

Metastudie zum nachhaltigen Ausbau von Gigabitnetzen

Autoren:

Prof. Dr. Bernd Sörries
Matthias Wissner

Caspar von Preysing
Josephine Neuhaus
Tim Hoff
Marscha Berg

Impressum

WIK-Consult GmbH
Rhöndorfer Str. 68
53604 Bad Honnef
Deutschland
Tel.: +49 2224 9225-0
Fax: +49 2224 9225-63
E-Mail: info@wik-consult.com
www.wik-consult.com

Vertretungs- und zeichnungsberechtigte Personen

Geschäftsführerin und Direktorin	Dr. Cara Schwarz-Schilling
Direktor, Verwaltungs- und Abteilungsleiter	Alex Kalevi Dieke
Direktor, Abteilungsleiter	Prof. Dr. Bernd Sörries
Abteilungsleiter	Dr. Christian Wernick
Abteilungsleiter	Dr. Lukas Wiewiorra
Vorsitzender des Aufsichtsrates	Dr. Thomas Solbach
Handelsregister	Amtsgericht Siegburg, HRB 7043
Steuer-Nr.	222/5751/0926
Umsatzsteueridentifikations-Nr.	DE 329 763 261

Stand: Januar 2024

Inhaltsverzeichnis

Abbildungen	II
Tabellen	III
Zusammenfassung	1
Summary	3
1 Einleitung	5
2 Methodik und Vorgehensweise	7
2.1 Definition der Netzkomponente (a)	9
2.2 Betrachtung und Analyse von Nachhaltigkeitsaspekten (b)	10
2.3 Betrachtung und Analyse der Rahmenbedingungen (c)	11
2.4 Analyse der Praxis (d)	12
3 Grundlegende Aspekte bei der Betrachtung nachhaltiger Gigabitnetze	12
3.1 Der IKT-Sektor und relevante Aspekte der Nachhaltigkeit	12
3.2 Treiber für ökologische Nachhaltigkeit in den Infrastrukturen	17
3.3 Messung von ökologischer Nachhaltigkeit	20
3.4 Rechtsrahmen und Nachhaltigkeit	23
3.5 Finanzierungsinstrumente von Nachhaltigkeit	27
4 Analyse der Netzinfrastrukturen	31
4.1 Rechenzentren	31
4.2 Drahtgebundene Netzinfrastrukturen: Zugangs- und Kernnetze	50
4.3 Öffentliche Mobilfunknetze: Zugangs- und Kernnetz	72
4.4 Gebäudenetze	89
5 Zusammenfassende Überlegungen und Handlungsbedarfe	95
5.1 Berücksichtigung unterschiedlicher Ziele	97
5.2 Migration auf nachhaltige Infrastrukturen	99
5.3 Transparenz über ökologische Aspekte von IKT	100
6 Fazit und Ausblick	107
Literatur	109
Abkürzungen	115
Anhang 1: Literaturübersicht	118
Anhang 2: Thesenpapier des Workshops vom 5. September 2023	131
Anhang 3: Übersicht Experteninterviews	135

Abbildungen

Abbildung 2-1:	Lebenszyklen von Infrastrukturen	7
Abbildung 2-2:	Struktur der Metastudie	9
Abbildung 2-3:	Netzinfrastrukturen der Literaturanalyse	10
Abbildung 3-1:	Überschlägige Beiträge zu THG-Emissionen innerhalb des IKT-Sektors	13
Abbildung 3-2:	Basisprognose zur Entwicklung der Treibhausgasemissionen der IKT in Deutschland bis 2030 (ohne Unterhaltungselektronik)	14
Abbildung 3-3:	Wirkungsverteilung entlang der Lebenszyklusphasen	16
Abbildung 3-4:	Kernindikatoren zur Messung von Nachhaltigkeit im IKT-Sektor	21
Abbildung 3-5:	Anteil der Großanleger, die Nachhaltigkeitskriterien bei ihren Anlageentscheidungen berücksichtigen	27
Abbildung 4-1:	Literaturübersicht Rechenzentren	33
Abbildung 4-2:	Relative Verteilung der Umweltwirkungen der Rechenzentren nach Lebenszyklusphasen	34
Abbildung 4-3:	Scoring-System für Rechenzentren	35
Abbildung 4-4:	Energiebedarf der Rechenzentren in Deutschland	37
Abbildung 4-5:	Entwicklung der PUE weltweit in den größten Rechenzentren der Befragten	41
Abbildung 4-6:	Ausgestaltung der EN 50600	44
Abbildung 4-7:	Maßnahmen für nachhaltigere Rechenzentren	48
Abbildung 4-8:	Zukünftiger Energiebedarf der Rechenzentren in Deutschland	50
Abbildung 4-9:	Netzebenen im Mehrfamiliengebäude	51
Abbildung 4-10:	Netzelemente von FTTC-, FTTB/H- sowie HFC-Netzen	52
Abbildung 4-11:	Vergleich der Produktionsemissionen von Kupferdoppelader und Glasfaser in kg CO ₂ e/km	55
Abbildung 4-12:	Literaturübersicht drahtgebundener Netze	56
Abbildung 4-13:	Globaler IP-Verkehr nach Anwendungskategorie	57
Abbildung 4-14:	THG-Emissionen verschiedener Legeverfahren in kg CO ₂ /100m	59
Abbildung 4-15:	Leistungsaufnahme der jeweiligen Zugangstechnologien für eine Gesamtversorgung Deutschlands (in MW)	63
Abbildung 4-16:	Gesamtgewicht der jeweiligen Zugangstechnologien (in t)	63
Abbildung 4-17:	Leistungsaufnahme der jeweiligen Zugangstechnologien (in MW/Gbit/s)	64

Abbildung 4-18: Stromverbrauch von ICT-Komponenten im Kernnetz	65
Abbildung 4-19: Maßnahmen für nachhaltigere leitungsgebundene Netze	71
Abbildung 4-20: Aufbau eines Mobilfunkstandorts	74
Abbildung 4-21: Literaturübersicht Mobilfunk	76
Abbildung 4-22: Prognose des elektrischen Energiebedarfs in TWh/a der Funkzugangsnetze (RAN) und Transportkernnetze (TCN) in Deutschland im Basisszenario 2019 bis 2030	78
Abbildung 4-23: Energieverbrauch und Effizienz mobiler Zugangstechnologien	79
Abbildung 4-24: Monatliches Datenvolumen pro Mobilfunkanschluss in Deutschland in Gigabyte (GB), 2017–2022	84
Abbildung 4-25: Maßnahmen für nachhaltigeren Mobilfunk	88
Abbildung 4-26: Netzebenen im Mehrfamiliengebäude	90
Abbildung 5-1: Phasenkonzept zur Migration im Festnetzbereich	100

Tabellen

Tabelle 3-1: Potenzielle Indikatoren	22
Tabelle 4-1: Anforderungen an Rechenzentren nach Energieeffizienzgesetz und Blauem Engel	47
Tabelle 4-2: Drahtgebundene Technologien und Komponenten	52
Tabelle 4-3: Durchschnittliche CO ₂ -Emissionen (in g) verschiedener Internetprozesse	57
Tabelle 4-4: Übersicht der Indikatoren im Festnetzbereich	68
Tabelle 5-1: Nachhaltigkeitsziele der größten deutschen TK-Unternehmen	103

Zusammenfassung

Auf Basis modernster Telekommunikationsnetze werden innovative, datenbasierte Anwendungen realisiert, mit denen energie- und umweltpolitische Herausforderungen des Klimawandels begegnet werden kann. Telekommunikationsnetze und die durch sie verbundenen informationstechnischen Infrastrukturen nehmen damit eine zentrale Rolle in einem ökologisch nachhaltigen und innovativen Wirtschaftssystem ein. Um den negativen Beitrag zur ökologischen Nachhaltigkeit angesichts der stetig wachsenden Bedeutung und Nutzung von datenbasierten Anwendungen zu begrenzen, wird in der Gigabitstrategie der Bundesregierung das Ziel formuliert, Handlungsempfehlungen für den nachhaltigen Ausbau und Betrieb von Gigabitnetzen zu erarbeiten. Ziel ist es, dass die digitalen Infrastrukturen nicht nur die Erreichung der Klimaziele anderer Sektoren unterstützen, sondern auch selbst zu den globalen Nachhaltigkeits- und Klimazielen sowie zu den auf EU-Ebene festgelegten Zielen des Green Deals beitragen. Die vorliegende Metastudie soll die Erreichung dieses Ziel insoweit unterstützen, als sie eine Auswertung der entsprechenden Sach- und Studienlage beisteuert und Wissenslücken schließt.

Die dieser Metastudie zugrunde liegende Literaturanalyse zeigt, dass Aspekte der ökologischen Nachhaltigkeit der betrachteten Netzinfrastrukturen und Technologien sehr unterschiedlich erforscht sind. Während es eine Vielzahl von Analysen zu Aspekten der Nachhaltigkeit von Rechenzentren mit einer Vielzahl von (technischen) Indikatoren zur Messung von Nachhaltigkeit gibt, liegen vergleichbare Studien für drahtgebundene und drahtlose Netzinfrastrukturen und gebäudeinterne Netze nur vereinzelt oder gar nicht vor. Ebenso gibt es nur sehr vereinzelt Analysen, die bei ihrer Methode auf eine Ende-zu-Ende-Betrachtung von Netzinfrastrukturen und Anwendungen abstellen.

Im Hinblick auf die unterschiedlichen Nachhaltigkeitsdimensionen, die in der vorliegenden Literatur zu digitaler Infrastruktur behandelt werden, wird konstatiert, dass der Schwerpunkt existierender Forschungen primär auf der Energieeffizienz liegt – andere Nachhaltigkeitsdimensionen werden kaum behandelt. In Bezug auf den Lebenszyklus liegt der Fokus der Forschung auf den CO₂-Emissionen während des Betriebs der IKT-Infrastruktur – andere umweltrelevante Phasen des Lebenszyklus, insbesondere die Produktion und Entsorgung von Komponenten, finden in der wissenschaftlichen Diskussion bisher nur wenig Berücksichtigung.

Die Metastudie präsentiert auf Basis vorliegender Literatur zum Thema eine eingehende Analyse der Nachhaltigkeitsdimensionen digitaler Infrastrukturen, wobei ein besonderer Fokus auf den Sektor der Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT) gelegt wird. Der IKT-Sektor ist, wie erörtert, für einen globalen Anteil von 2–4 % der Treibhausgasemissionen verantwortlich. Eine differenzierte Betrachtung der Emissionsquellen innerhalb des Sektors zeigt, dass Endgeräte beim Verbraucher zwischen 49–80 % der Emissionen ausmachen, gefolgt von Rechenzentren (15–29 %) und Netzinfrastrukturen (12–24 %). Während die Emissionen bei den Endgeräten mehrheitlich auf Produktion und

Entsorgung zurückzuführen sind, entstehen diese auf Ebene der Rechenzentren und Netze primär im Betrieb.

Im Kontext der Rechenzentren wird die Energieeffizienz speziell in Bezug auf Kühlungsprozesse und unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) beleuchtet. Die Power Usage Effectiveness (PUE) wird als etablierter und zentraler Indikator zur Bewertung der Energieeffizienz von Rechenzentren identifiziert. Die Nachhaltigkeit von drahtgebundenen Netzinfrastrukturen wird ebenfalls analysiert, mit einem Fokus auf die Umweltverträglichkeit verschiedener Verlegungsmethoden. Die Studie hebt hervor, dass minimalinvasive Verlegungsmethoden, im Gegensatz zum konventionellen Aufbruch und Wiederherstellen von Asphalt, potenzielle Nachhaltigkeitsvorteile bieten können. Im Bereich des Mobilfunks wird die Implementierung von Open RAN und kooperativen Nutzungsansätzen als positiv für die Energiebilanz und allgemeine Nachhaltigkeit herausgestellt. Diese Ansätze tragen zur Reduzierung der Abhängigkeit von einzelnen Herstellern, Materialien, Komponenten und Standorten bei.

Insgesamt zeigen die Literaturanalyse und die Ergebnisse des im Rahmen der Metastudie durchgeführten Stakeholder-Dialogs, dass die Marktteilnehmer in der Regel im Zusammenhang mit der Reduzierung von Betriebskosten sowie des Zugangs zum Kapitalmarkt ein hohes Interesse haben, ökologische Aspekte der Nachhaltigkeit (insbesondere den Ressourcen- und Energieverbrauch) zu beachten. Im Bereich der drahtgebundenen Netze und Mobilfunknetze ist der Stromverbrauch trotz eines teilweise exponentiellen Anstiegs der übertragenden Daten relativ stabil geblieben bzw. nur mäßig gestiegen. Dies liegt in erster Linie an der verbesserten Energieeffizienz und deutet darauf hin, dass die Unternehmen den Wechsel hin zu mehr nachhaltigen Technologien vorantreiben. Bei drahtgebundenen Netzinfrastrukturen steigert der Ausbau von Glasfasernetzen bis in die Wohnungen und die nachfolgende Nutzung dieser Anschlüsse die ökologische Nachhaltigkeit. Der Beitrag des Sektors zur ökologischen Nachhaltigkeit hängt somit von der erfolgreichen Migration auf die jeweils modernsten und leistungsfähigsten Telekommunikationstechnologien ab. Ein kritischer Punkt, der in der Studie aufgezeigt wird, ist das Defizit an umfassenden Datenräumen für die Entwicklung harter Key Performance Indicators (KPIs). Es wird deutlich, dass der Mangel an präzisen und zugänglichen Daten die Identifikation und Implementierung von Best Practices in Bereichen wie beispielsweise Kreislaufwirtschaft erschwert. Die Studie legt dar, dass Endgeräte einen überproportionalen Beitrag zu den Emissionen leisten. Daher wird die Notwendigkeit betont, Verbraucher hinsichtlich ökologischer Aspekte in der Herstellung und im Betrieb von Endgeräten zu sensibilisieren. Es wird argumentiert, dass Fortschritte in den vorgelagerten Wertschöpfungsebenen durch die Fortsetzung aktueller Entwicklungs- und Verhaltensweisen potenziell zunichte gemacht werden könnten. Des Weiteren werden Zielkonflikte und Marktanreize im Kontext nachhaltiger Digitalisierung diskutiert. Es wird aufgezeigt, dass einige Wettbewerbsziele und Marktanreize Nachhaltigkeit fördern können, während andere, wie Infrastrukturwettbewerb, digitale Souveränität oder Resilienz, potenziell gegenläufige Effekte haben.

Die Studie empfiehlt den Übergang zu nachhaltigeren Infrastrukturen, insbesondere durch die Transformation von Kupfer- zu Glasfaserinfrastrukturen, um das volle Einsparpotential von Glasfaser zu realisieren. Abschließend wird die Bedeutung einer unabhängig erstellten und öffentlich zugänglichen Datenbank mit Nachhaltigkeitsdaten für wesentliche Netzkomponenten betont. Eine solche Datenbank würde nicht nur die Berichterstattung verbessern und die Transparenz sowie Vergleichbarkeit erhöhen, sondern auch die Belastung für Netzbetreiber reduzieren und nachhaltige Produktion sowie den Materialeinkauf erleichtern.

Summary

Based on modern telecommunications networks, innovative, data-based applications are being realised that can be used to meet the energy and environmental challenges of climate change. Telecommunications networks and the information technology infrastructures connected by them thus play a central role in an ecologically sustainable and innovative economic system. To limit the negative contribution to ecological sustainability in view of the constantly growing importance and use of data-based applications, the German government's gigabit strategy formulates the goal of developing recommendations for the sustainable expansion and operation of gigabit networks. The aim is for digital infrastructures not only to support the achievement of climate targets in other sectors, but also to contribute to global sustainability and climate targets and to the EU-level Green Deal targets. This meta-study is intended to support the achievement of this goal by contributing an evaluation of the relevant facts and studies and closing knowledge gaps.

The literature analysis on which this meta-study is based shows that aspects of the ecological sustainability of the network infrastructures and technologies under consideration have been researched in very different ways. While there are many analyses of aspects of the sustainability of data centres, with a wide range of (technical) indicators for measuring sustainability, comparable studies for wired and wireless network infrastructures and in-house networks are only available in isolated cases, if at all. Similarly, there are only very few analyses that use an end-to-end approach to network infrastructures and applications.

Regarding the various sustainability dimensions that are addressed in the literature on digital infrastructure, it is stated that the focus of existing research is primarily on energy efficiency – other sustainability dimensions are hardly addressed. In terms of the life cycle, research focuses on CO₂-emissions during the operation of ICT infrastructure – other environmentally relevant phases of the life cycle, in particular the production and disposal of components, have so far received little attention in the scientific discussion.

The meta-study presents an in-depth analysis of the sustainability dimensions of digital infrastructures based on the available literature on the subject, with a particular focus on the information and communication technology (ICT) sector. As discussed, the ICT sector

is responsible for a global share of 2–4% of greenhouse gas emissions. A differentiated analysis of the emission sources within the sector shows that consumer devices account for between 49–80% of emissions, followed by data centres (15–29%) and network infrastructures (12–24%). While most emissions from consumer devices are attributable to production and disposal, those at the level of data centres and networks are primarily generated during operation.

In the context of data centres, energy efficiency is examined particularly regarding cooling processes and uninterruptible power supply (UPS). Power Usage Effectiveness (PUE) is identified as an established and central indicator for evaluating the energy efficiency of data centres. The sustainability of wired network infrastructures is also analysed, with a focus on the environmental compatibility of various laying methods. The study emphasises that minimally invasive laying methods, in contrast to the conventional breaking up and re-laying of asphalt, can offer potential sustainability benefits. In the area of mobile communications, the implementation of Open RAN and cooperative usage approaches is highlighted as positive for the energy balance and general sustainability. These approaches contribute to reducing dependence on individual manufacturers, materials, components and locations.

Overall, the literature analysis and the results of the stakeholder dialogue conducted as part of the meta-study show that market participants are generally very interested in considering ecological aspects of sustainability (in particular resource and energy consumption) in connection with reducing operating costs and accessing the capital market. In the area of wired and mobile networks, electricity consumption has remained relatively stable or increased only moderately, despite a partial exponential increase in the amount of data transmitted. This is primarily due to improved energy efficiency and indicates that companies are driving the change towards more sustainable technologies. In the case of wired network infrastructures, the expansion of fibre-optic networks into homes and the subsequent use of these connections increases ecological sustainability. The sector's contribution to ecological sustainability therefore depends on the successful migration to the most modern and powerful telecommunications technologies. One critical point highlighted in the study is the lack of comprehensive data spaces for the development of hard key performance indicators (KPIs). The lack of precise and accessible data makes it difficult to identify and implement best practices in areas such as the circular economy. The study shows that end devices make a disproportionate contribution to emissions. Therefore, the need to raise consumer awareness of environmental aspects in the production and operation of end devices is emphasised. It is argued that progress in the upstream value chain could potentially be undone by the continuation of current development and behavioural patterns. Furthermore, trade-offs and market incentives in the context of sustainable digitisation are discussed. It is shown that some competition objectives and market incentives can promote sustainability, while others, such as infrastructure competition, digital sovereignty or resilience, have potentially countervailing effects.

The study recommends the transition to more sustainable infrastructures, in particular through the transformation from copper to fibre infrastructures, in order to realise the full savings potential of fibre. Finally, the importance of an independently created and publicly accessible database with sustainability data for key network components is emphasised. Such a database would not only improve reporting and increase transparency and comparability, but also reduce the burden on network operators and facilitate sustainable production and material procurement.

1 Einleitung

Auf Basis modernster Telekommunikationsnetze werden innovative, datenbasierte Anwendungen realisiert, mit denen energie- und umweltpolitische Herausforderungen des Klimawandels begegnet werden kann.¹ Telekommunikationsnetze und die durch sie verbundenen informationstechnischen Infrastrukturen nehmen damit eine zentrale Rolle in einem ökologisch nachhaltigen und innovativen Wirtschaftssystem ein.

Den Telekommunikationsnetzen sowie weiteren an der Wertschöpfung beteiligten Infrastrukturen kommt durch ihren eigenen Energie- und Ressourcenverbrauch sowie ihre Bedeutung für neue Anwendungen eine besondere Rolle bei der Erreichung von Umwelt- und Klimazielen zu. Der Informations- und Kommunikationstechnik werden heute ungefähr 3 % der globalen CO₂-Emissionen zugerechnet.² Trotz einer massiven Steigerung der Nutzung ist es bisher gelungen, beispielsweise den Stromverbrauch in den letzten Jahren nur leicht ansteigen zu lassen.

Um den negativen Beitrag zur ökologischen Nachhaltigkeit angesichts der stetig wachsenden Bedeutung und Nutzung von datenbasierten Anwendungen zu begrenzen, wird in der Gigabitstrategie der Bundesregierung das Ziel formuliert, Handlungsempfehlungen für den nachhaltigen Ausbau und Betrieb von Gigabitnetzen zu erarbeiten.³ Ziel ist es, dass die digitalen Infrastrukturen nicht nur die Erreichung der Klimaziele anderer Sektoren unterstützen, sondern auch selber zu den globalen Nachhaltigkeits- und Klimazielen sowie zu den auf EU-Ebene festgelegten Zielen des Green Deals beitragen.⁴ Die vorliegende Metastudie soll die Erreichung dieses Ziel insoweit unterstützen, als sie eine Auswertung der entsprechenden Sach- und Studienlage beisteuert und Wissenslücken schließt.

¹ Vgl. dazu Erwägungsgrund 38 ff der delegierten Verordnung (EU) 2021/2139 der Kommission vom 4.6.2021. Mit dem von Informations- und Kommunikationstechnologien ausgehenden Einfluss auf Nachhaltigkeit in anderen Sektoren setzen sich u. a. Freitag et al. (2021) und Arthur D. Little und eco-Verband (2023) auseinander.

² Freitag et al. (2021).

³ https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/K/gigabitstrategie.pdf?__blob=publicationFile, S. 53, zuletzt abgerufen am 10.10.2023.

⁴ BMDV (2022).

Auf Basis der Erkenntnisse dieser Metastudie sollen im Austausch mit Anwendern, Netzbetreibern und Herstellern Eckpunkte und Handlungsempfehlungen für den nachhaltigen Netzausbau und Betrieb entwickelt werden, die die allgemeinen Anforderungen an den Netzausbau ergänzen und insoweit einen Beitrag dazu leisten können, dass die betrachteten Infrastrukturen selbst noch ökologisch nachhaltiger werden.

Im Fokus der Studie stehen Infrastrukturen, die für die Datenübertragung und -verarbeitung auf Seiten des Angebots aufgebaut, betrieben und entsorgt werden. Hinzu kommt ein Exkurs zu Endgeräten, die von Anwendern (Nachfragern) zur Nutzung datenbasierter Anwendungen benötigt werden und die einen erheblichen Anteil am Energie- und Ressourcenverbrauch der Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) haben, auch wenn deren ökologisch relevante Konfiguration und Produktion zu einem großen Anteil nicht in Deutschland erfolgt.

