

Intended for  
**Bundesnetzagentur**

Document type  
**Abschlussbericht**

Date  
**Februar 2023**

# **FORSCHUNGSVORHABEN INDIKATOREN NACHHALTIGKEIT**



**RAMBOLL**

Bright ideas. Sustainable change.

Confidential



**WIK**  
CONSULT

## **FORSCHUNGSVORHABEN INDIKATOREN NACHHALTIGKEIT**

Project name **Forschungsvorhaben "Identifizierung und Entwicklung von maßgeblichen Indikatoren zur Beurteilung der ökologischen Nachhaltigkeit von elektronischer Telekommunikationsinfrastruktur"**

Recipient **Bundesnetzagentur**

Document type **Abschlussbericht**

Date **20. Februar 2023**

Prepared by **Anja Kubeneck, Roman Kirchdorfer, Veronika Abraham (Ramboll)  
Matthias Wissner, Bernd Sörries (WIK Consult)**

Checked by **Veronika Abraham**

Approved by **Jens Haubensak**

Description **Abschlussbericht**

Ramboll Management  
Consulting  
Werinherstraße 79  
Gebäude 32a  
81541 München  
Germany

T +49 89 978970-100  
<https://de.ramboll.com>

Ramboll Management Consulting  
GmbH  
Jürgen-Töpfer-Straße 48  
22763 Hamburg  
Germany

District Court Hamburg,  
HRB 76096  
Managing Director:  
Markus Diederich

Confidential

BNP Paribas S.A. Branch Germany  
IBAN: DE11512106004223035017  
BIC: BNPADEFFXXX

## INHALT

<b>1.</b>	<b>Kurzfassung</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>Executive Summary</b>	<b>4</b>
<b>3.</b>	<b>Einleitung</b>	<b>7</b>
3.1	Kontext und Ziel	7
3.2	Vorgehensweise	7
3.3	Politische und regulatorische Hintergründe der Nachhaltigkeitsbewertung in der Telekommunikation	8
3.4	Methodische Hintergründe zur Nachhaltigkeitsbewertung	9
<b>4.</b>	<b>Literaturanalyse zur identifizierung von ökologischen nachhaltigkeitsindikatoren</b>	<b>12</b>
4.1	Identifizierung relevanter Studien/Gutachten hinsichtlich ökologischer Nachhaltigkeitsindikatoren in der Telekommunikationsinfrastruktur	12
4.2	Analyse ausgewählter Studien und Gutachten	19
4.2.1	Überblick analysierter Literatur	19
4.2.2	Identifizierung der Indikatoren	20
4.3	Detaillierter Überblick ökologischer Nachhaltigkeitsindikatoren	22
4.3.1	Klima-Indikatoren	23
4.3.2	Wasser-Indikatoren	24
4.3.3	Biodiversitäts-Indikatoren	25
4.3.4	Kreislaufwirtschafts-Indikatoren	26
4.3.5	Umweltverschmutzungs-Indikatoren	27
4.4	Zwischenfazit	27
<b>5.</b>	<b>Ableitung eines geeigneten Indikatorensets</b>	<b>29</b>
5.1	Die Technologien im Überblick	29
5.1.1	Festnetz	29
5.1.2	Mobilfunk	32
5.1.3	Satellit	33
5.2	Neuere Entwicklungen	34
5.3	Betrachtung der Lebenszyklen als Grundlage der LCA-Indikatorenbewertung	36
5.4	Methodische Herangehensweise als Grundlage der Primärindikatoren-Bewertung	38
5.4.1	Detaillierte Prüfung der Relevanz für das Nachhaltigkeitsziel	38
5.4.2	Inhaltliche und operative Bewertung der Indikatoren	40
5.4.3	Experteneinschätzung hinsichtlich Übertragbarkeit und Nutzen für mögliche Anwendungsfälle	43
5.5	Ergebnisse der finalen Ableitung ökologischer Indikatoren	43
5.5.1	Überblick und Erläuterung des Kernindikatoren-Sets	43
5.5.2	Überblick und Erläuterung des erweiterten Indikatoren-Sets	44
5.5.3	Überblick und Erläuterung der LCA-Indikatoren	46
5.6	Anwendungskontext, Datengrundlage und Limitationen des finalen Indikatorensets	49
<b>6.</b>	<b>Schlussfolgerungen</b>	<b>52</b>

## 1. KURZFASSUNG

Das Ziel der Studie war es, belastbare Erkenntnisse über die am besten geeigneten Indikatoren für die Messung von Umweltauswirkungen (gemäß der Klima- und Umweltziele der EU-Taxonomie) von elektronischer Telekommunikationsinfrastruktur (TKI) zu gewinnen. Hierzu wurde ein technologieoffener Ansatz gewählt und der gesamte Lebenszyklus der Infrastruktur betrachtet. Im ersten Schritt wurde eine Analyse und Auswertung bestehender Studien und Gutachten insbesondere aus dem OECD-Raum, welche eine indikatoren-gestützte Beurteilung der ökologischen Nachhaltigkeit elektronischer TKI thematisieren, vorgenommen. Darauf basierend wurde im zweiten Schritt ein Indikatorenset abgeleitet, welches eine Bewertung der ökologischen Nachhaltigkeit von elektronischer TKI aus gesamtwirtschaftlicher Sicht ermöglicht.

In der Literaturrecherche wurden insgesamt 29 Studien und wissenschaftliche Publikationen ausgewertet. Durch den technologieoffenen Ansatz wurden im ersten Schritt jegliche Indikatoren extrahiert, ohne bereits eine Vorauswahl zu treffen. Dadurch ergab sich eine Liste von 223 Indikatoren, welche nach den sechs Klima- und Umweltzielen gruppiert wurden. Die beiden Klimaziele der EU-Taxonomie (*Climate Change Mitigation* und *Climate Change Adaptation*) wurden zu einem übergeordneten Klimaziel kompiliert, weshalb die Studie von fünf anstatt sechs EU-Klima- und Umweltzielen spricht. Um die Indikatoren zu strukturieren und zu gruppieren, wurden Auswahlkriterien definiert, auf Basis derer die 223 Indikatoren durch das Expertenteam eingeschätzt wurden. Es resultierte eine Liste von 77 ökologischen Nachhaltigkeitsindikatoren, die sich aus 26 Primärindikatoren, 31 „Life Cycle Assessment“ (LCA-Indikatoren) und 20 Back-Up-Indikatoren zusammensetzt.

Primärindikatoren umfassen dabei jene Indikatoren, welche die Auswahlkriterien hinreichend erfüllen. Die Kategorie LCA-Indikatoren wurde eigens für Indikatoren gebildet, die aus dem Kontext von Ökobilanzen (LCA) stammen und in Verbindung mit einschlägiger Software und Datenbanken als nutzbar für den Projektkontext gewertet wurden. Ökobilanzen haben den Vorteil, dass sie methodisch alle Lebensphasen der TKI abdecken können und ein breites Bild über verschiedene Klima- und Umweltziele liefern. Anwendungen der Methodik im TKI-Kontext bestehen bereits und wurden im Zuge der Literaturrecherche identifiziert und ausgewertet.

Weiterhin wurden Indikatoren dem Back-Up zugeordnet. Diese Indikatoren sind verglichen mit den Primärindikatoren weniger geeignet, da sie die Auswahlkriterien nur teilweise erfüllen. Es zeigte sich zudem, dass das Umweltziel „Umweltverschmutzung vermeiden“ wenig Relevanz im Bereich Telekommunikationsinfrastruktur hat, weshalb es im weiteren Verlauf des Vorhabens zurückgestellt wurde<sup>1</sup>.

Im zweiten Teil der Studie wurde ein Set an Indikatoren zur anwendungsorientierten und ganzheitlichen Bewertung der ökologischen Nachhaltigkeit von TK-Infrastruktur abgeleitet. Das Augenmerk lag auf der Prüfung von Anwendbarkeit (vor allem bezüglich Datenverfügbarkeit und -bedarf) und Übertragbarkeit der identifizierten Primär- und LCA-Indikatoren. Back-Up-Indikatoren sollten lediglich bei eventuellen inhaltlichen Lücken tiefergehend analysiert werden.

Für die Bewertung der LCA-Indikatoren wurden die verschiedenen TKI (Satellit, Festnetz und Mobilfunk) und deren Lebenszyklusphasen näher beleuchtet. Es wurde geprüft, ob in gängigen Ökobilanz-Datenbanken eine grundlegende Datenverfügbarkeit angenommen werden kann, um LCA-Indikatoren anzuwenden und die verschiedenen TKI abzubilden. Es zeigte sich, dass eine Anwendung von LCA-Indikatoren für Herstellungs-, Nutzungs- und *End of Life*-Phase von TKI

<sup>1</sup> Detaillierte Informationen zu den einzelnen Umweltzielen enthält Verordnung (EU) 2020/852 über die Einrichtung eines Rahmens zur Erleichterung nachhaltiger Investitionen (EU-Taxonomie), abrufbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32020R0852>.

prinzipiell möglich und umsetzbar ist. Die Durchführbarkeit hängt im Einzelnen jedoch stark von der Verfügbarkeit von entsprechenden Primärdaten und Datensätzen ab.

Um aus den 26 Primärindikatoren ein finales Set an ökologischen Bewertungsindikatoren für die Telekommunikationsinfrastruktur ableiten zu können, wurde eine methodische Herangehensweise entwickelt. Diese gliedert sich in drei Schritte auf: (1) Detaillierte Prüfung der Relevanz für das ökologische Nachhaltigkeitsziel, (2) Inhaltliche und operative Bewertung der Indikatoren sowie (3) Experteneinschätzung hinsichtlich Übertragbarkeit und Nutzen für mögliche Anwendungsfälle innerhalb der TKI.

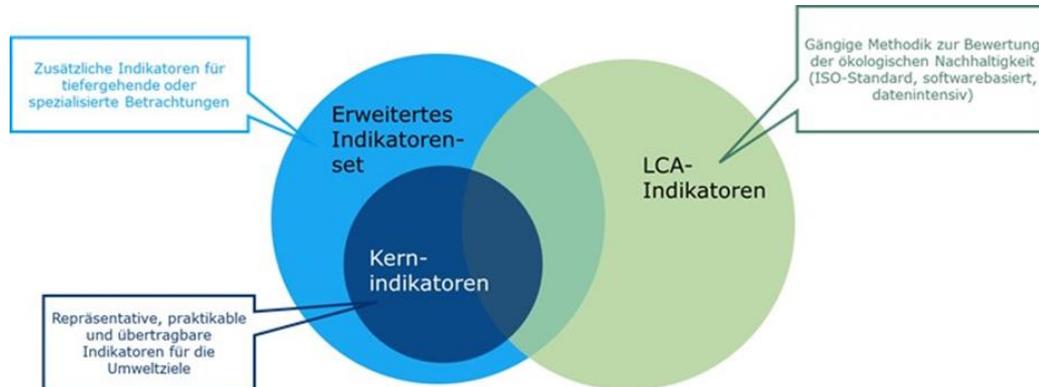
Im ersten Schritt wurden die Primärindikatoren vertieft hinsichtlich ihrer Relevanz und Repräsentativität für das jeweilige zugeordnete Klima- und Umweltziel hinterfragt. Fünf Indikatoren wurde in diesem Schritt nur eine geringe Relevanz und Repräsentativität für das jeweilige Klima- und Umweltziel bescheinigt. Sie wurde aus dem Indikatorenset entfernt. Erwähnenswert ist, dass kein Primärindikator im Bereich Wasser dieser Prüfung standhielt.

Für die darauffolgende inhaltliche und operative Bewertung wurde ein quantitatives Bewertungsschema erstellt, um die verschiedenen Bewertungsbereiche vergleichbar zu machen und dadurch Entscheidungen nachvollziehbar zu gestalten. Für die inhaltliche Bewertung der Primärindikatoren wurden zwei verschiedene Betrachtungsgegenstände bewertet – die Fähigkeit des Indikators, die verschiedenen Stufen des Lebenszyklus der TKI abzubilden und die Abdeckung von relevanten Bestandteilen der TKI in den bisherigen Anwendungsfällen. Im ersten Schritt wurde untersucht, auf welche Komponenten oder Teilbereiche der Telekommunikationsinfrastruktur die Anwendung des Indikators in der Literatur erfolgte, ohne bereits darauf einzugehen, ob sich der jeweilige Indikator auch für einen breiteren Betrachtungsrahmen eignen würden. Dies wurde so gestaltet, um in der Bewertung mitabzubilden, für welche Bereiche der TKI die Anwendung des Indikators bereits im wissenschaftlichen Kontext erprobt ist. Danach wurde die eben dargestellte Bewertung um eine qualitative Einschätzung (gering/mittel/hoch) zum Potential der Übertragbarkeit auf nicht in der bisherigen Anwendung umfasste Teile der TKI ergänzt. Bei der abschließenden Auswertung wurde für jeden Indikator nicht nur die quantitative Bewertung herangezogen, sondern auch die qualitative Einschätzung berücksichtigt.

Zur operativen Bewertung der Primärindikatoren wurden ebenfalls zwei verschiedene Betrachtungsgegenstände berücksichtigt – der Datenbedarf des Indikators und die Abschätzung der Datenverfügbarkeit im einzelnen Anwendungsfall.

Nach Durchführung der quantitativen Bewertung der eben beschriebenen Einzelaspekte wurde jeweils die Summe der Bewertungsergebnisse für die Unter Aspekte der inhaltlichen und operativen Bewertung gebildet. Basierend auf der Gesamteinschätzung betrachtete das Expertenteam jeden einzelnen Indikator und diskutierte insbesondere die Operationalisierbarkeit im Kontext der TKI, die gesamtwirtschaftliche Aussagekraft und Vergleichbarkeit sowie mögliche Limitationen.

Das **finale Ergebnis der Studie sind drei Indikatorensets** für die Bewertung der ökologischen Nachhaltigkeit der Telekommunikationsstruktur: 9 Kernindikatoren, ein erweitertes Indikatoren-Set von 11 Indikatoren und ein Set von LCA-Indikatoren.



Bei den Kernindikatoren handelt es sich um praktikable und übertragbare Indikatoren, die das jeweilige Umweltziel umfassend und repräsentativ behandeln. Aufgrund eines Mangels an geeigneten Indikatoren für Wasser und Biodiversität in der Literatur wurde das Kernindikatorenset durch etablierte und weitläufig genutzte LCA-Indikatoren in diesem Bereichen ergänzt.

Das erweiterte Indikatorenset enthält Indikatoren, die eine zusätzliche und tiefergehende Betrachtung einzelner Aspekte erlauben. Ein Beispiel ist hier der Indikator *Green Energy Coefficient*. Dieser Indikator beschreibt den Anteil des Strombedarfs, der aus erneuerbaren Energien gedeckt wird. Der Indikator hat nur eine eingeschränkte Aussagekraft hinsichtlich der Klimafreundlichkeit der Gesamtinfrastruktur. Es bleibt beispielsweise vollkommen unklar, wie der restliche Strommix aussieht. Daher ist für eine Gesamtaussage zum Umweltziel Klima der Kernindikator *Carbon Footprint* vorzuziehen. Möchte man jedoch die Grünstromnutzung zweier Infrastrukturen in der Nutzungsphase vergleichen, ist der *Green Energy Coefficient* durchaus von Nutzen. Dieses Beispiel zeigt, dass das erweiterte Indikatorenset für spezielle Fragestellungen und als Ergänzung zu den Kernindikatoren zu sehen ist.

Die LCA-Indikatoren entstammen einer gängigen Methode zur Bewertung der ökologischen Nachhaltigkeit, welche bereits im Kontext TKI angewandt wurde. Die Anwendung ist standardisiert und softwarebasiert. Zukünftig werden weitere Publikationen im Bereich LCA und TKI erwartet. Entsprechend stellt eine Lebenszyklusanalyse eine sinnvolle, etablierte Alternative und Erweiterung zu den identifizierten Kernindikatoren dar.

Im Verlauf der Studie wurde deutlich, dass die Indikatorensets nur dann robuste Ergebnisse liefern können, wenn sie in den passenden Kontext gesetzt werden. Ihre Aussagekraft ist abhängig der betrachteten TKI und unterliegt gewissen Limitationen. Die Indikatoren berücksichtigen nicht zwangsläufig die Auslastung von Telekommunikationsnetzen, ein relevanter Aspekt zur Bewertung der Nachhaltigkeit. Auch sind rein quantitative Aussagen für sich oftmals nicht in der Lage ein holistisches Bild der Situation wiederzugeben. Entsprechend sollten Kontextfragen bei der Bewertung, wie z.B. die Aufrüstung / Erneuerung / Wiederverwendung von bestehender Infrastruktur, ergänzend beleuchtet werden.

Generell ist die Identifikation sinnvoller und vergleichbarer Bezugsgrößen beim Vergleich verschiedener TKI unerlässlich. Teilweise kann ein direkter Vergleich aufgrund unterschiedlicher Anwendungsgebiete (z.B. Satellit vs. Mobilfunk) wenig zielführend sein. Für direkte Vergleiche ist es daher immens wichtig, einen klaren und angemessenen Bezugsrahmen zu definieren.

## 2. EXECUTIVE SUMMARY

The aim of the study was to gain insights about which indicators are most suitable for measuring environmental impacts (according to the environmental objectives of the EU taxonomy) of electronic telecommunication infrastructure. For this purpose, an open-technology approach was adopted, and the entire life cycle of the respective infrastructures considered. In the first step, an analysis and evaluation of existing studies and scientific publications covering the OECD area, which address indicator-based assessments of the environmental sustainability of electronic telecommunication infrastructure, was carried out. Based on this, a set of indicators was derived which enables an assessment of the environmental sustainability of electronic telecommunication infrastructure from a macroeconomic perspective.

A total of 29 studies and scientific publications was evaluated. Due to the technology-open approach, all indicators were extracted in the first step without making a pre-selection. This resulted in a list of 223 indicators, which were grouped according to the six environmental objectives. The two climate objectives of the EU taxonomy (climate change mitigation and climate change adaptation) were combined into one overarching climate objective, which is why the study speaks of five instead of six EU environmental objectives. To structure and group the indicators, selection criteria were defined, based on which the 223 indicators were assessed by the expert team. The result was a list of 77 environmental sustainability indicators, consisting of 26 primary indicators, 31 LCA indicators and 20 back-up indicators.

Primary indicators include those indicators that sufficiently meet the selection criteria. The LCA indicators category was formed specifically for indicators that originate from the context of life cycle assessments (LCA) and have been evaluated as usable for the project context in conjunction with relevant software and databases. LCAs have the advantage that they can methodologically cover all life cycle stages of telecommunication infrastructure and provide a holistic picture of the different environmental objectives. Applications of the methodology in the telecommunication infrastructure context already exist and were identified and evaluated during the literature review. Furthermore, some indicators were classified as back-up indicators. Compared to the primary indicators, these indicators are less suitable as they only partially meet the selection criteria. It also became apparent that the environmental objective "pollution prevention" has little relevance for the telecommunication infrastructure and was therefore considered less relevant for the further course of the project<sup>2</sup>.

In the second part of the study, a set of indicators was derived for an application-oriented and holistic assessment of the environmental sustainability of telecommunication infrastructure. The focus was on testing the applicability (especially regarding data availability and requirements) and transferability of the identified primary and LCA indicators. Back-up indicators were only analyzed in detail in case primary indicators showed to be unsuitable. For the evaluation of the LCA indicators, the various telecommunication infrastructures (satellite, fixed network, and mobile communications) and their lifecycle phases were examined in more detail. It was assessed whether basic data availability can be assumed in common LCA databases to apply LCA indicators and to map the different telecommunication infrastructures. It was shown that an application of LCA indicators for manufacturing, use and end-of-life phases of telecommunication infrastructure is in principle possible and feasible. However, the feasibility in detail strongly depends on the availability of corresponding primary data and data sets.

To derive a final set of ecological assessment indicators for the telecommunications infrastructure from the 26 primary indicators, a three-step methodological approach was developed: (1) detailed examination of the relevance for the respective environmental objective, (2) content-related and

<sup>2</sup> Detailed information on the individual environmental objectives can be obtained from regulation (EU) 2020/852 on the establishment of a framework to facilitate sustainable investment (EU-Taxonomy), available at <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32020R0852>.

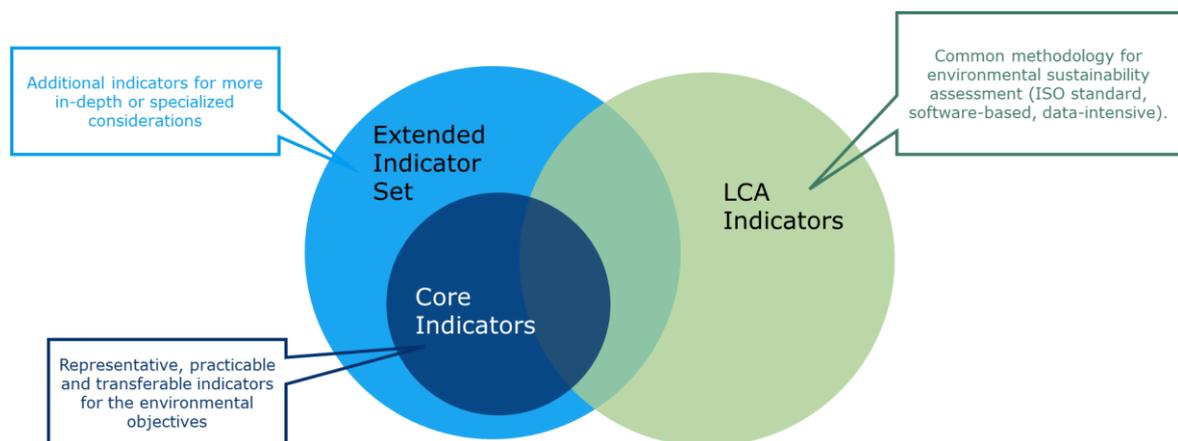
operational evaluation of the indicators, (3) expert assessment regarding transferability and benefit for possible use cases within telecommunication infrastructure.

In the first step, the primary indicators were investigated in depth regarding their relevance and representativeness for the respective assigned environmental objective. Five indicators were found to have only low relevance and representativeness for the overall respective environmental objective. They were removed from the indicator set. It is noteworthy that no primary indicator in the field of “sustainable use of water and marine sources” stood up to this scrutiny.

For the subsequent content-related and operational evaluation, a quantitative evaluation scheme was created to make the different evaluation areas comparable and thus make decisions comprehensible. For the content evaluation of the primary indicators, two different objects of consideration were assessed - the ability of the indicator to represent the different stages of the telecommunication infrastructure life cycle and the coverage of relevant components of the telecommunication infrastructure. The first step was to examine which components or sub-areas of telecommunication infrastructure the indicator was applied to in the literature, without already addressing whether the indicator would also be suitable for a broader scope of consideration. This was done to reflect in the assessment for which areas of telecommunication infrastructure the application of the indicator has already been tested in a scientific context before. The evaluation was then supplemented with a qualitative assessment (low/medium/high) of the potential for transferability to parts of the telecommunication infrastructure not included in the previous application. In the final evaluation, not only the quantitative assessment but also the qualitative assessment was considered for each indicator.

For the operational evaluation of the primary indicators, two different objects were considered - the amount of data needed to calculate an indicator and the estimation of data availability for the individual application. After conducting the quantitative assessment of the individual aspects just described, the results for each aspect (content-related and operational evaluation) were summed up for each indicator. Based on the overall assessment, the team of experts looked into each indicator individually and discussed its operationalizability in the context of telecommunication infrastructure, its macroeconomic meaningfulness and comparability, and possible limitations.

The **outcome of the study is three sets of indicators** for assessing the environmental sustainability of the telecommunication structure: 9 core indicators, an extended indicator set of 11 indicators, and a set of LCA indicators.



The core indicators are viable and transferable indicators that comprehensively and representatively address the environmental objectives at hand. Due to a lack of suitable indicators for water and biodiversity in the literature, the core indicator set was supplemented with established and widely acknowledged LCA indicators. The extended indicator set contains indicators that allow an additional

and more in-depth consideration of individual aspects. One example here is the "Green Energy Coefficient" indicator. This indicator describes the share of electricity demand that is covered by renewable energies. The indicator has only limited informative value regarding the climate friendliness of the overall infrastructure. For example, the indicator does not give an indication on the composition of the non-renewable part of the electricity. The core indicator "Carbon Footprint" is therefore preferable for an overall assessment of the climate objective. However, if one wants to compare the renewable electricity share of two infrastructures in the use phase, the "Green Energy Coefficient" is quite useful. This example shows that the extended set of indicators can be used for specific inquiries and as a supplement to the core indicators.

The LCA indicators are derived from a common method for assessing environmental sustainability, which has already been applied in the context of telecommunication infrastructure. The application is standardized and software based. In the future, further publications in the field of LCA and telecommunication infrastructure are expected. Accordingly, life cycle analysis is a useful, established alternative and supplement to the identified core indicators.

