/projekte/detail/agents42watermarkets (abgerufen am 11.05.2026).

Digital GreenTech 2026b: Entwicklung und Erprobung eines dezentralen IoT-Sensorsystems zur KI-gestützten Steuerung von Kompostmieten zur Reduzierung der prozessbasierten Methan-Treibhausemissionen, online verfügbar unter: https://digitalgreentech.de/projekte/detail/digi-kompost (zuletzt abgerufen am 11.05.2026).

Digital GreenTech 2026c: DigiWaVe – Digitale Lösungen für eine ressourceneffiziente und sichere Wasserwiederverwendung im urbanen Raum, online verfügbar unter: https://digitalgreentech.de/projekte/detail/digiwave (zuletzt abgerufen am 11.05.2026).

Digital GreenTech 2026d: iOLE - Intelligente Online Leckage-Erkennung, online verfügbar unter: https://digitalgreentech.de/projekte/detail/iole (zuletzt abgerufen am 11.05.2026).

Digital GreenTech 2026e: LALWeco – Long-term Autonomous Laser Weed Control, online verfügbar unter: https://digitalgreentech.de/projekte/detail/lalweco (zuletzt abgerufen am 11.05.2026).

Digital GreenTech 2026f: Lass das mal die Roboter machen: nachhaltige Landwirtschaft mit Laser und KI, online verfügbar unter: https://digitalgreentech.de/magazin/nachhaltige-landwirtschaft-mit-laser-und-ki (zuletzt abgerufen am 11.05.2026).

DIN EN ISO 14040: Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14040:2006, Beuth Verlag.

Einstein Center Digital Future 2026: iOLE, online verfügbar unter: https://www.digital-future.berlin/forschung/projekte/iole/ (zuletzt abgerufen am 11.05.2026).

Fraunhofer IKTS 2026: Dezentrales IoT-Sensorsystem zur KI-gestützten Steuerung von Bio- und Grünabfallkompostieranlagen, online verfügbar unter: https://www.ikts.fraunhofer.de/de/abteilungen/umwelttechnik_verfahrenstechnik/kreislauftechnologien_und_wasser/biomassekonversion_naehrstoffrecycling/oeffentlich_gefoerderte_projekte/dezentrales_iot-sensorsystem_zur_ki-gestuetzten_steuerung_von_bio-und_gruenabfallkompostieranlagen.html (zuletzt abgerufen am 11.05.2026).

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 (zuletzt abgerufen am 11.05.2026).

Idemat 2026: Datenbank für Umwelt- und Materialinformationen. Delft University of Technology, online verfügbar unter: https://www.ecocostsvalue.com/EVR/download.html (zuletzt abgerufen am 11.05.2026).

KWB 2026: DigiWaVe, online verfügbar unter: https://www.kompetenz-wasser.de/de/forschung/projekte/digiwave (zuletzt abgerufen am 11.05.2026).

Möller et al 2023: Möller, M., Köhler, A., Liu, R., & Gröger, J., 2023. Entwicklungsbegleitende Nachhaltigkeitsanalysen im Querschnittsprojekt zur Fördermaßnahme „Digital GreenTech“. Abschlussbericht.

Steffelbauer et al. 2022: Steffelbauer, D.B., Deuerlein, J., Gilbert, D., Abraham, E., & Piller, O., 2022. Pressure-leak duality for leak detection and localization in water distribution systems. *Journal of Water Resources Planning and Management*, *148*(3), p.04021106.

Steins et al. 2026: Steins, E., Langer, N., Koslowski, J., & Cominola, A., 2026. From Theory to Practice: Robust and Automated Data-Driven Leakage Detection in Water Distribution Networks. *Journal of Water Resources Planning and Management*, *152*(7), p.06026001.

Technische Universität Darmstadt 2026: agents42watermarkets, online unter: https://www.fst.tu-darmstadt.de/forschung_fst/forschungsschwerpunkte_4/urbanisierung_und_infrastruktur/agents42wm.de.jsp (zuletzt abgerufen am 11.05.2026).