Daraus ergibt sich die Analyse folgender Infrastrukturen mit Blick auf nachhaltige Aspekte / Nachhaltigkeit:

- Rechenzentren,
- Drahtgebundene öffentliche Telekommunikationsnetze (VDSL-, HFC- und FTTB/H-Netze),
- Funkbasierte öffentliche Telekommunikationsnetze (öffentliche Mobilfunknetze),
- Gebäudeinterne Infrastrukturen zur Übertragung von Daten.

Obwohl die Analyse der obigen Infrastrukturen im Fokus dieser Metastudie liegen, werden die ökologischen Aspekte von im Massenmarkt genutzten Endgeräten mitbetrachtet.

Um die ökologische Nachhaltigkeit der elektronischen Telekommunikationsinfrastruktur zu beurteilen, werden publizierte Studien und Analysen über die einzelnen Infrastrukturen hinsichtlich ihrer ökologischen Nachhaltigkeit ausgewertet. Ziel der Literaturanalyse ist, Erkenntnisse über bereits bestehende Maßnahmen und Entwicklungen für mehr Nachhaltigkeit zu gewinnen. Die Studie setzt dabei auf die Vorarbeiten der AG Digitale Netze und des Steuerkreises Bauwesen sowie der Workshopreihe „Digitalisierung nachhaltig gestalten“ des BMDV auf. Ebenso werden Ergebnisse der unter deutscher G7-Präsidentschaft durchgeführten G7-Multi-Stakeholder „Conference on the Digital-Environment Nexus“ berücksichtigt.

Wie bereits oben ausgeführt, dient die vorliegende Studie auch dazu, nachfolgend Eckpunkte für Handlungsempfehlungen abzuleiten, mit denen weitere Verbesserungen der ökologischen Nachhaltigkeit der Telekommunikationsinfrastrukturen erreicht und/oder Einsparpotentiale beim Energie- und Ressourcenverbrauch identifiziert werden können. Die Eckpunkte und Handlungsempfehlungen sollen in einem Diskurs mit den relevanten Stakeholdern erarbeitet werden. Sie sind deshalb nicht Gegenstand der vorliegenden Metastudie.

Um dieser umfassenden Aufgabenstellung zu genügen, rücken auch Maßnahmen in den Fokus der Analyse, wie beispielsweise die konsequente Transformation von Kupfer- auf Glasfaserinfrastrukturen, die bereits in der Gigabitstrategie der Bundesregierung erwähnt werden.

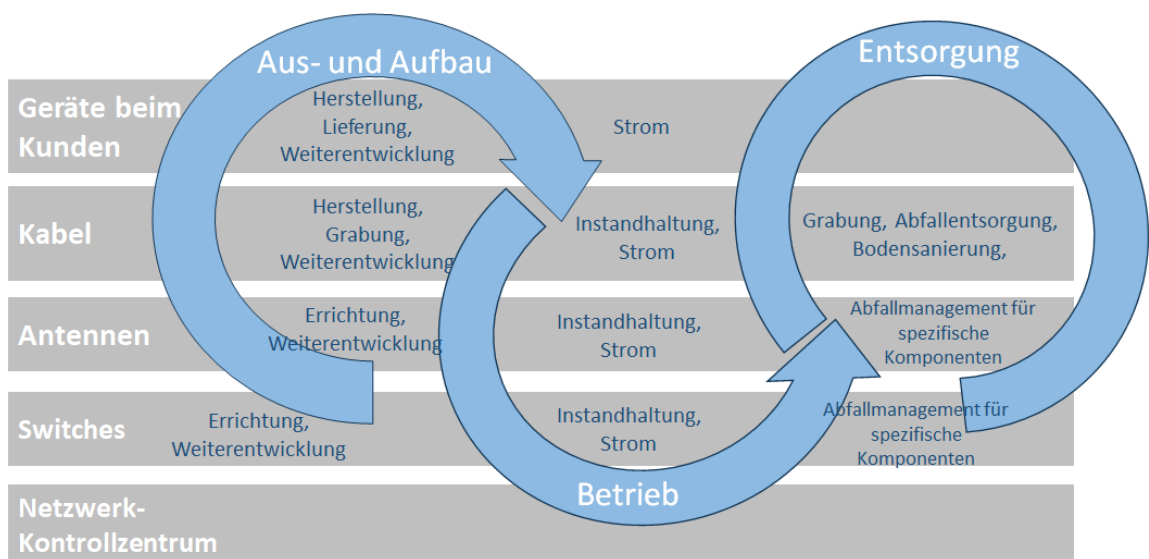
Die Metastudie wurde im Oktober 2023 erstmals veröffentlicht und nachfolgend von Marktteilnehmern kommentiert. Die im Juni 2024 erschienene Metastudie berücksichtigt diese Kommentare.

Der nachfolgende Text gliedert sich wie folgt: In Abschnitt 2 wird die Methodik und Vorgehensweise der Studie erläutert. In Abschnitt 3 werden grundlegende Aspekte sowie die Ausgangslage diskutiert, die beim Ausbau nachhaltiger Gigabitnetze von Relevanz sind. Abschnitt 4 befasst sich detailliert mit den einzelnen Bereichen Rechenzentren, drahtgebundene Netze, Mobilfunk und Gebäude. In Abschnitt 5 werden wesentliche Ergebnisse zusammengefasst dargestellt und einzelne Aspekte, die auf Handlungsbedarfe hindeuten, betrachtet. Die Studie schließt mit einem Fazit und Ausblick in Abschnitt 6.

2 Methodik und Vorgehensweise

Die vorliegende Metastudie basiert auf einer Literaturanalyse, ordnet diese in den rechtlichen und regulatorischen Rahmen ein, betrachtet wesentliche Lebenszyklen und gleicht die Erkenntnisse aus der Literatur mit Marktbeobachtungen sowie von Marktakteuren genannten Herausforderungen und Best Practices ab.

Abbildung 2-1: Lebenszyklen von Infrastrukturen



Quelle: Kubneck et al. (2023), S. 25, eigene Übersetzung.

Um auf Basis dieser Studie Handlungsempfehlungen für nachhaltige Netzinfrastrukturen ausarbeiten zu können, ist es notwendig, die Netzkomponenten isoliert zu betrachten, weil sie u. a. von unterschiedlichen Wirtschaftsakteuren aufgebaut und betrieben werden.

Die relevante Literatur wird dahingehend analysiert, welche Aussagen sie hinsichtlich der ökologischen Nachhaltigkeit der analysierten Netzinfrastrukturen macht. Dies können beispielsweise Indikatoren sein, die zur Messung und Steuerung des CO₂-Fußabdrucks dienen. Ebenso wird betrachtet, welche Bestandteile der Wertschöpfungsprozesse einen maßgeblichen Einfluss auf die ökologische Nachhaltigkeit (z. B. Energieverbrauch, Emissionen, Wasserverbrauch, Flächenverbräuche) haben.

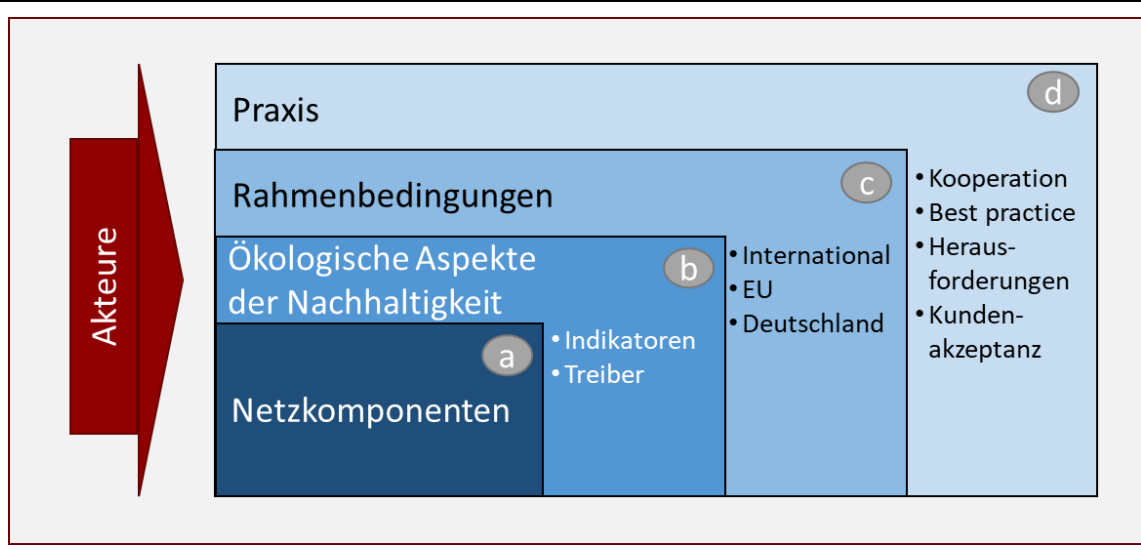
Weitere Kriterien, die bei der Literatursuche berücksichtigt wurden, sind:

- Die Aktualität der Veröffentlichung (möglichst aus den letzten fünf Jahren)
- Die analytische Untersuchung des betreffenden Sachverhalts (weniger die Projektion von Entwicklungen)
- Der räumliche Bezug (möglichst Deutschland bzw. Europa)
- Abdeckung möglichst aller Phasen des Lebenszyklus von Infrastrukturen

Um eine ganzheitliche Betrachtung zu erhalten, werden im Weiteren relevante rechtliche und/oder regulatorische Rahmenbedingungen geprüft, die Aspekte der ökologischen Nachhaltigkeit der jeweiligen Netzinfrastrukturen adressieren und insoweit von den Unternehmen, die an der Wertschöpfung beteiligt sind, umgesetzt werden müssen. Freiwillige Selbstverpflichtungen werden ebenfalls betrachtet.

Die Analyse wird dadurch komplementiert, dass Best Practices bei der Verbesserung von Nachhaltigkeit, genauso wie Herausforderungen oder Verhaltensweisen von Akteuren (z. B. Kooperationen, Kundenverhalten), im Fokus der Analyse stehen. Die Abbildung 2-2 illustriert die gewählte Vorgehensweise bei der Erstellung dieser Metastudie.

Abbildung 2-2: Struktur der Metastudie



Quelle: Eigene Darstellung

Die Literaturanalyse wird durch Erkenntnisse aus Gesprächen mit Netzbetreibern im Festnetz und Mobilfunk, Herstellern von Netzwerkkomponenten, Verbänden der Telekommunikationswirtschaft, Betreibern von Rechenzentren und Wissenschaftlern, die im Bereich IKT und Nachhaltigkeit forschen, vertieft. Darüber hinaus werden in der Analyse Erkenntnisse aus einem Stakeholder-Workshop berücksichtigt, der Anfang September 2023 durchgeführt wurde.

Die gewählte Vorgehensweise mit den wesentlichen Bestandteilen der Analyse werden nachfolgend detailliert vorgestellt.

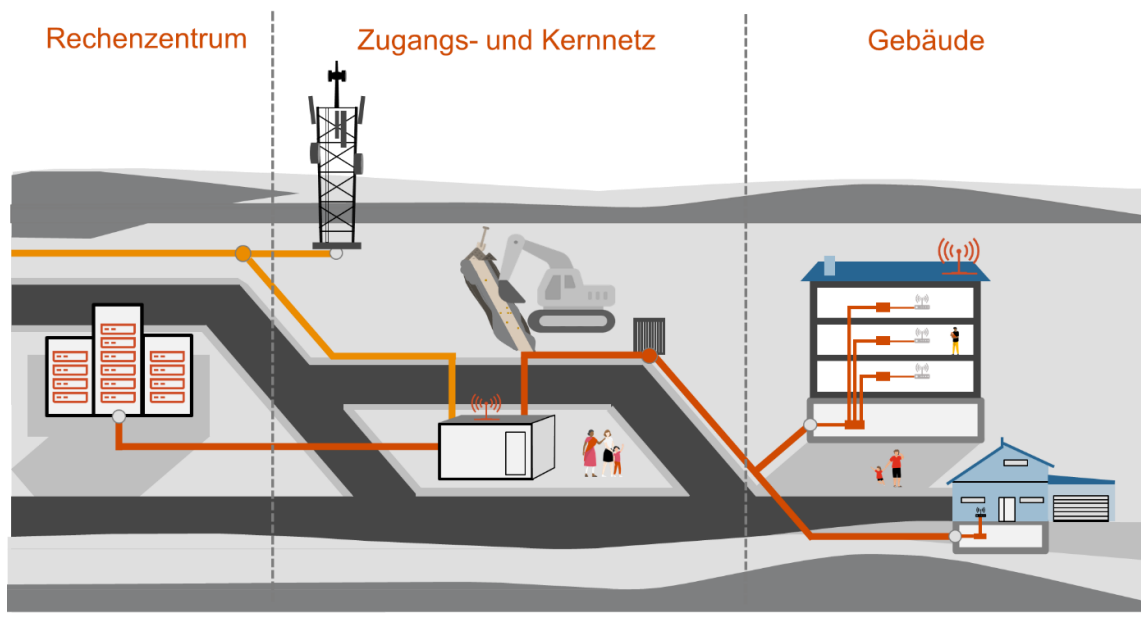
2.1 Definition der Netzkomponente (a)

Der erste Schritt der Analyse bezieht sich auf die notwendige Definition von (infrastrukturellen) Komponenten, die im Weiteren hinsichtlich ihrer ökologischen Nachhaltigkeit näher betrachtet werden.

Abbildung 2-3 zeigt, auf welche Infrastrukturen bzw. Netzkomponenten typischerweise datenbasierte Anwendungen zurückgreifen bzw. von diesen erst technisch ermöglicht werden. Es handelt sich hierbei um Rechenzentren, die einerseits die Anwendungen bereitstellen, und andererseits mit der zunehmenden Virtualisierung von Netzwerkfunktionen die Steuerung von Wertschöpfungen in Zugangnetzen steuern und übernehmen. Der Datenstrom geht dann vereinfacht über die Kernnetze und Zugangnetze zu den Nutzern. Um möglichst die Treiber (Input-Parameter), die die ökologische Nachhaltigkeit der Netzinfrastrukturen beeinflussen, identifizieren zu können, wird die Literatur in Bezug auf Kernnetze und Zugangnetze in drahtgebundenen und drahtlosen Telekommunikationsnetzen ausgewertet.

Netzabschlusspunkte von drahtgebundenen Telekommunikationsnetzen befinden sich in Gebäuden, in denen dann die stationäre Nutzung der Anwendungen (in der Regel über ein Zusammenspiel von drahtgebundenen und funkbasierten Technologien bzw. Netzen) stattfindet.⁵ Aus diesem Grund umfasst die Analyse gebäudeinterne Netzinfrastrukturen.

Abbildung 2-3: Netzinfrastrukturen der Literaturanalyse



Quelle: Eigene Darstellung.

Die genannten Netzinfrastrukturen bzw. -komponenten werden hinsichtlich der drei Phasen ihres Lebenszyklus betrachtet (Abbildung 2-1). Somit wird die Literatur dahingehend ausgewertet, ob sie Aussagen über die Errichtung der Infrastrukturen (Aus- und/oder Aufbau), über den Betrieb und der danach folgenden Entsorgung enthält.

2.2 Betrachtung und Analyse von Nachhaltigkeitsaspekten (b)

Grundsätzlich orientiert sich die Analyse an den Umweltzielen der EU-Taxonomie:⁶

- Klimaschutz
- Nachhaltiger Einsatz und Gebrauch von Wasser- oder Meeresressourcen
- Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft
- Vorbeugung oder Kontrolle von Umweltverschmutzung

⁵ In diesem Sinne liegt eine mobile Nutzung dann vor, wenn die Anwendung in mehreren Funkzellen nachgefragt wird.

⁶ Das Ziel „Anpassung an den Klimawandel“ wurde nicht in die Analyse einbezogen, da es nicht im eigentlichen Sinne zu einer nachhaltigen Wirtschaftsweise gehört (vgl. dazu z. B. Behrendt et al. (2018), S. 1).

- Schutz und Wiederherstellung von Biodiversität und Ökosystemen

Mit der Betrachtung der Umweltziele rücken qualitative und quantitative Analysen, beispielsweise über den Flächenverbrauch, die Auswirkungen der Infrastrukturen auf die Biodiversität oder der CO₂-Fußabdruck von verschiedenen Netzarchitekturen bzw. -typologien oder Methoden der Errichtung von Infrastrukturen (z. B. Legetechniken beim Glasfaserausbau, technologische Zielbilder für den Ausbau passiver Mast-Infrastruktur) in den Fokus.

Im Zusammenhang mit dem Betrieb der Infrastrukturen stellen sich Fragen über die Messung ökologischer Aspekte der Nachhaltigkeit. Hier gibt es bereits eine intensive Diskussion über (technische) Indikatoren, die Aussagen über Nachhaltigkeit von Wertschöpfungsprozessen zulassen.⁷ Darunter fallen insbesondere der CO₂-Fußabdruck bzw. der Energieverbrauch (insbesondere der Stromverbrauch) und die Energieeffizienz der Infrastrukturen.

2.3 Betrachtung und Analyse der Rahmenbedingungen (c)

Die Bestandsanalyse wird für Netzindustrien durchgeführt, für die ein dedizierter regulatorischer Rahmen besteht. Darüber hinaus werden Aspekte der Nachhaltigkeit in europäischen und nationalen Gesetzen immer weiter gestärkt (siehe dazu z. B. Leitlinien für Beihilfen beim Gigabitnetzausbau).

Da der gesetzliche und/oder der regulatorische Rahmen für die zu betrachtenden Komponenten unterschiedlich ausfällt, wird geprüft, welche spezifischen Regelungen bestehen, die Einfluss auf die ökologische Nachhaltigkeit der jeweiligen Netzinfrastruktur haben. Wieso diese Analyse notwendig ist, sei an dieser Stelle mit folgendem Beispiel illustriert:

Ein Leitbild der sektorspezifischen Regulierung ist der (effiziente) Infrastrukturwettbewerb, der eine Duplizierung von Netzinfrastrukturen befürwortet. Mit einer Duplizierung von Infrastrukturen erhöht sich grundsätzlich der Energie- und Ressourcenverbrauch. Sofern das Ziel verfolgt wird, den Ressourcenverbrauch zu reduzieren, stellt sich die Frage, ob es der Wettbewerb der Infrastrukturen Unternehmen erschwert, ihre Nachhaltigkeitsziele zu erreichen. Oder es stellt sich die Frage, ob das Ziel von ökologisch nachhaltigeren Infrastrukturen gegenüber dem Ziel des Infrastrukturwettbewerbs zurückstehen sollte, weil es andere übergeordnete, volkswirtschaftlich relevante Ziele gibt (z. B. Resilienz von digitalen Infrastrukturen, Innovationen, Preiswettbewerb).

Folglich werden die gesetzlichen/regulatorischen Anforderungen an Unternehmen dahingehend betrachtet, ob ihre Zielsetzungen in Konflikt mit Zielen der ökologischen

⁷ Vgl. Abschnitt 3.2 bzw. BEREC (2023) und Kubeneck et al. (2023).

Nachhaltigkeit stehen, so dass der relevante Rechtsrahmen aus einer ganzheitlichen Sicht Zielkonflikte beinhaltet.

2.4 Analyse der Praxis (d)

Im letzten Schritt wird die Literatur dahingehend ausgewertet, wie die Akteure Aspekte der ökologischen Nachhaltigkeit und Vorgaben aus den Rahmenbedingungen in der Praxis umsetzen. So wird geprüft, welche Herausforderungen bei der Steigerung von Nachhaltigkeit von Gigabitinfrastrukturen bestehen. Ebenso besteht das Erkenntnisinteresse, Best Practices aufzuzeigen.



3 Grundlegende Aspekte bei der Betrachtung nachhaltiger Gigabitnetze

Bevor die Netzkomponenten im Einzelnen betrachtet werden, sollen zunächst grundlegende Aspekte der ökologischen Nachhaltigkeit für sämtliche hier betrachtete Infrastrukturen genannt werden. Dieser Analyseschritt spiegelt wider, dass sich die Summe der ökologischen Auswirkungen digitaler Anwendungen und der von ihnen genutzten Infrastrukturen erst aus einer Ende-zu-Ende-Betrachtung ergibt. Eine rein isolierte Betrachtung einzelner Netzkomponenten beinhaltet das Risiko, dass die absoluten und relativen Wirkungen von Maßnahmen zur Verbesserung der ökologischen Nachhaltigkeit unter- oder überschätzt werden. Insoweit besteht im Weiteren das Interesse, Aussagen aus der Literatur dazustellen, die im besten Fall umweltrelevante Aussagen über ganze Wertschöpfungsprozesse beinhalten.

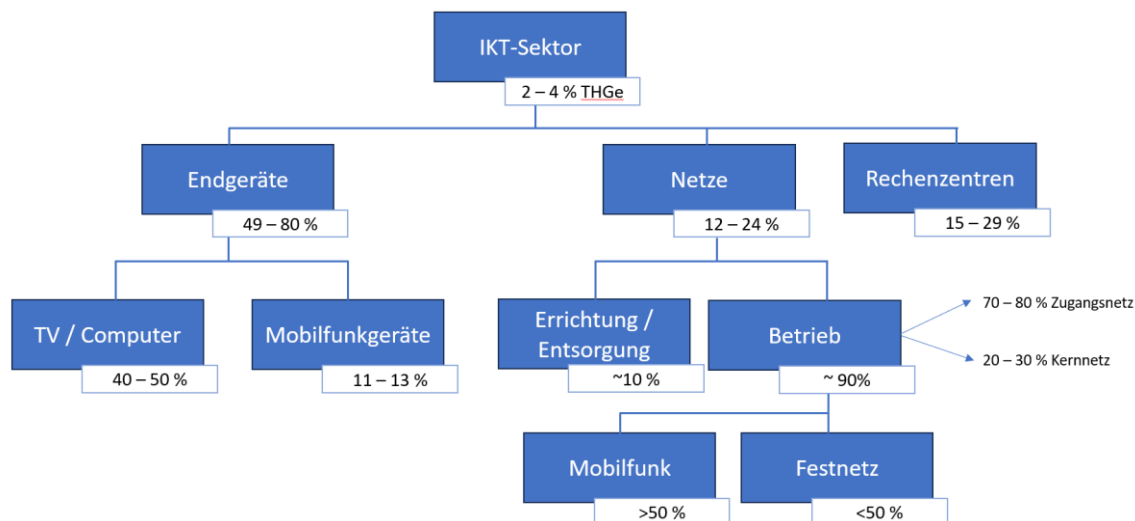
3.1 Der IKT-Sektor und relevante Aspekte der Nachhaltigkeit

Um mit einzelnen Maßnahmen die Erreichung der Umweltziele (der EU-Taxonomie) zu verbessern, sollte aus Effizienzgesichtspunkten zunächst auf die Bereiche fokussiert werden, die einen hohen Einfluss auf diese Ziele besitzen.