During the study, it became clear that the indicator sets can only provide robust results if they are placed in the appropriate context. Their informative value depends on the telecommunication infrastructure under consideration and is subject to certain limitations. The indicators do not necessarily consider the capacity utilization of telecommunication networks, a relevant aspect for assessing sustainability. Also, purely quantitative statements in themselves are often not able to provide a holistic picture of the situation. Accordingly, contextual issues in the assessment, such as the upgrade / renewal / reuse of existing infrastructure, should also be considered.

In general, the identification of meaningful and comparable benchmarks is essential when comparing different telecommunication infrastructures. In some cases, a direct comparison may not be very useful due to differences in application areas (e.g., satellite vs. mobile communications). For direct comparisons, it is therefore immensely important to define a clear and appropriate frame of reference.

## 3. EINLEITUNG

### 3.1 Kontext und Ziel

Der Telekommunikationssektor ermöglicht den Wandel hin zu einem ökologisch nachhaltigen Wirtschaftssystem durch seine zentrale Rolle im Bereich der Digitalisierung und Vernetzung. Durch intelligente Steuerungen sowie Vernetzungen bietet er vor allem die Möglichkeit, Energie und Treibhausgase einzusparen. Jedoch hat der Telekommunikationssektor auch negative Auswirkungen auf die Umwelt – sowohl in der Herstellung und Nutzung als auch Entsorgung von aktiven und passiven Netzwerkkomponenten. Aktuell ist der Informations- und Kommunikationstechnik-Sektor beispielsweise für ungefähr 3 % der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen verantwortlich<sup>3</sup>.

Laut der im Juli 2022 verabschiedeten Gigabit-Strategie der Bundesregierung gilt es die digitale Infrastruktur zukunftssicher – resilient und nachhaltig – auszubauen. Durch die Strategie soll die digitale Infrastruktur zu den globalen Nachhaltigkeits- und Klimazielen sowie zu den auf EU-Ebene festgelegten Zielen des Green Deals beitragen<sup>4</sup>. Daher muss sowohl der Netzausbau, der Betrieb der Netzinfrastrukturen sowie der Rückbau mit Recycling und Entsorgung umweltverträglich und nachhaltig gestaltet werden, um knappe Ressourcen und das Klima zu schonen. Um die ökologische Nachhaltigkeit der elektronischen Telekommunikationsinfrastruktur (TKI; Mobilfunk, Festnetz und Satellitenkommunikation) zu beurteilen, Einsparpotentiale zu identifizieren und Verbesserungen aufzuzeigen, werden transparente, nachvollziehbare und vergleichbare Bewertungskriterien benötigt. Derzeit existieren verschiedene Ansätze zur Bewertung der ökologischen Nachhaltigkeit allgemein, es mangelt jedoch an einer einheitlichen Anwendung der Indikatoren und einem spezifischen Indikatorenset im Kontext der TKI.

Mit diesem Forschungsvorhaben möchte die Bundesnetzagentur daher eine wissenschaftlich fundierte Grundlage schaffen anhand derer die ökologische Nachhaltigkeit von elektronischer TKI aus gesamtwirtschaftlicher Sicht beurteilt werden kann.

Das Ziel der Studie ist es, mit einem technologieoffenen Ansatz, der den gesamten Lebenszyklus betrachtet, belastbare Erkenntnisse über die am besten geeigneten Indikatoren für die Messung von Umweltauswirkungen (gemäß der sechs Klima- und Umweltziele der EU-Taxonomie) von elektronischer TKI zu gewinnen. Dabei werden vorhandene Indikatoren und Ansätze zur quantitativen und qualitativen Bemessung der ökologischen Nachhaltigkeit von Telekommunikationsnetzen aus verschiedenen Studien und Geografien berücksichtigt. Die abzuleitenden Indikatoren sollen einen Vergleich der verschiedenen Infrastrukturen untereinander hinsichtlich ihrer Umweltauswirkungen ermöglichen.

Die Ergebnisse der Studie können eine Grundlage für die Bundesnetzagentur bieten, sich konstruktiv in der aktuellen nationalen und internationalen Debatte hinsichtlich dieses Themas zu beteiligen, um sich beispielsweise auch bei künftigen Harmonisierungsbestrebungen auf Ebene der EU einbringen zu können.

### 3.2 Vorgehensweise

Die vorliegende Studie wurde in zwei Arbeitspaketen (AP) bearbeitet, um das beschriebene Ziel zu erreichen, wie Abbildung 1 aufzeigt. Wie aus der Abbildung ersichtlich wird, besteht AP 1 aus der Analyse und Auswertung vorhandener Studien und Gutachten. Ziel der Literaturanalyse ist es, bestehende Indikatoren in der Literatur zu identifizieren, die eine Beurteilung der ökologischen

<sup>3</sup> Freitag et al. (2021). The real climate and transformative impact of ICT: A critique of estimates, trends, and regulations. In Patterns (Bd. 2, Nummer 9). Cell Press.

<sup>4</sup> BMDV. (2022). Gigabitstrategie der Bundesregierung.

Nachhaltigkeit von elektronischer Telekommunikationsinfrastruktur unterstützen. Hierbei stehen Studien und Gutachten aus OECD-Ländern im Vordergrund.

In AP 2 findet dann die Ableitung und Entwicklung eines Indikatoren-Sets auf Basis der Erkenntnisse aus AP 1 statt. Ein besonderes Augenmerk wird hierbei auf die Anwendbarkeit der Indikatoren gesetzt und dass sie eine gesamtwirtschaftliche Betrachtung über alle Lebensphasen hinweg erlauben.

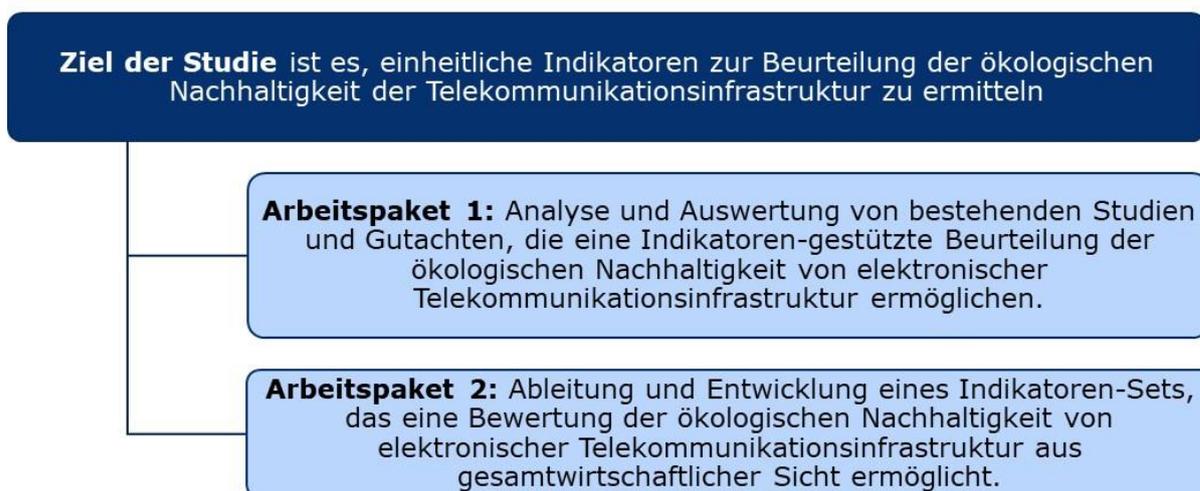


Abbildung 1: Ziel und wesentliche Bearbeitungsschritte der Studie.

### 3.3 Politische und regulatorische Hintergründe der Nachhaltigkeitsbewertung in der Telekommunikation

Die Bestrebungen der **internationalen Gemeinschaft** zu mehr Nachhaltigkeit resultierten 2015 in der Verabschiedung der Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung, die für die Weltgemeinschaft 17 Nachhaltigkeitsziele (Sustainable Development Goals) mit 169 konkreten Unterzielen definiert<sup>5</sup>. Die Ziele umfassen dabei auch eine Reihe von Aspekten der ökologischen Nachhaltigkeit, von sauberem Wasser über den Schutz der Biodiversität hin zur Bekämpfung des Klimawandels. Ebenfalls 2015 wurde letzteres Ziel mit dem Pariser Klimaabkommen nochmals bekräftigt und die Weltgemeinschaft hat sich verbindlich auf die Limitierung der Erderwärmung auf unter zwei Grad Celsius geeinigt<sup>6</sup>.

Auf **europäischer Ebene** sollen die Nachhaltigkeitsziele mit dem Green Deal umgesetzt und vorangetrieben werden<sup>7</sup>. Mit ihm wurden unter anderem Maßnahmen beschlossen, um ressourceneffizienter zu wirtschaften und bis 2050 klimaneutral zu werden. Teil des Green Deals ist auch die EU-Taxonomie, ein Klassifikationssystem für nachhaltige Wirtschaftsaktivitäten<sup>8</sup>. Dadurch sollen Finanzströme hin zu den als ökologisch nachhaltig klassifizierten Aktivitäten gelenkt werden und Unternehmen und Staaten dazu angeregt werden, ihre ökologische Nachhaltigkeit zu verbessern. Die Taxonomie befasst sich dabei vorrangig mit ökologischer Nachhaltigkeit und benennt sechs übergeordnete Klima- und Umweltziele, zu denen

<sup>5</sup> United Nations. (2015). Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development.

<sup>6</sup> UNFCCC. (2015). Adoption of the Paris Agreement.

<sup>7</sup> European Commission. (2019). The European Green Deal. European Commission, 53(9), 24.

<sup>8</sup> European Parliament and the Council. (2020). Regulation (EU) 2020/852 of the European Parliament and of the Council of 18 June 2020 on the establishment of a framework to facilitate sustainable investment, and amending Regulation (EU) 2019/2088. Official Journal of the European Union, 63, 13–43.

Wirtschaftsaktivitäten beitragen können. Abbildung 2 zeigt eine Übersicht der sechs Klima- und Umweltziele, wobei zwischen der Klima- und der Umwelntaxonomie mit Zielen zu Wasser, Umweltverschmutzung, Kreislaufwirtschaft und Biodiversität unterschieden werden kann.



Abbildung 2: Umweltziele laut EU-Taxonomie (Quelle: eigene Darstellung basierend auf (European Parliament and the Council, 2020)).

Künftig müssen eine Vielzahl von Unternehmen und Finanzmarktteilnehmenden aber auch die EU-Staaten selbst berichten, ob ihre Aktivitäten konform mit der EU-Taxonomie sind. Die Bewertung von ökologischer Nachhaltigkeit anhand der Klima- und Umweltziele der Taxonomie entspricht somit dem gängigen Vorgehen bei verschiedenen Nachhaltigkeitsberichterstattungen, auch wenn für die Telekommunikationsinfrastruktur derzeit noch keine konkreten Kriterien im Rahmen der Taxonomie vorliegen<sup>9</sup>.

Die globalen und EU-Ziele und Verpflichtungen gelten somit auch für **Deutschland** und werden teilweise weiter konkretisiert und für verschiedene Bereiche oder Sektoren spezifiziert. Beispielhaft seien an dieser Stelle das deutsche Klimaschutzgesetz und die Gigabit-Strategie genannt. Das geänderte Klimaschutzgesetz bekräftigt die globalen und europäischen Klimaschutzbestrebungen und macht eine Treibhausgasneutralität für Deutschland bis zum Jahr 2045 verbindlich<sup>10</sup>.

Die Gigabitstrategie der Bundesregierung ist wiederum ein Beispiel dafür, wie Umwelt- bzw. Klimaschutz mit wirtschaftlichen Zielen vereint werden. Neben den verschiedenen Maßnahmen für den Ausbau der digitalen Infrastruktur spricht sich die Gigabitstrategie für einen zukunftssicheren und damit nachhaltigen und resilienten Netzausbau aus und will unter anderem entsprechende Maßnahmen für Unternehmen entwickeln und Kriterien für nachhaltige Breitbandnetze einführen<sup>11</sup>.

### 3.4 Methodische Hintergründe zur Nachhaltigkeitsbewertung

Die Methodik des **Life Cycle Assessment** (LCA; Deutsch: Lebenszyklusanalyse oder Ökobilanz) erlaubt es umweltrelevante Vorgänge zu erfassen und zu bewerten. Wie in den relevanten Normen DIN EN ISO 14040/14044 festgehalten, zeichnet sich das Prinzip der Ökobilanzierung dadurch aus, dass ein zu betrachtendes Produkt / ein zu betrachtender Prozess über seinen

<sup>9</sup> European Commission. (2021). EU Taxonomy Compass. European Commission.

<sup>10</sup> Bundesregierung. (2021). Klimaschutzgesetz: Klimaneutralität bis 2045 | Bundesregierung.

<sup>11</sup> BMDV. (2022). Gigabitstrategie der Bundesregierung.

gesamten Lebenszyklus und somit von der Rohstoffgewinnung und -beschaffung, über die Energie und Materialproduktion und -herstellung bis hin zur Verwendung, Endbehandlung und endgültiger Entsorgung oder Wiederverwendung betrachtet wird. Für all diese Bereiche werden die Umweltaspekte und -auswirkungen des betrachteten Systems erfasst, indem die jeweils umweltrelevanten Inputs und Outputs des Systems bilanziert werden (siehe Abbildung 3). Hieraus lassen sich dann in der Folge verschiedene Wirkkategorien berechnen, welche methodisch verschiedene Inputs und/oder Outputs miteinander verrechnen und dadurch aus dem Lebenszyklus resultierende potenzielle Umweltauswirkungen abbilden können.

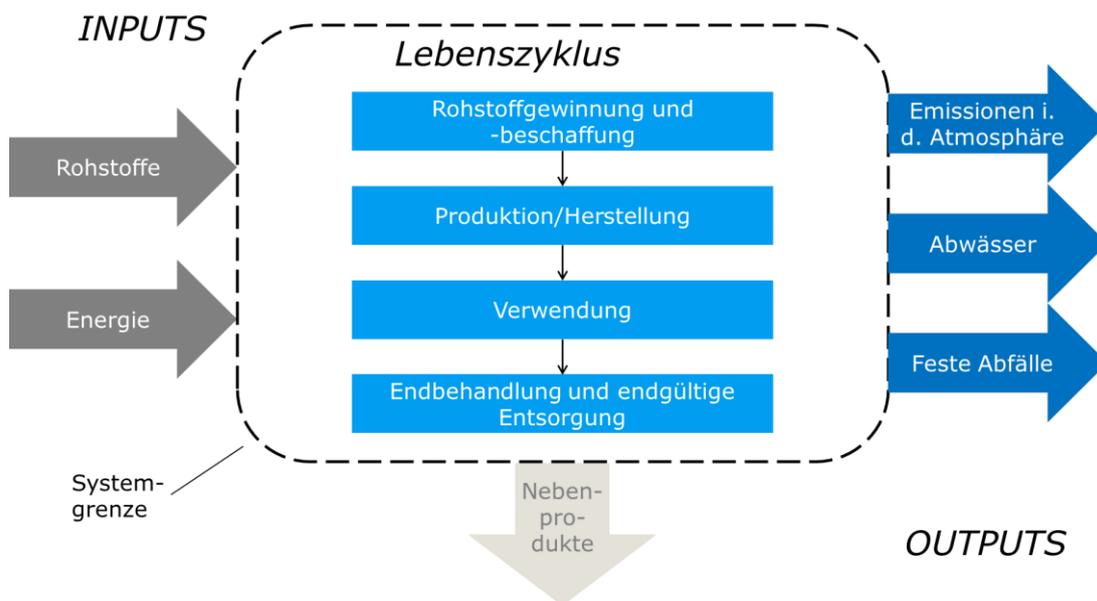


Abbildung 3: Schematische Darstellung des Betrachtungsrahmens einer Ökobilanz-Studie (Quelle: Ramboll (2022) in Anlehnung an DIN EN ISO 14040/14044).

Durch die Verbreitung der Methode Ökobilanz wurde erstmals großflächig ein akzeptierter Standard zur Bewertung von Umweltwirkungen geschaffen, der die Betrachtung aller Lebenszyklusphasen und die Bereitstellung einer möglichst ganzheitlichen Umweltperspektive durch das Berechnen einer Vielzahl von Umweltindikatoren zum Ziel hat.

Diese den gesamten Lebenszyklus umfassende Perspektive bringt jedoch auch Problematiken mit sich, da die Grenzen dessen, was ökobilanziell abgebildet werden kann, sowie die Validität der Ökobilanz, stark von der Datenverfügbarkeit zu den relevanten Inputs und Outputs abhängen. Können nicht für den gesamten Lebenszyklus alle relevanten Daten beschafft werden, müssen Annahmen getroffen, Vereinfachungen durchgeführt oder die Grenzen der Modellierung enger gezogen werden. Hierdurch wird die Repräsentativität der Ergebnisse eingeschränkt, was eine Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Studien erschwert.

Diese Problematik wird durch die **Product Environmental Footprint (PEF)**-Methode, die von der Europäischen Kommission in Zusammenarbeit mit Unternehmen und Nachhaltigkeitsexperten entwickelt wurde, behandelt. Die PEF-Methode beschreibt eine Methode zur Durchführung von Ökobilanzen, bei welcher für abgegrenzte Kategorien von Betrachtungsgegenständen engere Regelungen vorgegeben werden als es in der DIN EN ISO 14040/44 der Fall ist. Durch die Anwendung der PEF-Regelungen für eine Kategorie, genannt *Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCR)*, werden Ökobilanzen für verschiedene Betrachtungsgegenstände aus

derselben Kategorie besser vergleichbar gemacht, als wenn sie sich lediglich an den generischeren Regelungen der DIN Norm orientieren würden. Die Regelungen des PEF beschreiben spezielle Leitlinien für z.B. den Umgang mit Systemgrenzen, der funktionellen Einheit und den Auswertungskategorien für Ökobilanzen von Produkten innerhalb von Kategorien. Zudem werden im Webauftritt der PEFs auf der *European Platform on Life Cycle Assessment* Listen bereitgestellt, welche LCA-Datenbanken in bestimmten Bereichen Daten liefern, welche gut mit den Prinzipien der PEF-Methode harmonieren<sup>12</sup>. Auch eine eigene PEF-Datenbank, welche Daten für EF-konforme, repräsentative Produkte listet, ist inzwischen verfügbar. So soll die Validität und Vergleichbarkeit der Bewertung von Umweltwirkungen durch die Ökobilanz weiter verbessert werden. Die Entwicklung des PEFs und zugehöriger PEFCR befindet sich offiziell noch in einer Übergangsphase, was konkret heißt, dass die Entwicklung der PEF-Berechnungsmethode und einige PEFCR-Piloten bereits abgeschlossen sind, methodische Weiterentwicklungen und die Erstellung von zusätzlichen PEFCR jedoch in Arbeit und notwendig sind, um eine flächendeckende praktische Anwendbarkeit der Methodik zu gewährleisten.

Für einen Teilbereich der zu betrachtenden IKT-Infrastrukturen, *IT equipment (storage)*, wurde bereits im Rahmen der Pilotphase ein PEFCR-Dokument entwickelt und veröffentlicht. Für weite Teile der in den Infrastrukturen verwendeten Komponenten und Technologien besteht aktuell jedoch noch kein dediziertes Set von PEFCR. Dementsprechend werden die Betrachtungen in diesem Vorhaben bezüglich der Ökobilanz-Methodik nicht speziell an der PEF-Methodik orientieren, sondern alle ISO 14040/44-konformen und im IKT-Bereich etablierten Indikatoren miteinbeziehen.

<sup>12</sup> <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/LCDN/contactListEF.xhtml>

## 4. LITERATURANALYSE ZUR IDENTIFIZIERUNG VON ÖKOLOGISCHEN NACHHALTIGKEITSINDIKATOREN

Arbeitspaket (AP) 1 ist in drei Arbeitsschritte gegliedert (siehe Abbildung 4). Zuerst wurden neben vorgegebenen Studien weitere relevante Studien und Gutachten hinsichtlich ökologischer Nachhaltigkeitsindikatoren identifiziert. Anschließend wurden diese Studien in Arbeitsschritt 2 analysiert. Interessante Studien und Publikationen, auf die das Projektteam während der Analyse gestoßen ist, wurden in den zu analysierenden Pool an Studien und Publikationen aufgenommen. Arbeitsschritt 1 und 2 folgten daher einem iterativen Ansatz. Als sich viele Informationen sowie Indikatoren und Anwendungsfälle wiederholten (Informationssättigung), wurde Arbeitsschritt 2 beendet. Arbeitsschritt 3 umfasste anschließend die Extraktion der genannten Indikatoren aus der Literatur und die Sortierung dieser in eine Tabellenstruktur. Nach diesem ersten Schritt begannen die Strukturierung und Ordnung der Indikatoren sowie eine erste Reduzierung und Gruppierung der Liste, um abschließend einen detaillierten Überblick ökologischer Nachhaltigkeitsindikatoren zu gewinnen.

Die folgenden drei Kapitel beschreiben das Vorgehen der drei Arbeitsschritte sowie die jeweiligen Ergebnisse im Detail.

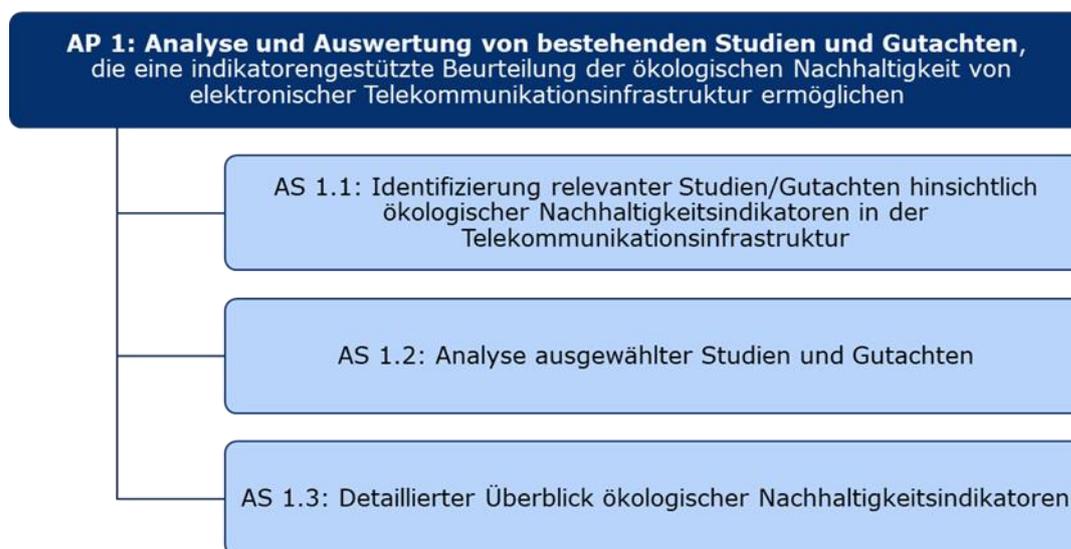


Abbildung 4: Untergliederung von AP 1 in drei Arbeitsschritte (AS) zur Identifizierung vorhandener Indikatoren.

### 4.1 Identifizierung relevanter Studien/Gutachten hinsichtlich ökologischer Nachhaltigkeitsindikatoren in der Telekommunikationsinfrastruktur

Die Identifizierung relevanter Literatur erfolgte in zwei Stufen, in denen einerseits bekannte Schwerpunktstudien und andererseits mit einem breiteren Recherchefokus weitere relevante Literatur identifiziert wurde. Die Recherche wurde technologieoffen und mit Fokus auf den OECD-Raum sowie mit Publikationsdatum in den letzten 12 Jahren durchgeführt.

#### Schwerpunktstudien aus der Leistungsbeschreibung

In der Leistungsbeschreibung wurden vier Studien von besonderer Relevanz für die vorrangige Analyse vorgegeben (siehe Tabelle 1). Diese stellen die Ausgangssituation für die Recherche dar und befassen sich bereits detailliert mit der Frage der ökologischen Nachhaltigkeit von Telekommunikationsinfrastruktur bzw. verwandten Themen.

**Tabelle 1: Schwerpunktstudien laut Leistungsbeschreibung zur vorrangigen Analyse.**

Schwerpunktstudien
<b>Arcep / Ademe</b> , Evaluation de l`impact environnemental du numerique en France et analyse prospective
<b>WIK / Ramboll</b> , Environmental impact of electronic communications
<b>IDEA, Öko-Institut e.V.</b> , Study EU Kommission on Greening Cloud Computing and Electronic Communications Services and Networks
<b>Umweltbundesamt</b> , Abschlussbericht Green Cloud Computing, Lebenszyklusbasierte Datenerhebung zu Umweltwirkungen des Cloud Computing

### **Identifizierung weiterer relevanter Literatur und Standards**

Zusätzlich zu den Schwerpunktstudien wurden durch eine klassische Literaturrecherche 26 weitere relevante Literaturquellen und Standards identifiziert. Dies erfolgte auf Basis von Referenzen aus den Schwerpunktstudien sowie Publikationen bekannt aus anderen Vorarbeiten im Zusammenhang von Digitalisierung und Nachhaltigkeit. Zudem wurden einige Lebenszyklusanalyse-Studien im Kontext Internet-/IKT-Anwendung sowie Digitalisierung identifiziert. Des Weiteren wurden in der Literatur benannte Standards, Rahmenwerke und Label (wie beispielsweise der Blaue Engel) betrachtet. Zuletzt wurde auch eine gezielte Internetrecherche durchgeführt, um weitere Publikationen im Kontext Nachhaltigkeit und elektronische Telekommunikationsinfrastruktur zu identifizieren und somit eine breite Abdeckung sicherzustellen.