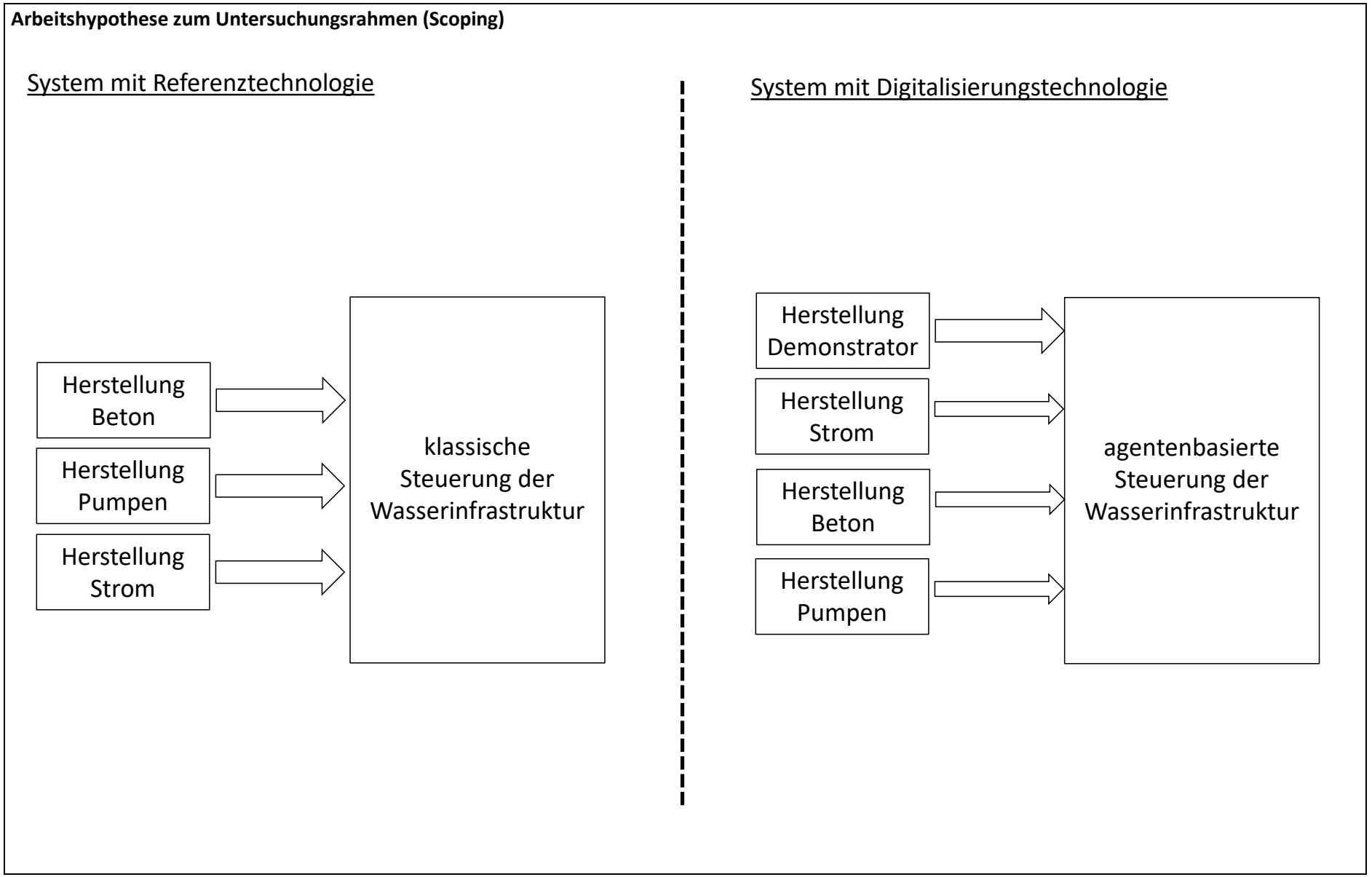
United Nations 2015: Transforming our world: the 2030 Agenda for sustainable development (Resolution A/RES/70/1 adopted by the General Assembly on 25 September 2015). United Nations. https://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/-docs/globalcompact/A_RES_70_1_E.pdf (zuletzt abgerufen am 11.05.2026).

Anhang: Dossiers der Ex-Ante-Analyse

1 agents42watermarkets

	Entlastungspotenziale			Belastungspotenziale		
	Effekt	**SDG-Bezug**	**Relevanz**	**Effekt**	**SDG-Bezug**	**Relevanz**
Effekte erster Ordnung				Rohstoffaufwand für die Digitalisierungstechnologien (v.a. für Herstellung Demonstrator) [1]	SDG 8.4, SDG 9.4, SDG 12.2	A
				Energieaufwand für die Digitalisierungstechnologien (v.a. Machine Learning, Betrieb Cloudserver) [1]	SDG 7.3	A
Effekte zweiter Ordnung	Effizientere Nutzung der Ressource Wasser [1]	SDG 6.4	A			
	geringerer Energieeinsatz zum Betrieb der Infrastruktur [1]	SDG 7.3	A			
	Downsizing der Wasserinfrastruktur und Reduzierung Materialeinsatz bei Neuerschließungen [1]	SDG 8.4	A			
Effekte dritter Ordnung	Beitrag zu resilienter Infrastruktur [1]	SDG 9.1, SDG 9.4	C			
	Beitrag zu sicheren und nachhaltigeren Städten [1]	SDG 11.6	C			

Arbeitshypothese zum Untersuchungsrahmen (Scoping)