Einen hohen Einfluss auf die Ziele haben Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) bzw. deren Vermeidung. Treibhausgasemissionen entstehen in den verschiedenen Phasen des Lebenszyklus von Netzinfrastrukturen und (End-)Geräten. Insbesondere bei der Nutzung der hier betrachteten Netzkomponenten und (End-)Geräte sind die bei der Stromproduktion freigesetzten Emissionen relevant, die sich dann verringern, wenn im Strommix die regenerativen Energien weiter ausgebaut werden.

Hierzu gibt es eine Reihe von Studien. Abbildung 3-1 gibt einen ersten Überblick über die Anteile der verschiedenen Bereiche an den gesamten THG-Emissionen.

Abbildung 3-1: Überschlägige Beiträge zu THG-Emissionen innerhalb des IKT-Sektors



Quelle: Eigene Abbildung nach Freitag et al. (2022), Grünwald/Caviezel (2022) und Godlovitch et al. (2022).

Anmerkung zur Interpretation: Die Prozentwerte beziehen sich auf unterschiedliche Größen. Der IKT-Sektor ist für 2–4 % aller THG-Emissionen verantwortlich. Innerhalb des Sektors entfallen die angegebenen Prozentwerte auf Endgeräte, Netze oder Rechenzentren und ergeben zusammen 100 %. Bei den Endgeräten entfallen die größten Anteile auf TV/Computer und Mobilfunkgeräte, die restlichen Endgeräte sind nicht aufgeführt.

Die Abbildung basiert auf der Berücksichtigung verschiedener Quellen. Die Autoren geben aber zu bedenken, dass in der Literatur eine relativ große Bandbreite an quantitativen Daten über THG-Emissionen zu finden sind und diese eher als Gesamtschätzung denn als präzise Messung anzusehen ist.⁸

Zu beachten ist des Weiteren, dass der Großteil der THG-Emissionen von den Geräten der Endkunden ausgeht. Für den Kontext der vorliegenden Studie ist gleichwohl festzuhalten, dass die Telekommunikationsnetze zwar nicht den überwiegenden, aber dennoch in der Summe einen sehr relevanten Beitrag zu den THG-Emissionen verursachen. Hierbei wiederum kommt dem Betrieb der Netze eine besondere Bedeutung zu, so dass Handlungsempfehlungen zur Reduzierung von THG-Emissionen einen relevanten Hebel darstellen, um beispielsweise Klimaziele zu erreichen. Die Analyse, dass den Endgeräten im Massenmarkt eine besondere Bedeutung hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Umwelt zukommt, wird von einer Studie des Bitkom⁹ bestätigt: „Insgesamt wird aus Sicht der Autoren eine Größenordnung der weltweiten THG-Emissionen der IKT- und

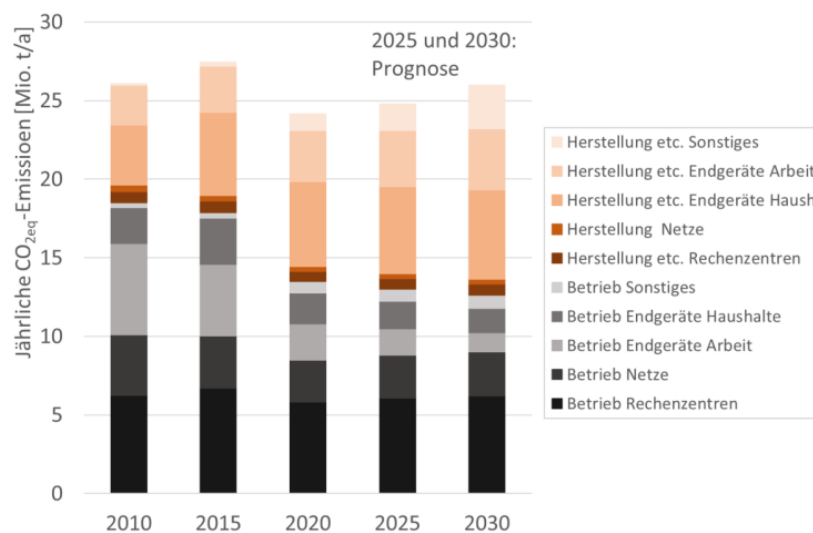
⁸ BEREC (2022), S. 8.

⁹ Bitkom (2020), S. 45.

Unterhaltungselektronik-Endgeräte von etwa 900 bis 1'100 Mt CO₂e im Jahr 2020 als plausibel angesehen. Rechenzentren und Netze sind nach dieser Abschätzung jeweils für etwa 200 bis 250 Mt CO₂e im Jahr 2020 verantwortlich."

Ein etwas anderes Bild ergibt sich speziell für Deutschland nach Hintemann et al. (2021).

Abbildung 3-2: Basisprognose zur Entwicklung der Treibhausgasemissionen der IKT in Deutschland bis 2030 (ohne Unterhaltungselektronik)



Quelle: Hintemann et al. (2021), S. 27.

Hier verursacht die Herstellung der Infrastruktur und Endgeräte ein ähnlich großes Aufkommen an Treibhausgasen wie deren Betrieb, wobei die Endgeräte insgesamt gesehen immer noch für den größten Teil der THG-Emissionen verantwortlich sind.

Eine weit verbreitete Systematisierung nimmt das GHG-Protokoll vor, das Treibhausgasemissionen nach ihren Quellen in direkte Treibhausgasemissionen der Unternehmen (Scope 1), indirekte Treibhausgasemissionen durch verwendeten Strom (Scope 2) und andere indirekte Treibhausgasemissionen aus Fremdquellen (Scope 3) unterscheidet.¹⁰ Nach Angaben von Unternehmen, die im Rahmen dieser Studie befragt wurden, liegt der größte Anteil der Umweltauswirkungen im Bereich der Aktivitäten, die nach dem GHG-Protokoll dem Scope 3 zugerechnet werden.

¹⁰ Siehe nachfolgende Box, Quelle: World Business Council for Sustainable Development und World Resources Institute (2015), S. 25, eigene Übersetzung. Diese Unterteilung ist auch für die auf Basis dieser Metastudie noch zu formulierenden Handlungsempfehlungen nützlich, da sie Emissionen bereits nach der Einflussphäre der Marktakteure unterscheidet.

Scope 1: Direkte Treibhausgasemissionen

Direkte Treibhausgasemissionen entstehen aus Quellen, die im Besitz des Unternehmens sind oder von ihm kontrolliert werden, zum Beispiel Emissionen aus der Verbrennung in eigenen oder kontrollierten Anlagen, Kesseln, Öfen, Fahrzeugen usw., darüber hinaus Emissionen aus chemischer Produktion in eigenen oder kontrollierten Prozessanlagen.

Direkte CO₂-Emissionen aus der Verbrennung von Biomasse sind nicht in Scope 1 enthalten, sondern werden separat ausgewiesen. Treibhausgasemissionen, die nicht vom Kyoto-Protokoll abgedeckt sind, z. B. FCKW, NO_x usw. dürfen nicht in Scope 1 enthalten sein, können aber gesondert ausgewiesen werden.

Scope 2: Indirekte Treibhausgasemissionen durch Strom

Scope 2 berücksichtigt Treibhausgasemissionen aus der Erzeugung des vom Unternehmen eingekauften und verbrauchten Stroms. Unter gekauftem Strom versteht man Strom, der gekauft oder auf andere Weise in die organisatorischen Unternehmensgrenzen eingebracht wird. Scope-2-Emissionen entstehen physisch in der Anlage, in der der Strom erzeugt wird.

Scope 3: Andere indirekte Treibhausgasemissionen

Scope 3 ist eine optionale Berichtskategorie von Unternehmen, die die Behandlung aller anderen indirekten Emissionen ermöglicht. Scope-3-Emissionen sind eine Folge der Aktivitäten des Unternehmens, stammen jedoch aus Quellen, die nicht im Besitz des Unternehmens sind oder von ihm kontrolliert werden. Einige Beispiele für Scope-3-Aktivitäten sind die Gewinnung und Produktion eingekaufter Materialien, Transport gekaufter Kraftstoffe und Nutzung der verkauften Produkte und Dienstleistungen.

Vor dem Hintergrund verschiedener Aussagen in der Literatur nimmt die Herstellung der Infrastruktur eine wichtige Rolle ein. Dies bestätigt sich etwa auch in der Studie von Schödwel et al. (2018) für Rechenzentren (vgl. Abbildung 4-2). Für den Mobilfunk sehen Stobbe et al. (2023, S. 166 ff.) den Hauptteil der THG-Emissionen für verschiedene Szenarien im Kern- und Zugangsnetz allerdings in der Nutzungsphase.

Einen Gesamtüberblick über verschiedene Umweltauswirkungen für Europa geben Bordage et al. (2021, S. 35, vgl. Abbildung 3-3), wobei Tier 1 für die Endgeräte, Tier 2 für die Netzwerke (Festnetz und Mobilfunk) und Tier 3 für die Rechenzentren stehen.

Abbildung 3-3: Wirkungsverteilung entlang der Lebenszyklusphasen

	Resource use, minerals and metals	Resource use, fossils	Acidification	Ecotoxicity, freshwater	Climate change	Ionising radiation, human health	Particulate matter	Photochemical ozone formation - human health	Raw materials	Waste production	Primary energy consumption	Final energy consumption (use)
TIER 1 - Manufacturing	88.6%	23.2%	31.7%	30.7%	32.8%	33.5%	27.4%	34.0%	41.7%	69.0%	15.0%	0.0%
TIER 1 - Distribution	0.0%	0.6%	1.8%	0.0%	1.0%	0.0%	1.5%	3.8%	0.1%	0.1%	0.6%	0.0%
TIER 1 - Use	0.1%	37.6%	31.0%	24.8%	31.0%	32.0%	34.3%	28.6%	24.2%	9.5%	42.2%	53.8%
TIER 1 - End of life	0.1%	0.5%	1.3%	13.9%	0.8%	0.0%	0.9%	1.0%	0.7%	0.1%	0.5%	0.0%
TIER 2 - Manufacturing	5.9%	1.5%	1.6%	1.2%	1.5%	3.7%	1.5%	1.7%	4.1%	5.3%	1.5%	0.0%
TIER 2 - Distribution	0.0%	0.0%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.1%	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
TIER 2 - Use	0.0%	12.5%	10.3%	8.3%	10.3%	10.7%	11.4%	9.5%	8.1%	3.2%	14.1%	17.9%
TIER 2 - End of life	0.0%	0.0%	0.1%	0.6%	0.1%	0.0%	0.1%	0.1%	0.1%	0.1%	0.0%	0.0%
TIER 3 - Manufacturing	5.3%	4.0%	5.6%	6.3%	5.9%	3.4%	4.7%	5.7%	8.3%	7.8%	4.1%	0.0%
TIER 3 - Distribution	0.0%	0.1%	0.1%	0.0%	0.2%	0.0%	0.2%	0.5%	0.0%	0.0%	0.1%	0.0%
TIER 3 - Use	0.0%	19.8%	16.3%	13.0%	16.4%	16.8%	18.0%	15.0%	12.7%	5.0%	22.1%	28.2%
TIER 3 - End of life	0.0%	0.0%	0.1%	1.1%	0.1%	0.0%	0.1%	0.1%	0.1%	0.0%	0.0%	0.0%
TOTAL - Manufacturing	99.8%	28.7%	38.9%	38.3%	40.1%	40.5%	33.5%	41.3%	54.1%	82.1%	20.5%	0.0%
TOTAL - Distribution	0.0%	0.8%	2.0%	0.0%	1.2%	0.0%	1.8%	4.4%	0.2%	0.1%	0.7%	0.0%
TOTAL - Use	0.1%	69.9%	57.6%	46.0%	57.8%	59.4%	63.7%	53.1%	44.9%	17.7%	78.4%	100.0%
TOTAL - End of life	0.1%	0.6%	1.5%	15.7%	0.9%	0.1%	1.0%	1.1%	0.9%	0.2%	0.6%	0.0%

Quelle: Bordage et al. (2021), S. 35.

Es zeigt sich, dass insgesamt (Tier 1 bis 3) der Ressourcenverbrauch und die weiteren Umweltbelastungen sowie der Energieverbrauch am höchsten in der Herstellungs- und Nutzungsphase der Endgeräte sind. Betrachtet man nur Telekommunikationsnetze und Rechenzentren (Tier 2 und 3), so haben die Herstellung und der Betrieb jeweils die größten negativen direkten Umweltauswirkungen.

Die Bedeutung der verschiedenen Lebenszyklusphasen für andere Umweltziele wurde in den Studien nur vereinzelt untersucht. Whitehead et al. (2015, S. 339) sehen bei der Untersuchung eines Rechenzentrums neben dem Abbau und der Nutzung fossiler Energien und den Folgen für den Klimawandel Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit als relevantestes Problem an. Hier leisten krebserregendes Arsen und Cadmium im Wasser sowie Emissionen von Kohlendioxid, Stickoxiden, PM-2,5 (Feinstaub) und Schwefeldioxid in die Luft aus der Entsorgung schwefelhaltiger Abraumhalden den größten Prozessbeitrag zur Schädigung der menschlichen Gesundheit. Der Großteil der Umweltschädigung findet dabei außerhalb der Betriebsphase, also bei der Herstellung und Entsorgung, statt.

Hinsichtlich der Frage, wie sich künftig die Anteile der digitalen Infrastrukturen beispielsweise an den Treibhausgasemissionen und Energieverbrauch entwickeln werden, kommt Lorincz (2020) zu dem Ergebnis, dass bis zum Jahr 2023 die größten Anteile am globalen Energieverbrauch von den drahtlosen Zugangsnetzen und den Rechenzentren kommen werden, weshalb diese im Folgenden im Detail betrachtet werden.

Die ökologische Nachhaltigkeit der hier betrachteten Infrastrukturen hängt auch von den Abfällen ab, die durch die Infrastrukturen verursacht werden,¹¹ d. h. es geht um die Umweltauswirkungen des Austausches von Netzkomponenten und von Endgeräten der Endkunden. Insoweit rücken Aspekte des Recyclings und des Einsatzes von überholten, gebrauchten (End-)Geräten in den Fokus.

3.2 Treiber für ökologische Nachhaltigkeit in den Infrastrukturen

Die ökologische Nachhaltigkeit von digitalen Infrastrukturen kann durch verschiedene Anreize und Akteure getrieben werden. Folgende grundlegende Überlegungen helfen beim weiteren Verständnis der Analyse und der nachfolgenden Ableitung von Handlungsempfehlungen.

Der Grad der ökologischen Nachhaltigkeit der hier betrachteten Infrastrukturen und Komponenten wird grundsätzlich von der qualitativen und quantitativen Ausprägung der Nachfrage beeinflusst. Von der Nachfrage nach datenbasierten Anwendungen hängt beispielsweise der Wechsel von Übertragungstechnologien, der Austausch von Netzkomponenten oder ganzen Zugangsnetzen sowie eine Verdichtung von Netzkomponenten ab. Da die Telekommunikationsnetze die Lebensadern einer modernen Wirtschaft sind, sehen sich die Anbieter dieser Infrastrukturen einer sich zeitlich verändernden Nachfrage gegenüber, die angesichts des zu übertragenden Datenvolumens mit den jeweiligen Bestandsnetzen und -technologien kaum oder gar nicht adressiert werden kann. Der daraus folgende Transformationsprozess der Infrastrukturen hat dann Auswirkungen auf den Energie- und Ressourcenverbrauch. Einerseits können beispielsweise Netzbetreiber durch den Einsatz energieeffizienterer Technologien Betriebskosten, die vom Stromverbrauch beeinflusst werden, verringern. Andererseits kann eine weiterhin steigende Nachfrage¹² zum Aus- und Aufbau von (neuen) Infrastrukturen führen, der den Ressourcen- und Flächenverbrauch erhöht. Jedenfalls werden Marktakteure bestrebt sein, die aus ihrer Sicht kostenoptimale Strategie auszuwählen, die nach Aussagen von Marktteilnehmern angesichts der Anforderungen der Kapitalmärkte zunehmend ökologische Aspekte der Nachhaltigkeit berücksichtigt.

¹¹ Vgl. dazu Vishwakarma et al. (2022).

¹² Siehe hinsichtlich des übertragenen Datenvolumens in den Mobilfunknetzen u. a. die Tätigkeitsberichte der Bundesnetzagentur der letzten Jahre.

Nachhaltigkeit kann aber nur an den Stellen verbessert bzw. erreicht werden, die von den Akteuren kurz- bis mittelfristig auch selbst beeinflussbar sind. Damit verbunden ist ein Trade-off zwischen dem Einsatz nachhaltiger Technologie jetzt und der Alternative, die bestehende Technologie trotz Vorhandensein von (nachhaltigeren) Alternativen weiterzubetreiben. Erst wenn die Nutzung (und Entsorgung) der neuen Technologie weniger externe Kosten verursacht als der Aufbau, Betrieb und die Ablösung der alten Technologie inklusive des Rückbaus und der Entsorgung, ist eine Transformation aus ökologischer Sicht sinnvoll. Diesen Überlegungen können infrastrukturbasierte, wettbewerbliche oder sicherheitspolitische Ziele der Gesellschaft gegenüberstehen. Insoweit stellt sich auch die Frage, ob es ein Spannungsfeld von Nachhaltigkeit und Wettbewerb gibt.¹³

Grobe (2023) schlägt zur Beantwortung der Frage, wann eine alte Technologie ersetzt werden sollte, eine Kennzahl vor, die die umweltschädlichen Auswirkungen sowohl während der Nutzungs- als auch während der Produktionsphase berücksichtigt:

$UPR_{10} := \text{GWP of the first 10 years in the use phase} / \text{GWP of the production phase}$

wobei UPR für Use Phase over Production Phase Ratio (Verhältnis Nutzung zur Herstellung) und GWP für Global Warming Potential (Treibhauspotential) stehen. Abhängig vom Strommix ergeben sich Kennzahlen, die einen Austausch der Technologie indizieren.

Darüber hinaus sollte auch der Nutzung der Infrastruktur Beachtung geschenkt werden. Wird eine neue Infrastruktur aufgebaut, so sollte diese über den Betrachtungszeitraum auch entsprechend genutzt werden. Je höher die Nutzungsrate (z. B. auch durch Sharing-Lösungen im Mobilfunkbereich), desto höher fällt die Nachhaltigkeit aus. Sofern neue Infrastrukturen aufgebaut werden, ohne dass sie bestehende Infrastrukturen (kurzfristig) ersetzen, leisten sie zunächst keinen oder nur einen geringen Beitrag für mehr ökologische Nachhaltigkeit.

Vor diesem Hintergrund kann Nachhaltigkeit durch verschiedene *ökonomische* Treiber ausgelöst werden, zum einen aus einem Selbstinteresse der Unternehmen, zum anderen aus dem staatlichen Interesse für (mehr) Umwelt- und Klimaschutz oder der Errichtung neuer Netzinfrastrukturen. Ebenso können Verbraucherpräferenzen und -entscheidungen ökonomische Treiber sein.¹⁴ Die Nachfrage nach entsprechenden Angeboten ist allerdings noch weniger stark ausgeprägt, wenn auch mit steigender Tendenz.¹⁵

Es stellt sich daher die Frage, wo die Marktdynamik nicht ausreicht und staatliche Unterstützungsmaßnahmen notwendig sind, um eine nachhaltige Digitalisierung zu erreichen.

¹³ Haucap et al. (2023), S. 10 ff.

¹⁴ Vgl. D-fine und Frontier Economics (2022)

¹⁵ Titjen und Hafer (2023), S. 7.

Im Regelfall besteht aus Kosten-, Effizienz-, Resilienz-, Nachfrage- oder Imagegründen ein Eigeninteresse von Unternehmen, nachhaltig zu handeln:

- So führt z. B. eine höhere Energieeffizienz langfristig zu Kosteneinsparungen.
- „Nachhaltige“ Investitionen können den Aufbau einer (nachhaltigen) Marke des Unternehmens unterstützen, so dass die Marke für Käufer, die an Nachhaltigkeit interessiert sind, attraktiver wird.
- Nachhaltige Maßnahmen können neue Märkte erschließen,
- Finanzierungsmöglichkeiten durch ethische Anleger verbessern,
- der Standortsicherung dienen,
- Unternehmenswertverbesserung.¹⁶

Darüber hinaus ist der (erfolgreiche) Zugang zum Kapitalmarkt immer stärker auch davon geprägt, dass mit Investitionen Nachhaltigkeitsaspekte verbunden sind (siehe dazu Kapitel 3.6).

Restriktionen die ökologische Nachhaltigkeit zu verbessern, können in fehlenden Informationen über ökologische Aspekte des Lebenszyklus von Produkten, Handlungsalternativen oder im Transformationsaufwand sein.

Neben bereits bestehenden Berichtspflichten über Nachhaltigkeitsindikatoren (vgl. Abschnitt 3.3) haben sich Unternehmen aus dem IKT-Sektor unabhängig von gesetzlichen Regelungen selbst verpflichtet, ihren Energie- und Ressourcenverbrauch zu reduzieren. Hierbei gibt es verschiedene Initiativen.¹⁷

Im Jahr 2021 haben 26 Telekommunikationsunternehmen die „European Green Digital Coalition“ mit den folgenden Zielen gegründet:¹⁸

- *„Investitionen in die Entwicklung und den Einsatz umweltfreundlicher digitaler Lösungen mit erheblicher Energie- und Materialeffizienz, die in einer Vielzahl von Sektoren positive Nettowirkungen erzielen,*
- *Entwicklung von Methoden und Instrumenten zur Messung der Nettoauswirkungen grüner digitaler Technologien auf Umwelt und Klima durch Zusammenarbeit mit NRO und einschlägigen Expertenorganisationen,*
- *Gemeinsam mit Vertretern anderer Sektoren Empfehlungen und Leitlinien für eine umweltfreundliche digitale Transformation dieser Sektoren zu erarbeiten, die Umwelt, Gesellschaft und Wirtschaft zugutekommen.“*

Die im Rahmen dieser Studie durchgeführten Expertengespräche zeigen, dass die Unternehmen mit einer Vielzahl von Maßnahmen Beiträge für eine ressourcenschonende

¹⁶ Stahlmann und Clausen (2000), S. 33.

¹⁷ [Press Release \(itu.int\)](#), zuletzt abgerufen am 15.10.2023.

¹⁸ <https://digital-strategy.ec.europa.eu/de/policies/european-green-digital-coalition>, zuletzt abgerufen am 14.09.2023.

Kreislaufwirtschaft (Circular Economy) anstreben. Ziel ist es hierbei, die Entkopplung der wirtschaftlichen Wertschöpfung vom materiellen Ressourcenverbrauch zu erreichen, um somit über den gesamten Lebenszyklus von Netzkomponenten negative Umweltauswirkungen, insbesondere die Emission von Treibhausgasen bei der Herstellung, zu reduzieren.¹⁹ So streben beispielsweise die Netzbetreiber an, den Grad von Netzkomponenten und sonstiger Hardware aus recycelten Materialien zu erhöhen. Ebenso wird eine erhöhte Quote der Wiedernutzung von gebrauchten (End-)Geräten angestrebt.