Tabelle 2 zeigt einen Überblick der identifizierten Literatur aus diesem Arbeitsschritt einschließlich der Schwerpunktstudien.

**Tabelle 2: Identifizierte Literatur mit Relevanz für das Vorhaben.**

Studie / Publikation	Autor / Institution	Zeitraumen	Geographie	abgedeckte Technologien	Lebenszyklusphasen
<b>Evaluation de l`impact environnemental du numerique en France et analyse prospective</b>	Aiouch et al (2022); Arcep / Ademe	2022	Frankreich	Geräte, Netze und Rechenzentren Mobilfunk- und Festnetze  - xDSL, FTTx (Glasfaser) - 2G, 3G, 4G, 5G	Kompletter Lebenszyklus
Environmental impact of electronic communications	Godlovitch et al. (2021); WIK / Ramboll im Auftrag für BEREC	2021	Europa	- Kommunikationsdienste und -netze (4G, 5G) - Glasfaser (FTTH, FTTC, G.Fast, usw.) - zukünftige Technologien (6G) - IKT - ECN - DSL, HMCT, UMTS, WiMAX	Betrachtet den kompletten Lebenszyklus, aber starker Fokus auf THG-Emissionen
Study EU Kommission on Greening Cloud Computing and Electronic Communications Services and Networks	Bilsen et al. (2022); IDEA, Öko-Institut e.V. for EU Commission	2022	Europa	Rechenzentren (die meisten Indikatoren werden in diesem Zusammenhang bereitgestellt), elektronische Kommunikationsdienste und -netze (z. B. 3G, 4G usw.)	Deckt die verschiedenen Phasen ab: Studie kategorisiert verschiedene Technologien in verschiedenen Komponenten und Phasen der Wertschöpfungskette und diskutiert Metriken in diesem Kontext

Abschlussbericht Green Cloud Computing, Lebenszyklusbasierte Datenerhebung zu Umweltwirkungen des Cloud Computing	Gröger et al (2021); Umweltbundesamt	2021	Deutschland	Cloud Dienstleistungen	Herstellungs- und Nutzungsphase
Electricity Intensity of Internet Data Transmission: Untangling the Estimates.	Aslan et al (2018)	2018	Global	Internet Datenübertragung, Netzwerksysteme, IKT	Nutzung
Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations.	Belkhir and Elmeligi (2018)	2018	Global	Elektronische Geräte und Infrastrukturzentren, die mit IKT verbunden sind	Herstellung und Nutzung; Fokus nur auf Treibhausgasemissionen
Life cycle assessment of network traffic: A review of challenges and possible solutions	Billstein et al (2021)	2021	Schweden	Netzwerkverkehr (kein Schwerpunkt auf Hardware/Technologie)	Methodik der Ökobilanz in einem bestimmten Kontext
The overlooked environmental footprint of increasing Internet use.	Obringer et al (2021)	2021	Global	Internet	Wartung und Nutzung
Comparing embodied greenhouse gas emissions of modern computing and electronics products.	Teehan and Kandlikar (2013)	2013	Kanada	IKT	vollständige Ökobilanz von 11 IKT-Produkten
Estimating the resource intensity of the Internet: A meta-model to account for cloud-based services in LCA.	Ulrich et al (2022)	2022	Deutschland	Netzwerk und Rechenzentrum	Herstellung und Nutzung
Klimaeffekte der Digitalisierung: Studie zur Abschätzung des Beitrags	Bitkom e.V., Accenture	2020	Deutschland	Berücksichtigt werden Technologien zur Erfassung ( z. B . mittels Sensoren), Speicherung,	-

digitaler Technologien zum Klimaschutz				Übertragung und Verarbeitung von Informationen.	
Klimaschutz durch digitale Technologien – Chancen und Risiken	Bitkom e.V.	2020	Deutschland	Rechenzentren, Telekommunikationsnetze , Endgeräte	Fokus THG-Emissionen; ganzer Lebenszyklus
Impacts of the digital transformation on the environment and sustainability	Liu et al (2019)	2019	Europa; Deutschland	Endgeräte	Gesamter Lebenszyklus
Study on the practical application of the new framework methodology for measuring the environmental impact of ICT—Cost/benefit analysis.	Prakash et al (2014); European Commission	2014	Europa	IKT-Produkte, Telekommunikationsnetze , Datenzentren und IKT-Produktion	Gesamter Lebenszyklus
Schaffung einer Datenbasis zur Ermittlung ökologischer Wirkungen der Produkte der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT)	Prakash (2011); Öko-Institut, Fraunhofer im Auftrag von Umweltbundesamt	2011	Deutschland	Notebook Komponenten, Bildschirm Module, Integrierte Schaltungen	Fokus Produktions- und Nutzungsphase; allgemein wird jedoch die Ökobilanzierung und die Datenverfügbarkeit/qualität für eine solche (Kontext Notebook) insgesamt behandelt.
Kennzahlen und Indikatoren für die Beurteilung der Ressourceneffizienz von Rechenzentren und Prüfung der praktischen Anwendbarkeit	Schödwel et al (2018); Umweltbundesamt	2018	Deutschland	Rechenzentren	Gesamte Lebenszyklusbetrachtung
Energie- und Ressourcenverbräuche der Digitalisierung	Köhler et al (2018); WBGU	2018	Deutschland	Rechenzentren, ICT Geräte	Gesamte Lebenszyklusbetrachtung

Blauer Engel für Rechenzentren	Blauer Engel	2015	Deutschland	Rechenzentren, Server, Computer	-
Blauer Engel für ressourcen- und energieeffiziente Softwareprodukte	Blauer Engel	2020	Deutschland	Software	-
Blauer Engel für Server und Datenspeicherprodukte	Blauer Engel	2020	Deutschland	Server und Datenspeicherprodukte	-
ORIENTING: Operational Life Cycle Sustainability Assessment Methodology Supporting Decisions Towards a Circular Economy	Bachmann et al (2021) Fraunhofer IBP, Universität Ghent, VTT Technical Research Centre of Finland	2021	Europa	Kein spezifischer Technologiebezug	Gesamter Zyklus der Landnutzung (Transformation, occupation, regeneration)
ReCiPe 2016. A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. Report 1: Characterization.	Huijbregts et al (2016)	2016	Global	Alle Technologien/Produkte	Gesamter Lebenszyklus
Understanding Product Environmental Footprint and Organisation Environmental Footprint methods	Damiani et al (2022); European Commission	2022	Europa	Alle Technologien/Produkte, für die bereits PCR entwickelt wurden (z.B. IT equipment)	Gesamter Lebenszyklus
Impact assessment in the PEF initiative	PRé (2016)	2016	Europa		Gesamter Lebenszyklus
A new methodology toward effectively assessing data center sustainability	Lykou et al (2018)	2018	Europa	Rechenzentren	Herstellung und Nutzung
The water footprint of data centers	Ristic et al (2015)	2015	Global	Rechenzentren	Gesamter Lebenszyklus

The Environmental Impacts of Core Networks for Mobile Telecommunications: A Study Based on the Life Cycle Assessment (LCA) of Core Network Equipment.	Pino, A. (2017).	2017	Schweden	IKT-Kernetze	Vollständige Ökobilanz des Kernnetzes
Umweltbezogene Technikfolgenabschätzung Mobilfunk in Deutschland (UTAMO-Projekt)	Stobbe et al Fraunhofer IZM im Auftrag des Umweltbundesamts	Noch nicht veröffentlicht	Deutschland	Mobilfunknetz (2G-5G) (Funkzellen + Funkzugang + Transport- und Kernnetz)	Herstellungs- und Nutzungsphase
Technikfolgenabschätzung (TA) Energieverbrauch der IKT-Infrastruktur: Bericht des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung	Deutscher Bundestag (2022)	2022	Deutschland	Telekommunikationsnetze (Kernnetz und Zugangsnetze) sowie die Rechenzentren. Nicht Gegenstand des Berichts sind die Netzwerke in Unternehmen und privaten Haushalten sowie die dazugehörigen Endgeräte.	In der vorliegenden Untersuchung wurde der Fokus auf die elektrischen Energiebedarfe bei der Nutzung von IKT-Infrastrukturen gelegt

Die Auswahl der Literatur fand technologieoffen statt. Das heißt, diverse Publikationen, die einen Bezug zur ökologischen Bewertung in einem Digitalisierungskontext aufwiesen, wurden betrachtet.

Eine Kernbeobachtung ist, dass eine Vielzahl an Studien und wissenschaftlichen Publikationen im Bereich der Klima- und Energieeffizienz von Rechenzentren existieren und entsprechend auch einen signifikanten Anteil in der analysierten Literatur ausmachen. Zudem enthält der Literaturpool Publikationen aus dem Bereich Nachhaltigkeit von Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT)-Hardware, Nachhaltigkeit des Internets sowie Lebenszyklusstudien, u.a. im Technologiekontext, aber auch Grundlagenliteratur. Vereinzelt konnten auch Publikationen identifiziert werden, die spezifisch das Thema ökologische Bewertung von Mobilfunk und Netzwerken untersuchen (siehe Arcep/Ademe-Studie). Die Literaturrecherche ergab jedoch auch, dass es bisher nur eine überschaubare Anzahl von Publikationen im Bereich ökologische Bewertungen von Telekommunikationsinfrastrukturen, spezifisch Festnetz, Mobilfunk und Satellit, gibt.

## 4.2 Analyse ausgewählter Studien und Gutachten

### 4.2.1 Überblick analysierter Literatur

Die identifizierten Studien und Gutachten stammen vorwiegend aus dem europäischen Raum, wie Abbildung 5 zeigt. Bei der Suche nach relevanter Literatur wurde keine bewusste geographische Einschränkung vorgenommen, sondern ein globaler Ansatz angewandt. Während die wissenschaftlichen Publikationen in globalen Journals veröffentlicht wurden, ist eine Konzentration von Studien aus Deutschland sowie der EU zu beobachten. Grundsätzlich bedienen sich diverse Studien indirekt auch weiteren Quellen, wie u.a. Standards aus dem amerikanischen Raum, wie z. B. The Green Grid oder des internationalen ITU-Standards. Dennoch scheint es, dass die Diskussionen an der Schnittstelle von Nachhaltigkeit und Digitalisierung im europäischen Raum ausgeprägter bzw. weiter fortgeschritten sind und daher entsprechende Veröffentlichungen vorrangig aus Europa und einzelnen europäischen Ländern stammen. Mögliche Erklärungen lassen sich darauf zurückführen, dass mit dem Green Deal die Europäische Union thematisch bereits weiter fortgeschritten ist als viele andere Regionen und somit das Thema Nachhaltigkeit im europäischen Raum insbesondere in den letzten Jahren an Interesse und Relevanz gewonnen hat. Durch Ziele wie die EU-weite Klimaneutralität bis 2050 und die Klassifizierung von ökologisch nachhaltigen Aktivitäten durch die EU-Taxonomie wächst der Druck auf Privatwirtschaft, öffentlich Einrichtungen, aber auch auf die Wissenschaft, sich diesen Themen anzunehmen.



Abbildung 5: Aufgliederung der analysierten Literatur nach Publikationstyp.

Diese These wird auch durch die Verteilung der Literatur hinsichtlich ihres Publikationsjahres unterstützt. Es lässt sich eine Häufung an Publikationen mit Fokus auf Nachhaltigkeit und Digitalisierung aus den letzten fünf Jahren feststellen (siehe Abbildung 6).

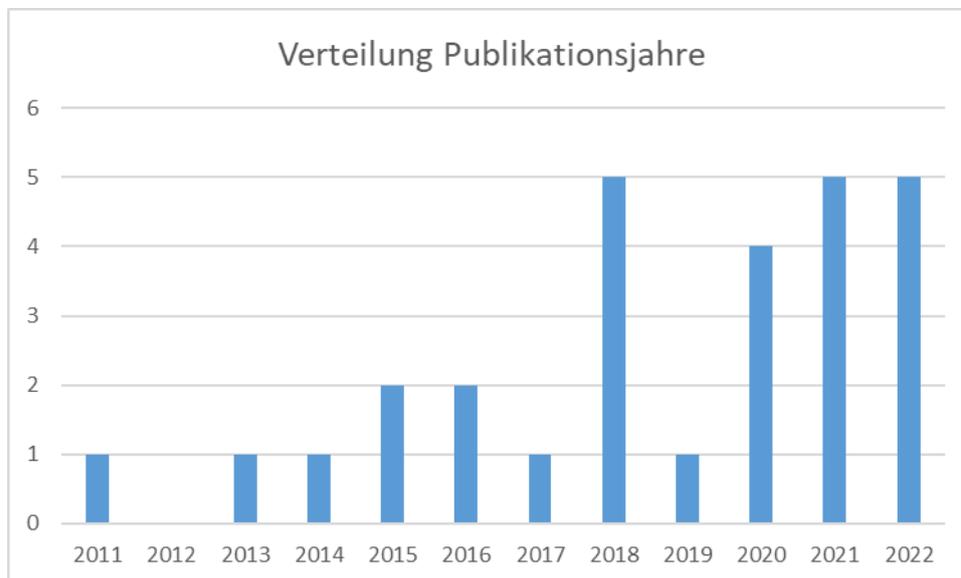


Abbildung 6: Anzahl der analysierten Publikationen je Veröffentlichungsjahr.

#### 4.2.2 Identifizierung der Indikatoren

In Arbeitsschritt 1.2 wurde die identifizierte Literatur mit Augenmerk auf quantitative und qualitative ökologische Indikatoren mit einer Präferenz für quantitative Indikatoren analysiert. Die Analyse wurde auch hier technologieoffen durchgeführt und jegliche Indikatoren wurden extrahiert, die in der Literatur aufkamen, ohne bereits eine Vorauswahl zu treffen.

Dadurch ergab sich insgesamt eine Liste von **223 Indikatoren**. In einem ersten Schritt wurden diese Indikatoren nach den sechs Klima- und Umweltzielen gruppiert, wobei die beiden Klimaziele zur Vereinfachung zu einem Ziel vereint wurden. Das Ergebnis dieser Gruppierung ist wie folgt:

- **127** Klima-Indikatoren (aus den Bereichen Energiebedarf, Energieeffizienz, Treibhausgase und deren Minderung)
- **12** Biodiversitäts-Indikatoren
- **20** Kreislaufwirtschafts-Indikatoren
- **18** Umweltverschmutzungs-Indikatoren
- **19** Wasser-Indikatoren
- **27** nicht-zuordenbare Indikatoren

Aus dieser Erstanalyse der Indikatoren konnten folgende Beobachtungen abgeleitet werden:

- Starken Fokus auf Klima- und Energie-Indikatoren
- Wenig Spezifisches über Anwendungsfälle in der Telekommunikationsinfrastruktur
- Sehr spezifische Anwendungsfälle (insbesondere bei Rechenzentrum)
- Teils irrelevante Indikatoren aus ökologischer Sicht, obwohl in entsprechendem Kontext beschrieben
- Übertragbarkeit der Indikatoren auf die TK-Infrastruktur ist zu prüfen

Diese Beobachtungen stellten die Grundlage dar, um die folgenden Auswahlkriterien zu definieren, mit denen die 223 Indikatoren reduziert und weiter strukturiert werden konnten:

- Ist der Indikator **relevant** für eines der **Klima- und Umweltziele**? Passt die ursprüngliche Einordnung?
- Deckt der Indikator Potential alle/einige **Lebensphasen** der Telekommunikationsinfrastruktur (TKI) ab?
- Ist eine **Anwendbarkeit** in der TKI **vorstellbar**?
- Ist der Indikator **etabliert**, wurde er bereits benutzt?
- Ist der Indikator gleich einem anderen Indikator und stellt eine **Dopplung** dar?

Auf Basis dieser Auswahlkriterien wurden die 223 Indikatoren durch das Expertenteam geprüft. Daraus resultierten vier Gruppen von Indikatoren: Primärindikatoren, LCA-Indikatoren, Back-up-Indikatoren und ein Set von ausgeschlossenen Indikatoren. Abbildung 7 verdeutlicht diese Vorgehensweise.

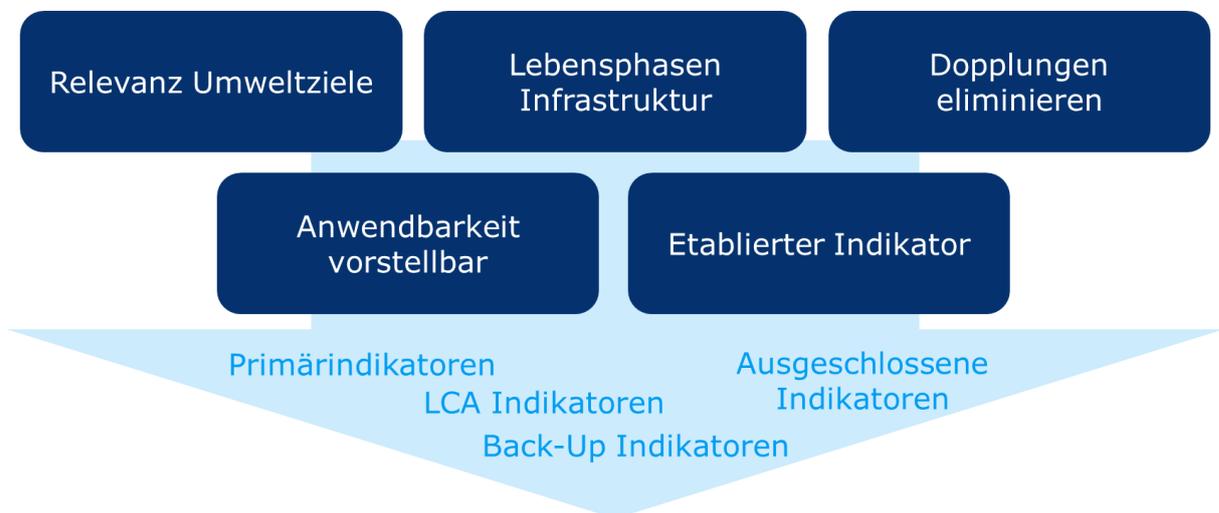


Abbildung 7: Bewertungskriterien und vier Ergebnisgruppen der Indikatorenbewertung.

Dabei umfassen die **ausgeschlossenen Indikatoren** jene Indikatoren, die den Auswahlkriterien nicht ausreichend standhalten konnten und entsprechend nicht weiter betrachtet wurden. Bei dem Großteil der Indikatoren war ausschlaggebend, dass sie sich ausschließlich und sehr spezifisch nur auf den Anwendungsfall „Rechenzentrum“ beziehen, und daher die Übertragbarkeit und Relevanz für die Technologieperspektive des Forschungshabens als nicht gegeben angesehen wurde<sup>13</sup>. Des Weiteren gab es einige Indikatoren, die bezüglich der Klima- und Umweltziele irrelevant waren (keinen ausreichenden Bezug zu ökologischer Nachhaltigkeit hatten) und daher aussortiert wurden.

Alle weiteren Indikatoren wurden als **Primärindikatoren**, **LCA-Indikatoren** oder **Back-Up-Indikatoren** klassifiziert und in der weiteren Arbeit berücksichtigt. Primärindikatoren umfassen dabei jene Indikatoren, für die die Auswahlkriterien erfüllt waren, da die Indikatoren beispielsweise den Klima- und Umweltzielen zugeordnet werden konnten und in der Literatur etabliert waren. Eine weitere Kategorie wurde für Indikatoren gebildet, die aus dem Kontext der Ökobilanz (LCA) stammen und somit in Verbindung mit der notwendigen Software und

<sup>13</sup> Beispiele für hier ausgeschlossene Indikatoren sind 'Chiller Efficiency', welche die Energieeffizienz der Kälteanlagen als Verhältnis aus Energiebedarf der Kälteanlagen und Kühllast des Rechenzentrums misst oder die 'Corporate Average Datacenter Efficiency', einer Kombination aus der Nutzung und Effizienz der IT-Ausrüstung und der Einrichtung, deren Bewertung nach einem fünfstufigen System erfolgt.

Datenbanken zielführend für den Projektkontext sind. Sie haben den Vorteil, dass sie ein breites Bild über verschiedene Umweltziele liefern und alle Lebensphasen abdecken. Aufgrund der LCA-Methodik besteht zunächst noch keine Bezugsgröße, da diese im Rahmen einer LCA als funktionelle Einheit fallspezifisch erst definiert werden muss. Anwendungen der Methodik im TKI-Kontext bestehen bereits und wurden im Zuge der Literaturrecherche identifiziert und ausgewertet. Weiterhin wurden einige Indikatoren dem Back-Up zugeordnet. Die Indikatoren dieser Kategorie sind verglichen mit den Primärindikatoren weniger zielführend oder geeignet, da sie die Auswahlkriterien nur teilweise erfüllen. Sie konnten den Klima- und Umweltzielen zugeordnet werden und sind prinzipiell für eine ökologische Bewertung geeignet. Jedoch sind die Indikatoren in dieser Kategorie entweder qualitativ oder die Übertragbarkeit ihrer spezifischen Anwendung auf den weiteren TKI-Kontext muss geprüft werden. Weiterhin wurden hier Indikatoren zugeordnet, die sich gerade in Entwicklung befinden und somit nicht etabliert sind. Außerdem wurden Indikatoren hier zugeordnet, die einem Primärindikator sehr ähnlich sind, jedoch z. B. eine andere Bezugsgröße aufweisen. Abbildung 8 fasst die wesentlichen Charakteristika der drei Kategorien zusammen.

Der Fokus der weiteren Analyse wurde auf die Primärindikatoren und LCA-Indikatoren gelegt, wobei die Back-up-Indikatoren weiterhin Berücksichtigung finden, sofern sich Primärindikatoren als ungeeignet erweisen.

Primärindikatoren	LCA Indikatoren	Back-Up Indikatoren
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Umweltziel zuordenbar</li> <li>• Übertragbarkeit machbar und/oder durch leichte Modifizierung wahrscheinlich</li> <li>• Sehr prominent in Literatur</li> <li>• Geringe Komplexität</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bezugsgröße nicht immer klar → AP II</li> <li>• Decken alle Lebensphasen ab</li> <li>• Spiegeln alle Umweltziele wider</li> <li>• Anwendung im Kontext Telekommunikationsinfrastruktur besteht</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Umweltziel zuordenbar</li> <li>• Grundsätzlich interessant und relevant im Kontext ökologische Bewertung</li> <li>• Bedenken bzgl. Übertragbarkeit</li> <li>• Sehr spezifisch / sehr spezifischer Anwendungsfall</li> <li>• Zweifel an Relevanz für Infrastruktur</li> <li>• Messbarkeit unklar und/oder sehr komplex</li> <li>• Eher qualitative Ausrichtung</li> <li>• Zu wenig definierter Indikator</li> <li>• Einem Primärindikator sehr ähnlich</li> </ul>

Abbildung 8: Verbleibende Gruppen von Indikatoren für die weitere Betrachtung.

### 4.3 Detaillierter Überblick ökologischer Nachhaltigkeitsindikatoren

Resultierend aus der in Kapitel 4.2 beschriebenen Analyse ergibt sich eine Liste aus 77 ökologischen Nachhaltigkeitsindikatoren, die sich aus 26 Primärindikatoren, 31 LCA-Indikatoren und 20 Back-Up-Indikatoren zusammensetzt. Abbildung 9 gibt eine Übersicht über die pro Gruppe und Klima-/Umweltziel zugeordnete Anzahl von Indikatoren, die im Folgenden näher benannt und beschrieben werden. Die Übersicht zeigt eine starke Konzentration an Indikatoren im Klimabereich und im Bereich Kreislaufwirtschaft. In den Bereichen Wasser, Biodiversität und Umweltverschmutzung hingegen ist die Verfügbarkeit potenziell relevanter Indikatoren hingegen begrenzter. Diese Erkenntnis deckt sich mit den Erwartungen des Projektteams, da Energie- und Klimabezogene Indikatoren generell stark unter den ökologischen Nachhaltigkeitsindikatoren vertreten sind, gut quantifizierbar sind und aufgrund des politischen und gesellschaftlichen Fokus derzeit besonders häufig adressiert werden. Weiterhin sind zwar aus anderen Sektoren für die Umweltziele Wasser und Umweltverschmutzung zahlreiche Indikatoren bekannt, aufgrund des Fokus der Recherche zu Indikatoren für TKI war jedoch kein Fokus auf Luft- oder Wasseremissionen zu erwarten, da in diesem Sektor anders als beispielsweise in der Industrie

kaum direkten Emissionen in Wasser und Luft entstehen. Das Thema Kreislaufwirtschaft ist vor dem Hintergrund knapper werdender Ressourcen und dem Bedarf an beispielsweise kritischen Rohstoffen für die Digitalisierung wesentlich bei der Betrachtung der Nachhaltigkeit der TKI, sodass hier entsprechend viele Indikatoren identifiziert wurden. Insgesamt ist die Liste der Indikatoren sehr umfangreich und umfasst Aspekte aus verschiedenen Fachrichtungen und Perspektiven. Auch zeigte sich eine zunehmende Wiederholung bereits identifizierter Indikatoren mit fortgeschrittener Recherche. Eine vollumfängliche Liste kann an dieser Stelle jedoch nicht gewährleistet werden.