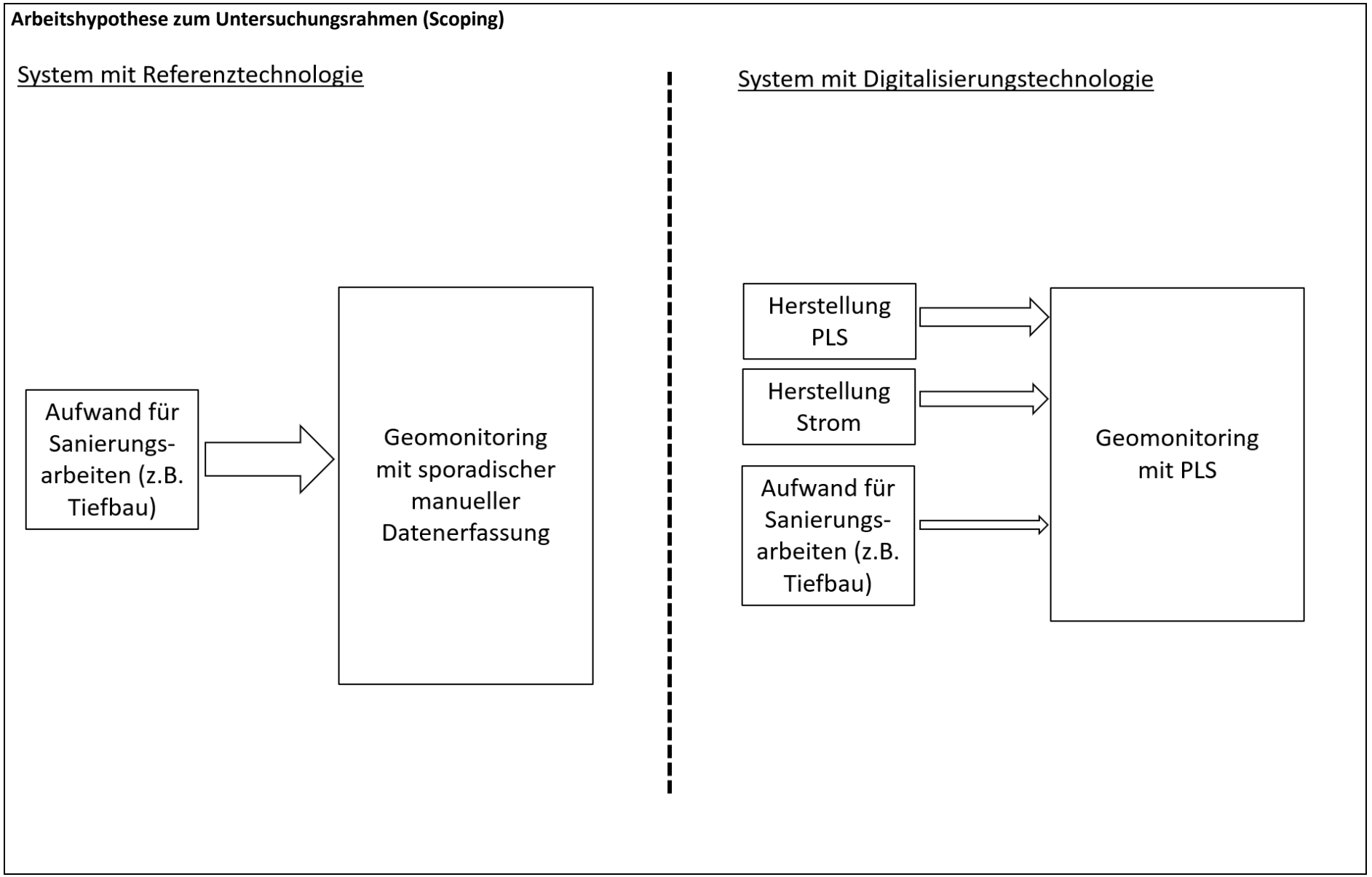
Definitionen / Referenzen:

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] Sonstiges (mittels Kommentar in der jeweiligen Zelle dokumentieren)

2 Almon5.0

	Entlastungspotenziale			Belastungspotenziale		
	Effekt	**SDG-Bezug**	**Relevanz**	**Effekt**	**SDG-Bezug**	**Relevanz**
Effekte erster Ordnung				Rohstoffaufwand für die Digitalisierungstechnologien (v.a. für Herstellung des permanenten Laserscanningsystems (PLS)) [2]	SDG 8.4, SDG 9.4, SDG 12.2	A
				Energieaufwand für die Digitalisierungstechnologien (v.a. Datentransfer, Betrieb Cloudserver) [2]	SDG 7.3	A
Effekte zweiter Ordnung	Effizienterer Ressourceneinsatz durch gezielte Sanierungsmaßnahmen bzw. Vermeidung von unnötigen Sanierungsmaßnahmen [1]	SDG 9.4, SDG 12.2	A			
	Vermeidung unnötiger Eingriffe in die Natur durch gezielte Sanierungsmaßnahmen [1]	SDG 15.1	A			
Effekte dritter Ordnung	Erhöhung von Lebensqualität und Sicherheit der betroffenen Bevölkerung und Infrastruktur durch eine frühzeitige Erkennung von gravitativen Massenbewegungen [1]	SDG 11.5	B			
	Steigerung der Resilienz von Verkehrswegen gegenüber Einflüssen des Klimawandels [1]	SDG 13.1	B			

Arbeitshypothese zum Untersuchungsrahmen (Scoping)