Vor dem Hintergrund insbesondere der betriebswirtschaftlich motivierten Maßnahmen zur Verbesserung der ökologischen Nachhaltigkeit läge die Notwendigkeit für direkte staatliche Eingriffe nur bei einem sich abzeichnenden oder bereits bestehenden Marktversagen vor, da dann Marktösungen externe Kosten nicht internalisieren können.²⁰ In Ergänzung zu wirtschaftlichen Anreizen können daher unterschiedliche Ziele (z. B. Effizienzsteigerung durch verstärkte Nutzung energieeffizienter Infrastrukturen) im relevanten gesetzlichen und/oder regulatorischen Rahmen unternehmerische Entscheidungen für eine verbesserte Nachhaltigkeit in vielfältiger Weise beeinflussen (z. B. befördern oder einschränken). Staatliche Maßnahmen können zusätzliche Anreize setzen, sind allerdings mit Rechtsetzungsaufwand, Kontroll- und Durchsetzungsaufwand sowie fortlaufendem Anpassungsbedarf verbunden.

3.3 Messung von ökologischer Nachhaltigkeit

Um verschiedene Aspekte der ökologischen Nachhaltigkeit (z. B. Stromverbrauch, Wasserverbrauch, Flächenverbrauch, Auswirkungen auf die Biodiversität) zu messen, werden in der Literatur eine Vielzahl von (technischen) Indikatoren diskutiert. Derzeit sind aber nur wenige Indikatoren etabliert oder deren Messung gesetzlich verankert. Eine Ausnahme bildet das Energieeffizienzgesetz, das die Energieverbrauchseffektivität (Power Usage Effectiveness, PUE) und den Anteil Erneuerbarer Energien (EE) für Rechenzentren vorgibt (vgl. Abschnitt 4.1.3.1). Weiterhin finden sich Indikatoren in verschiedenen internationalen Standards, auf die detaillierter in Kapitel 4 eingegangen wird.

Auf europäischer Ebene betrachtet die Europäische Kommission entsprechende Indikatoren für alle Bereiche der EU-Taxonomie. Dazu wurde eine Unternehmensbefragung im IKT-Sektor durchgeführt, um die Relevanz verschiedener Indikatoren zu eruieren. Die Indikatoren sollen in einen entsprechenden Code of Conduct münden. Die Verabschiedung des Code of Conduct ist für das Jahr 2025 angekündigt.

¹⁹ Vgl. Ramessohl et al. (2023).

²⁰ Fritsch et al. (1999), S. 92 ff.

Mit den für Telekommunikationsnetze potenziell relevanten Indikatoren befasst sich die Studie von Kubeneck et al. (2023). In dieser Studie werden neun Kernindikatoren betrachtet, die in allen Bereichen Anwendung finden können (vgl. Abbildung 3-4).

Abbildung 3-4: Kernindikatoren zur Messung von Nachhaltigkeit im IKT-Sektor

Umweltziel	Kernindikator	Kurzbeschreibung
Klima	Carbon Intensity per unit of data	CO ₂ -Äquivalente/Gigabit des übertragenen Datenverkehrs pro Sekunde
	Energy Intensity of the network	Energieverbrauch in einer bestimmten Zeitspanne pro übertragene Datenmenge in dieser Zeitspanne
	Carbon Footprint	in CO ₂ -Äquivalenten
Wasser	Water Footprint	in m ³
Biodiversität	Land Footprint	in m ²
Kreislaufwirtschaft	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*

Quelle: Kubeneck et al. (2023), S. 44.

Des Weiteren sind in der Veröffentlichung von BEREC (2023, S. 58 ff.) 19 Indikatoren genannt, die zur Messung von Nachhaltigkeit geeignet erscheinen. BEREC kategorisiert die Indikatoren in drei Gruppen, abhängig von ihrer Reife, Verwendung und Unterstützung durch Regulierungsbehörden (NRA) und Stakeholder aus dem Markt: Gruppe A beinhaltet Indikatoren, die bereits von NRA erfasst wurden und für die befragten Unternehmen eine hohe oder mittlere Relevanz aufweisen. Gruppe B umfasst Indikatoren, die entweder von NRA gesammelt wurden oder von der Industrie mittelmäßig unterstützt werden und nicht in Gruppe A enthalten sind. Gruppe C enthält Indikatoren, die von der Industrie nur geringfügig unterstützt werden und von keiner NRA erfasst wurden. Innerhalb derselben Gruppe wurden die Indikatoren nach der Anzahl der Unternehmen, die sie verwenden, gerankt (vgl. BEREC (2023), S. 57 ff.):

Tabelle 3-1: Potenzielle Indikatoren

Relevanz	Indikatoren
Gruppe A: Von mindestens einer NRA erfasst, hohe oder mittlere Unterstützung von Unternehmen	Energy consumption
	Carbon emissions – Direct emissions
	Carbon emissions – Energy indirect emissions
	Carbon emissions – Other indirect emissions
	Energy efficiency
	Use of renewable energy (rate)
	Distribution or utilisation of recycled/refurbished/reused products
	Expected lifetime
	Water usage/consumption
	Raw materials depletion (mineral)
Gruppe B: Bisher von keiner NRA erfasst, mittlere Unterstützung aus der Industrie	E-waste production
	Recycled/refurbished/reused components (also excavated masses) used in products
	Recyclability
	Reparability
	Land use
	Waste heat recovery
Gruppe C: Bisher von keiner NRA erfasst, geringe Unterstützung aus der Industrie	Eco toxicity (including incidence on biodiversity, water pollution...)
	Human toxicity (including air pollution)
	Eutrophication (terrestrial, freshwater, marine)

Quelle: BEREC (2023) S. 57 ff.

Die im Rahmen dieser Studie durchgeführten Expertengespräche haben hinsichtlich der Anwendung von Indikatoren folgende Aspekte ergeben:²¹

- Die Indikatoren sollten über eine gute Aussagekraft in Hinblick auf Nachhaltigkeit verfügen.
- Sie sollten mit geringem administrativem Aufwand bei den Unternehmen abfragbar sein (Daten für Scope-3-Informationen sind heute oft nicht verfügbar).

²¹ Siehe auch Kubeneck et al. (2023) S. 49.

- Viele Indikatoren werden von den Unternehmen noch nicht für einzelne Bereiche der Wertschöpfung berichtet.
- Es sollte vermieden werden, dass international agierende Unternehmen Daten für unterschiedliche Indikatoren in verschiedenen Ländern erheben müssen.
- Die Werte der Indikatoren sollten vergleichbar sein, auch bezüglich des „Einsatzortes“ (Bildung, Smart Grids, Streaming etc.).
- Relative Indikatoren sagen nichts über den Gesamtverbrauch aus.
- Die Netzauslastung bzw. die Netznutzung wird in den Indikatoren nicht zwangsläufig widerspiegelt.
- Einzelne Indikatoren lassen keinen Vergleich dahingehend zu, dass verschiedene Unternehmen oder sogar Märkte miteinander verglichen werden können. Vielmehr dienen beispielsweise Lebenszyklusindikatoren dazu, wesentliche Treiber in Wertschöpfungsprozessen zu identifizieren, die Einfluss auf die ökologische Nachhaltigkeit haben.
- Die Vergleichbarkeit hängt von der konkreten Nutzungssituation ab und kann nicht rein quantitativ erfolgen.

Insgesamt zeigt sich, dass die Semantik von Daten, die für die Indikatoren erhoben und ausgetauscht werden müssen, noch sehr unterschiedlich ausfällt, so dass Vergleiche beispielsweise von Unternehmen oder sogar Märkten kaum möglich sind. Zudem zeigen die bisherigen Analysen und die Ergebnisse des Stakeholder-Workshops, dass Indikatoren im Kontext von Übertragungstechnologien interpretiert werden müssen. So hat der Stromverbrauch in Glasfasernetzen eine andere Bedeutung als in Mobilfunknetzen, in denen der Stromverbrauch potenziell mit steigenden Übertragungskapazitäten ansteigt.

Auf die Indikatoren, die für die verschiedenen Bereiche Rechenzentren, drahtgebundene Netze, Mobilfunk und Gebäude diskutiert bzw. eingesetzt werden, wird in Kapitel 4 jeweils näher eingegangen.

3.4 Rechtsrahmen und Nachhaltigkeit

Die Verbesserung der (ökologischen) Nachhaltigkeit als gesetzlich formuliertes Ziel ist im Gegensatz zu Zielen wie der Sicherstellung der Konnektivität und eines effizienten infrastrukturbasierten Wettbewerbs weder im Telekommunikationsgesetz (TKG) noch in anderen spezifischen gesetzlichen Regelungen, die den Aufbau, Betrieb und Entsorgung der Infrastrukturen erfassen, erwähnt.²²

Dennoch gewinnen Umwelt- und Klimaziele auch aufgrund der stärkeren öffentlichen Aufmerksamkeit entsprechender politischer Ziele oder gesetzgeberischer Akte eine

²² Vgl. § 2 (2) TKG. Anders verhält es sich zum Beispiel im Energiewirtschaftsgesetz (EnWG), wo in § 1 eine „möglichst sichere, preisgünstige, verbraucherfreundliche, effiziente, umweltverträgliche und treibhausgasneutrale leitungsgebundene Versorgung“ als Zweck genannt wird.

zunehmend größere Bedeutung. Nachfolgend werden relevante europäische Richtlinien, Gesetze, Verordnungen und Zielsetzungen staatlicher Ebenen genannt.

3.4.1 EU-Ebene

Ein zentrales Element der EU-Klimapolitik ist die Lastenverteilungsverordnung (ESR) 2018/842, die verbindliche Jahresziele zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen bis 2030 für die Mitgliedstaaten vorgibt.²³ Die ESR betrifft mit Vorgaben u. a. zu Energieeffizienz in Gebäuden und Industrie indirekt den IKT-Sektor, etwa durch eine verstärkte Nachfrage nach energieeffizienten Lösungen in Rechenzentren. Ein weiterer wichtiger Bestandteil der EU-Klimapolitik ist die Nachhaltigkeitsbezogene Offenlegungspflicht im Finanzdienstleistungssektor (SFDR). Diese fungiert als Transparenz-Rahmenwerk der EU und regelt die Offenlegung von Nachhaltigkeitsinformationen der Finanzmarktteilnehmenden. Die SFDR beeinflusst maßgeblich die Entscheidungsprozesse von Finanzakteuren hinsichtlich Investitionen im IKT-Sektor.²⁴

Parallel dazu bietet die Unternehmens-Nachhaltigkeitsberichterstattungs-Richtlinie (CSRD) Unternehmen einen klaren Rahmen für die Nachhaltigkeitsberichterstattung. Die Richtlinie gilt für Unternehmen, die bestimmte Größen- und Umsatzkriterien erfüllen. Sie intensiviert und gleicht die Nachhaltigkeitsberichterstattung an die Anforderungen an die Offenlegung von nachhaltigkeitsbezogenen Informationen an die stark regulierten Berichterstattungen zu finanziellen Kennzahlen an. Dadurch sind Unternehmen zur umfassenden Darlegung der wechselseitigen Beziehungen zwischen ihren Geschäftsaktivitäten und Nachhaltigkeitsaspekten verpflichtet.²⁵

Im Juni 2023 hat das Europäische Parlament zudem einen Entwurf der Europäischen Lieferkettenrichtlinie (CSDDD) beschlossen. Dieser befasst sich mit der unternehmerischen Sorgfaltspflicht in Bezug auf Nachhaltigkeit, welche die gesamte Wertschöpfungskette und den Lebenszyklus von Produkten umfasst. Ziel dieser Richtlinie ist es, nachhaltiges und verantwortungsbewusstes Unternehmensverhalten zu fördern und Menschenrechte sowie Umweltbelange in den Betriebsabläufen und der Unternehmensführung zu verankern. Die neuen Regelungen gewährleisten, dass Unternehmen die negativen Auswirkungen ihrer Tätigkeiten adressieren, einschließlich in ihren Wertschöpfungsketten innerhalb und außerhalb Europas. Im nächsten Schritt werden die Verhandlungen zwischen Europäischer Kommission, Europäischem Parlament und Rat bezüglich der finalen Abstimmung der Richtlinie geführt.²⁶

²³ Vgl. Verordnung (EU) 2018/842

²⁴ Vgl. Verordnung (EU) 2019/2088

²⁵ Vgl. Richtlinie (EU) 2022/2464

²⁶ Vgl. <https://www.csr-in-deutschland.de/DE/Wirtschaft-Menschenrechte/Europa/Lieferketten-Gesetzesinitiative-in-der-EU/lieferketten-gesetzesinitiative-der-eu-art.html>, zuletzt abgerufen am 18.10.2023

Weitere Initiativen auf EU-Ebene zur Erreichung der Klimaschutzziele und Förderung von Innovationen wurden ins Leben gerufen. Das Übereinkommen von Paris und der daraus entstandene European Green Deal sind zentrale Pfeiler des EU-Engagements für den Klimaschutz und die Klimaneutralität bis 2050. Diese Abkommen haben bedeutende Auswirkungen auf den IKT-Sektor, indem sie die Entwicklung energieeffizienter Technologien und die Reduzierung des CO₂-Fußabdrucks von Datenzentren und anderen IKT-Einrichtungen vorantreiben.

Im Rahmen des European Green Deal wurden bedeutende Maßnahmen wie die Fit-für-55-Initiative eingeführt, die das Ziel verfolgt, die Emissionen bis 2030 um 55 % zu reduzieren²⁷. Für den IKT-Sektor bedeutet dies strengere Vorschriften bezüglich Energieeffizienz und eine verstärkte Förderung nachhaltiger Technologien.

Des Weiteren stehen der Kunming-Montreal Global Biodiversity Framework und die EU-Biodiversitätsstrategie für 2030 im Fokus, die den Schutz der biologischen Vielfalt und die nachhaltige Nutzung von Ressourcen betonen. Der IKT-Sektor kann bei der Umsetzung dieser Abkommen und Strategien eine Rolle spielen, indem er Technologien für das Monitoring von Ökosystemen und die Datenerfassung zur Biodiversität bereitstellt.

Gleichzeitig soll der EU-Aktionsplan für Kreislaufwirtschaft (CEAP) dazu beitragen, den Ressourcenverbrauch zu minimieren und ein nachhaltiges Wachstum zu unterstützen²⁸. Im IKT-Sektor könnte dies zu einem stärkeren Fokus auf die Langlebigkeit und Reparierbarkeit von Geräten sowie auf Recycling und Wiederverwertung führen.

Abschließend zielen das Europäische Netzwerk für die Entwicklung des ländlichen Raums und die daraus resultierende Initiative Smarte Dörfer darauf ab, die Lebens- und Wirtschaftsbedingungen in ländlichen Gebieten durch digitale Transformation und Innovation zu verbessern.^{29,30}

3.4.2 Nationale Ebene

Die Regulatorik auf der nationalen Ebene spielt eine entscheidende Rolle bei der Umsetzung und Erreichung von Klima- und Nachhaltigkeitszielen in Deutschland. Wesentliche Regelungen werden nachfolgend kurz erläutert.

Das im Juni 2021 verabschiedete Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) verfolgt das Ziel der Klimaneutralität Deutschlands im Jahr 2045. Es legt verbindliche Reduktionsziele für

²⁷ Vgl. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_de, zuletzt abgerufen am 11.10.2023

²⁸ Vgl. https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/ip_20_420, zuletzt abgerufen am 11.10.2023

²⁹ Vgl. https://ec.europa.eu/enrd/home-page_de.html, zuletzt abgerufen am 11.10.2023

³⁰ Vgl. https://ec.europa.eu/enrd/enrd-thematic-work/smart-and-competitive-rural-areas/smart-villages_de.html, zuletzt abgerufen am 11.10.2023

Treibhausgase in Deutschland fest, darunter eine Minderung um 65 % bis 2030 und 88 % bis 2040 im Vergleich zu 1990. Das Gesetz dient der Einhaltung nationaler und europäischer Klimaziele, basierend auf dem Pariser Abkommen, mit dem Ziel, die globale Erwärmung auf maximal 1,5 Grad Celsius zu begrenzen.³¹ Im Juni 2023 präsentierte die Bundesregierung eine überarbeitete Fassung des KSG und ein neues Klimaschutzprogramm, wobei der Schwerpunkt auf der zukünftigen Entwicklung der Treibhausgasemissionen und der Verantwortung aller Sektoren mit gleichzeitig hoher Transparenz liegt.³²

Das Energieverbrauchsrelevante-Produkte-Gesetz (EVPG) setzt die EU-Ökodesign-Richtlinie (2009/125/EG) in nationales Recht um. Es zielt darauf ab, den Energieverbrauch und die Treibhausgasemissionen zu senken und gleichzeitig die Effizienz von Materialien und Ressourcen zu erhöhen. Es betrifft eine Vielzahl von Akteuren, darunter Hersteller, Händler, Verbraucher und Behörden der Marktaufsicht und stellt somit einen integralen Bestandteil der gesetzlichen Rahmenbedingungen für energieverbrauchsrelevante Produkte dar.³³

Das Lieferkettensorgfaltspflichtengesetz (LkSG) verpflichtet Unternehmen, Risiken im Zusammenhang mit Menschenrechtsverletzungen und Umweltstandards über ihren eigenen Geschäftsbereich hinaus bis in die gesamte Lieferkette zu vermeiden oder zu minimieren. Des Weiteren sollen deutsche Unternehmen dazu ein entsprechendes Risikomanagement implementieren. Das LkSG wird nach Inkrafttreten der CSDDD novelliert, erweitert und auf europäische Anforderungen gehoben.³⁴

In diesem Kontext ist auch das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) von entscheidender Bedeutung. Es setzt die Vorgaben der EU-Abfallrahmenrichtlinie um und legt den Fokus auf Ressourcenschutz. Das Gesetz stärkt die Produktverantwortung und Obhutspflicht, fördert das Recycling durch Getrenntsammlung und sieht die Entsorgung von Produkten nur als letztes Mittel vor. Zusätzlich sind Institutionen und Stellen des Bundes verpflichtet, beim Einkauf Produkte zu präferieren, welche ressourcenschonend, abfallarm, schadstoffarm, reparierbar und recyclebar sind, sofern dadurch keine unzumutbaren Mehrkosten entstehen.³⁵

Schließlich setzt das Energieeffizienzgesetz (EnEfG) einen sektorübergreifenden rechtlichen Rahmen zur Steigerung der Energieeffizienz und zur Umsetzung der EU-Energieeffizienzrichtlinie (EED). Es legt spezifische Energieeffizienzziele fest und

31 Vgl. <https://www.bmuv.de/gesetz/bundes-klimaschutzgesetz>, zuletzt abgerufen am 11.10.2023

32 Vgl. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2023/10/20231004-bundeskabinett-verabschiedet-umfassendes-klimaschutzprogramm-2023.html#:~:text=Das%20Bundeskabinett%20hat%20heute%20das,bis%20zum%20Jahr%202030%20schlie%C3%9Fen.>, zuletzt abgerufen am 11.10.2023

33 Vgl. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Gesetze/Energie/evpg.html>, zuletzt abgerufen am 11.10.2023

34 Vgl. <https://www.csr-in-deutschland.de/DE/Wirtschaft-Menschenrechte/Gesetz-ueber-die-unternehmerischen-Sorgfaltspflichten-in-Lieferketten/gesetz-ueber-die-unternehmerischen-sorgfaltspflichten-in-lieferketten.html>, zuletzt abgerufen am 11.10.2023

35 Vgl. <https://www.bmuv.de/gesetz/kreislaufwirtschaftsgesetz>, zuletzt abgerufen am 11.10.2023

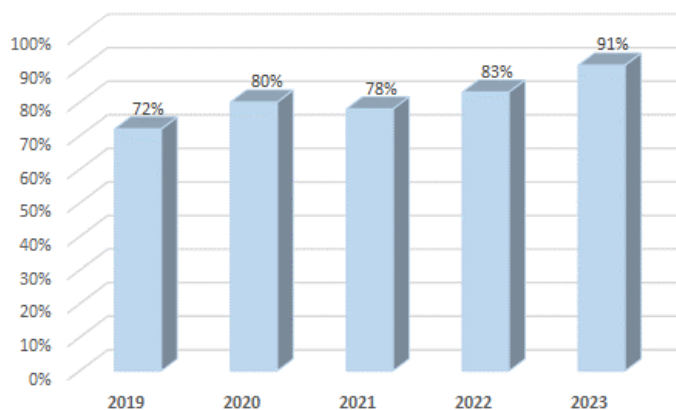
implementiert Effizienzmaßnahmen für die öffentliche Hand, Unternehmen und Rechenzentren, um die Klimaziele Deutschlands und die Vorgaben der EU-Energieeffizienzrichtlinie (EED) zu erfüllen. Es verpflichtet sowohl Bund und Länder als auch Unternehmen zur Implementierung von Energie- oder Umweltmanagementsystemen. Zudem werden durch das Gesetz Anforderungen an die Energieeffizienz und die Nutzung von Abwärme für Rechenzentren festgelegt und die Vermeidung und Verwendung von Abwärme in Produktionsprozessen geregelt.³⁶

Auch in der Gigabitstrategie der Bundesregierung ist das Thema Nachhaltigkeit in nahezu allen Handlungsbereichen verankert und reicht von verstärkter Mitnutzung passiver und aktiver Netzkomponenten über die verstärkte Nutzung mindertiefer Legeverfahren bis hin zu Überlegungen über die mögliche Einführung eines Gütesiegels für nachhaltigen Netzbau.³⁷

3.5 Finanzierungsinstrumente von Nachhaltigkeit

Eine langfristige Finanzierung nachhaltiger Infrastruktur sorgt auch für einen ökonomisch nachhaltigen Wert der Investition. Für institutionelle Anleger gewinnt das Thema Nachhaltigkeit dabei zunehmend an Bedeutung, wie Abbildung 3-5 zeigt.

Abbildung 3-5: Anteil der Großanleger, die Nachhaltigkeitskriterien bei ihren Anlageentscheidungen berücksichtigen



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Union Investment (2023): <https://unternehmen.union-investment.de/startseite-unternehmen/presseservice/pressemitteilungen/alle-pressemitteilungen/2023/Grossanleger-setzen-auch-in-Krisenzeiten-auf-Nachhaltigkeit.html>, zuletzt abgerufen am 22.09.2023.