Umweltziel	Primärindikatoren	LCA Indikatoren	Back-Up Indikatoren
Klima	8	4	13
Wasser	3	6	3
Biodiversität	3	6	1
Kreislaufwirtschaft	11	7	2
Umweltverschmutzung	1	8	1

Abbildung 9: Anzahl von Indikatoren pro Umweltziel und Indikatorengruppe nach erster Analyse.

### 4.3.1 Klima-Indikatoren

Tabelle 3: Klima-Indikatoren in den verschiedenen Gruppen zur weiteren Betrachtung.

Primärindikatoren	LCA-Indikatoren	Back-Up Indikatoren
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Carbon Emission Factor</li> <li>• Carbon Intensity per Unit of Data (CIUD)</li> <li>• Carbon Usage Effectiveness</li> <li>• Telecommunications Energy Efficiency Ratio (TEER)</li> <li>• Energy intensity of the network (kWh/GB)</li> <li>• Power Usage Effectiveness (PUE)</li> <li>• Green Energy Coefficient</li> <li>• Cooling Load Density</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kumulierter Energieaufwand (KEA)</li> <li>• Climate change/Global Warming Potential (GWP100) in kg CO<sub>2</sub> eq.</li> <li>• Primary energy consumption (MJ)</li> <li>• Energy consumption - usage (MJ)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Energy Management Systems</li> <li>• ENERGY STAR Score for DC</li> <li>• Cumulated Performance Efficiency (CPE)</li> <li>• Compute Power Efficiency</li> <li>• Type and amount of refrigerants used and leakage amount per year</li> <li>• Energy Reuse Effectiveness</li> <li>• Energy Reuse factor (ERF)</li> <li>• In-house Reuse Factor (IRF)</li> <li>• Facility Efficiency</li> <li>• CO<sub>2</sub> avoided Emissions</li> <li>• Jährlicher Energiebedarf gesamtes Rechenzentrum (KEA/Jahr/Rechenzentrum)</li> <li>• Green Energy Consumed (GEC)</li> <li>• THG-Potenzial des Strommixes in CO<sub>2</sub> eq. pro kWh</li> </ul>

Im Bereich „Klima“ liegen die meisten Indikatoren aus der betrachteten Literatur vor. Wie aus Tabelle 3 ersichtlich wird, wurden acht Primärindikatoren identifiziert. Viele dieser Indikatoren arbeiten mit der Erhebung von CO<sub>2</sub>-Äquivalenten, welche ins Verhältnis zu diversen Bezugsgrößen gesetzt werden. Bei den Primärindikatoren wird zu diesem Stand in der Studie angenommen, dass sie Potenzial zur Übertragbarkeit und Anwendbarkeit im Anwendungsfall Telekommunikationsinfrastruktur besitzen. Ein Beispiel ist die „Kohlenstoff Intensität (CO<sub>2</sub>e) pro Datenunit“. Dem bisherigen Eindruck folgend ist zu erwarten, dass dieser Indikator Potenzial besitzt sich auf die verschiedenen Infrastrukturen übertragen zu lassen und relevante Informationen hinsichtlich der Nutzenphase der jeweiligen Infrastruktur in Bezug auf die Kohlenstoff-Intensität und somit auf den Einfluss auf das Klimaschutzziel erzeugen kann.

Wie zu sehen ist, finden sich in der Liste der Back-Up-Indikatoren vorrangig Indikatoren, die einen spezifischen Anwendungsfall haben (z.B. „Jährlicher Energiebedarf gesamtes Rechenzentrum“) oder Indikatoren wie der „Energy Reuse Factor“, der sich auf die Wiedergewinnung und -nutzung von Energie (Wärme) auch im Kontext Rechenzentrum bezieht und wahrscheinlich geringe Relevanz für die Gesamtheit des untersuchten Anwendungsfalls hat, da der Indikator nur eine limitierte und sehr spezifische Aussage erlaubt. Ebenso finden sich hier Indikatoren wie die Frage nach dem Bestehen eines „Energy Management Systems“. Dieser Indikator hat zum einen eine qualitative Komponente, zum anderen bezieht er sich auf Gebäude und lässt höchstwahrscheinlich auch keine Gesamtaussage für die TK-Infrastruktur zu.

### 4.3.2 Wasser-Indikatoren

Tabelle 4: Wasser-Indikatoren in den verschiedenen Gruppen zur weiteren Betrachtung.

Primärindikatoren	LCA-Indikatoren	Back-Up Indikatoren
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Energy Water Intensity Factor</li> <li>• Water Reuse Rate</li> <li>• Water Usage Effectiveness (WUE)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Freshwater eutrophication in kg P eq</li> <li>• Marine eutrophication in kg N eq</li> <li>• Freshwater ecotoxicity in kg 1,4-DB eq</li> <li>• Ecotoxicity (freshwater: CTUe)</li> <li>• Marine ecotoxicity in kg 1,4-DB eq</li> <li>• Water depletion in m<sup>3</sup></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Water Usage Effectiveness (site)</li> <li>• Water Usage Effectiveness (source)</li> <li>• Water Re-Usage Effectiveness</li> </ul>

Im Bereich „Wasser“ liegt im Vergleich zu z.B. Klima eine beschränktere Auswahl an Indikatoren aus der Literatur vor (siehe Tabelle 4). In den Primärindikatoren finden sich drei Indikatoren, die aus dem Rechenzentrum-Kontext kommen und bei denen noch unklar ist, ob sie übertragbar auf anderen Komponenten der Telekommunikationsinfrastruktur sind. Zum Stand dieses Arbeitsschrittes stellen sie die favorisierte Auswahl an Indikatoren im Bereich Wasser dar. Die „Water Reuse Rate“ erhebt beispielsweise, inwieweit Wasser in der Nutzenphase wiederverwendet wird. Vermutlich ist dies ein Anwendungsfall, der hauptsächlich im Rechenzentrum relevant ist. Wie man sieht, sind die noch kleinteiligeren Versionen („source“ und „site“) z.B. des Primärindikators „Water Usage Effectiveness“, den Back-Up Indikatoren zugeordnet.

Aufgrund des Mangels an Wasserindikatoren wird es in den nächsten Schritten der Studie essenziell sein, die vorgeschlagenen Primärindikatoren eingehend zu prüfen und zu entscheiden, ob Übertragbarkeit und Anwendbarkeit auf Telekommunikationsinfrastrukturen gegeben ist oder

ob an dieser Stelle LCA-Indikatoren, wie zum Beispiel „*Water depletion*“ (auch bekannt als „Wasserfußabdruck“ oder „*Water Footprint*“), eine geeignetere Alternative darstellen.

### 4.3.3 Biodiversitäts-Indikatoren

**Tabelle 5: Biodiversitäts-Indikatoren in den verschiedenen Gruppen zur weiteren Betrachtung.**

Primärindikatoren	LCA-Indikatoren	Back-Up Indikatoren
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Land Footprint / Land-use of data centres</li> <li>• Land-use change</li> <li>• Potentially disappeared fraction (PDF) of species during a year</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Terrestrial acidification in kg SO<sub>2</sub> eq</li> <li>• Terrestrial ecotoxicity in kg 1,4-DB eq</li> <li>• Agricultural/Natural land occupation, land use in m<sup>2</sup>a</li> <li>• Acidification (mol H<sup>+</sup> eq)</li> <li>• Eutrophication (terrestrial: mol N eq; marine: kg N eq; freshwater: kg P eq)</li> <li>• Land use (dimensionless as pt)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bauweise Infrastruktur (qualitativ abgeleitet)</li> </ul>

Im Bereich „Biodiversität“ stand aufgrund bisheriger Projekterfahrungen bereits anfangs die Vermutung im Raum, dass die Auswahl an Indikatoren verhältnismäßig klein sein würde. Dies bestätigte sich im Laufe der Literaturrecherche (siehe Tabelle 5).

Unter den Primärindikatoren befindet sich ein Indikator, der sich mit der durch die Telekommunikationsinfrastruktur genutzten Fläche, dem „*Land Footprint*“, befasst. Dieser Indikator lässt sich auch in der Auswahl der LCA-Indikatoren finden („*land-use*“), ist jedoch auch unabhängig von Ökobilanzstudien in der Literatur präsent und wurde daher auch in den Primärindikatoren gelistet. Zum Stand dieses Arbeitsschrittes wird davon ausgegangen, dass sich dieser Indikator gut auf die Telekommunikationsinfrastruktur übertragen lässt. Zudem wurde der Indikator „*Potentially disappeared fraction (PDF) of species during a year*“ identifiziert - ein etablierter Biodiversitätsindikator, der den potenziellen Schwund an Artenvielfalt durch eine untersuchte Aktivität beschreibt. Ob von einer ausreichenden Verfügbarkeit geeigneter Daten zur Ableitung dieses Indikators ausgegangen werden kann, ist im vorliegenden Anwendungsfall jedoch unklar. Dies ist ein Faktor, der im zweiten Teil der Studie hinterfragt und eingehender geprüft werden muss.

Im Bereich der Back-Up Indikatoren findet sich lediglich ein qualitativer Indikator. Beschreibungen in der Literatur erwähnen, dass z.B. unterschiedliche Methoden Kabel zu verlegen unterschiedlich disruptiv sind und diese Unterschiede in besagtem Indikator erfasst werden sollen. Letztendlich konnte hierfür jedoch keine Methode zur quantitativen Erfassung identifiziert werden. Somit hat der Indikator lediglich eine qualitative Ausrichtung. Diese kann jedoch im Kontext der Biodiversität durchaus relevant sein kann. Aus diesem Grund wurde der Indikator in das Set der Back-Up Indikatoren übernommen.

#### 4.3.4 Kreislaufwirtschafts-Indikatoren

Tabelle 6: Kreislaufwirtschafts-Indikatoren in den verschiedenen Gruppen zur weiteren Betrachtung.

Primärindikatoren	LCA-Indikatoren	Back-Up Indikatoren
<ul style="list-style-type: none"> <li>Green Material Use (GMU)</li> <li>Material Recycling Ratio</li> <li>Waste Recycle Ratio</li> <li>Percentage of used electronics refurbished</li> <li>Percentage of used electronics resold</li> <li>Percentage of used electronics recycled</li> <li>Percentage of used electronics landfilled</li> <li>Percentage of used electronics incinerated</li> <li>Recyclable design</li> <li>Longevity</li> <li>Reparability</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Abiotischer Rohstoffverbrauch (ADP)</li> <li>Metal depletion in kg Fe eq</li> <li>Fossil depletion in kg oil eq</li> <li>Resource use (minerals and metals: kg Sb eq; fossils: MJ)</li> <li>Natural abiotic resources depletion - elements (kg Sb eq.)</li> <li>Natural abiotic resources depletion - fossil (MJ)</li> <li>MIPS - Material input per unit of service (kg)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Consumption of raw materials</li> <li>Useful life measured in years</li> </ul>

Das Thema "Kreislaufwirtschaft" ist in sich bereits komplex und Bedarf mehr als einem Indikator, um hinreichend abgebildet zu werden. Auf der einen Seite ist der Aspekt des „end of life“ hier relevant, sprich die Frage, was mit Materialien und Abfällen am Ende des Lebenszyklus passiert. Auf der anderen Seite ist die Betrachtung am Anfang des Lebenszyklus hinsichtlich der eingesetzten Menge an Primärrohstoffen und Nutzung von Rezyklaten, aber auch recyclebarer Materialien relevant.

Wie in Tabelle 6 abgebildet, wurden elf Indikatoren den Primärindikatoren zugeordnet. Diese decken entweder den Anfang oder das Ende des Lebenszyklus ab. Bei der weiteren Bewertung im zweiten Teil der Studie werden vor allem Fragen der Datenverfügbarkeit relevant. Auch die Ausprägung sowie Anwendbarkeit des Indikators ist weiter zu prüfen. Verdeutlicht werden kann dies am Beispiel des Indikators „*recyclable design*“. Der Betrachtungsgegenstand des Indikators wirkt durchaus relevant, jedoch stellen sich Fragen bezüglich der Quantifizierung des Indikators für den vorliegenden Betrachtungsgegenstand und der damit einhergehenden Datenbedarfe und -verfügbarkeiten.

In der Liste der Back-Up Indikatoren finden sich Indikatoren, die im Vergleich wenig konkret sind: Der Indikator „*Useful life measured in years*“ geht beispielsweise der Frage nach den nutzbaren Jahren von Infrastruktur nach. Auch wenn dies im Kontext der Kreislaufwirtschaft relevant sein kann, ist eine genaue und belastbare Quantifizierung schwer durchführbar. Der zweite Indikator („*Consumption of raw materials*“) zum Verbrauch von Rohmaterialien trifft allein keine Aussage hinsichtlich der Zirkularität der Infrastruktur ist dementsprechend eher als komplementäre Information zu betrachten (die jedoch auch durch die LCA-Indikatoren zur Ressourcennutzung gewonnen werden kann).

### 4.3.5 Umweltverschmutzungs-Indikatoren

**Tabelle 7: Umweltverschmutzungs-Indikatoren in den verschiedenen Gruppen zur weiteren Betrachtung.**

Primärindikatoren	LCA-Indikatoren	Back-Up Indikatoren
<ul style="list-style-type: none"> <li>Electronic Disposal Efficiency</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ozone depletion in kg CFC11 eq</li> <li>Waste production (kg)</li> <li>Ionizing radiation in kBq U235 eq</li> <li>Human toxicity in kg 1,4-DB eq</li> <li>Photochemical oxidant formation in kg NMVOC</li> <li>Photochemical ozone formation (kg NMVOC eq)</li> <li>Particulate matter formation (in kg PM10 eq or disease incidence)</li> <li>Fine-particle emissions (Disease occurrence)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>disposal number and weight of obsolete IT hardware as well as Electronics Disposal Efficiency (EDE) metric</li> </ul>

Im Kontext der EU-Taxonomie befasst sich das Umweltziel *Umweltverschmutzung vermeiden* mit Schadstoffen für die Umwelt in Luft, Land und Wasser. Im Gegensatz zum Bereich Klima liegt der Fokus hier nicht auf Treibhausgasemissionen, sondern umfasst Schadstoffe oder karzinogene und toxische Stoffe (dies spiegelt sich auch in den aufgeführten Lebenszyklus-Indikatoren wider).

In Tabelle 7 ist zu erkennen, dass sowohl ein Indikator für den Bereich Primärindikatoren als auch einer im Bereich Back-Up Indikatoren identifiziert wurde. Es ist anzumerken, dass diese Zuordnung nicht eindeutig ist und diese Indikatoren ebenso dem Bereich „Kreislaufwirtschaft“ zugeordnet werden könnten. Grundsätzlich hat sich im Laufe der Literaturrecherche und vor dem Hintergrund der Klima- und Umweltziele laut EU-Taxonomie herauskristallisiert, dass das Nachhaltigkeitsziel im Bereich Umweltverschmutzung eine untergeordnete Relevanz für die Telekommunikationsinfrastruktur hat, da kaum Indikatoren für dieses Umweltziel identifiziert wurden. Dies ist damit zu begründen, dass der Sektor nur indirekt zur Verschmutzung von Wasser, Boden und Luft über seine vorgelagerte Produktion oder nachgelagerte Entsorgung beiträgt und direkte Emissionen von Schadstoffen nicht zu erwarten sind. Derartige Effekte auf die Umwelt lassen sich somit primär anderen Wirtschaftsaktivitäten zuordnen, können aber durch Lebenszyklusbetrachtungen mittels LCA auch für den durch die TKI bedingten Anteil berechnet werden. Weiterhin deckt bereits die Kategorie der Kreislaufwirtschaftsindikatoren Auswirkungen auf die Umwelt beispielsweise in Form von Deponierung ab.

Im weiteren Verlauf der Studie wird dieses Ziel daher als im untersuchten Sektor nachrangig betrachtet und die hier vorhandenen Primärindikatoren und Back-Up Indikatoren dem Bereich Kreislaufwirtschaft zugeordnet.

### 4.4 Zwischenfazit

Folgende Erkenntnisse lassen sich aus der Erarbeitung zusammenfassen:

- Ökologisch vergleichende Betrachtung der Nachhaltigkeit von TKI **kaum** in Literatur vorhanden → LCA-Vergleich von Mobilfunk und Festnetz in französischer Studie (Arcep / Ademe)

- Starker Fokus bisheriger Studien auf **Klima-** und **Energieindikatoren**
- Bewertung ökologischer Nachhaltigkeit (Klima/Energie) vor allem im Kontext **Rechenzentrum** zu finden
- Indikatoren aus der Lebenszyklusmethodik decken alle Lebensphasen sowie alle Klima- und Umweltziele ab. Sie finden zudem auch im Kontext Telekommunikationsinfrastruktur bereits Anwendung. Aus diesem Grund werden wir sie auch im zweiten Teil der Studie betrachten und dort noch weiter prüfen. Insbesondere hinsichtlich Datenverfügbarkeit und -bedarf für den vorliegenden Betrachtungsgegenstand (Mobilfunk, Festnetz, Satellit).
- Es bleibt weiterhin ein großer Pool an Indikatoren (77). Dies erlaubt einen iterativen Prozess, falls sich identifizierte Primärindikatoren als ungeeignet herausstellen sollten.
- Ziel ist es, eine Liste an handbaren Indikatoren zu identifizieren. Hierbei wird die maximale Anzahl an Indikatoren pro Klima- und Umweltziel nicht eingeschränkt. Insbesondere mit Blick auf Umweltziele wie Kreislaufwirtschaft, welche komplexer in Betrachtung und Abbildung sind, ist dies erforderlich.
- Besonderes Augenmerk bei der weiteren Bearbeitung bedarf die Anwendbarkeit (vor allem bezüglich Datenverfügbarkeit und -bedarf), Übertragbarkeit und Praktikabilität der einzelnen Indikatoren. Das ist vor allem wichtig, da viele Indikatoren aus sehr spezifischen Anwendungsfällen (Rechenzentren) heraus identifiziert wurden und zum Stand dieses Arbeitsschritts die Übertragbarkeit teilweise noch unklar ist.
- Das Umweltziel „Umweltverschmutzung vermeiden“ zeigt wenig Relevanz im Bereich Telekommunikationsinfrastruktur und wird daher im weiteren Verlauf des Vorhabens zurückgestellt.

## 5. ABLEITUNG EINES GEEIGNETEN INDIKATORENSETS

Basierend auf den zuvor identifizierten Indikatoren sollte ein geeignetes Set zur anwendungsorientierten Bewertung der ökologischen Nachhaltigkeit von TK-Infrastruktur abgeleitet werden. Die ökologische Nachhaltigkeit soll dabei ganzheitlich betrachtet werden, d. h. nicht im Vorfeld auf einzelne Aspekte wie z. B. Klima beschränkt werden. Weiterhin sollen alle Phasen des Lebenszyklus betrachtet werden, von der Herstellung über die Nutzung bis hin zum Ende des Lebenszyklus der Infrastrukturen. Die dabei vorgenommenen Schritte sind in Abbildung 10 aufgelistet. Zunächst wird dazu ein detaillierter Überblick über die Technologien im Fokus des Forschungsvorhabens gegeben (Kapitel 5.1 und 5.2). Anschließend werden deren Lebenszyklen beschrieben, um einen Überblick über (mögliche) Umweltauswirkungen zu erhalten (Abschnitt 5.3). Im Kern dieses Kapitels (5.4) sollen geeignete Indikatoren, die eine quantitative und qualitative Bewertung der ökologischen Nachhaltigkeit der zu analysierenden Kommunikationstechnologie bzw.-netzen erlauben, abgeleitet werden.

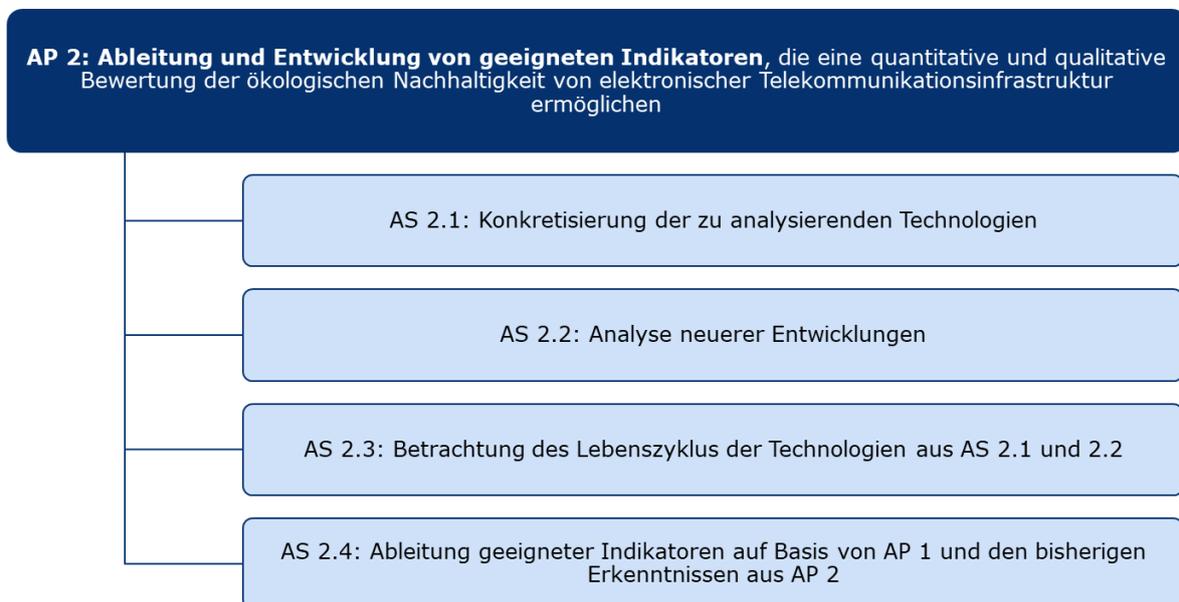


Abbildung 10: Übersicht der Arbeitsschritte zur Ableitung eines geeigneten Indikatorensets für TK-Infrastrukturen.

### 5.1 Die Technologien im Überblick

In diesem Abschnitt wird ein Überblick über die verschiedenen Telekommunikationstechnologien gegeben. Dabei wird im Wesentlichen kurz auf deren Aufbau, sowie aktive und passive Komponenten eingegangen. Dies verdeutlicht, welche Komponenten beim Aufbau der Infrastruktur benötigt werden und wo im Betrieb entsprechende Energieverbräuche entstehen. Schließlich wird kurz auf den Rückbau der Infrastruktur eingegangen.

#### 5.1.1 Festnetz

Im Festnetzbereich stehen mit dem Kupferkabel, der Glasfaser und dem Kabelnetz im Wesentlichen drei Technologien zur Verfügung, auf die im Folgenden kurz eingegangen wird.

Die Übertragung über **Kupferkabel**, das ursprünglich für die Telefonie ausgelegt wurde, erfolgt heute auf Basis der DSL-Technologie und deren Weiterentwicklungen (ADSL, VDSL etc.). Im Festnetzbereich erfolgt derzeit der sukzessive Ausbau von FTTH-Netzen, so dass die Glasfaser

perspektivisch immer näher zum Endverbraucher rückt, wie die Abbildung 11 schemenhaft zeigt. Es erfolgt also ein sukzessiver Switch-Off von Kupfer hin zu Glasfaser.