Klärungsbedarf

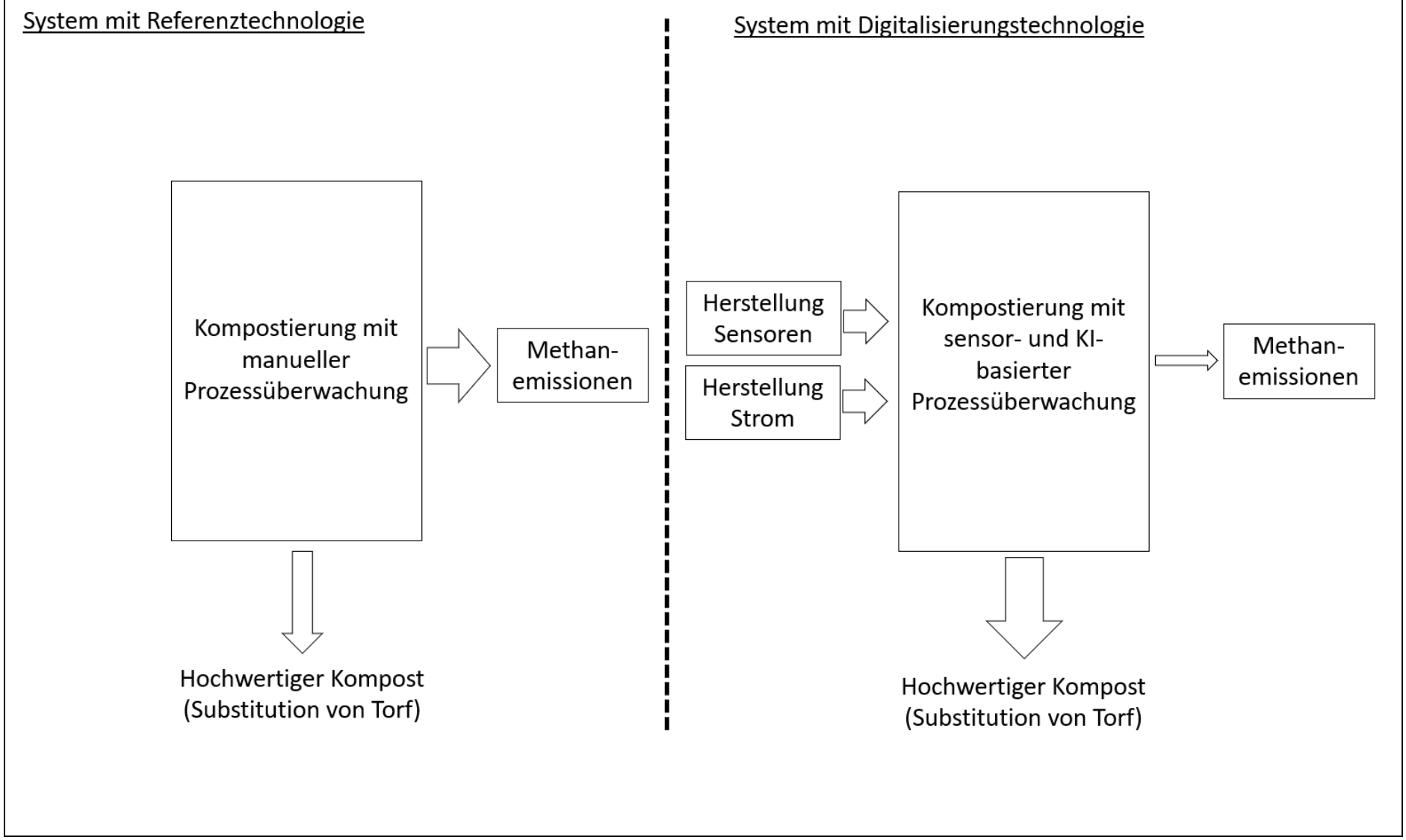
Definitionen / Referenzen:

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] Sonstiges (mittels Kommentar in der jeweiligen Zelle dokumentieren)

3 DigiKompost

	Entlastungspotenziale			Belastungspotenziale		
	Effekt	**SDG-Bezug**	**Relevanz**	**Effekt**	**SDG-Bezug**	**Relevanz**
Effekte erster Ordnung				Rohstoffaufwand für die Digitalisierungstechnologien (v.a. für Sensoren (digital vernetzten Einstechlanzen)) [2]	SDG 8.4, SDG 9.4, SDG 12.2	A
				Energieaufwand für die Digitalisierungstechnologien (v.a. Machine Learning; Betrieb Cloudserver) [2]	SDG 7.3	A
Effekte zweiter Ordnung	Reduzierung von THG-Emissionen (Methan) durch eine Überwachung von Leitparametern sowie Prognose des Rotteverlaufs [1]	SDG 12.4, SDG 13.2	A			
	Substitution von Torfen durch hochwertige Komposte [1]	SDG 12.2, SDG 12.5, SDG 15.1, SDG 15.5	A			
	Wegfall von entbehrlichen Kontroll-fahrten zu dezentralen Standorten dank Fernüberwachung [1]	SDG 13.2	A			
	Kosteneinsparung durch verringerten Energiebedarf [1]	SDG 7.3	B			
Effekte dritter Ordnung	Erhöhung der Produktqualität (RAL-zertifizierte Kompostprodukte) [1]	n.a.	C			
	Erweiterung der Inputstoffe erhöht die stoffliche Nutzung von organischen Reststoffen [1]	n.a.	C			
	optimierte Betriebsweise verringert Geruchsbelastungen [1]	n.a.	C			

Arbeitshypothese zum Untersuchungsrahmen (Scoping)