³⁶ Vgl. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2023/09/20230921-bundestag-beschliesst-energieeffizienzgesetz.html>, zuletzt abgerufen am 11.10.2023

³⁷ Vgl. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/digitaler-aufbruch/gigabitstrategie-2017464>, zuletzt abgerufen am 11.10.2023

„60 Prozent der befragten Großanleger, die nachhaltig und konventionell investieren, bescheinigen dem nachhaltigen Portfolio eine ähnliche oder gar bessere Renditeentwicklung als dem konventionellen. Unter Risikogesichtspunkten sehen 69 Prozent von ihnen das nachhaltige Portfolio gleichauf oder im Vorteil.“³⁸

Die Investitionsbereitschaft in nachhaltig wirtschaftende Unternehmen ist also gegeben. Dies gilt im Übrigen auch für den Bereich der Privatanleger, die im Jahr 2022 mit einem Anteil von 45 % an den nachhaltigen Anlagen (im Vergleich zu 36 % ein Jahr zuvor) ihren Anteil gegenüber institutionellen Anlegern vergrößern konnten.³⁹ Insgesamt beträgt der Marktanteil nachhaltiger Publikumsfonds, Mandate und Spezialfonds 12,5 %.⁴⁰

Die Europäische Union hat eine Vielzahl von Fördermitteln, Fonds und Finanzierungsinstituten ins Leben gerufen, um Nachhaltigkeit im IKT-Sektor zu unterstützen. Ein wesentliches Instrument zum Erkennen nachhaltiger Infrastruktur ist die Aufnahme in die EU-Taxonomie. Dies wurde von den Stakeholdern aus der TK-Branche vielfach bestätigt. Die EU-Taxonomie ist ein zentrales Instrument der EU, das entwickelt wurde, um die Nachhaltigkeit von wirtschaftlichen Aktivitäten in der EU zu fördern und Investitionen in umweltfreundliche Projekte zu lenken. Sie dient dazu, ein gemeinsames Klassifikationssystem für wirtschaftliche Tätigkeiten zu etablieren, um sicherzustellen, dass sie den Kriterien für Umweltverträglichkeit entsprechen. Dies soll dazu beitragen, den Übergang zu einer nachhaltigeren und klimafreundlicheren Wirtschaft zu beschleunigen und das Ziel der EU zu erreichen, bis 2050 klimaneutral zu sein.⁴¹

Gleichzeitig soll das „Greenwashing“ verhindert werden: Es soll vermieden werden, dass Unternehmen fälschlicherweise behaupten, nachhaltig zu sein, indem die Taxonomie klare Kriterien für umweltfreundliche Tätigkeiten festlegt und eine bessere Überprüfbarkeit ermöglicht.

Die Telekommunikationsnetze werden heute, anders als Rechenzentren, wenn sie die Bedingungen des EU-Verhaltenskodex für die Energieeffizienz von Datenzentren erfüllen, nicht grundsätzlich als nachhaltige Wirtschaftstätigkeit eingestuft. Vielmehr gilt, dass die Tätigkeit folgendes umfassen muss:

„Entwicklung oder Nutzung von IKT-Lösungen, die auf die Erfassung, Übermittlung, Speicherung, Modellierung und Nutzung von Daten abzielen, wenn diese Tätigkeiten

³⁸ <https://unternehmen.union-investment.de/presseservice/pressemitteilungenarchiv/alle-pressemitteilungen/2023/grossanleger-setzen-auch-in-krisenzeiten-auf-nachhaltigkeit>, zuletzt abgerufen am 14.06.2024; befragt wurden „von Januar bis April 2023 insgesamt 200 institutionelle Investoren in Deutschland [...], die zusammen ein Vermögen von mehr als sechs Billionen Euro verwalten. Zu den Befragten zählten Versicherungen (Anteil: 13 Prozent), Großunternehmen (18 Prozent), Altersversorger/Pensionskassen (10 Prozent), Stiftungen/Kirchen (13 Prozent), Kreditinstitute (25 Prozent) und Kapitalverwaltungsgesellschaften (21 Prozent).“

³⁹ <https://fng-marktbericht.org/deutschland#c2741>, zuletzt abgerufen am 22.09.2023.

⁴⁰ <https://fng-marktbericht.org/deutschland#c2702>, zuletzt abgerufen am 22.09.2023.

⁴¹ https://finance.ec.europa.eu/sustainable-finance/tools-and-standards/eu-taxonomy-sustainable-activities_de?etans=de#policy-making-timeline, zuletzt abgerufen am 22.09.2023.

vorwiegend zur Bereitstellung von Daten und Analysen zur Ermöglichung der Senkung der Treibhausgasemissionen bestimmt sind. Zu solchen IKT-Lösungen gehört unter anderem der Einsatz von dezentralen Technologien (d. h. Distributed-Ledger-Technologien), dem Internet der Dinge (IoT), 5G und künstlicher Intelligenz.“⁴²

Für die Anerkennung bedarf es außerdem der Erfüllung von Kriterien zum Klimaschutz und der Kreislaufwirtschaft.⁴³

Einige Unternehmen nutzen bereits Formate, die eine Finanzierung von der Nachhaltigkeit der Investition abhängig machen. Ein Instrument sind sog. „Green Loans“ (Grüne Darlehen), eine spezielle Form der Finanzierung, bei der die Mittel, die durch das Darlehen bereitgestellt werden, für Projekte oder Investitionen verwendet werden, die einen positiven Umweltnutzen haben. Orientierung hierbei geben die „Green Loan Principles“ der International Capital Market Association (ICMA), die klare Standards für grüne Darlehen setzen, indem sie sicherstellen, dass die Mittel aus diesen Darlehen ausschließlich für umweltfreundliche Projekte verwendet werden, Transparenz und Berichterstattung gewährleistet sind und eine unabhängige Überwachung angeregt wird.⁴⁴ Ein Beispiel für ein Projekt, das mit solchen Mitteln finanziert wurde, ist das von Metrofibre entwickelte Projekt „ruhrfibre“, das sich auf den städtischen Fiber-to-the-Home (FTTH)-Ausbau im Ruhrgebiet fokussiert. Metrofibre möchte, dass in den kommenden Jahren rund 150.000 Haushalte sowie Unternehmen und öffentliche Gebäude mit Glasfaseranschlüssen (FTTH) ausgestattet werden.⁴⁵ Das Unternehmen erhielt für das Projekt ein grünes Darlehen in Höhe von 120 Mio. Euro.⁴⁶

Auf der EU-Ebene gibt es eine Reihe von Instrumenten, die im Kontext dieser Studie relevant sind:

Ein Instrument der EU zur Finanzierung von Infrastrukturen ist die Fazilität Connecting Europe (CEF), die sich der Entwicklung leistungsstarker, nachhaltiger und effizient vernetzter transeuropäischer Netzwerke in den Sektoren Verkehr, Energie und digitale Dienste widmet.⁴⁷

In Ergänzung dazu hat der Europäische Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) das Ziel, wirtschaftliche und soziale Disparitäten zwischen den EU-Regionen zu mindern.

⁴² EU-Kommission (2021), S. 197.

⁴³ EU-Kommission (2021), S. 197 ff.

⁴⁴ <https://www.icmagroup.org/sustainable-finance/the-principles-guidelines-and-handbooks/green-bond-principles-gbp/>, zuletzt abgerufen am 25.09.2023.

⁴⁵ <https://telecomtalk.info/metrofibre-secures-eur120-million-debt-financing-germany/855274/>, zuletzt abgerufen am 25.09.2023.

⁴⁶ <https://www.hoganlovells.com/de/news/hogan-lovells-beraet-bei-finanzierung-eines-gruenen-darlehens-in-hoehe-von-eur-120-millionen-fuer-ruhrfibre-projekt>, zuletzt abgerufen am 25.09.2023.

⁴⁷ https://cinea.ec.europa.eu/programmes/connecting-europe-facility_en, zuletzt abgerufen am 11.10.2023.

Hierbei werden insbesondere Projekte im Kontext digitaler Innovation und Nachhaltigkeit unterstützt.⁴⁸

Der EU-Innovationsfonds setzt seinen Schwerpunkt auf hochinnovative Technologien und umfangreiche Projekte, die emissionsreduzierende Lösungen fördern. Ein besonderes Augenmerk liegt hier auf dem Wissensaustausch, um eine möglichst schnelle Markteinführung der Lösungen zu gewährleisten.⁴⁹

Spezifisch auf die Steigerung der Energieeffizienz und den Einsatz erneuerbarer Energien ausgerichtet ist der Europäische Energieeffizienzfonds (EEEF) und soll somit unterstützen, die Ziele des Europäischen Grünen Deals zu erreichen. Des Weiteren unterstützt der Fonds Technologien und Lösungen, die eine kohlenstoffarme und nachhaltige Wirtschaft vorantreiben.⁵⁰

Ein weiterer bedeutender Schritt in Richtung Resilienz und Nachhaltigkeit ist der Förderplan NextGenEU. Mit seinen Komponenten InvestEU, Horizon Europe und der Aufbau- und Resilienzfazilität (ARF) werden umfangreiche Ressourcen bereitgestellt, um die Widerstandsfähigkeit und Nachhaltigkeit der EU-Wirtschaft und des Arbeitsmarktes zu stärken, wobei die Förderung von Forschung und Innovation im Mittelpunkt steht.⁵¹

Abschließend fokussiert sich das LIFE-Programm als spezielles Finanzierungsinstrument der EU auf Umwelt- und Klimaschutzprojekte. Es unterstützt Maßnahmen zur Erhaltung der Natur und Biodiversität, einschließlich Initiativen in den Bereichen Kreislaufwirtschaft, Ressourceneffizienz und der Transition zu sauberer Energie.⁵²

Die Bundesregierung hat im Zuge der Umsetzung des Klimaschutzgesetzes verschiedene Fördermittel ins Leben gerufen, um die ambitionierten Klimaziele zu erreichen.

Ein zentrales Element dieser Bemühungen ist das Klimaschutzprogramm, welches die maßgeblichen Schritte und Strategien der Bundesregierung zur Erreichung dieser Ziele skizziert.⁵³ Ein integraler Bestandteil dieses Programms ist die Initiative Green-ICT. Ihr Hauptziel ist die Entwicklung technologischer Lösungen, die den CO₂-Fußabdruck

48 <https://www.foerderdatenbank.de/FDB/Content/DE/Foerderprogramm/EU/efre-kohaesionsfonds.html>, zuletzt abgerufen am 11.10.2023.

49 https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-funding-climate-action/innovation-fund/what-innovation-fund_en, zuletzt abgerufen am 11.10.2023

50 <https://www.eeef.lu/objective-of-the-fund.html>, zuletzt abgerufen am 11.10.2023

51 https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/eu-budget/eu-borrower-investor-relations/next-generation_en, zuletzt abgerufen am 11.10.2023

52 https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/ip_21_6178, zuletzt abgerufen am 11.10.2023

53 <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/klimaschutz/20231004-klimaschutzprogramm-der-bundesregierung.html>, zuletzt abgerufen am 11.10.2023

digitaler Technologien minimieren und gleichzeitig die Energieeffizienz von IKT-Komponenten maximieren.⁵⁴

4 Analyse der Netzinfrastrukturen

In diesem Abschnitt werden wir die Erkenntnisse der Literaturanalyse in Bezug auf folgende Netzinfrastrukturen darlegen:

- Rechenzentren
- Drahtgebundene Netzinfrastrukturen (d. h. FTTB/H, HFC, Vectoring-VDSL-Netze)
- Drahtlose Funknetze (öffentliche Mobilfunknetze mit ihren jeweiligen Funktechnologien)
- Gebäudeinterne Netze⁵⁵

Die vorliegende Metastudie schließt mit den hier betrachteten Netzinfrastrukturen eine Lücke in der Literatur, da bisherige Studien typischerweise nur einzelne der oben genannten Netzinfrastrukturen hinsichtlich ihrer ökologischen Nachhaltigkeit betrachten. Insofern existieren auch keine Studien, die umfassend alle drei Lebenszyklusphasen bzw. sämtliche Indikatoren der verschiedenen Umweltziele zur potenziellen Messung oder Steuerung von Nachhaltigkeit untersuchen. Studien, die die Interdependenz der Netzinfrastrukturen (z. B. Konvergenz von draht- und drahtlosen Technologien und Netzen) behandeln, fehlen ebenfalls. Insofern steht die wissenschaftliche Analyse der ökologischen Nachhaltigkeit von Netzinfrastrukturen, die dabei noch eine Ende-zu-Ende-Betrachtung der Anwendungen beinhaltet, erst am Anfang.

Im Gegensatz dazu steigt die Anzahl von Studien, die sich mit der Auswahl geeigneter (technischer) Indikatoren zur Messung von Nachhaltigkeit befassen.

4.1 Rechenzentren

4.1.1 Definition

Ein Rechenzentrum besteht aus verschiedenen wesentlichen Bestandteilen, die gemeinsam den Betrieb und die Funktionalität des Zentrums gewährleisten. Zu den wichtigsten Bestandteilen zählen:

⁵⁴ <https://www.elektronikforschung.de/fokusthemen/nachhaltigkeit/konferenz>, zuletzt abgerufen am 11.10.2023

⁵⁵ Hiermit sind nach der Typologie der Breitbandkabelnetze die Netzinfrastrukturen auf der Netzebene 4 gemeint.

- Das Gebäude, in dem die Server und weitere Komponenten untergebracht sind. Dazu zählen auch Lager- und Verwaltungsräume.⁵⁶
- Server zur Verarbeitung, Speicherung und Bereitstellung von Daten. Sie bilden das Herzstück eines Rechenzentrums und führen die eigentliche Rechenarbeit durch.⁵⁷
- Netzwerkinfrastruktur: Diese umfasst Router, Switches, Firewalls und andere Netzwerkkomponenten.⁵⁸
- Speichersysteme: Rechenzentren verfügen über verschiedene Arten von Speichersystemen, einschließlich Festplattenarrays (RAID-Systeme), Solid-State-Laufwerke (SSDs)⁵⁹ und zunehmend auch Cloud-Speicherlösungen. Diese Speichersysteme dienen zur langfristigen Datenhaltung und zur schnellen Bereitstellung von Daten für die Server.
- Kühlung und Klimatisierung: Aufgrund der hohen Wärmeentwicklung der Server und anderer Geräte im Rechenzentrum ist eine effiziente Kühlung erforderlich, um die Betriebstemperaturen auf einem optimalen Niveau zu halten und einen reibungslosen Betrieb sicherzustellen. Dies beinhaltet Klimaanlage, Lüftungs- und Kühlungssysteme.
- USV (unterbrechungsfreie Stromversorgung): Eine USV ist ein Stromversorgungsgerät, das bei Stromausfällen oder Spannungsschwankungen als Backup-Stromquelle fungiert. Dies gewährleistet einen kontinuierlichen Betrieb der Server und schützt vor Datenverlust oder Beschädigung der Hardware.⁶⁰
- Verkabelung und Verkabelungsinfrastruktur: Die Verkabelung spielt eine entscheidende Rolle im Rechenzentrum, da sie die Kommunikation zwischen den Servern, Netzwerkkomponenten und Speichersystemen ermöglicht. Hierzu gehören strukturierte Verkabelungssysteme, Glasfaserkabel, Patch-Panels, Schaltschränke und Kabelmanagementlösungen.⁶¹
- Monitoring und Verwaltung: Um den reibungslosen Betrieb des Rechenzentrums sicherzustellen, werden umfangreiche Überwachungssysteme eingesetzt. Diese Systeme erfassen Daten zu Temperatur, Leistung, Netzwerkaktivität und anderen wichtigen Parametern, um potenzielle Probleme frühzeitig zu erkennen und angemessen darauf zu reagieren. Zudem gibt es Verwaltungssysteme zur Konfiguration, Überwachung und Verwaltung der Server und Netzwerkkomponenten.⁶²

⁵⁶ Bitkom (2023), S. 8.

⁵⁷ UBA (2023), S. 7.

⁵⁸ Vgl. <https://www.ionos.de/digitalguide/server/knowhow/was-ist-ein-rechenzentrum/>, zuletzt abgerufen am 23.06.2023.

⁵⁹ Stephan (2020), S. 2.

⁶⁰ Dehli, (2020), S. 623.

⁶¹ Vgl. <https://community.fs.com/de/blog/basic-knowledge-tips-for-data-center-cabling.html>, zuletzt abgerufen am 28.06.2023.

⁶² Vgl. <https://www.it-daily.net/it-management/data-center/wie-sieht-ein-modernes-monitoring-der-rechenzentrums-infrastruktur-aus>, zuletzt abgerufen am 28.06.2023.

Rechenzentren werden über Glasfaser an das Gesamtsystem bzw. das Kernnetz der jeweiligen Netze verbunden.⁶³ Im engeren Kontext von Telekommunikationsnetzen und deren Betrieb müsste bei Rechenzentren eine Unterscheidung gemacht werden zwischen solchen, die zum Betrieb der Netze erforderlich sind (Core) und Rechenzentren für die tatsächlichen Anwendungen (z. B. Cloud Computing, Content Delivery wie Streaming-Dienste).⁶⁴ Ein Großteil der Rechenzentrumskapazitäten und auch des starken jährlichen Zuwachses in diesem Bereich entfällt auf Letztere und ist somit nicht direkt den Netzen zuzurechnen. Bei einer Bewertung der absoluten Emissionen wäre eine solche Abgrenzung auf jeden Fall zu vorzunehmen. Da die Nachhaltigkeitsaspekte aber für beide Arten der Rechenzentren vergleichbar sind, wird diese Unterscheidung nachfolgend nicht gemacht.

4.1.2 Aspekte der ökologischen Nachhaltigkeit

Der Schwerpunkt der verfügbaren Literatur betrachtet und analysiert den Betrieb der Infrastruktur. Zu den benötigten Rohstoffen, der Errichtung und Aspekten der Entsorgung finden sich kaum Informationen und Daten in der Literatur. Ebenso fokussieren bisherige Studien ihre Untersuchungen primär auf Emissionen – andere Aspekte wie Biodiversität, Landnutzung oder auch Umweltverschmutzung werden bislang kaum betrachtet. Insofern besteht hier Aufholbedarf, wenn eine ganzheitliche Betrachtung von Umweltfolgen im Sinne der EU-Taxonomie erfolgen soll.

Abbildung 4-1: Literaturübersicht Rechenzentren

Umweltziel	Lebenszyklusphase		
	Herstellung	Betrieb	Entsorgung
Klimaschutz	30 % bis 40 %	> 40 %	20 % bis 30 %
Energieeffizienz	30 % bis 40 %	> 40 %	30 % bis 40 %
Erneuerbare Energien	20 % bis 30 %	30 % bis 40 %	20 % bis 30 %
Wasser	20 % bis 30 %	20 % bis 30 %	10 % bis 20 %
Ressourcenverbrauch	20 % bis 30 %	20 % bis 30 %	20 % bis 30 %
Umweltverschmutzung	< 10 %	< 10 %	< 10 %
Biodiversität	< 10 %	< 10 %	< 10 %
Landnutzung	10 % bis 20 %	10 % bis 20 %	10 % bis 20 %
Kreislaufwirtschaft	20 % bis 30 %	20 % bis 30 %	20 % bis 30 %
Gesundheitliche Auswirkungen	10 % bis 20 %	10 % bis 20 %	10 % bis 20 %

Quelle: Eigene Darstellung

Anmerkung zur Interpretation der Tabelle: Die Prozentzahlen weisen den Anteil der betrachteten Studien an den insgesamt 40 betrachteten Studien aus, für die ein gewisses Umweltziel in einer Veröffentlichung einer bestimmten Lebenszyklusphase zugeordnet werden kann. Die geschieht

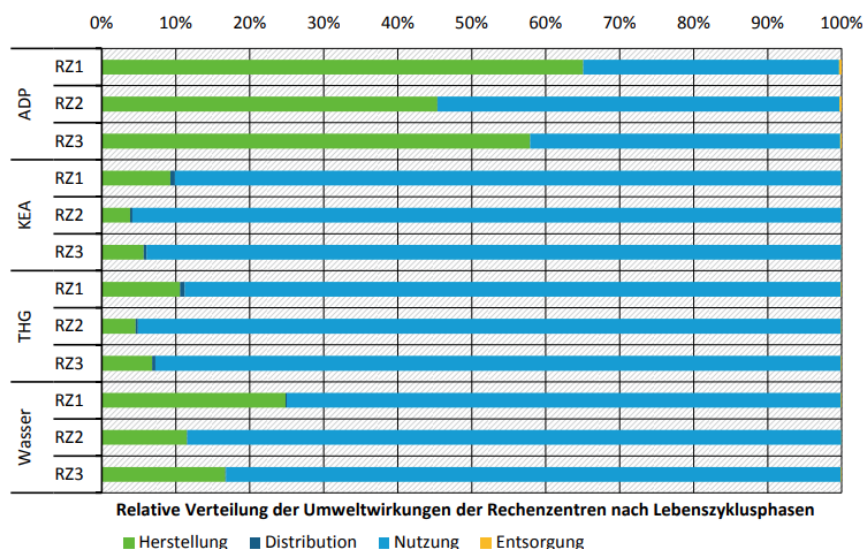
⁶³ Vgl. <https://www.datacenter-insider.de/die-herausforderungen-fuer-glasfasernetze-in-und-um-rechenzentren-a-842591/>, zuletzt abgerufen am 28.06.2023.

⁶⁴ Eine solche Zahl konnte bisher von den Autoren nicht eruiert werden.

auch, wenn das Thema nur in Ansätzen betrachtet wird oder nur Teilaspekte behandelt werden. Es lässt also nicht unbedingt auf eine umfangreiche Abhandlung in einem gewissen Gebiet (z. B. Energieeffizienz bei der Entsorgung) schließen, sondern zeigt vielmehr, ob das Thema schon als (wissenschaftlich) relevant angesehen wird. Dies gilt im Folgenden für alle Bereiche. Siehe hierzu auch die ausführliche Literaturliste in Anhang 1.

Eine ausführliche Bewertung der Nachhaltigkeit von Rechenzentren und die Ableitung geeigneter Indikatoren finden sich in einer Studie für das Umweltbundesamt (2018).⁶⁵ Dort zeigt eine Auswertung von drei Fallbeispielen (RZ1 bis RZ3), dass die ökologischen Auswirkungen hauptsächlich in den Bereichen Herstellung/Errichtung bzw. Nutzung/Betrieb bestehen (vgl. Abbildung 4-2)

Abbildung 4-2: Relative Verteilung der Umweltwirkungen der Rechenzentren nach Lebenszyklusphasen



ADP: Abiotischer Rohstoffverbrauch KEA: Kumulierter Energieaufwand THG: Treibhausgasemissionen

Quelle: Schödwell et al. (2018), S. 31.

Unter Distribution wird dabei der Transport der notwendigen Elemente verstanden.⁶⁶

Lykou et al. (2018) entwickeln ein Scoring-System, das die Nachhaltigkeit von Rechenzentren ganzheitlicher erfassen soll. Neben den ökologischen Indikatoren (wie z. B. PUE) werden auch soziale Aspekte mit in die Bewertung einbezogen. Die einzelnen Aspekte werden vorab gewichtet und dann zu einer Gesamtpunktzahl aufaddiert. Allerdings wird z. B. die Phase der Errichtung nicht direkt in die Betrachtung einbezogen, so dass keine komplette Lebenszyklusbetrachtung vorliegt. Dennoch ermöglicht dies einen relativ

⁶⁵ Schödwell et al. (2018).

⁶⁶ Schödwell et al. (2018), S. 22.

einfachen Vergleich zwischen verschiedenen Rechenzentren. Abbildung 4-3 zeigt, welche Faktoren mit welcher Gewichtung in das System eingehen.