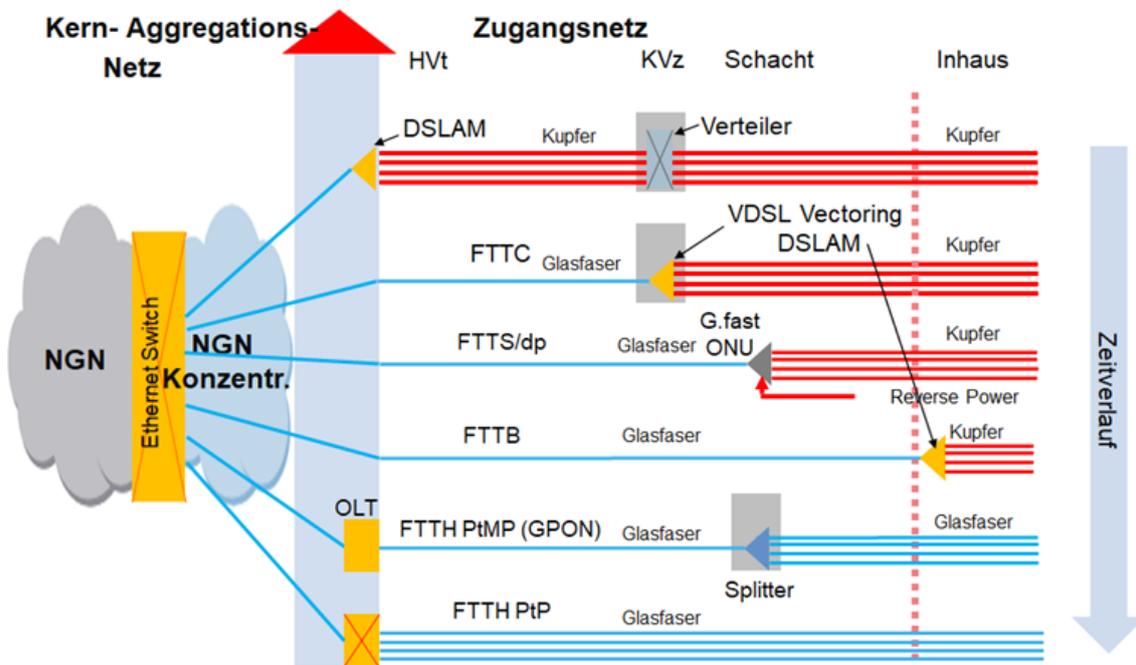


Abbildung 11: Übersicht verschiedener Festnetz-Technologien im Zeitverlauf (Quelle: WIK-Consult 2022).

Durch diese Entwicklung verändern sich auch die notwendigen Netzwerkkomponenten (insbesondere deren Anzahl), die wiederum einen Einfluss auf die Nachhaltigkeitsindikatoren haben (z.B. durch veränderten Strombedarf, Flächen- und Ressourcenverbrauch). Auf dem Weg vom Kupferkabel zur Glasfaser gibt es verschiedene Zwischenstufen. Während passive Komponenten dabei Umweltauswirkungen durch den Ressourcenverbrauch haben, haben die aktiven Komponenten einen entsprechenden Strombedarf.

Beim VDSL Vectoring bedarf es eines DSLAM (Digital Subscriber Line Access Multiplexer), der die Teilnehmeranschlussleitungen (Kupferdoppeladern) terminiert und die Daten aggregiert in das Glasfasernetz überträgt oder von diesem empfängt.<sup>14</sup> Der DSLAM als aktive Komponente benötigt einen Stromanschluss.<sup>15</sup> Bei einer durchgängigen **Glasfaserinfrastruktur** (FTTH) wird im Wesentlichen zwischen GPON (Gigabit Passive Optical Network) und einer PtP (Point-to-Point)-Verbindung unterschieden. GPON stellt eine passive Zugangstechnologie dar, bei der die verfügbare Bandbreite zwischen den Endkunden mittels eines passiven Splitters aufgeteilt wird. Dagegen sind bei PtP-Verbindungen grundsätzlich höhere Datenraten möglich. Allerdings ergibt sich unter Verwendung der Zugangsporten in den OLT (Optical Line Terminals) u.U. ein höherer Energiebedarf.<sup>16</sup>

Das **Kabelnetz** ist dadurch charakterisiert, dass sich die verfügbare Bandbreite unter den Endnutzern geteilt werden muss ("shared medium"). Die Darstellung in Abbildung 12 zeigt die grundlegende Architektur eines Kabelnetzes.

<sup>14</sup> <https://www.ip-insider.de/was-ist-ein-dslam-digital-subscriber-line-access-multiplexer-a-820375/>, zuletzt abgerufen am 09.11.2022.

<sup>15</sup> Vgl. Breide et al.(2021). Energy consumption of telecommunication access networks.,S. 15.

<sup>16</sup> "Während bei der P2P-Technik an einen Port des OLTs nur ein Nutzer angeschlossen sein kann, sind es bei den PON-Techniken mehrere Nutzer pro Port. Ein Beispiel hierfür ist der SI3000 Lumia G16 von Iskratel, über dessen 16 Ports sich tausende Endnutzer anschließen lassen. Ausgehend von einem Breitbandanschluss mit 250 MBit/s verbraucht ein mittels GPON angeschlossener Nutzer 5,2 kWh pro Jahr (bei XGS-PON sind es 5,5 kWh). Ist stattdessen P2P in Benutzung, steigt der Verbrauch auf 19 kWh [...]."

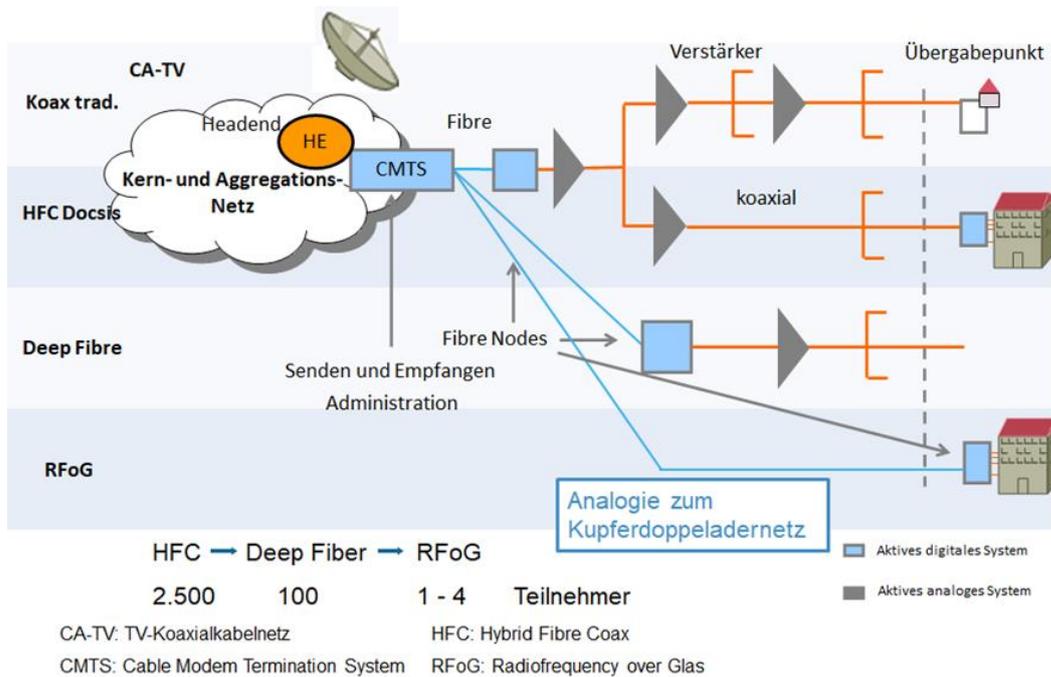


Abbildung 12: Grundlegende Architektur des Kabelnetzes (Quelle: WIK-Consult 2022).

Das CMTS als zentrales Element des Kabelnetzes bildet die Vermittlungsstelle, in der die Verbindungen zusammenlaufen.<sup>17</sup> Ähnlich wie beim Kupferkabel wird auch hier immer näher zum Kunden hin Glasfaser verbaut. Das heutige Kabelnetz ist weitestgehend eine Mischung aus Glasfaser und Koaxialkabel (HFC), d.h. auf dem Weg zum Endkunden bestehen als aktive Komponenten Glasfaserknotenpunkte und Verstärker. Die verschiedenen aktiven Komponenten sind für die wichtigsten Zugangstechnologien in Tabelle 8 noch einmal zusammengefasst.

Tabelle 8: Aktive Komponenten verschiedener Festnetz-Technologien (Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Breide et al. (2021)).

	VDSL2- Vectoring	FTTH PtP Ethernet	FTTH GPON	HFC Docsis 3.0
<b>Kernnetz (inkl. Rechenzentrum)</b>	Server, Klima, USV			
<b>Zugangsnetz</b>	DSLAM	Optical Line Terminal (OLT)	Optical Line Terminal (OLT)	Cable Modem Termination System (CMTS)
	Vectoring-Recheneinheit	Central Office Equipment (COE)	Central Office Equipment (COE)	Glasfaserknotenpunkt inkl. Verstärker
	Verbindung ins Kernnetz Kühlung			
<b>Endkunde</b>	DSL-Router mit Modem und WLAN	Optical Network Unit (ONU)(aktiv), Router mit WLAN		Verstärker am Hausanschluss, DOCSIS-Router mit Modem und WLAN

<sup>17</sup> Schnabel (2019). Kommunikationstechnik-Fibel, 5. vollständig überarbeitete Auflage von Oktober 2019 S. 216.

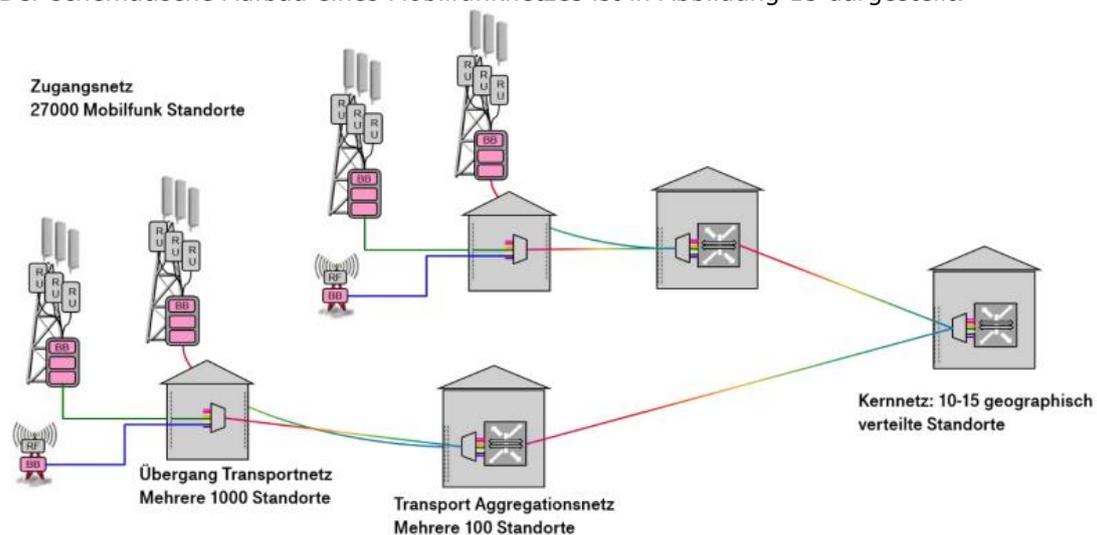
Beim Endkunden kommt ebenfalls verschiedene Technik zum Einsatz. Das ONU kommt bei Glasfaserverbindungen zum Einsatz und wandelt optische in elektrische Signale um.

Für die Verlegung des Glasfaserkabels werden oftmals Pflugverfahren eingesetzt. Daneben existiert das sog. Spülbohrverfahren, bei dem horizontale Bohrungen unter der Erdoberfläche durchgeführt werden. Ein weiteres Verlegeverfahren stellt zudem das sogenannte Fräsen (Microtrenching) dar. Statt einen Schacht auszuheben, wird lediglich ein schmaler Schlitz in die die Straßendecke gefräst. Darin werden die Glasfaser-Kabel versenkt und die Oberfläche kann rasch wieder verschlossen werden.<sup>18</sup> Für die Verlegung kommen sodann Lehrrohre zum Einsatz. Untersuchungen zum konkreten Ressourcenverbrauch der verschiedenen Festnetztechnologien während der verschiedenen Lebenszyklen sind in der Literatur noch nicht erschienen.<sup>19</sup> Dies schließt auch den Rohstoffverbrauch und Rückbau der Infrastruktur ein. Auf diesem Gebiet besteht also noch entsprechender Forschungsbedarf.

### 5.1.2 Mobilfunk

Mobilfunknetze bestehen aus einem Kernnetz, dem Transportnetz und dem Zugangsnetz. Das Zugangsnetz stellt dabei über die Luftschnittstelle die Verbindung zwischen den Geräten der Endkunden und dem Transportnetz da. Transportnetz und Kernnetz sind im Wesentlichen über Glasfaser oder Richtfunk angebunden bzw. vernetzt.

Der schematische Aufbau eines Mobilfunknetzes ist in Abbildung 13 dargestellt.



**Abbildung 13: Schematischer Aufbau eines Mobilfunknetzes (Quelle: <https://www.bundestag.de/resource/blob/908164/8124058f9c68d93c9e7292baf133537b/Stellungnahme-Thomas-Tschersich-Deutsche-Telekom-data.pdf>, zuletzt abgerufen am 10.11.2022).**

Die folgenden Komponenten sind somit wesentliche Bestandteile eines Mobilfunknetzes:

Aktive Komponenten:

- BBU (Baseband Unit): Die BBU stellt (üblicherweise) über Glasfaser die Verbindung zum Transport-/Kernnetz her. Die BBUs sind für das Management einer Mobilfunkzelle verantwortlich.
- Remote Radio Units (RRUs): Sie sind für die Umwandlung des digitalen Datenstroms aus der BBU in ein analoges Signal verantwortlich um, das dann an die Antenne weitergeleitet

<sup>18</sup> <https://www.deutsche-glasfaser.de/glasfaser/bau/uebersicht/>, zuletzt abgerufen am 10.11.2022.

<sup>19</sup> Vgl. Liu et al. (2019). Impacts of the digital transformation on the environment and sustainability, Issue Paper under Task 3 from the "Service contract on future EU environment policy", S. 60.

wird. "Um Dämpfungen durch das Antennenkabel möglichst gering zu halten, sind RRUs am Antennenmast befestigt, meistens direkt neben oder unterhalb der Funkantenne."<sup>20</sup>

- Antennen: Bei LTE z.T. als passive Komponenten installiert, bei 5G als Aktive Systeme (Active Antenna Systems, AAS).
- (Endgeräte (in erster Linie Mobilfunktelefone))

Passive Komponenten:

- Masten: Hier kommen unterschiedliche Materialien bzw. Bauweisen in Frage: Beton, Stahlgitter oder Stahlrohre
- Glasfaserkabel zum / im Kernnetz und zur Verbindung RRU / BBU
- Koaxialkabel zur Verbindung RRU und Antennen

Grundsätzlich können alle Mobilfunkgenerationen mit derselben Infrastruktur betrieben werden, die benutzten Antennen und Radiomodule sind technologieneutral. Allein die Baseband-Units musste beim Sprung von 3G auf 4G entsprechend ausgetauscht werden.<sup>21</sup> Insofern kann auch von derselben Nutzung an Landfläche pro Antennenstandort ausgegangen werden.

Die derzeit genutzten Mobilfunkgenerationen 4G und 5G gelten allerdings als deutlich energieeffizienter als die Vorgängerversion 3G, die in Deutschland im Jahr 2021 abgeschaltet wurde.

Beim Aus- bzw. Aufbau eines Mobilfunknetzes spielen auch die genutzten Frequenzen eine Rolle. Niedrigere Frequenzbereiche gehen mit einer größeren Reichweite einher, besitzen aber innerhalb eines bestimmten Frequenzbandes eine geringere Übertragungskapazität. Höhere Frequenzen wie z.B. im Bereich 3,6 GHz, die für 5G genutzt werden, ermöglichen höhere Übertragungsraten, allerdings werden dabei mehr Antennen(standorte) benötigt.

Rückbauten von Mobilfunkstandorten bewegen sich im Bereich von 1 % bezogen auf alle Standorte. Bei neuen Anlagen wird die Recyclingfähigkeit bereits mitgedacht.<sup>22</sup>

### 5.1.3 Satellit

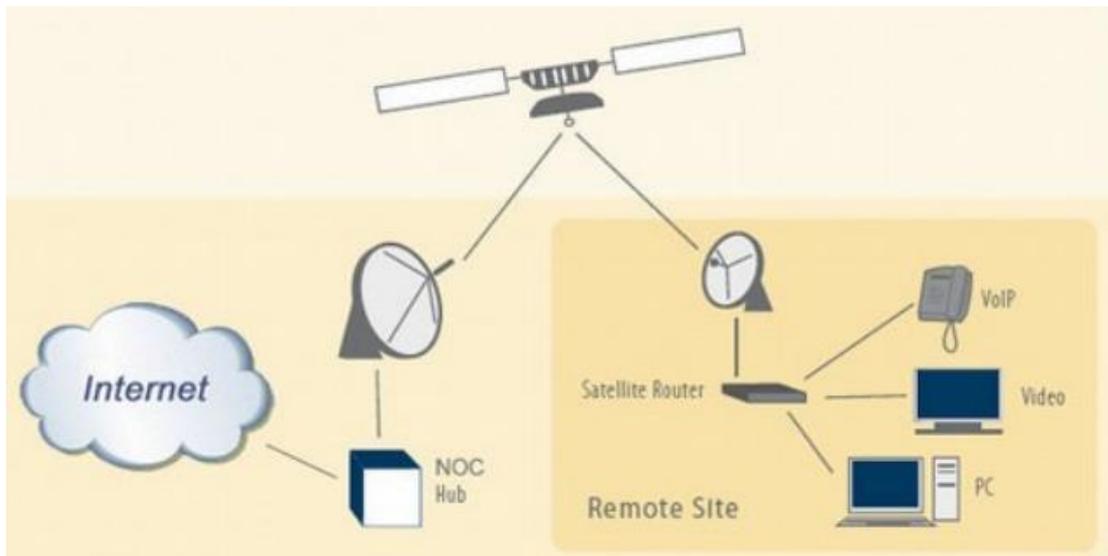
Im Bereich der Satelliten kann eine flächendeckende Abdeckung gewährleistet werden, soweit nicht Hindernisse (z.B. Bäume, Gebäude etc.) das Signal beeinträchtigen. Heutzutage wird dabei das sog. Zwei-Wege-Satelliten-Internet eingesetzt, d.h. Hin- und Rückkanal wird über Satellit realisiert, so dass eine Verbindung über örtliche Infrastrukturen wie z. B. Telefonleitungen nicht notwendig ist.<sup>23</sup> Die Infrastruktur zur Satellitenverbindung ist schemenhaft in Abbildung 14 dargestellt.

<sup>20</sup> [https://www.itwissen.info/remote-radio-unit-BBU-RRU.html#:~:text=Die%20Remote%20Radio%20Unit%20\(RRU,Generation%20funktechnische%20Transceiver-Funktionen%20ausführt.&text=Die%20RRU-Einheit%20ist%20eine,mit%20Antennen%20und%20rechentechnischen%20Funktionen.](https://www.itwissen.info/remote-radio-unit-BBU-RRU.html#:~:text=Die%20Remote%20Radio%20Unit%20(RRU,Generation%20funktechnische%20Transceiver-Funktionen%20ausführt.&text=Die%20RRU-Einheit%20ist%20eine,mit%20Antennen%20und%20rechentechnischen%20Funktionen.), zuletzt abgerufen am 11.11.2022

<sup>21</sup> <https://stadt-bremerhaven.de/5g-einfach-erklart-unterschiede-und-gemeinsamkeiten-zu-4g-3g-2g/>, zuletzt abgerufen am 21.12.2022.

<sup>22</sup> <https://www.informationszentrum-mobilfunk.de/artikel/warum-werden-mobilfunksendeanlagen-abgebaut>, zuletzt abgerufen am 21.12.2022.

<sup>23</sup> Puhl, P., Lundborg, M. (2019). Breitbandzugang über Satellit in Deutschland – Stande der Marktentwicklung und Entwicklungsperspektiven, WIK-Diskussionsbeitrag Nr. 444.



**Abbildung 14: Schematische Darstellung der Satelliteninfrastruktur (Quelle: SABER (2013). Final report on Satellite Broadband as an option for Regions, Deliverable 3, S. 35).**

Im NOC (Network Operations Centre) werden dabei die Verbindungen zwischen dem Internet und den Hausanschlüssen orchestriert. Anders als im Mobilfunk und Festnetz bedarf es keines Kernnetzes im Hintergrund. Ein Vorteil der Verbindung über Satellit aus Nachhaltigkeitsgesichtspunkten ist, dass dieser selbst seine Energie aus einem Solarpanel beziehen kann.

Elemente eines Satellitennetzes sind:

- Aktiv: Der Satellit: Die Energieversorgung erfolgt üblicherweise über Solarzellen.<sup>24</sup>
- Network Operation Centre (NOC): Der NOC „verwaltet die Verbindungen zu/von entfernten Satellitengeräten in den Räumlichkeiten der Endbenutzer und verbindet sie mit dem Internet. Das NOC überwacht und passt die Leistungspegel und die Leistung des Satellitensignals entsprechend an, verwaltet die Netzwerkkonfigurationen und stellt eine schnelle proaktive und reaktive Reaktion sicher.“<sup>25</sup>
- Bodenstationen

Beim Endnutzer:

Aktiv:

- LNB (Low Noise Blockconverter) empfangen, verstärken und setzen die vom Satelliten abgestrahlten Signale um.
- Sat-Modem

Passiv:

- Satelliten-Schüssel
- Kabel von der Sat-Schüssel zum Sat-Modem

## 5.2 Neuere Entwicklungen

Während das „Kupfer-Festnetz“ in einer Ende-zu-Ende-Betrachtung kaum noch von Veränderungen betroffen ist, insoweit der Überbau dieser Infrastruktur mit Glasfaser aus methodischen Gründen dem FTTB/H-Ausbau zugeordnet wird, zeichnen sich FTTB/H-Netze und Mobilfunknetze durch einen kontinuierlichen Ausbau und damit auch Veränderungen aus, die

<sup>24</sup> Vgl. <https://wowi.astra.ses/aktuelles/hightech-auf-hoehstem-niveau>, zuletzt abgerufen am 22.11.2022.

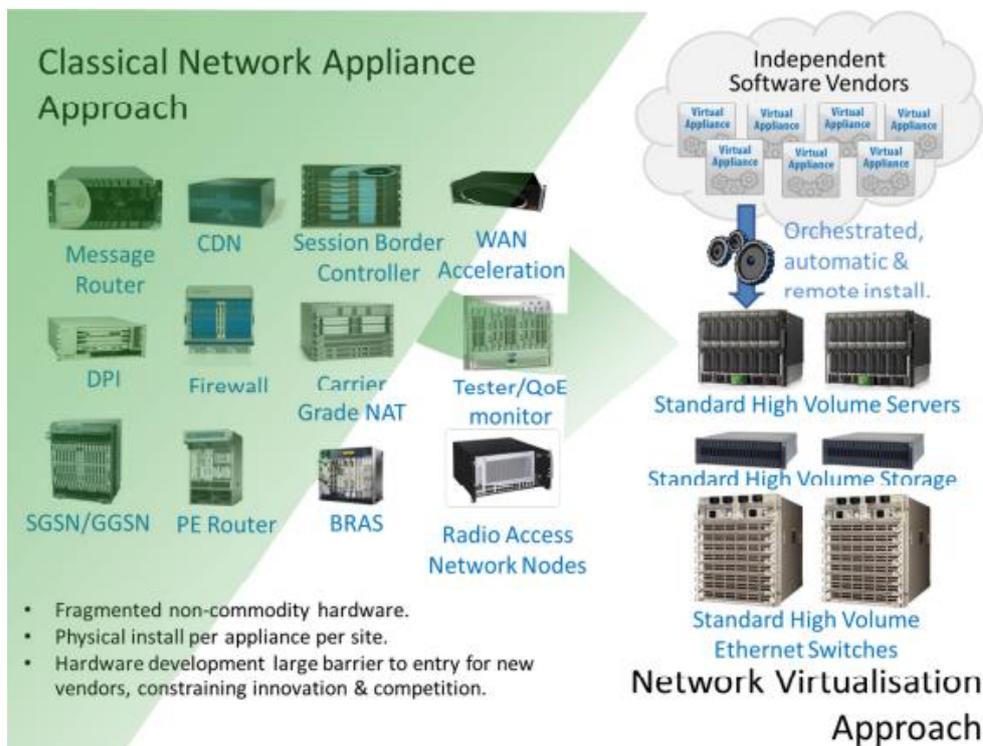
<sup>25</sup> ABER (2013). Final report on Satellite Broadband as an option for Regions, Deliverable 3, S. 37.

zudem insbesondere beim Mobilfunk auch noch ständige technologische Veränderungen reflektieren.

So werden sich perspektivisch mit der Virtualisierung und der Umsetzung von Software Defined Networks (SDN) und Open RAN die Strukturen in den Funkzugangnetzen verändern. Zudem wird es idealtypisch zunehmend eine Konvergenz mit Glasfasernetzen geben, wovon auch die Indikatoren zur Messung der ökologischen Nachhaltigkeit betroffen sein werden.

Im Einzelnen bedeutet dies: In der Vergangenheit fand die Administration der Netze häufig auf unteren Ebenen, den Netzkomponenten wie Router, Switches etc. statt.<sup>26</sup> „Dies bedeutete für die Administration eines Netzes, dass Einstellungen zur Konfigurierung der Netzfunktionen in jedem einzelnen Netzknoten erfolgen mussten. Zukünftig wird diese Funktion der Netzsteuerung auf einer höheren Netzebene zentralisiert. [...]. Auf diese Weise wird die bisher dezentral verankerte Steuerung der Netzknoten zentral steuerbar.“<sup>27</sup>

Abbildung 15 verdeutlicht die Entwicklung.