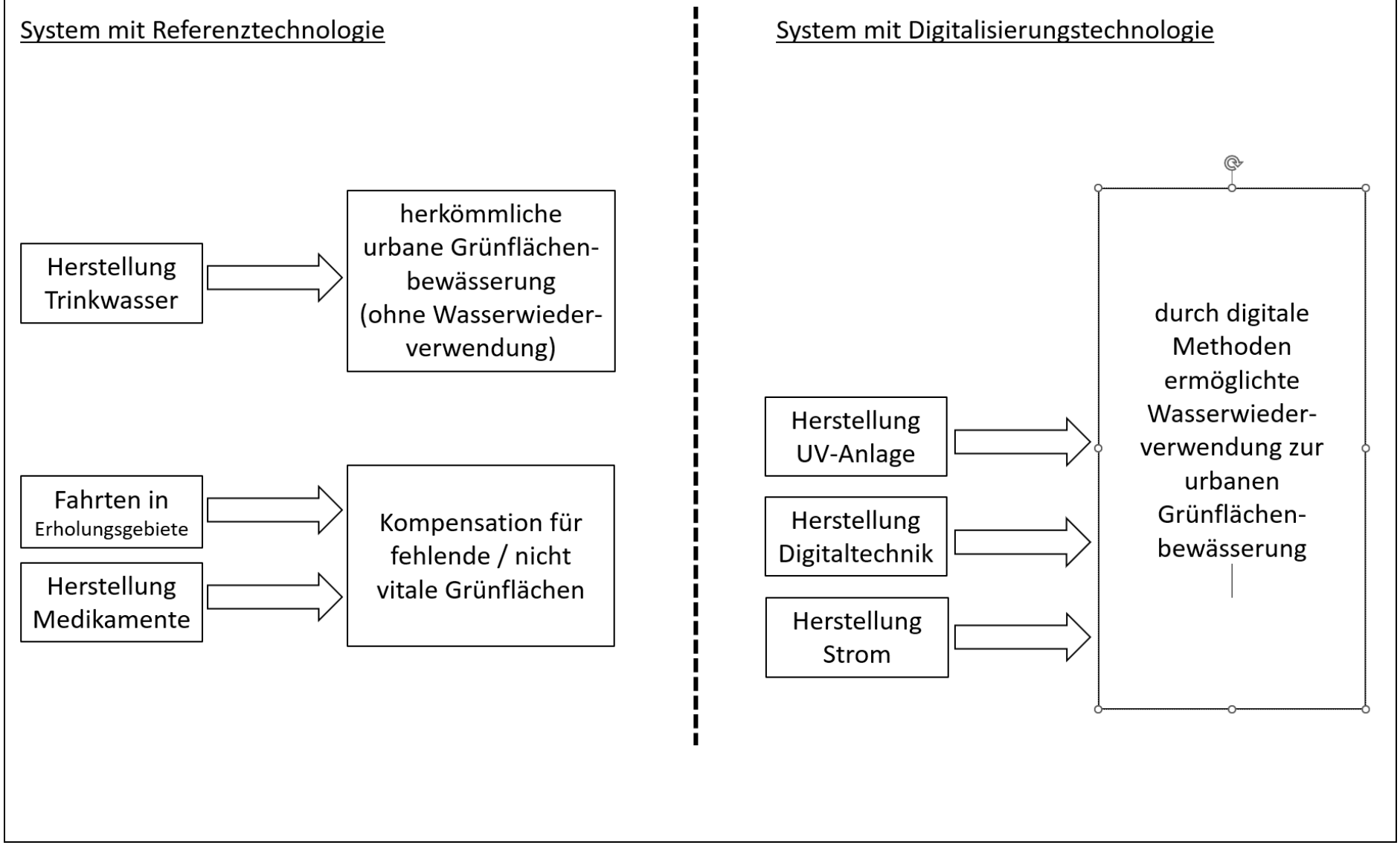
Definitionen / Referenzen:

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] Sonstiges (mittels Kommentar in der jeweiligen Zelle dokumentieren)

4 DigiWaVe

	Entlastungspotenziale			Belastungspotenziale		
	Effekt	**SDG-Bezug**	**Relevanz**	**Effekt**	**SDG-Bezug**	**Relevanz**
Effekte erster Ordnung				Rohstoffaufwand für die zusätzlich benötigten Technologiekomponenten (v.a. Herstellung UV-Desinfektionsanlage, Rechner) [1]	SDG 8.4, SDG 9.4, SDG 12.2	A
				Energieaufwand für UV-Anlage und Digitalisierungstechnologien (v.a. Machine Learning; Betrieb Cloudserver) [1]	SDG 7.3	A
Effekte zweiter Ordnung	Einsparung von Trinkwasser für die Grünflächenbewässerung durch Wasserwiederverwendung [2]	SDG 6.4, SDG 6.5	A			
Effekte dritter Ordnung	Einsparung von Fahrten in Erholungsgebieten durch vitale urbane Grünflächen [1]	SDG 3.9, SDG 11.7, SDG 13.2	B			
	Einsparung von Medikamentenkonsum durch vitale urbane Grünflächen [1]	SDG 3.4, SDG 11.7	C			
	Klimaresilientere Bewirtschaftung der lokalen Wasserressourcen durch Wasserwiederverwendung [1]	SDG 6.4, SDG 13.1	C			
	Urbane Grünflächenpflege zum Erhalt vitaler Grünflächen, welche stadtklimatisch positiv wirksam [1]	SDG 6.4, SDG 11.7	C			

Arbeitshypothese zum Untersuchungsrahmen (Scoping)