Abbildung 4-3: Scoring-System für Rechenzentren

a/a	Sustainability Element	Influencing Factor (Fi)	Value Range	MAX Rating (Wi)	%	
1	Environmental Impact	GEC	0 ~ 1	15	75	
2		GMU	0 ~ 1	10		
3	Resource Utilization & Economy	DciE	0 ~ 1	15		
4		ERF	0 ~ 1	10		
5	Resources Recyclability	Waste Recycle Rate	0 ~ 1	5		
6		Water Reuse Rate	0 ~ 1	5		
7	Operational Efficiency	IT Equipment Efficiency	0 ~ 1	15	25	
8		Security & Resilience Plan	Y/N	4		
9		BEMS	Y/N	4		
10		Effective Maintenance	Y/N	4		
11		Innovation Research	Y/N	3		
12	Societal Impact	Corporate Social Responsibility	Y/N	3		
13		Employee Satisfaction Index	Y/N	2		
14		Health and Safety	Y/N	3		
15		Sustainable Transport	Y/N	2		
TOTAL SUSTAINABILITY SCORE				100		100

GEC: Green Energy coefficient (Green Energy / Total Facility Energy)

GMU: Green Material Use (Green Product Purchases / Total Annual Purchases)

DciE: Data Center infrastructure Efficiency (IT Equipment Energy / Total Facility Energy or equally: DCiE = 1 / PUE)

ERF: Energy Reuse Factor (Reused Energy / Total Facility Energy)

Quelle: Lykou et al. (2018), Legende durch die Autoren eingefügt.

Im Folgenden wird auf die einzelnen Lebenszyklusphasen näher eingegangen.

4.1.2.1 Errichtung

Für diesen Abschnitt der Wertschöpfungskette ist die Studienlage noch sehr limitiert. Schödwell et al. (2018) beschreiben und entwickeln Indikatoren, die die ökologische Nachhaltigkeit von Rechenzentren umfänglich abbilden sollen. Sie weisen darauf hin, dass der Forschungsstand für den Bereich Herstellung bislang weitestgehend lückenhaft ist.⁶⁷ Für die Herstellungsphase werden die Stufen „Rohstoffentnahme“, „Materialverarbeitung“, „Herstellung der Komponenten“ und „Endmontage“ einbezogen.⁶⁸ Die Untersuchung schließt die folgenden Komponenten/Produkte ein:⁶⁹

- Prozessoren
- Integrierte Schaltkreise
- Unbestückte Leiterplatte
- Hard Disk Drive
- Solid State Drive
- Server

⁶⁷ Schödwell et al. (2018), S. 75.

⁶⁸ Schödwell et al. (2018), S. 114.

⁶⁹ Schödwell et al. (2018), S. 118 ff.

- Datenspeichersysteme
- Netzwerk-Switches
- USV-Anlagen und Batterien

Für die Distribution der Komponenten wurden ebenfalls typische Verbräuche berechnet.⁷⁰

Eine weitere Studie, die Nachhaltigkeit in der Herstellungsphase inkludiert, stammt von Whitehead et al. (2015). Sie betrachtet Auswirkungen von Rechenzentren auf Ressourcen, die menschliche Gesundheit und die Qualität des Ökosystems.⁷¹ Die Studie arbeitet mit einem Punktesystem zur Bewertung und beinhaltet keine expliziten Indikatoren zur Messung der Nachhaltigkeit, nicht zuletzt deswegen, weil sie ein konkretes Rechenzentrum bewertet. Die Auswirkungen der Herstellung in den genannten Kategorien machen dabei knapp 20 % der Gesamtwirkung aus, der Betrieb ca. 80 %.⁷²

Fung und Beran (2022) beschreiben die Entwicklung vorgefertigter modularer Rechenzentren („Prefabricated Modular Data Centers“, PMDCs) als Lösung. *„Der Bau eines PMDC in einer werkskontrollierten Umgebung ermöglicht erhebliche Verbesserungen der Nachhaltigkeit des Prozesses. PMDC-Konstruktionen basieren stärker auf Stahl als auf Beton. Stahl hat einen geringeren Anteil an Kohlenstoff als Beton, wodurch die Scope-3-THG-Emissionen durch die Verwendung dieses Materials reduziert werden. Die kontrollierte Umgebung ermöglicht eine effizientere Materialnutzung, was zu weniger als der Hälfte des Wasserverbrauchs und weniger als der Hälfte des Abfalls führt. Die kontrollierte Bauumgebung und der gleichzeitige Bau vor Ort verkürzen auch die Markteinführungszeit (Time-to-Market, TTM) des Rechenzentrums, von den 18–24 Monaten, die normalerweise für eine Anlage in Stabbauphase erforderlich sind, auf die 3–6 Monate, die für eine PMDC-Lösung erforderlich sind.“*⁷³

Messbare Indikatoren werden in diesem White Paper für diesen Bereich aber nicht genannt.

Insgesamt ist die Studienlage für dieses Gebiet also noch unbefriedigend. Für die Zukunft gilt, dass z. B. Rechenzentren für Quantencomputing unter völlig anderen Betriebsparametern laufen werden, so dass die Relevanz der Ergebnisse der vorliegenden Studien fortlaufend beobachtet werden sollte.

⁷⁰ Schödwell et al. (2018), S. 142 ff.

⁷¹ Whitehead et al. (2015). S. 339.

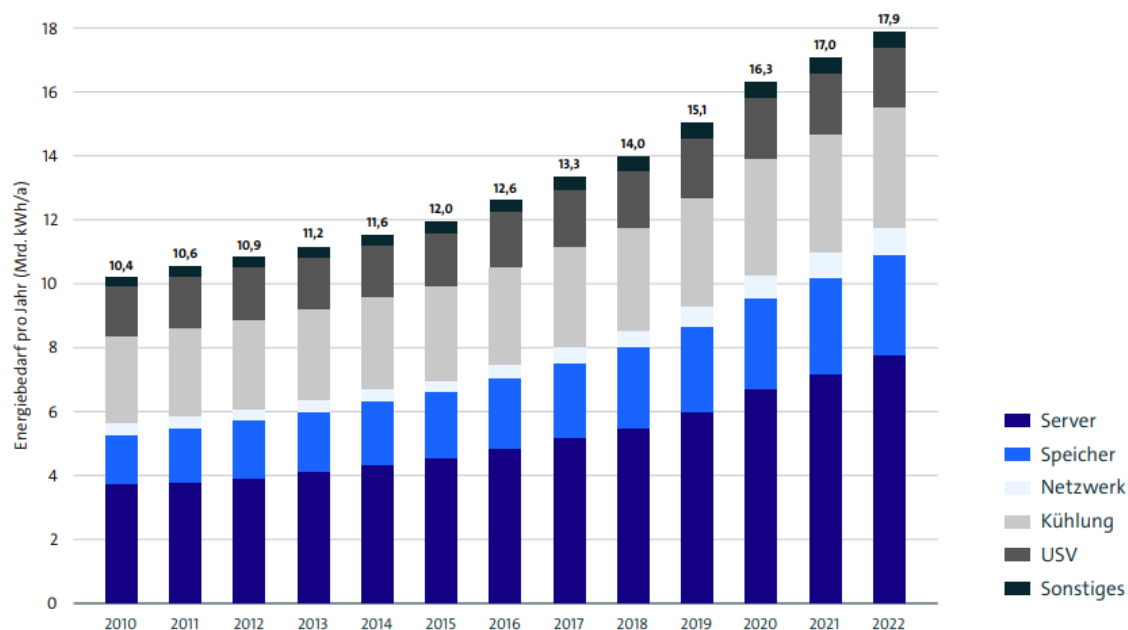
⁷² Berechnungen zur Studie von Whitehead et al. (2015) in Schödwell (2018), S. 115 ff.

⁷³ Fung und Beran (2022).

4.1.2.2 Infrastruktur und Betrieb

Im Bereich des Betriebs der Rechenzentren spielt der Energiebedarf in den gesichteten Studien die größte Rolle. Die nachfolgende Abbildung zeigt die Entwicklung des Energiebedarfs in den Rechenzentren in Deutschland in den letzten Jahren.

Abbildung 4-4: Energiebedarf der Rechenzentren in Deutschland



Quelle: Bitkom (2023).

Ein wesentlicher Einflussfaktor auf den Energieverbrauch stellt die Art der Kühlung dar. Moderne Rechenzentren können mit Wasser beziehungsweise Flüssigkeit gekühlt werden, da diese Energieeffizienzvorteile besitzen. Die Server der neuesten Generation benötigen heute weniger Kühlung, da sie bei höheren Temperaturen (im Bereich von 30° Celsius) arbeiten können. Auf der anderen Seite ist die Luftkühlung noch weit verbreitet, da sie einfach umzusetzen ist und keine wesentlichen Änderungen an der Struktur der Anlage erforderlich sind, wenn neue Elektronik eingebaut oder bestimmte Bereiche neugestaltet werden.⁷⁴

Eine Verbesserung zur Nachhaltigkeit stellt die Nutzung Erneuerbarer Energien dar. Diese können durch den Bau und die Nutzung eigener Erzeugungsanlagen vor Ort oder den Einkauf von Ökostrom zur Energieversorgung beitragen bzw. diese zu 100 % erfüllen. Eine Statistik zur Entwicklung des Anteils Erneuerbarer Energien an der gesamten Stromversorgung der Rechenzentren ist nicht bekannt, allerdings sieht das Energieeffizienzgesetz eine 100-prozentige Abdeckung mit Strom aus Erneuerbare-Energie-

⁷⁴ ekwb/SDIA (2022), S. 6.

Anlagen ab dem Jahr 2027 vor (vgl. Abschnitt 4.1.3.1). Dazu wurde eine entsprechende Berichtspflicht für die Rechenzentrumsbetreiber eingeführt (vgl. § 13 Energieeffizienzgesetz).

Cloud- / Fog- / Edge-Computing

Inwiefern die Entwicklung hin zu Cloudsystemen einen Einfluss auf die Nachhaltigkeit hat, ist noch nicht abschließend geklärt. Anbieter von Cloud-Rechenzentren besitzen zunächst einen intrinsischen Anreiz zur Reduktion der Energiekosten bei gleichzeitiger Einhaltung des Servicelevels, da sie so ihren Gewinn steigern können.⁷⁵ Die Zentralisierung der Dienste erleichtert tendenziell den Einsatz von KI, die auf der einen Seite durch effizientere Prozesse Energie einsparen kann, auf der anderen Seite aber auch (neuen) Energieverbrauch induziert.⁷⁶

Edge-Computing bietet insofern Vorteile hinsichtlich der Energieeffizienz, als dass die Daten vor Ort verarbeitet und gespeichert werden. Es entfällt somit die Notwendigkeit, Daten an ein zentrales Rechenzentrum zu übertragen. Das spart Kapazität und Energie. Allerdings sind Edge-Geräte häufig in ihrer Rechenleistung und Stromversorgung begrenzt, sodass datenintensive Anwendungen dort nicht ausgeführt werden können.⁷⁷

Eine weitere Alternative stellt das Fog-Computing dar. Kleinstrechenzentren bzw. Nanoserver besitzen mehr Rechenkapazität am Rande des Systems, so dass auch hier kürzeren Datenübertragungswege realisiert werden und potenziell Energie eingespart wird, ohne die Rechenleistung (im Vergleich zu „reinem“ Edge-Computing) zu stark zu senken.⁷⁸

Eine Überlegung zur Erhöhung der Nachhaltigkeit betrifft die Nutzung der Unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV) der Rechenzentren für netzdienliche Zwecke. Die volatile Einspeisung aus EE kann durch die Einbeziehung der USVs entsprechend geglättet werden. In einer Umfrage der Beratungsgesellschaft Omdia, die eine Reihe von Rechenzentrumsbetreibern sowie Ingenieur-, Architektur- und Beratungsunternehmen sowie Versorgungsunternehmen in Nordamerika, den nordischen Ländern, Großbritannien, Irland, Frankreich, Deutschland und Australien umfasste, „gaben 77 Prozent an, dass sie nicht glauben, dass der Einsatz einer Smart-Grid-fähigen USV auf diese Weise

⁷⁵ Jayaprakash et al. (2021), S. 2.

⁷⁶ Bermejo und Juiz (2023), S. 41

⁷⁷ Wissner et al. (2022), S. 18.

⁷⁸ Wissner et al. (2022), S. 19. Die „Energieeinsparungen sind dabei abhängig von Faktoren des Systemdesigns wie der Art von Zugangsnetzwerk, das mit Nanoservern verbunden ist, das Verhältnis von aktiver Zeit zu Leerlaufzeit von Nanoservern und dem Anwendungstyp, der Faktoren wie die Anzahl der Downloads von anderen Benutzern, die Anzahl der Aktualisierungen und Anzahl der vorab geladenen Daten erfasst.“ Vgl. Jalali et al. (2016).

geschäftskritische Arbeitslasten gefährden würde. Stattdessen schätzten rund 80 Prozent der Befragten, dass zwischen 10 und 50 % der Kapazität der heute in ihrem Rechenzentrum eingesetzten Batteriesysteme überschüssig seien und möglicherweise zur Unterstützung des Stromnetzes genutzt werden könnten.“⁷⁹

Neben dem Energie- ist auch der Wasserverbrauch ein häufig zu findender Faktor in der Literatur (vgl. Abschnitt 4.1.2.4), da Rechenzentren unter Umständen eine große Menge an Wasser benötigen.⁸⁰ Zu diesem Bereich ist die Studienlage befriedigend, wenngleich noch ausbaufähig in den Gebieten, die sich nicht mit Energie- oder Wasserverbrauch befassen (Biodiversität, Landnutzung, etc.). Mit dem Energieeffizienzgesetz wurde ein entsprechender Rahmen gesetzt, der nun von den Akteuren erst einmal umgesetzt und überwacht werden muss.

4.1.2.3 Entsorgung

Die Entsorgung im Bereich Rechenzentren besitzt verschiedene Dimensionen. Zum einen kann die Entsorgung der einzelnen Komponenten des Rechenzentrums betrachtet werden, die beim Bau bzw. in der Nutzung implementiert wurden. Hierzu existieren in der Literatur nur wenige Analysen.⁸¹

Bei Neubauten von Rechenzentren sollte durch modularen Aufbau der Komponenten das Recycling entweder durch die Nutzung der Komponente in ihrer ursprünglichen Funktion an anderer Stelle (z. B. in einer anderen Branche / einem anderen Land) oder durch einfache Wiederverwendung der enthaltenen Rohstoffe ermöglicht werden.

Zum anderen bildet die Nutzung der Abwärme eine weitere Dimension. Durch die Nutzung im Rechenzentrum selbst oder die Einspeisung in nahegelegene Fernwärmenetze kann der Wirkungsgrad der Anlage erhöht werden. Vielerorts fehlt allerdings die Möglichkeit zur Einspeisung, da sich die Standortentscheidung für neue Rechenzentren nicht nach diesem Kriterium, sondern vielmehr nach der Nähe zu wichtigen Netzknotenpunkten richtet. Bei vielen bestehenden Rechenzentren sind Fernwärmenetze schlicht nicht vorhanden. Abzuwarten bleibt, wie sich das Energieeffizienzgesetz in dieser Hinsicht auswirkt. Hier werden allerdings nur große Rechenzentren mit einem mittleren Jahresverbrauch von mehr als 2,5 Gigawattstunden in die Pflicht genommen (vgl. § 16(4) Energieeffizienzgesetz).

⁷⁹ https://www.theregister.com/2022/02/09/your_data_centre_ups/, zuletzt abgerufen am 15.08.2023.

⁸⁰ Rechenzentren mit Verdunstungskühlung benötigen mitunter 3 bis 5 Millionen Liter Wasser täglich. (Vgl. <https://www.datacenterfrontier.com/executive-roundtable/article/21438743/data-center-sustainability-comes-to-the-fore-even-more-in-2023>).

⁸¹ Vgl. z. B. Schödwell et al. (2018), Whitehead et al. (2015).

4.1.2.4 Indikatoren zur Bewertung der Nachhaltigkeit

In der Literatur existiert eine Vielzahl zum Teil sehr spezifischer Indikatoren zur Messung der Nachhaltigkeit von Rechenzentren.⁸²

CEN, CENELEC und ETSI (2022, S. 14 ff.) unterscheiden drei verschiedene Kategorien von Indikatoren (KPIs):

- Technische KPIs beziehen sich auf die Entwurfs- und Konstruktionsphase der Komponenten, Unterbaugruppen, Produkte und Systeme, die in Rechenzentren eingesetzt werden sollen. Sie werden unter bestimmten Betriebsbedingungen gemessen und geben Hinweise auf die potenzielle Leistung in einem betriebsbereiten Rechenzentrum.
- Objektive KPIs gelten für die Rechenzentrumsinfrastrukturen in der Betriebsphase und können zur Überwachung und Steuerung des Benutzerverhaltens innerhalb des Rechenzentrums verwendet werden (z. B. PUE, siehe unten).
- Globale KPIs bieten eine andere Sicht auf das Engagement eines Benutzers für strategische Energiemanagementpraktiken als die objektiven KPIs. Beispielsweise unterstützt ein Benutzer seine Gesamtenergieziele nicht durch die Verwendung lokaler Erneuerbarer Energien, wenn sein Gesamtenergieverbrauch auf Geräten mit sehr schlechter Energieeffizienz basiert.

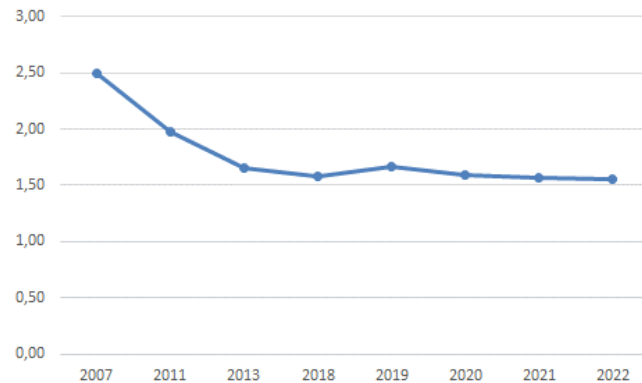
Der am weitesten verbreitete Indikator ist die Power Usage Effectiveness (PUE). Er berechnet sich aus dem Quotienten der für den Betrieb der Server notwendigen Energie (im Nenner, sie wird mit „1“ angesetzt) und dem Verbrauch für die restliche Infrastruktur (Kühlung, Sicherheit, Beleuchtung etc., diese wird im Zähler angesetzt). Dabei ist zu beachten, dass beim Vergleich dieses Wertes zwischen verschiedenen Rechenzentren verschiedene Parameter hinzuzuziehen sind (z. B. die unterschiedlichen klimatischen Verhältnisse, Energieverfügbarkeit, Möglichkeit der Wasserkühlung etc.).

Der PUE-Wert in Deutschland betrug im Jahr 2022 durchschnittlich 1,55, nachdem er im Jahr 2010 bei 1,98 gelegen hatte.⁸³ Weltweit ergab sich eine ähnliche Entwicklung, wie die folgende Abbildung zeigt (vgl. Abbildung 4-5).

⁸² Kubeneck et al. (2023), S. 19., Schödwell et al. (2018, S. 206 ff.) listen mehr als 90 verschiedene Indikatoren auf.

⁸³ Bitkom (2023), S. 22.

Abbildung 4-5: Entwicklung der PUE weltweit in den größten Rechenzentren der Befragten



Quelle: Eigene Darstellung auf Basis von Statista (2023).

Für den Energieverbrauch existiert neben der PUE auch ein weit verbreiteter Indikator für den Anteil Erneuerbarer Energien an der Versorgung des Rechenzentrums, der sog. Renewable Energy Factor (REF). Er beschreibt den Energiebedarf des Rechenzentrums, der durch Erneuerbare Energien gedeckt wird.

Des Weiteren sind auch Indikatoren zum Wasserverbrauch (Wasserverbrauch im Verhältnis zur eingesetzten Energie für die IT) und zur Effizienz des Kühlsystems (Verhältnis der vom Kühlsystem aus dem Rechenzentrum abzuführende Wärmemenge zur dazu eingesetzten elektrischen Energie des gesamten Kühlsystems) etabliert. Sie sind nach dem Energieeffizienzgesetz berichtspflichtig und in der EN-Norm 50600 bereits enthalten.⁸⁴

Während diese Indikatoren grundsätzlich für bzw. über alle Lebenszyklusphasen eingesetzt werden können, existieren weitere spezifische Indikatoren in der Literatur, z. B. zum Bereich Entsorgung. Schödwell et al. (2018, S. 212 ff.) führen z. B. die Material Recycling Ratio (MRR) als Anteil des recycelten/wiederverwendeten Materials am Nettomaterial und die Electronic Disposal Efficiency (EDE) als den Anteil der mittels eines akkreditierten Partners verantwortungsvoll entsorgten elektronischen Ausrüstung an den insgesamt entsorgten elektronischen Geräten an.

Insgesamt ist die Indikatorenlage für Rechenzentren als gut zu bezeichnen, wobei die Nutzung der Indikatoren im Bereich Betrieb am weitesten fortgeschritten ist. Bei anderen Indikatoren besteht noch weiterer Forschungsbedarf bezüglich der praktischen Anwendbarkeit, d. h. insbesondere der Verfügbarkeit der notwendigen Daten. Einzelne Indikatoren dürften ohne viel Aufwand zu erheben sein (z. B. PUE, Anteil Erneuerbarer Energien). Hier gilt es, die entsprechenden Erfahrungen systematisch zusammenzuführen, um

⁸⁴ Vgl. Anlage 3 zum Entwurf eines Gesetzes zur Steigerung der Energieeffizienz und zur Änderung des Energiedienstleistungsgesetzes vom 17.05.2023. Siehe auch Abschnitt 4.1.3.1.

entsprechende Prozesse (z. B. der Datenabfrage und -weitergabe) zu bewerten und zu verbessern bzw. auf andere Bereiche zu übertragen.

4.1.3 Rechtliche und ökonomische Rahmenbedingungen

4.1.3.1 Rechtliche und regulatorische Rahmenbedingungen

Es existieren sowohl internationale als auch nationale Regelungen. Daher soll zunächst kurz auf die verschiedenen Vor- und Nachteile eingegangen werden:

Internationale Regelungen ermöglichen einen globalen Ansatz zur Bewältigung von Herausforderungen, die nationale Grenzen überschreiten, wie z. B. Umweltprobleme. Sie fördern die Zusammenarbeit zwischen Ländern und schaffen einen Rahmen für den Austausch von Ressourcen, Informationen und bewährten Verfahren. Auf der anderen Seite können die Aushandlung und Umsetzung internationaler Regelungen oft ein langwieriger Prozess sein, der Zeit und Ressourcen erfordert.