**Abbildung 15: Entwicklung neuer Netzwerktechnologien (Quelle: Chiosi et al. (2012). Network Functions Virtualisation, An Introduction, Benefits, Enablers, Challenges & Call for Action).**

Netzknoten („White Boxes“) im Netz leiten bzw. vermitteln dann immer noch den Verkehr in die unterschiedlichen Richtungen, allerdings nach Vorgaben aus der zentraler angesiedelten Netzsteuerung und nicht mehr so dezentral und autonom wie vorher.

Eine zentrale Umsetzung erlaubt es auch, ökologische Nachhaltigkeitsmaßnahmen einfacher auf den Weg zu bringen. Wird die Steuerung zentral installiert, so kann auf wenige Einrichtungen (Server / Rechenzentren) fokussiert werden und es können neben energieeffizienter Technologie auch weitere Maßnahmen wie z.B. Abwärmenutzung realisiert werden.

<sup>26</sup> Eltges et al. (2020). SDN/NFV und ihre Auswirkungen auf die Kosten von Mobilfunk und Festnetz im regulatorischen Kontext, WIK Diskussionsbeitrag Nr. 461.

<sup>27</sup> Eltges et al. (2020). SDN/NFV und ihre Auswirkungen auf die Kosten von Mobilfunk und Festnetz im regulatorischen Kontext, WIK Diskussionsbeitrag Nr. 461, S. 4.

In diesem Zusammenhang bietet Open RAN den Netzbetreibern die Möglichkeit, Netzkomponenten auch nach Nachhaltigkeitsgesichtspunkten einzukaufen. Denn ein "offenes Zugangsnetz" (Open RAN) bedeutet, dass Herstellervielfalt beim Einsatz von Netzkomponenten besteht und somit auch ein Wettbewerb um möglichst energieeffiziente Bauteile entstehen kann.

### 5.3 Betrachtung der Lebenszyklen als Grundlage der LCA-Indikatorenbewertung

Um die Eignung und Anwendbarkeit der identifizierten LCA-Indikatoren zu bewerten, müssen vor allem die Anwendbarkeit von LCA-Methodik auf die zu betrachtenden Telekommunikationsinfrastrukturen und die Verfügbarkeit potenziell nutzbarer Datensätze zur Abbildung derselben in einer LCA-Software analysiert werden.

Zur Abbildung der Umweltwirkungen muss sich das betrachtete Produktsystem (im vorliegenden Fall die verschiedenen Telekommunikationsinfrastrukturen) klar definieren und abgrenzen lassen. Das Produktsystem bezeichnet in diesem Kontext alle über den gesamten Lebenszyklus relevanten Prozesse und In-/Outputs, die erforderlich sind, um den betrachteten Service bzw. die betrachtete Infrastruktur anzubieten (vgl. Abbildung 16). Es ist wichtig, dass sich die vom Produktsystem bereitgestellte Leistung durch eine funktionelle Einheit abbilden lässt, die einen Vergleich zu anderen Produktsystemen mit vergleichbarer Funktion erlaubt. Eine weitere wesentliche Herausforderung bei der Durchführung von Ökobilanzen ist die oftmals sehr eingeschränkte Verfügbarkeit geeigneter Daten. Produktspezifische umweltbezogene Daten sind häufig nicht öffentlich oder nur durch mühevolle Recherche zugänglich.

Für die drei zu untersuchenden Technologien wurden in Kapitel 5.1 jeweils die Funktionalität sowie die verwendeten Systemkomponenten beschrieben. Um auf dieser Basis eine Aussage über die Abbildbarkeit durch die LCA-Methodik zu treffen, wurden für jede Technologie die maßgeblichen Komponenten des Produktsystems extrahiert und die Verfügbarkeit von geeigneten Datensätzen in gängigen LCA-Datenbanken eingeschätzt.

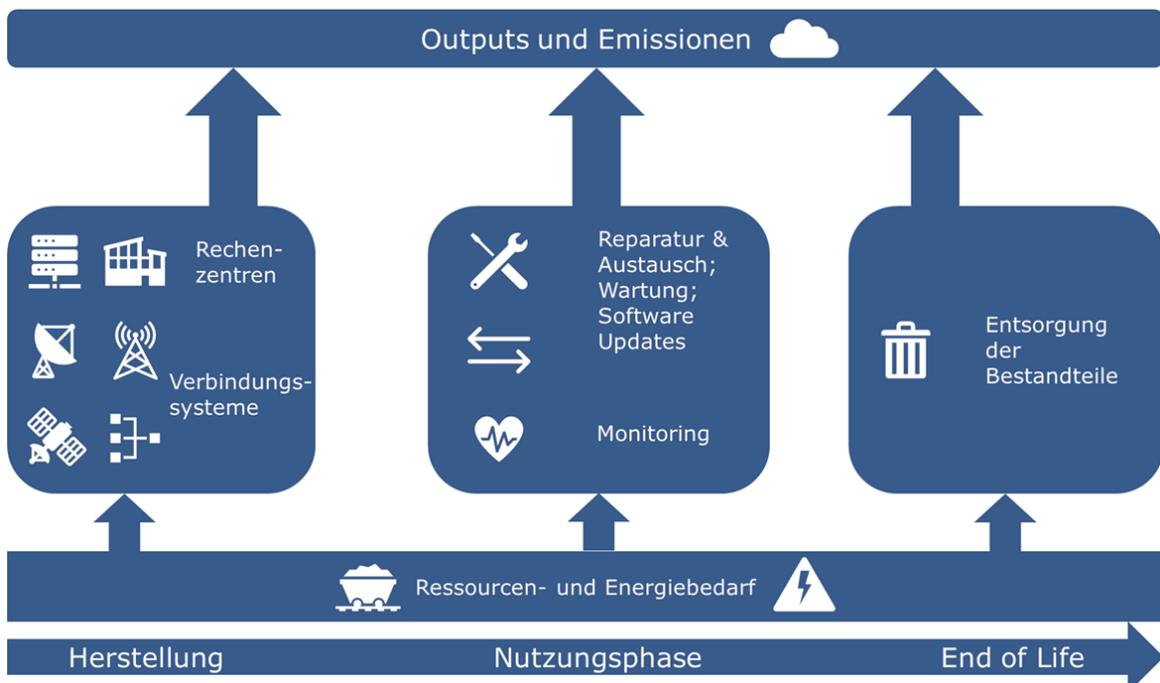


Abbildung 16: Schematische Darstellung der wesentlichen Systemkomponenten im Lebenszyklus der untersuchten Technologien (Quelle: eigene Darstellung).

In Abbildung 16 sind die wesentlichen Komponenten der betrachteten Netzinfrastrukturen aufgeteilt nach der Lebenszyklusphase dargestellt. Um die Herstellungsphase der Netze ökobilanziell abbilden zu können ist die Verfügbarkeit von Daten zu den Kern- und Zugangsnetz, sowie genutzten Verbindungssystemen notwendig. Elementare Komponente des Kern- und Zugangsnetzes sind hierbei Rechenzentren, die mit ihren Servern die Rechenleistung für den Netzbetrieb bereitstellen. In der Ökobilanz-Fachliteratur finden sich mehrere Veröffentlichungen, die sich mit der Bilanzierung von Rechenzentren und den darin verwendeten Komponenten auseinandersetzen.<sup>28 29 30</sup> Aufgrund der bestehenden Literaturlage kann davon ausgegangen werden, dass die ökobilanzielle Modellierung und Betrachtung von Rechenzentren prinzipiell möglich sind. Bezüglich der Verbindungssysteme kann, sowohl für die Glasfaserkabel als auch für die aktiven Technikkomponenten und Sendemasten, nach Recherche in einschlägigen Publikationen und in gängigen LCA-Datenbanken prinzipiell von einer ausreichenden Verfügbarkeit repräsentativer Datensätze ausgegangen werden.<sup>31</sup> Unklarer ist die Datenlage bezüglich der Herstellungsphase von Satelliten. Die niederländische Nachhaltigkeitsberatung PRé Consultants hat im Auftrag der Europäischen Weltraumorganisation eine Ökobilanz zu einer Satellitenmission durchgeführt<sup>32</sup>, wobei auch eine LCA-Datenbank für die Aktivitäten und Projekte der ESA, die die verschiedenen im Rahmen des Projekts erstellten Modelle enthält, erstellt wurde. Zudem finden sich auch in der Fachliteratur Veröffentlichungen über die Anwendung der von Ökobilanzen im Raumfahrtsektor.<sup>33</sup> Der Zugang zu den entsprechenden Datenbankdaten kann in diesem Bereich jedoch stark eingeschränkt sein. Daher lässt sich schließen, dass eine ökobilanzielle Betrachtung von Satelliten grundsätzlich möglich ist. Die Durchführbarkeit dürfte im Einzelnen jedoch stark von der Verfügbarkeit von entsprechenden Primärdaten und Datensätzen abhängen, da im Raumfahrtsektor viele spezielle Materialien und maßgeschneiderte Komponenten verwendet werden, gängige LCA-Datenbanken, wie zum Beispiel die Ecoinvent-Datenbank, jedoch hauptsächlich Daten zu Standard- und in großer Masse produzierten Produkten führen.

In der Nutzungsphase ist der Betrieb, Monitoring und Wartung der Komponenten zu modellieren. Sowohl der Energieverbrauch als auch für den Ersatz einzelner Komponenten kann nach Einschätzung des Projektteams mit den in den gängigen LCA-Datenbanken verfügbaren Datensätzen modelliert werden. Ein gesondert zu betrachtender Punkt ist die Inbetriebnahme eines Satelliten. An dieser Stelle sei auf die im letzten Absatz geäußerten Bedenken bezüglich der Datenverfügbarkeit verwiesen.

Am Lebensende bzw. in der *End of Life*-Phase ist die Entsorgung der technischen Komponenten und anderer Infrastrukturbestandteile zu modellieren. Datensätze für die Abfallbehandlungs- und Verwertungsmethoden im Produktlebensende für WEEE (*Waste from Electrical and Electronic Equipment*), Bestandteile und klassische Baustoffe für Verbindungssysteme sind in den gängigen LCA-Datenbanken vorhanden. Auch wenn die Verfügbarkeit von speziellen Datensätzen für das Lebensende einzelner technischer Komponenten nicht unbedingt gegeben ist, kann durch die generischen Datensätze eine grundsätzliche Abbildbarkeit angenommen werden.

<sup>28</sup> Aggar et al. (2012). Data Centre Life Cycle Assessment Guidelines: Executive Summary.

<sup>29</sup> Umweltbundesamt. (2021). Green cloud computing.

<sup>30</sup> Whitehead et al. (2014). Assessing the environmental impact of data centres part 1: Background, energy use and metrics. *Building and Environment*, 82(December), 151–159.

<sup>31</sup> Vgl. Pino, A. (2017). The Environmental Impacts of Core Networks for Mobile Telecommunications. : A Study Based on the Life Cycle Assessment (LCA) of Core Network Equipment.

<sup>32</sup> PRé Sustainability. (o. J.). Environmental impacts of a satellite mission. Abgerufen 29. November 2022.

<sup>33</sup> Maury et al. (2020). Application of environmental life cycle assessment (LCA) within the space sector: A state of the art. *Acta Astronautica*, 170, 122–135.

## 5.4 Methodische Herangehensweise als Grundlage der Primärindikatoren-Bewertung

Um die 26 Primärindikatoren zu bewerten und ein finales Set an ökologischen Bewertungsindikatoren für die Telekommunikationsinfrastruktur ableiten zu können, wurde eine methodische Herangehensweise entwickelt. Diese gliedert sich in drei Schritte auf:

1. Detaillierte Prüfung der Relevanz für das Nachhaltigkeitsziel
2. Inhaltliche und operative Bewertung der Indikatoren
3. Experteneinschätzung hinsichtlich Übertragbarkeit und Nutzen für mögliche Anwendungsfälle

Die folgenden Unterkapitel erläutern die Bewertungsschritte sowie resultierende Zwischenergebnisse.

### 5.4.1 Detaillierte Prüfung der Relevanz für das Nachhaltigkeitsziel



Abbildung 17: Relevanzprüfung der Indikatoren.

Im ersten Schritt wurden die 26 Primärindikatoren erneut hinsichtlich ihrer Relevanz und Repräsentativität für das jeweilige zugeordnete Umweltziel hinterfragt und überprüft. Im Vorlauf hatte bisher eine allgemeine Zuordnung stattgefunden. In diesem Schritt wurde nun geprüft, ob der Indikator im Hinblick auf das vorliegende Klima- und/oder Umweltziel aussagekräftig ist und dieses möglichst ganzheitlich abbilden kann. Die Bewertung erfolgte in drei Stufen, um die Relevanz auszudrücken: „hoch“, „mittel“ und „niedrig“, die sich wie folgt definieren:

- Hoch: Der Indikator hat eine hohe Relevanz im Kontext des ökologischen Nachhaltigkeitsziels und ist in der Lage das Ziel umfassend abzudecken.
  - *Beispiel: Kohlenstoffintensität pro Dateneinheit – dieser Indikator hat einen klaren Bezug zum Thema Klima, da er die CO<sub>2</sub>-Äquivalente erfasst – die gängigste Messeinheit im Bereich Klima – und eine Aussage über den Treibhausgasausstoß der untersuchten Aktivität / Betrachtungsgegenstand erlaubt ohne Einschränkungen.*
- Mittel: Der Indikator hat eine Relevanz im Kontext des ökologischen Nachhaltigkeitsziels, ist jedoch nicht in der Lage dieses vollumfänglich abzudecken.
  - *Beispiel: Green Energy Coefficient – dieser Indikator sagt aus wieviel Grünstrom bezogen wird. Im Kontext Klima ist das eine relevante Aussage, die hilft einzuschätzen, inwieweit bereits erneuerbare Energien genutzt werden. Es lässt jedoch nur bedingt eine umfängliche Aussage dazu treffen, wie klimafreundlich die gesamte Energienutzung ist und ob Energie eingespart wird. Es ist weiterhin unklar, welcher Strommix neben dem Grünstrom vorherrscht. Für eine umfassende Aussage zum Klimaziel sind zusätzliche Informationen neben dem Indikator notwendig.*
- Niedrig: Der Indikator hat nur geringe Relevanz im Kontext des ökologischen Nachhaltigkeitsziels und ist nicht in der Lage diese ausreichend zu erfassen.
  - *Beispiel: Energy Water Intensity Factor – dieser Indikator betrachtet den Wasserverbrauch in der Energieherstellung. Der Indikator beschränkt damit seine Aussage hinsichtlich des Themas Wassers stark und sehr spezifisch für einen*

*Anwendungsfall und ein Produkt (Energie) und gibt keine Aussage über die Wasserintensität der Infrastruktur. Entsprechend ist die Aussagekraft im Kontext des Nachhaltigkeitsziels Wasser gemessen am anvisierten Betrachtungsgegenstand limitiert.*

Das Ergebnis dieses ersten Bewertungsschrittes findet sich in Tabelle 9 wieder. Fünf Indikatoren wurden mit „geringer Relevanz“ eingestuft und fallen somit aus dem Indikatorenset heraus. Alle Indikatoren mit einer Bewertung „mittel“ oder „hoch“ werden im nächsten Schritt einer inhaltlichen und operativ-anwendbaren Bewertung unterzogen.

**Tabelle 9: Bewertung der Primärindikatoren nach Relevanz für die Umweltziele.**

Indikator	Klima	Wasser	Biodiversität	Kreislaufwirtschaft
Energy Water Intensity Factor		gering		
Water Usage Effectiveness		gering		
Water Reuse Rate		gering		
Carbon Emission Factor	hoch			
Carbon Intensity per Unit of Data	hoch			
Cooling Load Density	gering			
Carbon Usage Effectiveness	hoch			
Green Energy Coefficient	mittel			
Telecommunications Energy Efficiency Ratio	mittel			
Power Usage Effectiveness	gering			
Energy intensity of the network	hoch			
Land Footprint			hoch	
Land use change			hoch	
Potentially disappeared fraction of species during a year			hoch	
Material Recycling Ratio				hoch
Waste Recycle Ratio				hoch
Green Material Use				mittel
Percentage of used electronics refurbished				mittel
Percentage of used electronics resold				mittel
Percentage of used electronics recycled				mittel
Percentage of used electronics landfilled				mittel
Percentage of used electronics incinerated				mittel
Recyclable design				hoch
Reparability				hoch
Longevity				hoch
Electronic Disposal Efficiency				mittel

### 5.4.2 Inhaltliche und operative Bewertung der Indikatoren

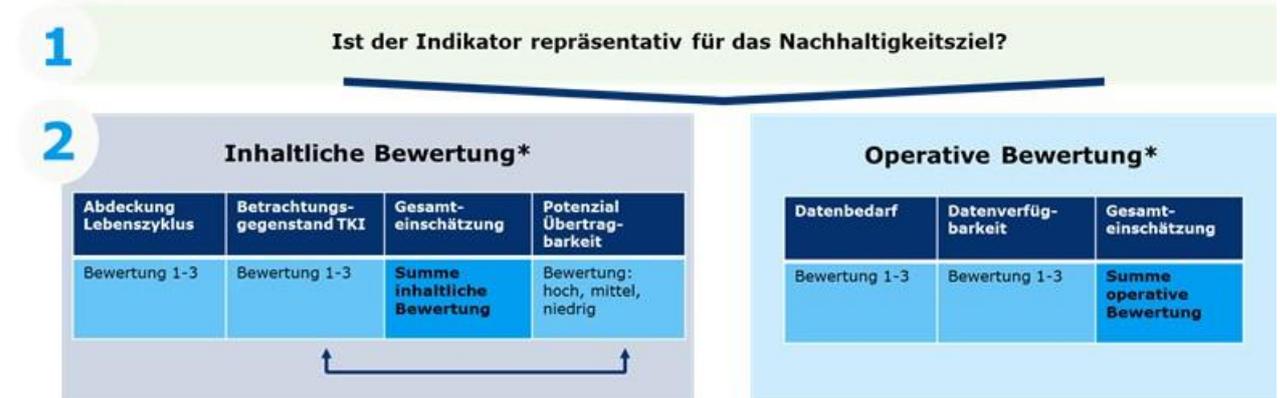


Abbildung 18: Übersicht der inhaltlichen und operativen Bewertung.

Für die inhaltliche und operative Bewertung wurde jeweils ein quantitatives Bewertungsschema erstellt, um die Einschätzung bezüglich der verschiedenen Bewertungsbereiche vergleichbar zu machen und dadurch Entscheidungen im weiteren Verlauf des Prozesses nachvollziehbarer zu gestalten.

#### Inhaltliche Bewertung

Für die inhaltliche Bewertung der Primärindikatoren wurden zwei verschiedene Betrachtungsgegenstände bewertet – die Fähigkeit des Indikators die verschiedenen Stufen des Lebenszyklus des Telekommunikationsnetzes (Herstellung – Nutzungsphase – *End of Life*) abzubilden und die Abdeckung von relevanten Bestandteilen des Telekommunikationsnetzes in den Anwendungsfällen, aus denen die Indikatoren in der Recherche in AP1 extrahiert wurde. Der zweite Betrachtungsgegenstand wurde zudem um eine qualitative Einschätzung erweitert, worauf in den weiteren Erläuterungen zu diesem Betrachtungsgegenstand tiefer eingegangen wird.

Für die Fähigkeit des Indikators die verschiedenen Stufen des Lebenszyklus des Telekommunikationsnetzes zu erfassen, wurde das in Tabelle 10 dargestellte Bewertungsschema entwickelt. Hintergrund dieser Bewertung ist, dass im Rahmen einer ganzheitlichen ökologischen Nachhaltigkeitsanalyse in den meisten Anwendungsfällen eine Analyse der mit einem Betrachtungsgegenstand einhergehenden Umweltwirkungen über alle Phasen des Lebenszyklus wünschenswert ist. In einzelnen Fällen kann es sinnvoll sein, lediglich spezifische Phasen des Lebenszyklus zu betrachten, beispielsweise bei über den Lebenszyklus stark schwankender Datenverfügbarkeit oder -qualität. Jedoch ist ein Indikator der grundsätzlich zur Abbildung weiter Teile des Lebenszyklus oder des ganzen Lebenszyklus befähigt potenziell als vielseitiger und aussagekräftiger anzusehen als ein Indikator, der sich lediglich dazu eignet, eine einzelne Lebenszyklusphase zu umfassen.

Tabelle 10: Bewertungsschema zur Einordnung der Fähigkeit des Indikators die verschiedenen Stufen des Lebenszyklus des Telekommunikationsnetzes abzubilden.

Abdeckung Lebenszyklus	Nur einzelne Teile/Phasen des Lebenszyklus können erfasst werden	Mehr als eine LZ-Phase kann erfasst werden, aber nicht der gesamte LZ	gesamter Lebenszyklus erfassbar
<b>Bewertung Punkte</b>	1	2	3

Zur Bewertung der Abdeckung von relevanten Bestandteilen des Telekommunikationsnetzes in den Anwendungsfällen kam das in Tabelle 11 dargestellte Schema zum Einsatz. Hierbei wurde in ersten Schritt lediglich untersucht, auf welche Komponenten oder Teilbereiche der Telekommunikationsinfrastruktur die Anwendung des Indikators in der identifizierten Literatur erfolgte, ohne näher darauf einzugehen, ob sich der jeweilige Indikator perspektivisch auch für einen breiteren Betrachtungsrahmen eignen würden. Dies wurde bewusst so gestaltet, um in der Bewertung mitabzubilden, für welche Bereiche der Telekommunikationsinfrastruktur die Anwendung des Indikators bereits im wissenschaftlichen Kontext erprobt ist.

**Tabelle 11: Bewertungsschema zur Einordnung der Abdeckung von relevanten Bestandteilen des Telekommunikationsnetzes in den Anwendungsfällen, aus denen der Indikatoren in der Recherche in AP1 extrahiert wurde.**

Betrachtungsgegenstand (TKI)	einzelne Teilkomponente erfasst	mehrere Teilkomponenten erfasst	gesamte TKI erfasst
<b>Bewertung Punkte</b>	1	2	3

Nichtsdestotrotz ist die Perspektive einen breiteren Betrachtungsrahmen zu umfassen für die abschließende Anwendbarkeit eines Indikators durchaus relevant. Aus diesem Grund wurde die eben dargestellte Bewertung um eine qualitative Einschätzung (gering/mittel/hoch) zum Potential der Übertragbarkeit auf nicht in der bisherigen Anwendung umfasste Teile der TKI ergänzt. Bei der abschließenden Auswertung der Ergebnisse dieses Arbeitsschrittes wurde für jeden Indikator somit nicht nur die quantitative Bewertung in dieser Kategorie herangezogen, sondern auch die qualitative Einschätzung miteinbezogen.

### Operative Bewertung

Zur operativen Bewertung der Primärindikatoren wurden ebenfalls zwei verschiedene Betrachtungsgegenstände herangezogen und eingeordnet – der Datenbedarf des Indikators und die Abschätzung der Datenverfügbarkeit im einzelnen Anwendungsfall.

Die Vorzüge eines Indikators mit geringem Datenbedarf liegen klar auf der Hand – prinzipiell muss davon ausgegangen werden, dass ein zusätzlicher Datenpunkt, der zur Ermittlung eines Indikators erhoben werden muss, mit zusätzlichem Aufwand und oftmals auch entsprechenden Kosten einhergeht. Es mag eingewendet werden, dass ein Indikator mit hohem Datenbedarf potenziell ein genaueres Bild eines Betrachtungsgegenstands vermittelt. Die Fähigkeit der untersuchten Indikatoren den Betrachtungsgegenstand hinreichend genau abzubilden ist jedoch bereits Gegenstand anderer Bewertungen im Rahmen dieses Vorhabens.

**Tabelle 12: Bewertungsschema zur operativen Bewertung der Primärindikatoren bezüglich des Datenbedarfs.**

Datenbedarf	hoch (entspricht mehr als 4 Kennzahlen)	mittel (entspricht 3-4 Kennzahlen)	gering (entspricht 1-2 Kennzahlen)
<b>Bewertung Punkte</b>	1	2	3

Bei der Anwendung eines Indikators ist die Verfügbarkeit der notwendigen Eingangsdaten essenziell für die Validität und Aussagekraft des Ergebnisses. Sollten Daten nicht verfügbar sein kann im Einzelfall eine Abschätzung des Eingangswertes getroffen werden. Solch eine Schätzung ist jedoch oft mit erheblicher Unsicherheit verbunden und schwächt somit die Aussagekraft des

Indikators. Zudem ist auch die Erarbeitung eines geeigneten Schätzwertes in der Regel mit einem hohen Rechercheaufwand und Bedarf an Fachexpertise verbunden.