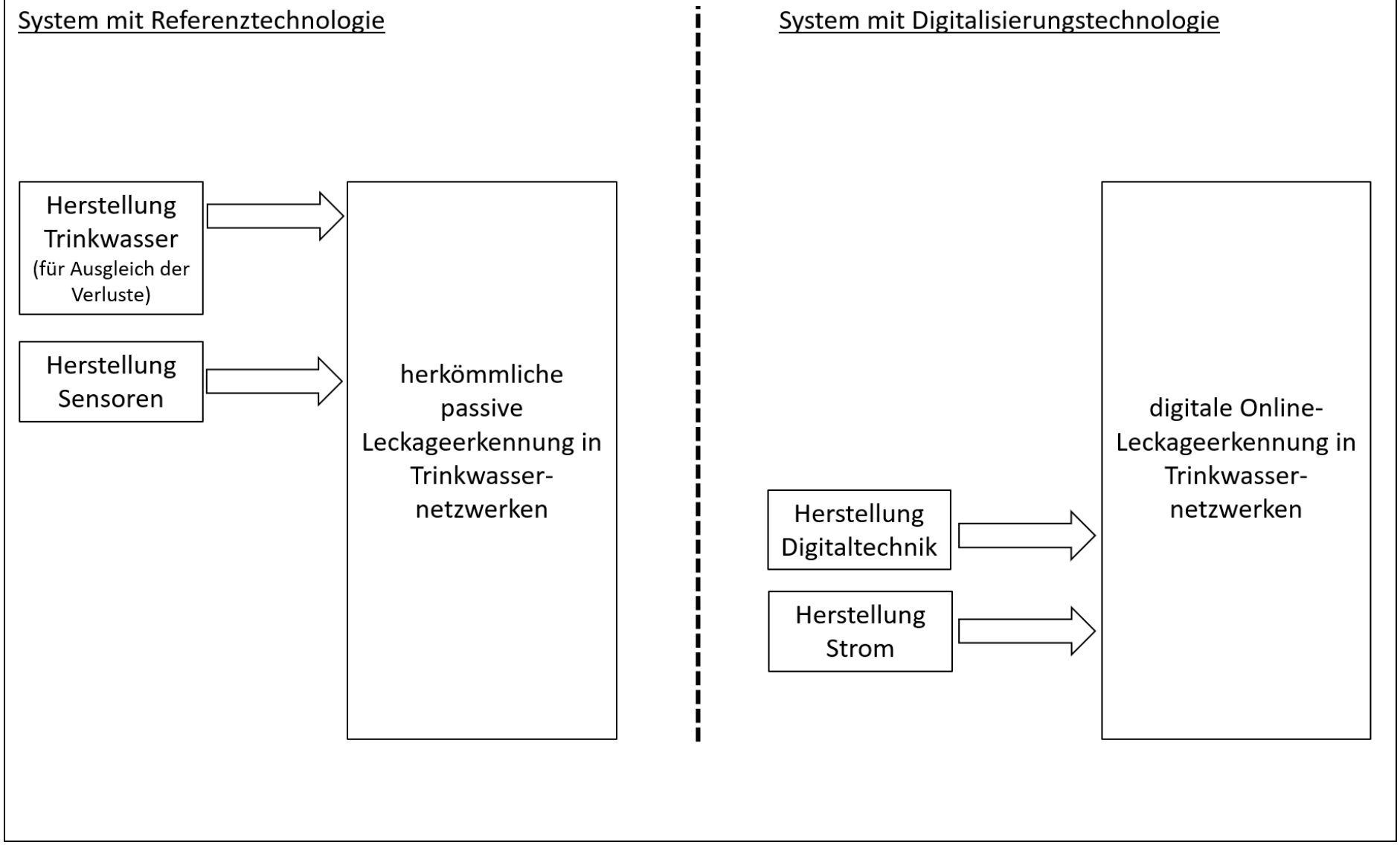
Definitionen / Referenzen:

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] Sonstiges (mittels Kommentar in der jeweiligen Zelle dokumentieren)

5 iOLE

	Entlastungspotenziale			Belastungspotenziale		
	Effekt	**SDG-Bezug**	**Relevanz**	**Effekt**	**SDG-Bezug**	**Relevanz**
Effekte erster Ordnung				Rohstoffaufwand für die Digitalgeräte (v.a. Rechner) [2]	SDG 8.4, SDG 9.4, SDG 12.2	A
				Energieaufwand für Training und Betrieb der Leckageerkennungs-algorithmen (v.a. Machine Learning; Betrieb Cloudserver) [2]	SDG 7.3	A
Effekte zweiter Ordnung	Einsparung von Trinkwasser durch die Verringerung von Wasserverlusten [1]	SDG 6.4, SDG 6.5	A			
	Einsparung von Hardware-Sensoren (Material und Kosten) durch den Einsatz digitaler Technologien [1]	SDG 8.4, SDG 9.4, SDG 12.2	B			
	Ressourceneinsparung bei der Ersetzung von Rohren durch die zeitige Detektion der Leckagen [1]	SDG 8.4, SDG 9.4, SDG 12.2	B			
Effekte dritter Ordnung	Resilientere Gestaltung der Wasserinfrastruktur durch Wasserverlustmanagement [1]	SDG 6.5, SDG 9.1, SDG 13.1	C			

Arbeitshypothese zum Untersuchungsrahmen (Scoping)