Nationale Regelungen bieten zunächst den Vorteil, dass sie besser auf die spezifischen Bedürfnisse und Gegebenheiten eines Landes zugeschnitten werden können, da sie flexibler in der Gestaltung und Anpassung sind. Einzelne Länder können auch eher eine Vorreiterrolle einnehmen. Nachteilig ist die begrenzte Reichweite: Nationale Regelungen können an ihre Grenzen stoßen, wenn es um globale Herausforderungen wie Umweltschutz oder grenzüberschreitenden Handel geht. Unterschiedliche nationale Regelungen können darüber hinaus zu Wettbewerbsverzerrungen führen, wenn Unternehmen in Ländern mit weniger strengen Vorschriften niedrigere Standards einhalten müssen. Dies kann bei der Ansiedlung von Rechenzentren eine Rolle spielen. Im Folgenden wird auf die wichtigsten internationalen und nationalen Regelungen eingegangen.

Bereits im Jahr 2008 wurde der Europäische Verhaltenskodex für Rechenzentren („Code of conduct for Data Centres“) mit dem Ziel ins Leben gerufen, die Energieeffizienz in Rechenzentren zu verbessern. Der Verhaltenskodex ist eine Initiative, die vom Joint Research Centre (JRC) der EU-Kommission verwaltet wird und Standards für zur freiwilligen Teilnahme bereite Unternehmen festlegt.⁸⁵ Zu den betrachteten Bereichen zählen u. a. das Gebäude, die Hard- und Software oder die Serverschränke.⁸⁶ Hierfür werden klare Handlungsempfehlungen für die Bereiche Energie- und Wasserverbrauch ausgesprochen. Bei einer Teilnahme wird die Erfüllung dieser Empfehlungen mindestens alle drei Jahre durch einen unabhängigen Dritten überprüft.

⁸⁵ Vgl. https://joint-research-centre.ec.europa.eu/scientific-activities-z/energy-efficiency/energy-efficiency-products/code-conduct-ict/code-conduct-energy-efficiency-data-centres_en, zuletzt abgerufen am 20.06.2023

⁸⁶ Acton et al. (2023), S. 4 ff.

Der Kodex findet sich auch in der EU-Taxonomie wieder. Anhang 1, Punkt 8.1 beinhaltet die Maßgabe, dass ein wesentlicher Beitrag zum Klimaschutz geleistet wird, wenn im Rahmen der Tätigkeit alle einschlägigen Verfahren, die in der neuesten Fassung des EU-Verhaltenskodex oder im CLC/TR 50600-99-1 (siehe Abbildung 4-6) umgesetzt wurden. Bezüglich des Verhaltenscodex hat die EU ein Zusatzdokument veröffentlicht, das die Umsetzung erleichtern soll (sog. „assessment framework“)⁸⁷.

In Deutschland wurde ein neues Energieeffizienzgesetz verabschiedet.⁸⁸ Im Gesetz wird dabei bereits vom Indikator „Energieverbrauchseffektivität“ (EVE)⁸⁹ Gebrauch gemacht. So sind Rechenzentren, die vor dem 1. Juli 2026 den Betrieb aufnehmen oder aufgenommen haben, so zu errichten und zu betreiben, dass sie ab dem 1. Juli 2027 eine EVE von kleiner oder gleich 1,5 und ab dem 1. Juli 2030 eine Energieverbrauchseffektivität von kleiner oder gleich 1,3 im Jahresdurchschnitt dauerhaft erreichen.

Rechenzentren, die ab dem 1. Juli 2026 den Betrieb aufnehmen, sind so zu errichten und zu betreiben, dass sie eine EVE von kleiner oder gleich 1,2 erreichen.⁹⁰ Des Weiteren gilt: *„Betreiber von Rechenzentren decken den Stromverbrauch in ihren Rechenzentren bilanziell ab dem 1. Januar 2024 zu 50 Prozent durch Strom aus erneuerbaren Energien und ab dem 1. Januar 2027 zu 100 Prozent durch Strom aus erneuerbaren Energien.“*⁹¹

Für Rechenzentren gelten in Deutschland verschiedene Normen, insbesondere die DIN EN 50600. Sie *„stellt die erste europaweit länderübergreifende Norm dar, die mit einem ganzheitlichen Ansatz umfassende Vorgaben für die Planung, den Neubau und den Betrieb eines Rechenzentrums macht. Sie definiert Anforderungen für die Planung der Gewerke Baukonstruktion, Elektroversorgung, Klimatisierung, Verkabelung, Sicherheitssysteme und legt Kriterien für den Betrieb von Rechenzentren fest. Die von der europäischen Normungsgesellschaft CENELEC (Europäisches Komitee für elektrotechnische Normung) geschaffene DIN EN 50600 bietet dabei diverse Freiheitsgrade und versteht sich*

87 „Dieses Dokument ergänzt das Verhaltenskodex-Best-Practices-Dokument, indem die Praktiken eher auf Anforderungen als auf Empfehlungen basieren. Der Bewertungsrahmen stellt Prüfern daher die notwendigen Werkzeuge zur Verfügung, um zu überprüfen, ob ein Rechenzentrum die im Verhaltenskodex enthaltenen Praktiken korrekt anwendet. Auf diese Weise können Marktteilnehmer ihre Offenlegungen zur Taxonomie im Rahmen ihrer nichtfinanziellen Berichterstattung korrekt und ohne Unklarheiten vervollständigen.“ <https://e3p.jrc.ec.europa.eu/publications/assessment-framework-data-centres-context-activity-81-taxonomy-climate-delegated-act>, zuletzt abgerufen am 25.08.2023, eigene Übersetzung.

88 Vgl. Deutscher Bundesrat (2023): Gesetz zur Steigerung der Energieeffizienz und zur Änderung des Energiedienstleistungsgesetzes, Stand: 20.10.2023.

89 Der Indikator beschreibt das Verhältnis des jährlichen Energiebedarfs des gesamten Rechenzentrums zum Energiebedarf der Informationstechnik. Er entspricht der (international) gebräuchlichen PUE (vgl. Abschnitt 4.1.2.4).

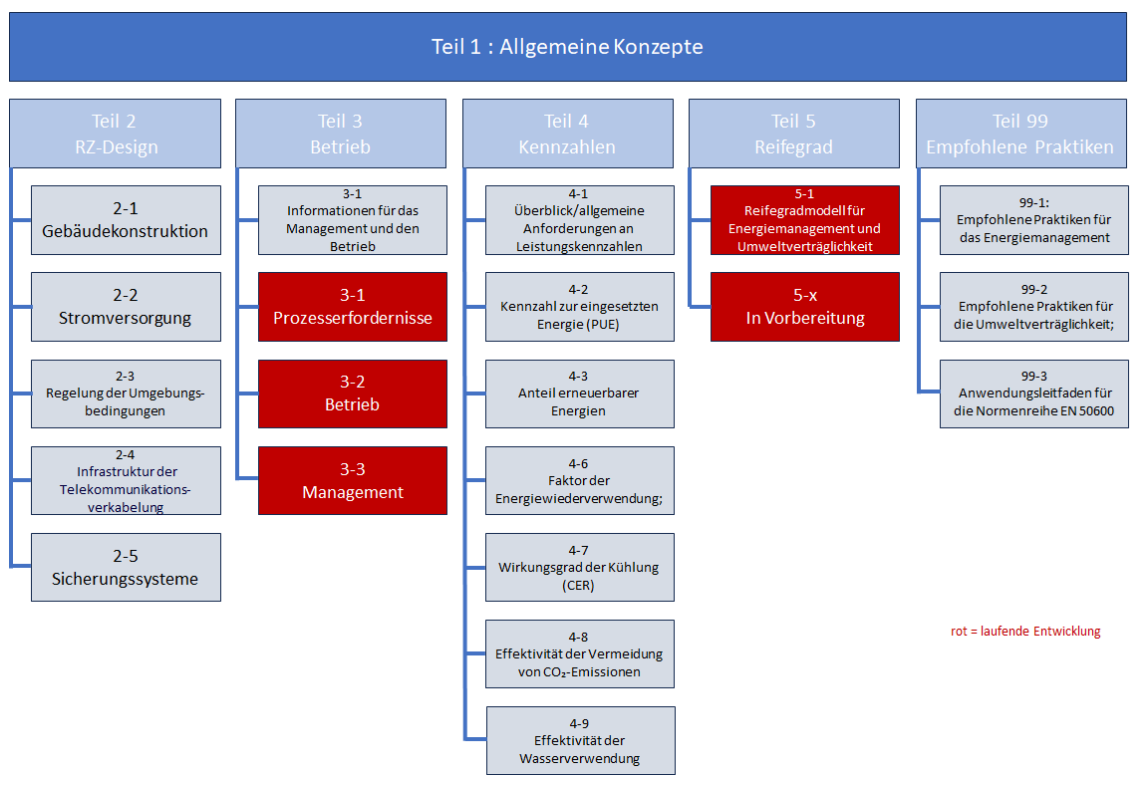
90 Vgl. Deutscher Bundestag (2023): Beschlussempfehlung und Bericht des Ausschusses für Klimaschutz und Energie (25. Ausschuss) zu dem Gesetzentwurf der Bundesregierung, Drucksache 20/6872, Entwurf eines Gesetzes zur Steigerung der Energieeffizienz und zur Änderung des Energiedienstleistungsgesetzes, Stand:05.07.2023, § 11 (1) und (2).

91 Vgl. Deutscher Bundestag (2023): Beschlussempfehlung und Bericht des Ausschusses für Klimaschutz und Energie (25. Ausschuss) zu dem Gesetzentwurf der Bundesregierung, Drucksache 20/6872, Entwurf eines Gesetzes zur Steigerung der Energieeffizienz und zur Änderung des Energiedienstleistungsgesetzes, Stand:05.07.2023, § 11 (5).

bis zu einem gewissen Punkt als Baukastensystem. In erster Linie stellt die DIN EN 50600 eine Norm dar, die bei Neubauten von Rechenzentren zur Anwendung kommt. Sie definiert dabei Notwendigkeiten von Gutachten und Analysen im Vorfeld der Planungs- und Bauarbeiten.“⁹²

Abbildung 4-6 gibt einen Überblick über die Norm.

Abbildung 4-6: Ausgestaltung der EN 50600



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an TÜV Nord (o.D.).

Bezüglich der Nachhaltigkeit ist Teil 4 relevant, in dem schon konkrete KPIs zur Anwendung kommen. Daneben sind perspektivisch Teil 5 und Teil 99 von Interesse. Die Einhaltung der Norm ist freiwillig.

Auf internationaler Ebene existiert weiterhin die ISO-Norm SO/IEC 22237, die als internationale Schwester zur europäischen EN 50600 angesehen werden kann.⁹³

⁹² <https://www.tuvit.de/de/leistungen/rechenzentren-colocation-cloud-infrastrukturen/en-50600/>, zuletzt abgerufen am 14.08.2023

⁹³ <https://www.tuvit.de/de/leistungen/rechenzentren-colocation-cloud-infrastrukturen/iso-22237/>, zuletzt abgerufen am 21.08.2023.

Somit existieren teilweise detaillierte Standards für Rechenzentren, die aber reine Richtwerte für die Industrie darstellen und keine direkte rechtliche Relevanz besitzen.

4.1.3.2 Ökonomische Rahmenbedingungen

Unabhängig von regulatorischen Vorgaben gibt es mehrere ökonomische Faktoren, die den Druck erhöhen, nachhaltige Rechenzentren zu bauen:

Rechenzentren benötigen beträchtliche Mengen an Energie, um Server und Kühlsysteme zu betreiben. Da die Energiekosten steigen können, je nachdem, wie die Energiequellen sich entwickeln, kann die Nutzung Erneuerbarer Energien dazu beitragen, diese Kosten langfristig zu stabilisieren oder zu senken. Auch Energieeffizienzmaßnahmen können Kosten sparen. Obwohl die anfänglichen Investitionskosten möglicherweise höher sind, können niedrigere Energie- und Wartungskosten im Laufe der Zeit zu einer besseren Rentabilität führen.

Unternehmen, die in nachhaltige Technologien und Infrastrukturen investieren, können innovative Ansätze entwickeln, um Energieeffizienz zu maximieren und Umweltauswirkungen zu minimieren. Dies kann ihre Wettbewerbsfähigkeit steigern, da sie effizientere Dienstleistungen anbieten können. Weiterhin achten Investoren zunehmend auf Umwelt-, Sozial- und Governance-Kriterien (ESG-Kriterien), wenn sie in Unternehmen investieren.

Insgesamt können diese Faktoren einen erheblichen ökonomischen Druck auf Unternehmen ausüben, nachhaltige Rechenzentren zu bauen und zu betreiben. Dies spiegelt die zunehmende Notwendigkeit wider, Umweltauswirkungen zu minimieren und ressourceneffiziente Lösungen zu fördern.⁹⁴

Maßnahmen in Rechenzentren, die Vorgaben des EU-Verhaltenscodex oder die DIN CLC/TR 50600-99-1 (siehe Abbildung 3-4) erfüllen, können darüber hinaus eine finanzielle Förderung durch die KfW erhalten, was zusätzliche finanzielle Anreize setzt.⁹⁵

4.1.4 Praxis und Handlungsbedarf

Bisher sind alle Maßnahmen bezüglich Nachhaltigkeit freiwillig, aber das Energieeffizienzgesetz (EnEfG) setzt konkrete Vorgaben und macht unter Umständen spezifische Messtechnik in Rechenzentren notwendig. Laut der Gesetzesbegründung *„entstehen bei neu errichteten Rechenzentren Kosten in Höhe von 680,5 Millionen Euro für die Investitionen in Abwärmetechnologien und Nahwärmenetze, denen Einnahmen aus dem*

⁹⁴ Vgl. CBRE (2023), S. 42.

⁹⁵ Vgl. [Anlage zum Merkblatt: Klimaschutzoffensive für Unternehmen \(kfw.de\)](#), zuletzt abgerufen am 25.08.2023.

Verkauf der Abwärme in Höhe von knapp 730 Millionen Euro gegenüberstehen. Zudem unterliegen Rechenzentren Informations- und Meldepflichten, für deren Umsetzung ein jährlicher Aufwand in Höhe von 29,2 Millionen Euro abgeschätzt wird.“⁹⁶

In der Praxis stoßen flüssigkeitsgekühlte Systeme teilweise noch auf Vorbehalte, da die psychologische Hemmschwelle („Flüssigkeit im Serverraum“) noch nicht beseitigt ist. Das Bewusstsein in den Einkaufsabteilungen für das Thema Nachhaltigkeit ist daher noch weiter ausbaufähig. Im Bereich der Luftkühlung könnte angedacht werden, auch mit höherer Betriebstemperatur zu agieren und somit Energie einzusparen.⁹⁷ Die öffentliche Hand kann solche Aspekte bei ihren Beschaffungsentscheidungen unterstützen.

Einige Rechenzentren zeichnen sich aber bereits heute durch einen hohen Grad an Nachhaltigkeit aus. Im Folgenden werden zwei Best-Practice-Beispiele beschrieben:

I. Best Practice im Projekt Eurotheum von Cloud&Heat⁹⁸

Das Eurotheum wurde im Jahr 2000 erbaut und bis zur Übernahme durch Cloud&Heat von der Europäischen Zentralbank genutzt. Es beherbergt ein sicheres Rechenzentrum im Herzen Frankfurts. Im Jahr 2018 erfolgte eine umfassende Modernisierung des Rechenzentrums innerhalb von sechs Monaten, wobei die klassische Luftkühlung durch eine Heißwasserdirektkühlung, einer Form der Flüssigkeitskühlung, ergänzt wurde. Dies umfasste die Modernisierung der IT-Infrastruktur, Neugestaltung der Rechenzentrumsperipherie, Integration der Cloud&Heat-Hardware und -Flüssigkeitskühltechnologie. Die Abwärme der Flüssigkeitskühlung wird, in Form der Beheizung von Büros, Konferenzräumen, Hotels und Gastronomie im Gebäude genutzt. Die Cloud&Heat-Kühltechnologien bieten Einsparpotenziale durch geringeren Energieverbrauch der Onboard-Lüfter, höhere Energieeffizienz der Flüssigkeitskühlung, reduzierte Betriebsstunden der Klimageräte und Nachnutzung der Abwärme.“

II. Best Practice im IT Cube in Darmstadt

Zentrales Merkmal des Green IT Cubes ist sein hocheffizientes Kühlsystem. Im Gegensatz zur aufwändigen Kühlung der Raumluft nutzt der Green IT Cube ein innovatives Wasserkühlungssystem. Die entstandene Wärme der Rechner wird in den Rücktüren der Computerschränke über wasserdurchflossene Wärmetauscher abgeführt. Dadurch beansprucht die Kühlung weniger als sieben Prozent der elektrischen Leistung, welche für das IT-Equipment aufgewendet wird (PUE < 1,07). Mit der Server-Abwärme des Green IT Cubes wird darüber hinaus auf dem GSI-Campus ein modernes Büro- und Kantinengebäude beheizt. Das innovative Kühlsystem schafft zudem die Voraussetzung für eine neuartige Bauweise. So können die Racks mit den eingebauten Servern nicht nur nebeneinander, sondern auch übereinander in einer

⁹⁶ Bundesregierung (2023), S. 3.

⁹⁷ Zhang et al. (2023).

⁹⁸ Vgl. Cloud&Heat (2019).

dreidimensionalen Anordnung platziert werden. Das schafft im Green IT Cube Platz für 768 Rechnerschränke verteilt auf sechs Etagen mit insgesamt 2.793 m².

Auch der Europäische Verhaltenskodex für Rechenzentren (vgl. Abschnitt 4.1.3.1) beinhaltet im Wesentlichen Best-Practice-Empfehlungen.

Seit 2012 ist es möglich, für Rechenzentren eine Zertifizierung des „Blauen Engels“ zu erhalten, wenn sie Kriterien der Energieeffizienz und des Umweltmanagements einhalten.⁹⁹ Die Anforderungen dazu werden ständig weiterentwickelt.¹⁰⁰ Laut Auskunft des Bitkom (2021) wurde die Zertifizierung bisher aber nur an sehr wenige Rechenzentren vergeben, gleichzeitig wird die Methodik als zu starr kritisiert.¹⁰¹ Die „Allianz zur Stärkung digitaler Infrastrukturen“ bemängelt die fehlende kommunale Wärmenetzinfrastruktur, welche die Abnehmerfindung für die Abwärme erschwert. Weiterhin habe der Blaue Engel nur begrenzte internationale Anerkennung. Willkürlich festgelegte Grenzwerte beeinträchtigten die Akzeptanz des Blauen Engels.¹⁰²

Tabelle 4-1 zeigt die unterschiedlichen Grenzwerte zur Erlangung des Blauen Engels und des Energieeffizienzgesetzes hinsichtlich der PUE.

Tabelle 4-1: Anforderungen an Rechenzentren nach Energieeffizienzgesetz und Blauem Engel

		Inbetriebnahme des Rechenzentrums	PUE
Blauer Engel		01.01.2024 oder später	PUE ≤ 1,25
		Zwischen 01.01.2019 und 31.12.2023	PUE ≤ 1,30
		Zwischen 01.01.2015 und 31.12.2018	PUE ≤ 1,50
		31.12.2014 oder früher	PUE ≤ 1,60
	Ausnahme	Vor weniger als 1 Jahr (Inbetriebnahme < 1 Jahr)	PUE ≤ 1,50
		Vor weniger als 2 Jahren (1 Jahr ≤ Inbetriebnahme < 2 Jahre)	PUE ≤ 1,40
Energieeffizienzgesetz		Vor dem 1. Juli 2026	PUE ≤ 1,50 (ab 1. Juli 2027) PUE ≤ 1,30 (ab 1. Juli 2030)
		Nach dem 1. Juli 2027	PUE ≤ 1,20

Quelle: Eigene Darstellung auf Basis des Energieeffizienzgesetzes und Blauer Engel (2023).

Während die Grenzwerte des Blauen Engels zeitlich stärker differenziert sind, so gleichen sich die Werte im Zeitablauf an. Nach dem 1. Juli 2027 errichtete Rechenzentren müssen den niedrigsten PUE nach dem Energieeffizienzgesetz erfüllen.

⁹⁹ <https://www.umweltbundesamt.de/themen/digitalisierung/gruene-informationstechnik-green-it/rechenzentren/umweltzeichen-blauer-engel-fuer-rechenzentren#das-umweltzeichen-fur-rechenzentren-der-blaue-engel>, zuletzt abgerufen am 31.08.2023.

¹⁰⁰ <https://be-rechenzentren.de>, zuletzt abgerufen am 31.08.2023.

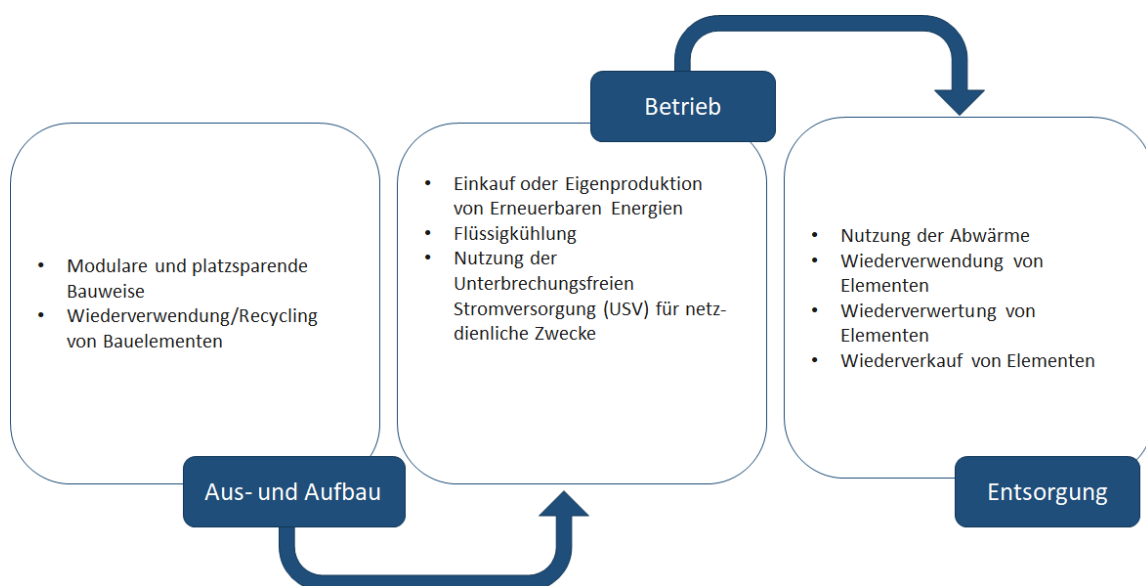
¹⁰¹ Bitkom (2021), S. 5.

¹⁰² <https://www.datacenter-insider.de/praxisfern-lautet-die-kritik-vom-eco-am-blauen-engel-a-576329d52b49cbcc16f61582ca20b063/>, zuletzt abgerufen am 31.08.2023.

Im Moment existieren, wie auch in Abschnitt 4.1.3.1 dargelegt, viele verschiedene Regelungen und Initiativen zur Erhöhung der Nachhaltigkeit.