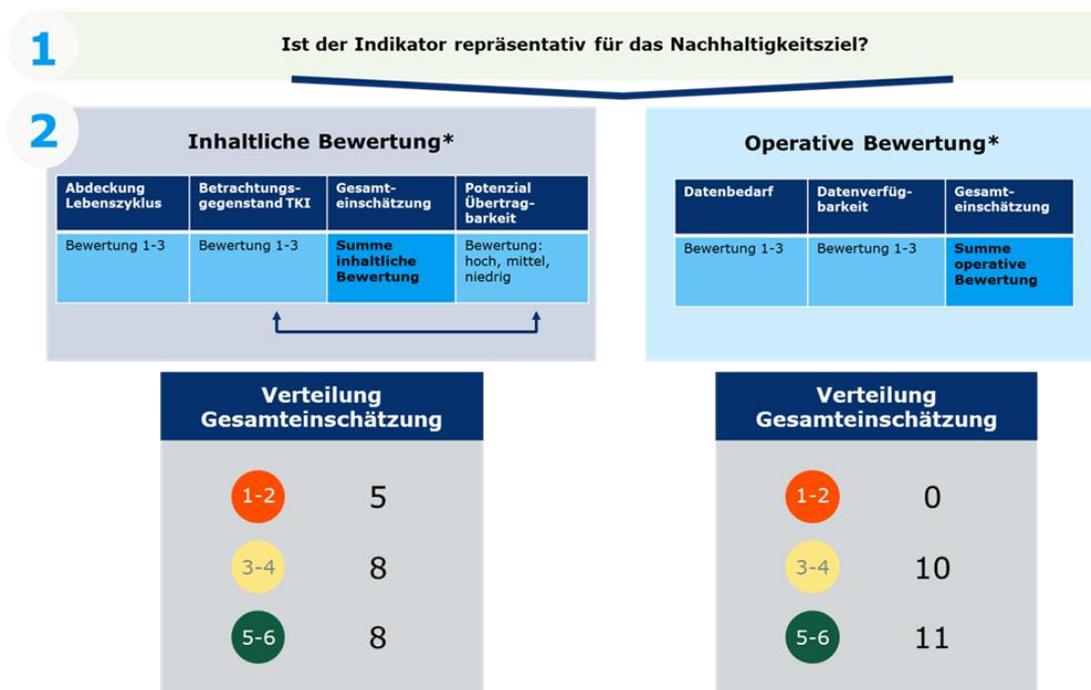
Die tatsächliche Datenverfügbarkeit einer Betrachtung hängt stark vom Einzel- und Anwendungsfall ab und kann daher nicht in diese Bewertung miteinfließen. Aus diesem Grund wurde von den am Projekt beteiligten Fachexperten für jeden Primärindikator eine Einschätzung zur voraussichtlichen Datenverfügbarkeit in einem generischen Anwendungsfall angegeben. Das zur Bewertung verwendete Schema ist in Tabelle 13 aufgezeigt.

**Tabelle 13: Bewertungsschema zur Abschätzung der Datenverfügbarkeit im einzelnen Anwendungsfall.**

Abschätzung Datenverfügbarkeit	Voraussichtlich schwer erfassbar	Aktuell nicht standardmäßig erfasst, aber mess-/erhebbar	Daten i.d.R. verfügbar
<b>Bewertung Punkte</b>	1	2	3

### Auswertung

Nach Durchführung der quantitativen Bewertung der eben beschriebenen Einzelaspekte wurde jeweils die Summe der Bewertungsergebnisse für die Unter Aspekte der inhaltlichen und operativen Bewertung gebildet. Der hieraus gebildete Wert war essenziell für die abschließende Einschätzung und Empfehlung, welche im folgenden Arbeitsschritt erfolgte. Die Verteilung der Gesamteinschätzung aus der inhaltlichen und operativen Bewertung der Indikatoren ist in Abbildung 19 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Großteil der Primärindikatoren in beiden Bewertungen eine mittlere bis hohe Gesamtwertung erzielen. Lediglich bei der inhaltlichen Bewertung wurde bei fünf der Primärindikatoren ein Gesamtwert von 1-2 erzielt. Diese Indikatoren wurden im nächsten Schritt trotz dessen noch weiter mitbetrachtet, falls ihnen perspektivisch auch ein breiterer Betrachtungsrahmen im qualitativen Aspekt der inhaltlichen Betrachtung bescheinigt wird.



**Abbildung 19: Verteilung der Gesamteinschätzung der inhaltlichen und operativen Bewertung der Indikatoren.**

### 5.4.3 Experteneinschätzung hinsichtlich Übertragbarkeit und Nutzen für mögliche Anwendungsfälle

Basierend auf der inhaltlichen und operativen Gesamteinschätzung betrachtet das Expertenteam jeden einzelnen Indikator und diskutiert in diesem Kontext insbesondere folgende Punkte:

- Ist die Operationalisierbarkeit im Kontext der Telekommunikationsinfrastruktur gegeben?
- Hat der Indikator auch eine gesamtwirtschaftliche Aussagekraft?
- Ist der Indikator geeignet, um relevante Technologien zu vergleichen?
- In welchem Kontext eignet sich der Indikator zum Vergleich?
- Welche Limitationen gibt es und sind diese zu umgehen und/oder auszugleichen?

Das Ergebnis dieser finalen Bewertung und Einordnung wird im nächsten Kapitel dargestellt.

### 5.5 Ergebnisse der finalen Ableitung ökologischer Indikatoren

Das Ergebnis der Studie sind drei Indikatorensets für die Bewertung der ökologischen Nachhaltigkeit der Telekommunikationsstruktur (siehe Abbildung 20). Diese Differenzierung ergibt sich einerseits aus der Vielzahl der Indikatoren, die aus unterschiedlichen Bereichen bzw. Kontexten identifiziert wurden und andererseits der Tatsache, dass das Indikatorenset zunächst eher allgemeingültig ohne spezifischen Anwendungskontext entwickelt werden soll (siehe hierzu auch Kapitel 3.1 (Zielsetzung) sowie 5.6 zum Anwendungskontext).

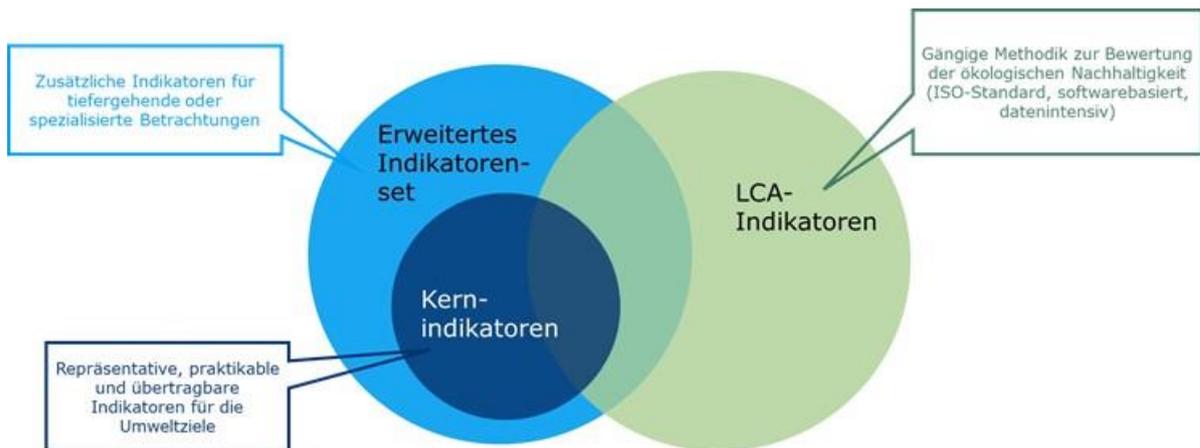


Abbildung 20: Indikatorensets für die ökologische Bewertung von TK-Infrastruktur für verschiedene Anwendungsfälle.

#### 5.5.1 Überblick und Erläuterung des Kernindikatoren-Sets

Das Set der Kernindikatoren besteht aus neun Indikatoren (siehe Tabelle 14), die sowohl umfangreich das Thema ökologische Nachhaltigkeit repräsentieren als auch praktikabel in der Anwendung und übertragbar auf verschiedene (Teil-)Infrastrukturen sind. Alle im Kontext der TKI wesentlichen Umweltziele sind mit diesem Set angesprochen, wobei die Umweltziele Klima und Kreislaufwirtschaft aufgrund ihrer Relevanz für die Infrastruktur und ihren Lebenszyklus (siehe hierzu auch Kapitel 4.3) im Vordergrund stehen. Die Indikatoren sind in der Lage, die gesamte Infrastruktur abzubilden und die Auswirkungen auf die Umweltziele ganzheitlich von Herstellung über Nutzung bis zum Ende des Lebenszyklus zu bilanzieren. Dabei müssen sie teilweise mit geeigneten Bezugsgrößen wie beispielsweise der Datenübertragung verbunden werden (Beispiel *Wasserfußabdruck/Water Footprint*). Am Beispiel der Klimaindikatoren zeigt sich, dass das Set mit dem *CO<sub>2</sub>-Fußabdruck/Carbon Footprint* sowohl den repräsentativsten und gängigsten Vertreter der Klimaindikatoren umfasst, weitere Indikatoren in Kombination jedoch ein noch umfassenderes Bild liefern können: Der Indikator *Carbon Intensity* bezieht die CO<sub>2</sub>-Äquivalente auf den übertragenen Datenverkehr und der Indikator zur Energieintensität betrachtet konkret den

Energiebedarf ohne bereits mit den entsprechenden Energiequellen und damit CO<sub>2</sub>-Äquivalenten zu berechnen. Somit kann beispielsweise in Vergleichen einerseits zwischen tatsächlichem Energiebedarf und den Auswirkungen auf das Klima durch den verwendeten Strommix und die damit verbundenen CO<sub>2</sub>-Äquivalente andererseits berichtet werden. Zusammengefasst ergeben die drei Indikatoren im Bereich Klima ein sehr umfassendes und repräsentatives Bild für dieses Umweltziel. Nennenswert sind auch die Indikatoren, die dem Bereich Kreislaufwirtschaft zugeordnet sind. Das Umweltziel ist sehr komplex und Bedarf verschiedener Betrachtungswinkel, beispielsweise der den Möglichkeiten zur Wiederverwertung und -verwendung von genutzten Primär- und Sekundärmaterialien. Entsprechend werden verschiedene Indikatoren benötigt, um diese Aspekte am Anfang und Ende des Lebenszyklus abdecken zu können. Die *Waste Recycle Ratio* zeigt somit an, wieviel dem Kreislauf wieder zugeführt wird. Die anderen drei Indikatoren geben Einblick, inwiefern benutzte Elektronik wiederaufbereitet, weiterverkauft und/oder recycelt wird.

Die im Kernset gelisteten Indikatoren sind bereits etabliert, d. h. sie finden in Wissenschaft und Wirtschaft Anwendung, und sie sind operationalisierbar, da sie verhältnismäßig wenig Daten benötigen bzw. die Eingangsdaten in der Regel vorliegen oder leicht zu erheben sind (vgl. auch Kapitel 5.6). Einige der Indikatoren finden bereits in der EU-Taxonomie Anwendung, wobei die Offenlegung zukünftig durch die Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD) geregelt wird (siehe Kapitel 5.6 für weitere Erläuterungen). Die Indikatoren des Kernsets können dabei nicht vollumfänglich die Klima- und Umweltziele abdecken, betrachten jedoch die wesentlichen Auswirkungen oder Stellschrauben, die mit der TKI in Verbindung stehen.

Als Ergänzung zu diesem Set und je nach Anwendungskontext können die LCA-Indikatoren oder das erweiterte Indikatorenset verwendet werden.

**Tabelle 14: Übersicht Kernindikatoren**

Umweltziel	Kernindikator	Kurzbeschreibung
<b>Klima</b>	Carbon Intensity per unit of data	CO <sub>2</sub> -Äquivalente/Gigabit des übertragenen Datenverkehrs pro Sekunde
	Energy Intensity of the network	Energieverbrauch in einer bestimmten Zeitspanne pro übertragene Datenmenge in dieser Zeitspanne
	<b>Carbon Footprint</b>	in CO <sub>2</sub> -Äquivalenten
<b>Wasser</b>	<b>Water Footprint</b>	in m <sup>3</sup>
<b>Biodiversität</b>	<b>Land Footprint</b>	in m <sup>2</sup>
<b>Kreislaufwirtschaft</b>	Waste Recycle Ratio	recycelter Abfall im Verhältnis zu Gesamtabfallaufkommen
	Percentage of used electronics refurbished	Prozentualer Anteil an wiederaufbereiteter Elektronik
	Percentage of used electronics resold	Prozentualer Anteil an weiterverkaufter Elektronik
	Percentage of used electronics recycled	Prozentualer Anteil an recycelter Elektronik

\*Indikatoren in *blau* gehören auch zu den LCA-Indikatoren

### 5.5.2 Überblick und Erläuterung des erweiterten Indikatoren-Sets

Für spezifische oder tiefere Betrachtungen können die Kernindikatoren mit jenen aus dem erweiterten Set kombiniert werden. Das erweiterte Set umfasst elf Indikatoren (siehe Tabelle 15),

die die vorherigen neun Kernindikatoren ergänzen können. So kann z. B. mittels des *Green Energy Coefficient* die Frage nach der Art der Energiebereitstellung bzw. konkret dem Anteil erneuerbarer Energien am Gesamtenergiebedarf betrachtet werden, auch wenn der Indikator allein keine Aussagekraft hinsichtlich der Klimaverträglichkeit der Gesamtinfrastruktur bietet, da die Aussage über den restlichen Strommix und die Energieeffizienz fehlt. Er dient daher der vertiefenden Betrachtung zusammen mit dem *Carbon Footprint*. Daher ist für eine Gesamtaussage zum Umweltziel Klima der Kernindikator „Carbon Footprint“ – Kernindikator - vorzuziehen.

Weiterhin enthält das erweiterte Indikatorenset auch inhaltlich wichtige Indikatoren, die aber eine verringerte Praktikabilität aufweisen, da ihrer Ermittlung ein erhöhter Datenbedarf zugrunde liegt oder weiterer Konkretisierungsbedarf besteht. Beispiele hierfür sind die Indikatoren *Recyclable Design*, *Reparability* und *Longevity*. Hierbei handelt es sich nicht um klar quantifizierbare Indikatoren und es muss genau definiert werden, was z. B. Langlebigkeit bedeutet, dennoch beschreiben sie wichtige Aspekte im Bereich Kreislaufwirtschaft. Die Indikatoren im Umweltziel Biodiversität (*Potentially Disappeared Fraction (PDF) of Species* und *Land-Use Change*) sind zwar relevant und etabliert, jedoch gibt es für den PDF verschiedene Erhebungsmethoden, die mit verschiedenen Datenbedarfen einhergehen und entsprechend auch die Aussagekraft (im deutschen Kontext) verändern.<sup>34</sup> Der Indikator *Land-Use Change* betrachtet vor allem die qualitative Änderung der genutzten Fläche und ist damit prinzipiell für die Nachhaltigkeit aussagekräftiger als die reine Flächennutzung (*Land Footprint*), seine Erhebung ist jedoch auch wesentlich anspruchsvoller und unsicherer. Zusammenfassend bieten die Indikatoren des erweiterten Sets somit die Möglichkeit auf spezielle Fragestellungen je nach Anwendungskontext einzugehen, sollten jedoch nicht einzeln herangezogen werden, da sie ihr jeweiliges Klima- oder Umweltziel nur sehr ausschnittsweise betrachten und ausschließlich einzelne Aspekte ihres jeweiligen Ziels adressieren.

**Tabelle 15: Übersicht erweitertes Indikatorenset**

Klima-/Umweltziel	Erweitertes Indikatorenset	Kurzbeschreibung
<b>Klima</b>	Carbon Emission Factor	misst CO <sub>2</sub> -Äquivalente pro verwendete Energieeinheit
	Green Energy Coefficient	misst das Verhältnis von erneuerbaren Energien am Gesamtenergiebedarf
	Telecommunications Energy Efficiency Ratio	Berechnung der Energieeffizienz einzelner Netzwerkgeräte unter Berücksichtigung von drei verschiedenen Datenauslastungen (0 %, 50 % und 100 %) und des damit verbundenen Stromverbrauchs
<b>Wasser</b>	-	-
<b>Biodiversität</b>	Land-use change	Beschreibt die Umwandlung eines Gebiets von einer Nutzungsart in eine Andere - einschließlich der Umwandlung von "ungenutztem" Land in von Menschen genutztes Land.

<sup>34</sup> Je nach Erhebungsmethode sind besonders vergleichende Aussagen z. B. im nationalen Kontext weniger aussagekräftig als beispielsweise interkontinentale Vergleiche.

	Potentially disappeared fraction (PDF) of species during a year	Diese Kennzahl beschreibt den Teil des Artenreichtums, der möglicherweise durch einen ökologischen Eingriff verloren geht.
<b>Kreislaufwirtschaft</b>	Green Material Use	Einsatz von grünem Material im Verhältnis zu den gesamten jährlichen Einkäufen.
	Percentage of used electronics landfilled	Prozentualer Anteil an entsorgter Elektronik
	Percentage of used electronics incinerated	Prozentualer Anteil an entsorgter Elektronik, die in der Verbrennungsanlage endet
	Recyclable design	z.B. einfach zu demontieren für Recyclingzwecke
	Reparability	z.B. Austauschbarkeit der Batterien
	Longevity	z.B. Verfügbarkeit von Ersatzteilen; Aktualisierung der Software, Verlängerung der Mindestgarantiezeiten

### 5.5.3 Überblick und Erläuterung der LCA-Indikatoren

LCA-Indikatoren erhalten durch ihre zugrundeliegende Methodik und dem damit verbundenen Ziel einer LCA (der Bewertung der ökologischen Nachhaltigkeit von Produkten oder Prozessen über den gesamten Lebenszyklus) eine Sonderstellung. Sie können als Ergänzung zum Kernindikatorenset verwendet werden, aber insbesondere auch als alternatives Indikatorenset eingesetzt werden, das sich aus einer Lebenszyklusanalyse der zu betrachtenden Infrastruktur oder einer anderen entsprechenden Bezugsgröße ergibt. Mit den Kernindikatoren bestehen in Form von *Carbon Footprint*, *Water Footprint* und *Land Footprint* bereits Überschneidungen zwischen beiden Sets.

LCAs folgen einer normierten Vorgehensweise, greifen durch entsprechende Datenbanken softwaregestützt auf notwendige komplexe Hintergrundinformationen z. B. zur Herstellungsprozessen oder anderen Vorketten zu und wurden bereits im Kontext der TKI angewandt. Trotz komplexer Methodik und benötigter Fachkenntnis ist daher die Praktikabilität der Methodik und dabei verwendeten Indikatoren als hoch anzusehen (siehe auch Kapitel 3.4 zur LCA-Methodik allgemein und 5.3 zur Datenverfügbarkeit im Kontext von LCAs). Werden LCA-Indikatoren aus verschiedenen Ökobilanzstudien miteinander vergleichen, ist es essenziell zu verstehen, ob sich beide Ökobilanzen auf dieselbe funktionelle Einheit (Bezugsgröße) beziehen und die Grenzen der Betrachtung identisch (oder zumindest vergleichbar) sind.

Der Überblick über die LCA-Indikatoren erfolgt gebündelt auf sogenannte *Life Cycle Impact Assessment* (LCIA)-Methoden, welche feste Pakete von Indikatoren darstellen, die in sich schlüssig ein ganzheitliches Bild der Umweltfolgen des Untersuchungsgegenstands abbilden. Es ist daher nicht üblich, nur einzelne LCA-Indikatoren zu berechnen. Vielmehr wird nach der softwarebasierten Modellierung eine in die Software integrierte LCIA-Methode ausgewählt und alle in dieser Methode inkludierten Indikatoren gemeinsam berechnet. Obwohl in Ergebnisdarstellungen in der Literatur (so auch in den betrachteten Dokumenten in diesem Vorhaben) oftmals nur einzelne ausgewählte Indikatoren dargestellt und analysiert werden, ist es bei der Durchführung einer Ökobilanz selbst im Sinne einer ganzheitlichen Umweltfolgenbilanzierung immer angeraten alle Indikatoren einer LCIA-Methode zu berechnen. Tabelle 16 zeigt eine Auswahl der meistgenutzten LCIA-Methoden.

**Tabelle 16: Auswahl verschiedener Life Cycle Impacts Assessment (LCIA) Methoden**

LCIA-Methode	Referenzwerk
<b>ReCiPe 2016 Midpoint (H)</b>	M.A.J. Huijbregts et al. (2016). ReCiPe 2016 A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level
<b>CML-IA</b>	Universität Leiden (2016). CML-IA Characterisation Factors
<b>EF 3.1</b>	European Commission (2022). Environmental Footprint reference packages
<b>Material Footprint</b>	Bringezu et al. (2019). Bestimmung des Materialfußabdrucks mit ökobilanziellen Methoden und Softwarelösungen

Der Aufbau von LCIA-Methoden kann beispielhaft an der im wissenschaftlichen Kontext sehr verbreiteten ReCiPe 2016 midpoint (H) Methode gezeigt werden. Tabelle 17 zeigt die 15 verschiedenen Indikatoren, welche in der Methode enthalten sind (je nach Darstellung wird bei ReCiPe 2016 von bis zu 18 Indikatoren gesprochen, da sich der Indikator *Agricultural/Natural land occupation, land use* in die Unterindikatoren *Agricultural Land Occupation, Urban Land Occupation* und *Natural Land Transformation* aufgeteilt werden kann). Die Aufgliederung nach den in der Studie betrachteten Klima- und Umweltzielen der Taxonomie zeigt, dass das Set einen ganzheitlichen Blick auf die ökologische Komponente von Nachhaltigkeit anstrebt.