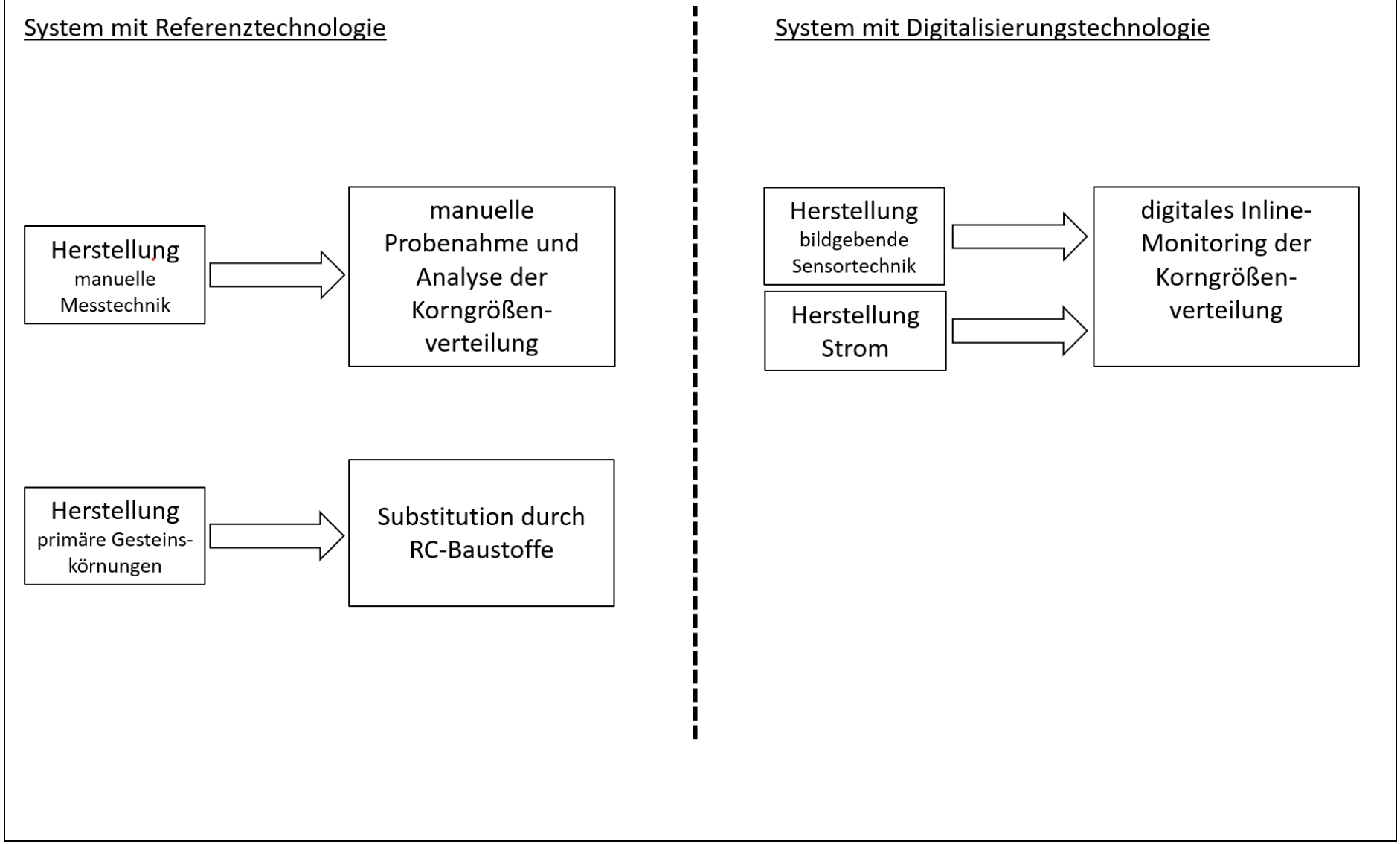
Definitionen / Referenzen:

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] Sonstiges (mittels Kommentar in der jeweiligen Zelle dokumentieren)

6 KIMBA

	Entlastungspotenziale			Belastungspotenziale		
	Effekt	**SDG-Bezug**	**Relevanz**	**Effekt**	**SDG-Bezug**	**Relevanz**
Effekte erster Ordnung				Rohstoffaufwand für die zusätzlich benötigten Technologiekomponenten (v.a. Herstellung bildgebender Sensortechnik) [2]	SDG 8.4, SDG 9.4, SDG 12.2	A
				Energieaufwand für UV-Anlage und Digitalisierungstechnologien (v.a. Entwicklung und Betrieb der Deep-Learning-Algorithmen; Betrieb Cloudserver) [2]	SDG 7.3	A
Effekte zweiter Ordnung	Substitution primärer Gesteinskörnung durch RC-Baustoffen in anspruchsvolleren Hochbauanwendungen (z.B. R-Beton) [1]	SDG 8.4, SDG 9.4, SDG 11.6, SDG 12.2, SDG 12.5, SDG 13.2	A			
Effekte dritter Ordnung	Steigerung der Akzeptanz von und Nachfrage nach RC-Baustoffen [1]	SDG 8.4, SDG 9.4, SDG 11.6, SDG 12.2, SDG 12.5, SDG 13.2	B			

Arbeitshypothese zum Untersuchungsrahmen (Scoping)