**Tabelle 17: Übersicht über die Indikatoren der ReCiPe 2016 midpoint (H) LCIA-Methode**

Klima-/ Umweltziel	ReCiPe 2016 midpoint (H) LCA-Indikatoren	Kurzbeschreibung
<b>Klima</b>	Global Warming Potential (GWP100)	Das GWP drückt die Menge an zusätzlicher Wärmestrahlung über einen bestimmten Zeitraum (hier 100 Jahre) aus, der durch die Emission eines Treibhausgases verursacht wird, (in kg CO2 eq)
	Freshwater eutrophication	Die Eutrophierung von Süßwasser entsteht durch den Eintrag von Nährstoffen in in den Boden oder in Süßwasserkörper und den daraus resultierenden Anstieg des Nährstoffgehalts (in kg P eq)
<b>Wasser</b>	Marine eutrophication	Marine Eutrophierung ist definiert als die Reaktion eines marinen Ökosystems auf eine übermäßige Verfügbarkeit eines limitierenden Nährstoffs (in kg N eq)
	Freshwater ecotoxicity	Der Charakterisierungsfaktor der Ökotoxizität berücksichtigt die Umweltpersistenz (Verbleib) und die Toxizität (Wirkung) einer Chemikalie (in kg 1,4-DB eq)
	Marine ecotoxicity	Der Charakterisierungsfaktor der Ökotoxizität berücksichtigt die Umweltpersistenz (Verbleib) und die Toxizität (Wirkung) einer Chemikalie (in kg 1,4-DB eq)

	Water depletion	Entnahme von Wasser aus Oberflächengewässern oder von Grundwasser aus Grundwasserleitern (in m <sup>3</sup> )
<b>Biodiversität</b>	Terrestrial acidification	Die atmosphärische Ablagerung von anorganischen Stoffen, wie Sulfaten, Nitraten und Phosphaten, führen zu einer Veränderung des Säuregehalts im Boden. (in kg SO <sub>2</sub> eq)
	Terrestrial ecotoxicity	Der Charakterisierungsfaktor der Ökotoxizität berücksichtigt die Umweltpersistenz (Verbleib) und die Toxizität (Wirkung) einer Chemikalie (in kg 1,4-DB eq)
	Agricultural/Natural land occupation, land use	Umfasst die direkten, lokalen Auswirkungen der Landnutzung auf terrestrische Arten über die Veränderung der Bodenbedeckung und die tatsächliche Nutzung von neuem Boden(in m <sup>2</sup> )
<b>Kreislaufwirtschaft</b>	Metal depletion	Primary extraction of a mineral resource leading to an overall decrease (in kg Fe eq)
	Fossil depletion	Verringerung der künftigen Verfügbarkeit fossiler Brennstoffe, die durch die primäre Gewinnung fossiler Brennstoffe im Zusammenhang mit der Nutzung von Kraftstoffen, Energie und anderen Inputs, wie Mineraldünger, verursacht wird (in kg oil eq)
<b>Umweltverschmutzung</b>	Ozone depletion	Emissions of Ozone Depleting Substances (ODSs) ultimately lead to damage to human health because of the resultant increase in UVB (in kg CFC11 eq)
	Ionizing radiation	anthropogenic emissions of radionuclides in the environment (kBq U235 eq)
	Human toxicity	Der Charakterisierungsfaktor der Humantoxizität berücksichtigt die Umweltpersistenz (Verbleib), die Anreicherung in der menschlichen Nahrungskette (Exposition) und die Toxizität (Wirkung) einer Chemikalie (in kg 1,4-DB eq)
	Photochemical oxidant formation	Air pollution that causes primary and secondary aerosols in the atmosphere (in kg NMVOC)
	Particulate matter formation	in kg PM10 eq or disease incidence;

## 5.6 Anwendungskontext, Datengrundlage und Limitationen des finalen Indikatorensets

Die Entwicklung des Indikatorensets erfolgte vor dem Hintergrund verschiedener Anwendungen. Um dem Rechnung zu tragen, wurden im Ergebnis verschiedene Sets, die ggf. in Kombination verwendet werden können, empfohlen. Das folgende Kapitel betrachtet daher die Fragestellung von konkretem Anwendungskontext, da die Indikatorensets nur dann robuste Ergebnisse liefern, wenn sie in den passenden Kontext gesetzt werden. Dafür sind verschiedene Fragestellungen und Überlegungen hinsichtlich ihrem konkreten Anwendungskontext notwendig:

- Die Indikatoren berücksichtigen nicht zwangsläufig auch die Auslastung des Netzes. Ob ein Netz jedoch effizient genutzt wird, ist eine relevante Indikation auch aus ökologischer Nachhaltigkeitssicht. Beispielsweise kann die Klimabilanz bei hoher Auslastung sehr gut aussehen, jedoch sehr schlecht (CO<sub>2</sub> pro Gigabit) bei geringer Auslastung. Je nach gewählter Bezugsgröße ist diese Aussage enthalten, jedoch sollte dieser Kontext bei der Anwendung unbedingt beachtet werden. Beispielsweise kann innerhalb eines bestehenden 5G-Netzes NB-IoT integriert werden. Werden dann die entsprechenden Alternativen (z. B. LoRaWAN, Sigfox etc.) verglichen, kann durchaus die Frage gestellt werden, ob nicht das gesamte 5G-Netz mit diesen Technologien verglichen werden müsste, da es einen entsprechenden ökologischen Fußabdruck hinterlässt. Bei geringer Auslastung des 5G-Netzes würde der (statische) Vergleich dann ggf. gegen 5G sprechen.<sup>35</sup>
- Quantitative Aussagen sind manchmal nicht in der Lage alleinstehend ein holistisches Bild der Situation wiederzugeben. Bei der Bewertung verschiedener Infrastrukturen im Vergleich oder innerhalb von Infrastrukturen sollten auch Kontextfragen in Betracht gezogen werden. Dies betrifft beispielsweise Aspekte wie: Kann bestehende Infrastruktur aufgerüstet werden? Inwieweit können bestehende Infrastrukturen wiederverwertet werden? Sind die ökologischen Kosten einer neuen Infrastruktur geringer als der ökologische Gewinn? Viele dieser Fragen stellen sich offensichtlich auch aus einer ökonomischen Sicht.
- Bestehen sinnvolle und vergleichbare Bezugsgrößen zwischen den Telekommunikationsinfrastrukturen? Insbesondere bei unterschiedlichem Nutzen der jeweiligen Infrastruktur (z. B. Satellit vs. Mobilfunk) stellt sich die Frage, ob ein Vergleich sinnvoll ist, da die Infrastrukturen nicht immer in gleichem Maße zur Verfügung stehen und auch unterschiedlichen Qualitäten haben. Beispielsweise macht die Versorgung einer abgelegenen Bergregion mit Satelliten im Vergleich zum Verlegen eines Breitbandkabels durchaus Sinn. Falls ein Vergleich gezogen werden soll, ist es daher unerlässlich sinnvolle Bezugsgrößen und/oder Vergleichssituationen zu definieren, da andernfalls der Betrachtungsrahmen nicht derselbe ist. Die Anwendung muss also immer im Kontext gesehen werden, d. h. es muss die Frage beantwortet werden, ob für den Anwender im Moment der Nutzung überhaupt verschiedene Anwendungen zur Verfügung stehen. Die Nachfrage nach Bandbreite für den Stream eines Videos zu Hause verdeutlicht dies. Im Normalfall wird der Nutzer dafür aus technischen Gründen (Größe des Bildschirms etc.) auf seinen Festnetzanschluss zurückgreifen und nicht auf LTE auf seinem Mobilfunktelefon. Bei perspektivischer Verfügbarkeit von 5G kann sich dies wiederum ändern. Somit ist bei einem Vergleich der Technologien auch die zeitliche Komponente bzw. die technologische Entwicklung zu beachten.

Darüber hinaus stellt die Datenverfügbarkeit einen möglicherweise limitierenden Faktor in der Anwendbarkeit dar. Dieses Kriterium wurde bereits auch in der Auswahl von Indikatoren (siehe 5.4.2) beachtet. Eine gute Datenverfügbarkeit erhöht die Anwendbarkeit und Praktikabilität des Indikators. Ein detaillierter Gesamtüberblick über sämtliche verfügbare Daten ist an dieser Stelle nicht möglich. Dennoch soll ein Verständnis vermittelt werden, wo Daten verfügbar sind bzw.

<sup>35</sup> In entsprechenden Studien muss eine Annahme über die Netzauslastung getroffen werden, so. z.B. in Obermann, K. (2022): Nachhaltigkeitsvergleich Internet-Zugangsnetz-Technologien.

entsprechend abgefragt werden könnten. Daher wird stichprobenartig auch auf die Verfügbarkeit bei einzelnen Unternehmen eingegangen. Große Kapitalgesellschaften nach HGB haben eine sog. nichtfinanzielle Erklärung abzugeben, die u. a. Umweltbelange zu enthalten hat, „wobei sich die Angaben beispielsweise auf Treibhausgasemissionen, den Wasserverbrauch, die Luftverschmutzung, die Nutzung von erneuerbaren und nicht erneuerbaren Energien oder den Schutz der biologischen Vielfalt beziehen können“.<sup>36</sup> Zukünftig regelt die der Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD) eine solche Offenlegungspflicht. Bezogen auf die einzelnen Klima- und Umweltziele und die darin enthaltenen Indikatoren können folgende Schlussfolgerungen zur Datenverfügbarkeit getroffen werden:

- Die **Klima**indikatoren liegen in direkter Form für einzelne Technologien nicht vor, können allerdings in den meisten Fällen aus verschiedenen Daten berechnet werden bzw. sind relativ problemlos bei den Unternehmen abzufragen. Die Deutsche Telekom veröffentlicht die Indikatoren *Carbon Intensity* sowie *Energy Intensity* und die gesamten CO<sub>2</sub>-Emissionen in ihrem Corporate Responsibility Bericht.<sup>37</sup> Dabei handelt es sich allerdings um konzernweite Daten, die nicht nach Sparten oder Anwendungsfeldern aufgegliedert sind.<sup>38</sup> Telefónica Deutschland veröffentlicht u. a. den gesamten Energiebedarf pro Datenvolumen sowie den Stromverbrauch, separat auch für den Bereich Netzwerk und Rechenzentren. Auch der Anteil erneuerbarer Energien wird dargelegt.<sup>39</sup> United Internet z. B. gibt einen Überblick über den Stromverbrauch bzw. die Menge an verursachten CO<sub>2</sub>-Äquivalenten für das Glasfasernetz.<sup>40</sup> Auch die Bundesnetzagentur veröffentlicht jährlich die gesamten Datenmengen sowohl für das Festnetz als auch für den Mobilfunk.<sup>41</sup> Eine Kurzrecherche bei verschiedenen Anbietern von Satellitenkommunikation ergab hingegen keine Veröffentlichungen von entsprechenden Größen oder Indikatoren.
- Der Indikator **Wasserverbrauch** wird beispielsweise von der DTAG veröffentlicht. Allerdings erfolgt auch diese Veröffentlichung für den gesamten Konzern. Gleichzeitig weist die DTAG darauf hin, dass der Wasserverbrauch ganz überwiegend bei Bürotätigkeiten anfällt. Ähnliches gilt für Telefónica Deutschland.<sup>42</sup>
- Der **Flächen**verbrauch der Netze ist in den Nachhaltigkeitsberichten von DTAG und Telefónica Deutschland nicht direkt enthalten. Die DTAG gibt zum Beispiel den Flächenverbrauch getrennt nach Technik-, Büro-, Lager-, Aufenthalts-, Call Center-, Laden- und sonstigen Flächen an.<sup>43</sup> Allerdings ist davon auszugehen, dass die Unternehmen die Lage und den Flächenbedarf ihrer Infrastruktur kennen, so dass diese Daten erhoben werden könnten.
- Im Bereich **Kreislaufwirtschaft** gibt beispielsweise Telefónica Deutschland eine Reihe verschiedener Abfallkennzahlen bekannt (vgl. Abbildung 21). Für das Mobilfunknetz wird beispielsweise ausgeführt: „2021 belief sich die Abfallmenge von Elektronik und Elektronikgeräten durch den Netzbetrieb und in den Büros auf 92,2 t (Vj. 88,3 t). Davon haben wir 100% an Fachentsorgungsunternehmen zum Recycling gegeben. Die Abfallmenge, bestehend aus Abfall oder Schrott von nichtelektronischen Geräten wie Kabeln, Rohren und Metallen oder Papier- und Kartonabfällen, belief sich auf 1.035,8 t (2020: 1.569,2 t). Auch

<sup>36</sup> § 289c Absatz 2 Satz1 HGB, Diese Regelung wird demnächst durch die sog. CSRD ersetzt: „Aufgrund der neuen EU-Richtlinie zur Nachhaltigkeitsberichterstattung von Unternehmen, der Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD), werden zukünftig auch kapitalmarktorientierte kleine und mittelgroße Unternehmen (KMU) Nachhaltigkeitsinformationen i. S. d. Europäischen Nachhaltigkeitsberichterstattungsstandards (European Sustainability Reporting Standards (ESRS)) offenlegen müssen.“ Vgl. [https://www.haufe.de/finance/jahresabschluss-bilanzierung/kmu-nachhaltigkeitsberichterstattung\\_188\\_585342.html](https://www.haufe.de/finance/jahresabschluss-bilanzierung/kmu-nachhaltigkeitsberichterstattung_188_585342.html), zuletzt abgerufen am 20.01.2023.

<sup>37</sup> Vgl. Deutsche Telekom (2022). Corporate Responsibility Bericht 2021.

<sup>38</sup> Die Daten werden auch über ein interaktives Tool bereitgestellt, vgl. <https://www.cr-bericht.telekom.com/2021/kennzahlen-tool/>, zuletzt abgerufen am: 19.01.2023.

<sup>39</sup> Telefónica Deutschland (2022). Corporate Responsibility Report 2021, S. 101.

<sup>40</sup> united internet (2021). Nachhaltigkeitsbericht 2021, S. 84.

<sup>41</sup> Vgl. BNetzA (2021). Daten Jahresbericht 2021, abrufbar unter:

<https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/Telekommunikation/Marktdaten/start.html>, zuletzt abgerufen am: 19.01.2023.

<sup>42</sup> Telefónica Deutschland (2022). Corporate Responsibility Report 2021, S. 110.

<sup>43</sup> Vgl. Deutsche Telekom (2022). Corporate Responsibility Bericht 2021, S. 95.

hier betrug die Recyclingquote 100%.<sup>44</sup> Auch hier liegen also gewisse Daten zum Umweltziel bereits vor, die durch (weitere) Abfragen ggf. konkretisiert werden könnten.

	Ungefährlicher Abfall	Gefährlicher Abfall	Gesamt
Gesamtabfallaufkommen (t) (ohne Wiederverwendung <sup>1</sup> )	1.116,5	138,0	<b>1.254,5</b>
Weiterverarbeiteter Abfall (t) (umfasst Wiederverwendung und Recycling)	1.003,6	148,5	<b>1.152,1</b>
Zur Entsorgung zugeführte Abfälle (t) (umfasst Energierückgewinnung)	113,1	0,0	<b>113,1</b>
<b>Abfallentsorgung nach Behandlungsverfahren</b>			
Wiederverwendung (t)	0,1	10,5	<b>10,6</b>
Recycling (t) <sup>2</sup>	1.003,4	138,0	<b>1.141,4</b>
Energierückgewinnung (t) <sup>3</sup>	113,1	0,0	<b>113,1</b>
Deponierung (t) <sup>4</sup>	0,0	0,0	<b>0,0</b>

<sup>1</sup> Gesamtabfallaufkommen (t) ohne Wiederverwendung, da Handys erst nach Ende der Nutzungsphase als Abfall betrachtet werden.  
<sup>2</sup> Das Recycling umfasst hier auch die Vor-/Zwischenbehandlung, also stoffliche Verwertung, vor der energetischen Verwertung.  
<sup>3</sup> Gesamtgewicht des zur Entsorgung weitergeleiteten Abfalls (Verbrennung mit Energierückgewinnung)  
<sup>4</sup> Die Telefónica Deutschland Gruppe gibt Abfälle ausschließlich an Vorbehandlungsunternehmen. Es werden keine Abfälle der direkten Deponierung zugeführt.

Abbildung 21: Abfallkennzahlen der Telefónica Deutschland Gruppe im Jahr 2021, Quelle: Telefonica (2022).

Für die Gruppe der **LCA-Indikatoren** wurde eine Einschätzung zur Verfügbarkeit der für eine Modellierung notwendigen Datensätze bereits in Kapitel 5.3 gegeben. Es ist davon auszugehen, dass mit den in aktuell gängigen LCA-Datenbanken enthaltenen Datensätzen eine Abbildbarkeit von Telekommunikationsinfrastrukturen grundsätzlich möglich ist. In welchem Detailgrad und welcher Spezifik sich einzelne Bestandteile und Technologien der Netzinfrastruktur abbilden lassen ist stark vom einzelnen Betrachtungsgegenstand abhängig und kann daher allgemein nicht angegeben werden. Für LCA-Betrachtungen im Rahmen der spezifischeren PEF-Guidelines besteht derzeit aus der Pilot-Phase des PEF bereits ein Set an Vorgaben (PEF Category Rules, PEFCR) im Bereich „IT equipment“<sup>45</sup> zur Abbildung von Speichersystemen, die mit Festplattenlaufwerken als Speichermedien ausgestattet sind. Andere Bereiche von TK-Infrastrukturen sind derzeit noch nicht durch PEFCR abgedeckt.

Nebst geeigneten Datensätzen ist zur Berechnung von LCA-Indikatoren zudem eine Erhebung von Eingangsdaten (Aufbau der IKT, Strombedarf, ...) für die Modellierung notwendig, welche benutzt werden, um die entsprechenden Datensätze auf den Betrachtungsgegenstand zu skalieren. Hierzu können, wie in den vorherigen Absätzen bereits beschrieben, Informationen aus der nichtfinanziellen Berichterstattung und den Onlineauftritten der Betreiber der betrachteten TK-Infrastruktur herangezogen werden. Sollten die dort vorhandenen Informationen nicht ausreichen, sollte nach Möglichkeit weitere Primärdaten beim Betreiber erfragt werden, bevor ungeklärte Parameter durch die Recherche von Sekundärdaten aus Fachliteratur, Berichten oder vergleichbaren LCA-Studien abgeschätzt werden. Besonderes Augenmaß ist hierbei bei der Erhebung von Daten zu Energieverbrauch und Traffic von Datennetzen geboten. Die Messung und Erhebung genauer und vergleichbarer Daten erweist sich aufgrund der Größe und Komplexität des TK-Sektors hier als schwierig.<sup>46</sup> Infolgedessen besteht die Gefahr, dass hier zunehmend generische Daten verwendet werden oder spezifische Daten sich in ihrer technologieperspektive unterscheiden. Dies kann zu widersprüchlichen Ergebnissen zwischen Ökobilanzen führen und die Aussagekraft einzelner Bilanzierungen maßgeblich beeinflussen.

<sup>44</sup> Telefónica Deutschland (2022). Corporate Responsibility Report 2021, S. 111.

<sup>45</sup> Abrufbar auf dem offiziellen Online-Auftritt der EU unter [https://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/pdf/PEFCR\\_ITequipment\\_Feb2020\\_2.pdf](https://ec.europa.eu/environment/eussd/smgp/pdf/PEFCR_ITequipment_Feb2020_2.pdf)

<sup>46</sup> Vgl. Billstein et al. (2021). Life Cycle Assessment of Network Traffic: A Review of Challenges and Possible Solutions. Sustainability 2021, Vol. 13, Page 11155, 13(20), 11155.

## 6. SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die steigende Relevanz der ökologischen Nachhaltigkeit und Umweltverträglichkeit wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Handelns bedingte in den vergangenen Jahren einer vermehrten Festlegung und Verabschiedung von entsprechenden Zielen auf globaler, europäischer und nationaler Ebene. Gleichzeitig schreitet die Digitalisierung und mit ihr der Bedarf an Telekommunikationsinfrastruktur voran. Um den Ausbau der dafür notwendigen Netzinfrastruktur in Einklang mit den ökologischen Nachhaltigkeitszielen zu bringen, bedarf es zielorientierter Indikatoren zur Überprüfung der ökologischen Nachhaltigkeit. Das Forschungsvorhaben analysierte daher bestehende Ansätze zur Erfassung und Bewertung ökologischer Nachhaltigkeit im Bereich der Telekommunikationsinfrastruktur und verwandten Themen aus dem Bereich der Digitalisierung und zugrundeliegenden IKT-Hardware und erarbeitete daraus einen Vorschlag für ein Indikatorenset zur ganzheitlichen Erfassung der Performance der elektronischen Telekommunikationsinfrastruktur in Bezug auf verschiedene ökologische Nachhaltigkeitsziele.

Um die Umweltauswirkungen der elektronischen Telekommunikationsinfrastruktur gemessen an den europäischen und nationalen ökologischen Nachhaltigkeitszielen zu identifizieren, wurden Indikatoren anhand der sechs Klima- und Umweltziele der Taxonomie als Grundlage für die Bewertung ökologischer Nachhaltigkeit ermittelt und eingeordnet. Obwohl die Recherche eingangs eine Vielzahl von Indikatoren, besonders im Energie- und Klimabereich, identifiziert hat, konnten auf Basis der weiteren Bewertungsschritte nur wenige Indikatoren ermittelt werden, die ganzheitlich die einzelnen Klima- und Umweltziele beschreiben und somit aussagekräftig für die Bewertung der ökologischen Nachhaltigkeit sind und zur Identifizierung möglicher Einsparpotentiale genutzt werden können.

Konkret werden in Abhängigkeit der möglichen Anwendungsfälle drei Indikatorensets vorgeschlagen, das Kernindikatorenset, die LCA-Indikatoren und das erweiterte Indikatorenset, die teils Überschneidungen aufweisen. Das Kernindikatorenset und die LCA-Indikatoren weisen dabei eine höhere Relevanz und Praktikabilität für die TKI auf und können durch das erweiterte Set in speziellen Anwendungsfällen ergänzt werden.

Zukünftig muss insbesondere konkretisiert werden, für welchen Anwendungsfall die Indikatoren verwendet werden sollen. Die Ausprägung der einzelnen Indikatoren kann im konkreten Anwendungsfall variieren. Auch wenn die Praktikabilität des Sets ein wesentliches Bewertungskriterium bei der Erstellung war, steht eine umfassende Prüfung dieser Anwendbarkeit aus. Die Anwendung der Indikatoren zielt dabei auf folgende wesentliche Erkenntnisse hinsichtlich der ökologischen Nachhaltigkeit von TK-Infrastrukturen ab: Die Indikatoren können dazu genutzt werden, den aktuellen Stand der ökologischen Nachhaltigkeit von TK-Infrastrukturen messbar zu machen. Dabei ist etwa auch ein Vergleich verschiedener TK-Infrastrukturen untereinander denkbar. Daneben können die Indikatoren genutzt werden, um über Monitoring-Ansätze die Transparenz bezogen auf Fragestellungen im Bereich ökologische Nachhaltigkeit zu steigern. So lassen sich beispielsweise Anreize setzen, um Verhaltensänderungen bei Unternehmen (z. B. Nachhaltigkeitsperformance) und Verbrauchern (z. B. nachhaltiger Konsum) zu bewirken.

## **ANHANG**

### **ABBILDUNGSVERZEICHNIS**

Abbildung 1: Ziel und wesentliche Bearbeitungsschritte der Studie.	8
Abbildung 2: Umweltziele laut EU-Taxonomie (Quelle: eigene Darstellung basierend auf (European Parliament and the Council, 2020)).	9
Abbildung 3: Schematische Darstellung des Betrachtungsrahmens einer Ökobilanz-Studie (Quelle: Ramboll (2022) in Anlehnung an DIN EN ISO 14040/14044).	10
Abbildung 4: Untergliederung von AP 1 in drei Arbeitsschritte (AS) zur Identifizierung vorhandener Indikatoren.	12
Abbildung 5: Aufgliederung der analysierten Literatur nach Publikationstyp.	19
Abbildung 6: Anzahl der analysierten Publikationen je Veröffentlichungsjahr.	20
Abbildung 7: Bewertungskriterien und vier Ergebnisgruppen der Indikatorenbewertung.	21
Abbildung 8: Verbleibende Gruppen von Indikatoren für die weitere Betrachtung.	22
Abbildung 9: Anzahl von Indikatoren pro Umweltziel und Indikatorengruppe nach erster Analyse.	23
Abbildung 10: Übersicht der Arbeitsschritte zur Ableitung eines geeigneten Indikatorensets für TK-Infrastrukturen.	29
Abbildung 11: Übersicht verschiedener Festnetz-Technologien im Zeitverlauf (Quelle: WIK-Consult 2022)	30
Abbildung 12: Grundlegende Architektur des Kabelnetzes (Quelle: WIK-Consult 2022).	31
Abbildung 13: Schematischer Aufbau eines Mobilfunknetzes (Quelle: <a href="https://www.bundestag.de/resource/blob/908164/8124058f9c68d93c9e7292baf133537b/Stellungnahme-Thomas-Tschersich-Deutsche-Telekom-data.pdf">https://www.bundestag.de/resource/blob/908164/8124058f9c68d93c9e7292baf133537b/Stellungnahme-Thomas-Tschersich-Deutsche-Telekom-data.pdf</a> , zuletzt abgerufen am 10.11.2022).	32
Abbildung 14: Schematische Darstellung der Satelliteninfrastruktur (Quelle: SABER (2013). Final report on Satellite Broadband as an option for Regions, Deliverable 3, S. 35).	34
Abbildung 15: Entwicklung neuer Netzwerktechnologien (Quelle: Chiosi et al. (2012). Network Functions Virtualisation, An Introduction, Benefits, Enablers, Challenges & Call for Action).	35
Abbildung 16: Schematische Darstellung der wesentlichen Systemkomponenten im Lebenszyklus der untersuchten Technologien (Quelle: eigene Darstellung).	36
Abbildung 17: Relevanzprüfung der Indikatoren.	38
Abbildung 18: Übersicht der inhaltlichen und operativen Bewertung.	40
Abbildung 19: Verteilung der Gesamteinschätzung der inhaltlichen und operativen Bewertung der Indikatoren.	42
Abbildung 20: Indikatorensets für die ökologische Bewertung von TK-Infrastruktur für verschiedene Anwendungsfälle.	43
Abbildung 21: Abfallkennzahlen der Telefónica Deutschland Gruppe im Jahr 2021, Quelle. Telefonica (2022). S.110.	51

## TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Schwerpunktstudien laut Leistungsbeschreibung zur vorrangigen Analyse.	13
Tabelle 2: Identifizierte Literatur mit Relevanz für das Vorhaben.	14
Tabelle 3: Klima-Indikatoren in den verschiedenen Gruppen zur weiteren Betrachtung.	23
Tabelle 4: Wasser-Indikatoren in den verschiedenen Gruppen zur weiteren Betrachtung.	24
Tabelle 5: Biodiversitäts-Indikatoren in den verschiedenen Gruppen zur weiteren Betrachtung.	25
Tabelle 6: Kreislaufwirtschafts-Indikatoren in den verschiedenen Gruppen zur weiteren Betrachtung.	26
Tabelle 7: Umweltverschmutzungs-Indikatoren in den verschiedenen Gruppen zur weiteren Betrachtung.	27
Tabelle 8: Aktive Komponenten verschiedener Festnetz-Technologien (Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Breide et al. (2021)).	31
Tabelle 9: Bewertung der Primärindikatoren nach Relevanz für die Umweltziele.	39
Tabelle 10: Bewertungsschema zur Einordnung der Fähigkeit des Indikators die verschiedenen Stufen des Lebenszyklus des Telekommunikationsnetzes abzubilden.	40
Tabelle 11: Bewertungsschema zur Einordnung der Abdeckung von relevanten Bestandteilen des Telekommunikationsnetzes in den Anwendungsfällen, aus denen der Indikatoren in der Recherche in AP1 extrahiert wurde.	41
Tabelle 12: Bewertungsschema zur operativen Bewertung der Primärindikatoren bezüglich des Datenbedarfs.	41
Tabelle 13: Bewertungsschema zur Abschätzung der Datenverfügbarkeit im einzelnen Anwendungsfall.	42
Tabelle 14: Übersicht Kernindikatoren	44
Tabelle 15: Übersicht erweitertes Indikatorenset	45
Tabelle 16: Auswahl verschiedener Life Cycle Impacts Assessment (LCIA) Methoden	47
Tabelle 17: Übersicht über die Indikatoren der ReCiPe 2016 midpoint (H) LCIA Methode	47