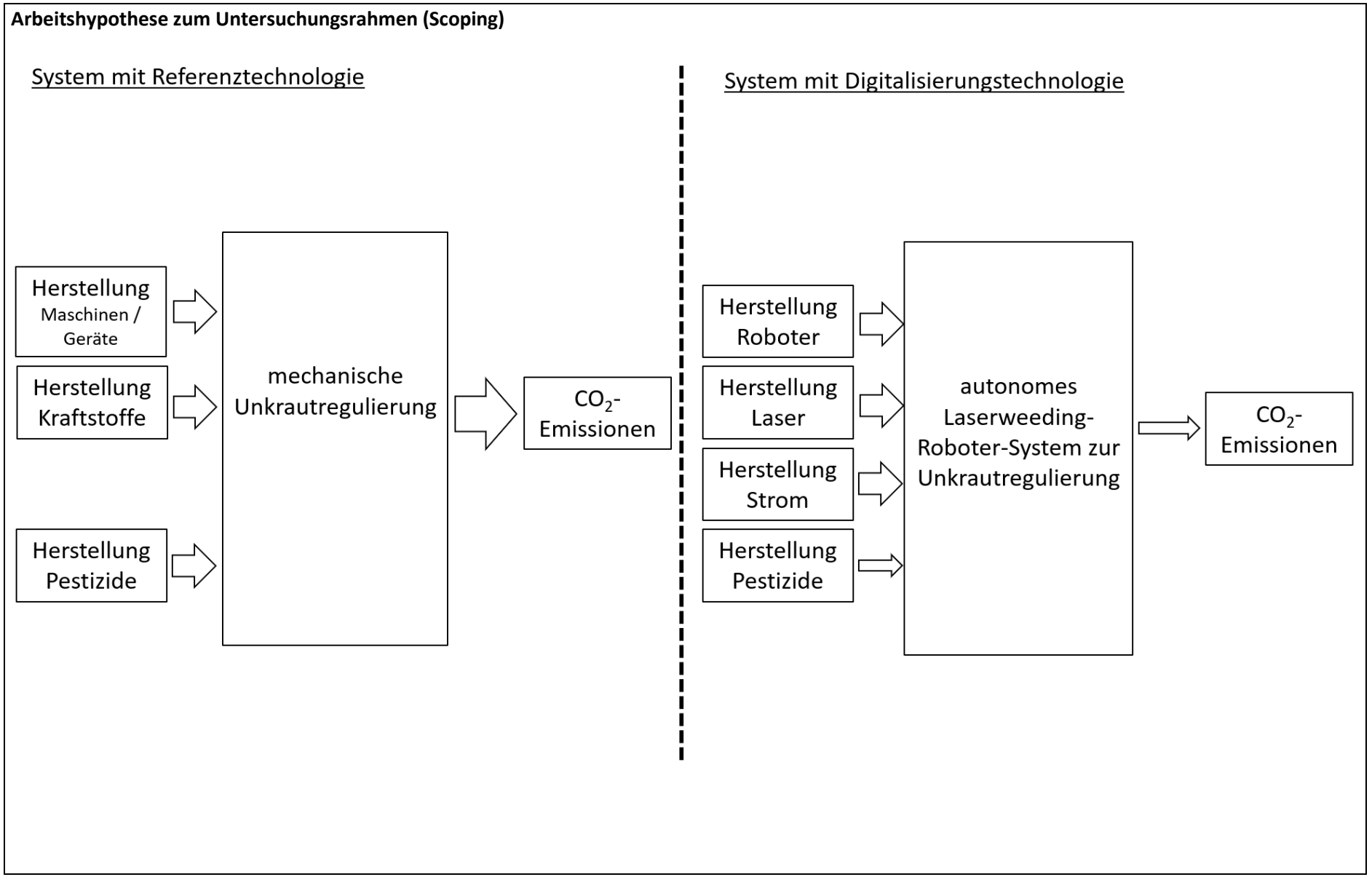
Definitionen / Referenzen:

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] Sonstiges (mittels Kommentar in der jeweiligen Zelle dokumentieren)

7 LALWeco

	Entlastungspotenziale			Belastungspotenziale		
	Effekt	**SDG-Bezug**	**Relevanz**	**Effekt**	**SDG-Bezug**	**Relevanz**
Effekte erster Ordnung				Rohstoffaufwand für die zusätzlich benötigten Technologiekomponenten (v.a. autonomer Roboter, Laser) [2]	SDG 8.4, SDG 9.4, SDG 12.2	A
				Energieaufwand für UV-Anlage und Digitalisierungstechnologien (v.a. Betrieb Roboter und Laser, Machine Learning, Betrieb Cloudserver) [2]	SDG 7.3	A
Effekte zweiter Ordnung	Vermeidung der CO_2-Freisetzung aus gestörten Böden [1]	SDG 13.2, SDG 15.5	A			
	Einsparung von Maschinen / Geräten für die mechanische Bodenbearbeitung (v.a. Traktoren) [1]	SDG 12.2, SDG 13.2	A			
	Reduzierung der Produktion und Nutzung von Pestiziden [1]	SDG 12.4, SDG 13.1	B			
	Kosteneinsparung durch Automatisierung der Bewirtschaftung (v.a. in der ökologischen Landwirtschaft) [1]	SDG 8.2, SDG 9.4	B			
Effekte dritter Ordnung	Erhöhung der Pflanzdichte und dadurch Reduzierung der Flächeninanspruchnahme [1]	SDG 2.4, SDG 15.1	B			
	Förderung von Humusaufbau und dadurch Verbesserung der Bodenqualität [1]	SDG 13.2, SDG 15.1	B			
	Steigerung der Resilienz des Gemüseanbaus [1]	SDG 2.4, SDG 13.1	C			
	Verringerung der Belastung von Böden und Grundwasser mit Pestiziden [1]	SDG 3.9, SDG 6.3 SDG 12.4	C			

Arbeitshypothese zum Untersuchungsrahmen (Scoping)



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] Sonstiges (mittels Kommentar in der jeweiligen Zelle dokumentieren)

Anlagen

Anlage I. Konzeptskizze für eine Nachhaltigkeits-Beratungsstelle (KOMPASS)

Anlage II. Selbstevaluierungstool (Version 1.2)

Anlage III. Tutorial für das Selbstevaluierungstool