In der Praxis orientiert sich die Standortfindung für Rechenzentren bislang vornehmlich an technischen Parametern, wie der Nähe zum nächsten Netzknotenpunkt. Die Ansiedlung eines Rechenzentrums in der Nähe eines Fernwärmenetzes kann zwar für eine erhöhte Nutzung der Abwärme sorgen (sofern der Fernwärmenetzbetreiber zur Aufnahme zusätzlicher Wärme bereit ist), impliziert aber u. U. negative Folgen im Sinne der Nachhaltigkeit durch erhöhten Aufwand, diese Rechenzentren mit den Nutzern kommunikationstechnisch zu verbinden. Die nachhaltige Errichtung und Entsorgung stehen in Theorie und Praxis noch nicht im Fokus der Aufmerksamkeit.

Abbildung 4-7: Maßnahmen für nachhaltigere Rechenzentren



Quelle: Eigene Darstellung.

4.1.5 Zwischenfazit Rechenzentren

Die ausgewertete Literatur zeigt, dass der Schwerpunkt der Veröffentlichungen auf der Phase des Betriebs und den Zielen des Klimaschutzes bzw. der Energieeffizienz und Erneuerbarer Energien liegt.

Die Phase „Infrastruktur und Betrieb“ betont den Energiebedarf von Rechenzentren, wobei die Kühlung ein Schlüsselfaktor ist. Die Verwendung Erneuerbarer Energien kann die Nachhaltigkeit erhöhen; Edge-Computing bietet bei geringen benötigten Kapazitäten Energieeffizienzvorteile. Ebenso wird die Einbeziehung der Unterbrechungsfreien Stromversorgung (USV) zur Netzstabilisierung diskutiert.

Es existieren verschiedene Kategorien von Indikatoren zur Messung der Nachhaltigkeit von Rechenzentren, darunter technische KPIs, objektive KPIs und globale KPIs. Ein weit verbreiteter Indikator ist die Power Usage Effectiveness, die den Energieverbrauch in Rechenzentren bewertet. Die Nutzung dieser Indikatoren im Betriebsbereich ist am weitesten fortgeschritten.

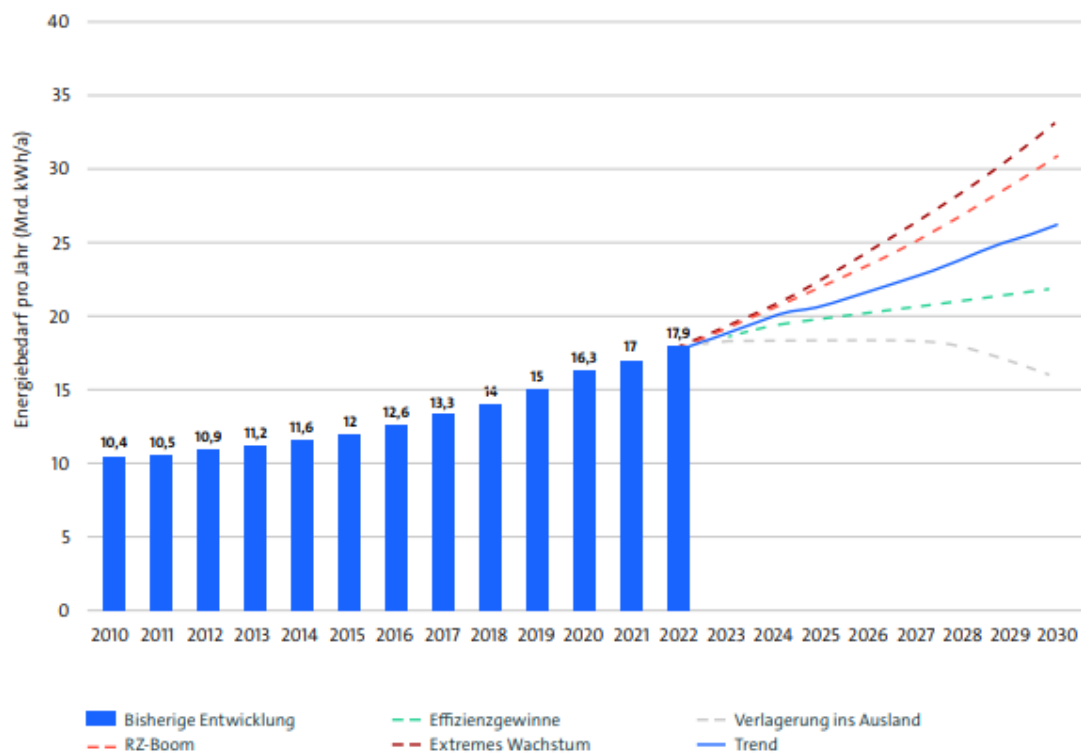
Ökonomische Faktoren, wie steigende Energiekosten und Investoreninteresse an ESG-Kriterien, erhöhen den Druck auf Unternehmen, nachhaltige Rechenzentren zu betreiben. Investoren achten dabei zunehmend auf Umwelt- und Sozialkriterien. Rechenzentren sind bereits in der EU-Taxonomie verankert.

Es existieren daneben verschiedene rechtliche und regulatorische Rahmenbedingungen, darunter der Europäische Verhaltenskodex für Rechenzentren und das deutsche Energieeffizienzgesetz. Sie sollen Nachhaltigkeit anreizen, wobei diese bisher auf Freiwilligkeit basierte. Mit dem Energieeffizienzgesetz wird sich dieser Sachverhalt insofern ändern, als dass für Rechenzentren Vorgaben bezüglich der Energieeffizienz sowie der Nutzung von Erneuerbaren Energien und Abwärme bestehen. Damit werden drei Aspekte aufgegriffen, die sowohl in der Wissenschaft hinreichend diskutiert als auch in der Praxis teilweise schon umgesetzt werden.

Trotz vieler Regelungen und Initiativen orientieren sich die Standortentscheidungen für Rechenzentren oft an technischen Parametern, wobei die nachhaltige Errichtung und Entsorgung noch nicht im Fokus steht. Beim Betrieb bestehen kaum Einflussmöglichkeiten auf Auslastungsgrade und Energieeffizienz der Dienste, da Kunden Kapazitäten einkaufen und aus Daten-/Geschäftsgeheimnisschutz für die Betreiber eine Blackbox darstellen, die nur indirekt durch Preisanreize beeinflusst werden kann. Diesem Umstand wird im Energieeffizienzgesetz mit Übergangsfristen nach der Inbetriebnahme Rechnung getragen.

Insgesamt zeigt die Analyse die Komplexität des Themas und die zahlreichen Aspekte, die bei der Schaffung nachhaltiger Rechenzentren berücksichtigt werden müssen. Mit dem Energieeffizienzgesetz ist ein wesentlicher Schritt seitens des Gesetzgebers erfolgt, denn der Energiebedarf wird sehr wahrscheinlich auch in Zukunft steigen, wie Abbildung 4-8 zeigt.

Abbildung 4-8: Zukünftiger Energiebedarf der Rechenzentren in Deutschland



Quelle: Bitkom (2023), S. 25.

Es besteht Handlungsbedarf, diesen Weg möglichst international zu harmonisieren. Weitere Forschung könnte hinsichtlich der Errichtung und Entsorgung erfolgen.

4.2 Drahtgebundene Netzinfrastrukturen: Zugangs- und Kernnetze

4.2.1 Definition

Unter drahtgebundenen Netzinfrastrukturen werden im Rahmen dieser Studie unterschiedliche Übertragungstechnologien der Zugangsebene (Netzebene 3) subsumiert:

- FTTC-Netze (VDSL, Vectoring, Super-Vectoring)
- HFC-Netze (DOCSIS 3.1 oder höher)
- FTTB (Glasfasernetze bis in das Gebäude)

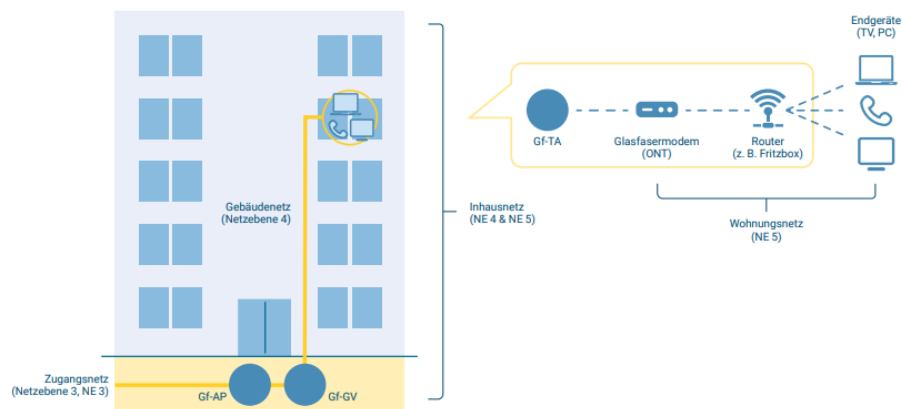
- FTTH (Glasfaser bis in die Wohnung)¹⁰³, als xPON oder PtP

Von den genannten Übertragungstechnologien können nur Glasfaser- und Breitbandkabelnetze (ab DOCIS 3.1) Übertragungsraten im Gigabitbereich anbieten.

Betrachtete Netzebenen

In diesem Kapitel beschränkt sich die Betrachtung auf die Netzebene 3 (Zugangsnetze). Dies spiegelt die Herangehensweise der vorliegenden Studien zu den unterschiedlichen Netztechnologien auf den Festnetzen wider.

Abbildung 4-9: Netzebenen im Mehrfamiliengebäude



Quelle: Deutsche Telekom in Zerson et al. (2020), S. 7.

Aktive Komponenten in den unterschiedlichen Netztechnologien

Die meisten Studien behandeln die Zugangsnetze, also ab dem Übergang vom Weitverkehrsnetz (NE2) in das Zugangsnetz (NE3) und bis zum Router des Kunden. Abhängig von der betrachteten Technologie unterscheiden sich die Bezeichnungen der Netzkomponenten:

¹⁰³ Bei Mehrfamilienwohnhäusern ist hier noch die hausinterne Netzinfrastruktur zu betrachten. Siehe hierzu Kapitel 4.5.

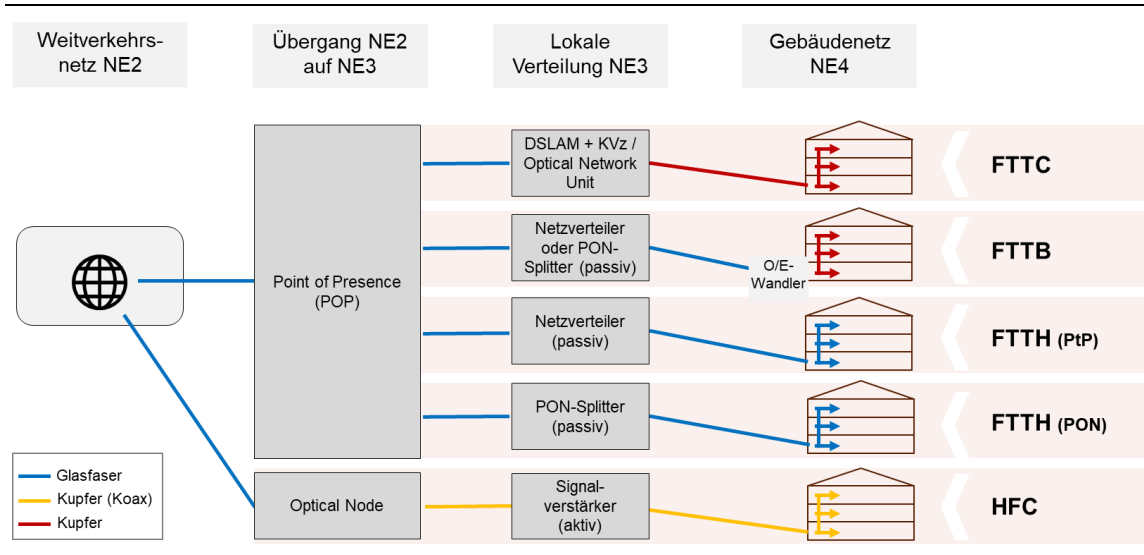
Tabelle 4-2: Drahtgebundene Technologien und Komponenten

Netztechnologie	Vermittlungsstelle (Übergang NE2 / NE3)	Lokale Verteilung	Haus (Keller)	Wohnung
FTTC	Central Office (CO) / Hauptverteiler (HVt) / Point of Presence (POP) / Optical Line Termination (OLT)	DSLAM+KVz / Optical Network Unit (ONU)	-	Router
FTTB		Optischer PON-Splitter (<i>passiv</i>)	O/E-Wandler / ONU (z. B. G.fast)	
FTTH (PtP)		Netzverteiler (<i>passiv</i>)	Gebäudeverteiler (<i>passiv</i>)	
FTTH (xPON)		Optischer PON-Splitter (<i>passiv</i>)	Gebäudeverteiler (<i>passiv</i>)	
HFC		Optical Node	Signalverstärker / Trunk Amplifier	

Quelle: Eigene Darstellung.

Im nachfolgenden Schaubild sind die Technologien FTTx und HFC in vereinfachter Darstellung aufgeführt.

Abbildung 4-10: Netzelemente von FTTC-, FTTB/H- sowie HFC-Netzen



Quelle: Eigene Darstellung.

Im Kontext von FTTC (VDSL-Vectoring) beinhaltet die Infrastruktur einen DSLAM (Digital Subscriber Line Access Multiplexer), der die Datenverbindung zwischen Endnutzern und dem Internetdienstanbieter herstellt und verwaltet. Der DSLAM als aktive Komponente erfordert eine Stromversorgung, ebenso wie der O/E-Wandler im Kontext von FTTB.

Bei einer Glasfaserinfrastruktur (FTTH) unterscheiden sich im Wesentlichen zwei Zugangstechnologien: GPON (Gigabit Passive Optical Network) und Point-to-Point (PtP). In einem passiven optischen Netzwerk (GPON) erfolgt die optische Leitungsaufteilung auf mehrere Anschlüsse, wodurch ein gemeinsam genutztes Übertragungsmedium entsteht. Im Gegensatz zu aktiven Netzwerken zeichnet sich GPON durch eine geringere Stromaufnahme aus. Bei Point-to-Point-Ethernet (PtP) ist die Netzwerkarchitektur ähnlich der des herkömmlichen Telefonnetzes aufgebaut. Die Glasfaserleitungen verlaufen sternförmig von der zentralen Vermittlungsstelle zu jedem Haushalt, wobei jeder Haushalt über eine eigene dedizierte Glasfaser verfügt.¹⁰⁴

HFC-Netze zeichnen sich dadurch aus, dass an den sogenannten Fiber-Nodes die verfügbare Bandbreite zwischen den dahinterliegenden Endnutzern aufgeteilt wird. Je mehr Endkunden hinter einer Fiber-Node liegen, desto geringer die verfügbare, maximale Bandbreite. Auf dem Weg zum Endkunden wird das Signal im Koaxialnetz verstärkt. Je länger die Distanzen und je größer die Anzahl der Kunden auf eine Fiber-Node, desto mehr Verstärker werden benötigt.

Eine umfassende und mit der Industrie abgestimmte Übersicht über die unterschiedlichen Netztechnologien und ihre Komponenten bietet auch die Handreichung „Bausteine für Netzinfrastrukturen von Gebäuden“, herausgegeben vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur¹⁰⁵.

4.2.2 Aspekte der ökologischen Nachhaltigkeit

Im Vergleich zu Rechenzentren beschäftigen sich deutlich weniger Studien mit der Nachhaltigkeit von Festnetzen. Die vorliegende Literatur behandelt schwerpunktmäßig Parameter der Energieeffizienz und beleuchtet vorwiegend die Phasen der Herstellung und des Betriebs von drahtgebundenen Netzinfrastrukturen. Unterrepräsentiert in den Lebenszyklusanalysen (LCA) ist dagegen der Aspekt der Entsorgung.

Ebenso unterrepräsentiert sind sonstige Umweltziele und das, obwohl beim Leitungstiefbau Aspekte wie Biodiversität oder auch Wasser (im Sinne von der Berücksichtigung bestehender Wasserkreisläufe) durchaus von Relevanz sind.

Hinsichtlich des Vergleichs der verschiedenen Netztechnologien ist Folgendes festzuhalten:

- Die wesentlichen Unterschiede bei der Nachhaltigkeitsbetrachtung der Netztechnologien ergeben sich aus der Anzahl der aktiven Komponenten im Netz und deren Leistungsaufnahme. So beschränken sich beispielsweise bei FTTH-Netzen

¹⁰⁴ Vgl. <https://www.elektronik-kompodium.de/sites/kom/1507281.htm>

¹⁰⁵ https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/DG/ag-digitale-netze-bausteine-netzinfrastrukturen-gebaeude.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt abgerufen am 15.10.2023.

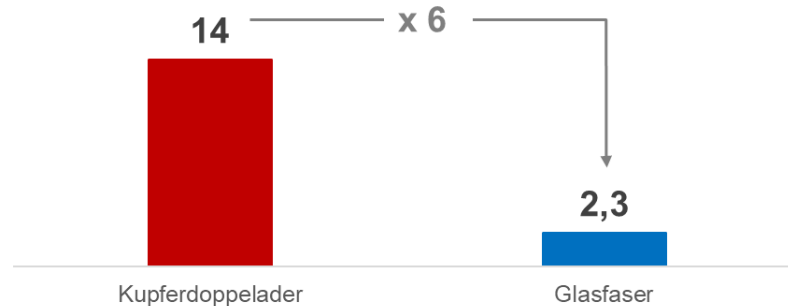
die aktiven Komponenten auf das im POP verbaute aktive Equipment und den Router beim Kunden. Im Vergleich dazu benötigen FTTB-, aber auch FTTC- und HFC-Netze zusätzlich noch aktive Technik zwischen POP und CPE. Die sonstigen aktiven Komponenten betreffen insbesondere die Klimatisierung der POPs sowie die unabhängige Stromversorgung (USV) und Sicherheitstechnologie.

- Die passiven Komponenten der unterschiedlichen Netztechnologien in den Zugangnetzen unterscheiden sich weniger stark als die aktiven. POPs sind jeweils physische Gebäude mit 6–15m² Fläche, während die übrigen Netzverteiler oberirdisch in Multifunktionsgehäusen (MFG) oder unterirdisch in Schächten entlang der Netztrassen oder in den Gebäuden verbaut sind und wenig Flächen- und Materialverbrauch aufweisen.
- Die Netze selbst unterscheiden sich primär in Bezug auf das Material der Signalleitungen selbst – zum einen Kupfer, zum anderen Glas. Da ein Nachhaltigkeitsvergleich bei den passiven Netzen primär auf neu verlegtes Material abstellen kann und zudem neue Leitungstrassen fast ausschließlich in Glasfaser ausgeführt werden, findet eine Auseinandersetzung mit den Materialunterschieden zwischen kupferbasierten Leitungen (z. B. Kupferdoppelader oder Koaxialkabel) und Glasfaser in den aktuelleren Studien kaum statt. Eine Studie von Corning¹⁰⁶ kommt zu dem Ergebnis, dass der CO₂-Fußabdruck der Produktion einer Kupferdoppelader mit 0,5 mm Durchmesser mit 14 kg CO₂-Äquivalent pro Kilometer etwa sechs Mal so hoch ist, wie der eines Glasfaserkabels, dessen CO₂-Fußabdruck die Studie mit 2,3 kg angibt. Die wichtigsten Treiber für den CO₂-Ausstoß bei der Glasfaserproduktion sind laut Corning der Stromverbrauch (70–80 %) und Material (15–20 %). Nicht berücksichtigt sind bei diesem Vergleich die hohen Schadstoffe, die bei der Primärgewinnung von Kupfer anfallen. Für Sekundärgewinnung aus recyceltem Material ist die Bilanz von Kupfer deutlich besser – die wesentlichen Emissionen sind hierbei auf den Energiebedarf für das Recyceln zurückzuführen¹⁰⁷.

¹⁰⁶ Corning (2023).

¹⁰⁷ ifeu-Institut für Energie- und Umweltforschung (2007).

Abbildung 4-11: Vergleich der Produktionsemissionen von Kupferdoppelader und Glasfaser in kg CO₂e/km

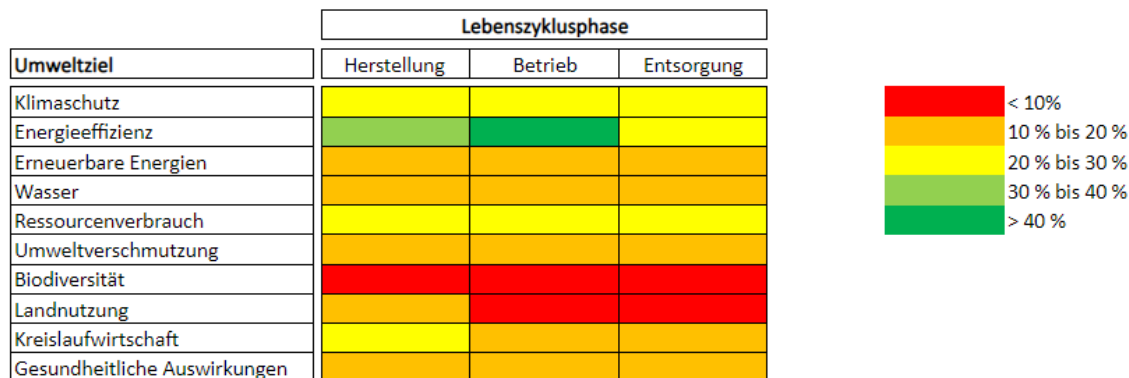


Quelle: Eigene Darstellung nach Corning (2023), S. 4.

Die maßgeblichen Unterschiede ergeben sich im Hinblick auf neu zu legende Netze daher bei den Legemethoden, zumindest im Hinblick auf Scope 1 und 2 (siehe Tabelle in Kapitel 3.1). Für eine erweiterte Bewertung, bei der auch Scope-3-Effekte berücksichtigt werden, müssten für die unterschiedlichen Materialien, Produktionsarten und Hersteller die jeweiligen nachhaltigkeitsrelevanten Daten in vergleichbarer Datenqualität und Granularität vorliegen. Da entsprechende Daten aber derzeit nicht unabhängig erhoben und veröffentlicht werden, müssten für eine Erhebung von Scope-3-Effekten die entsprechenden Daten individuell erhoben werden. Neben dem damit verbundenen, hohen Zeitaufwand wären die Ergebnisse von individuellen Herangehensweisen und Annahmen geprägt, was die Vergleichbarkeit erschweren würde.

Hinsichtlich der Auswirkungen auf die Umweltziele liegt der Fokus in der Literatur auf dem Betrieb. Dies ist insofern folgerichtig, als dass 90 % der THG-Emissionen von Telekommunikationsnetzen in der Nutzungsphase, d. h. im Betrieb anfallen (vgl. Bitkom 2020, S. 23).

Abbildung 4-12: Literaturübersicht drahtgebundener Netze



Quelle: Eigene Darstellung.

Anmerkung zur Interpretation der Abbildung: siehe Abbildung 4-1.

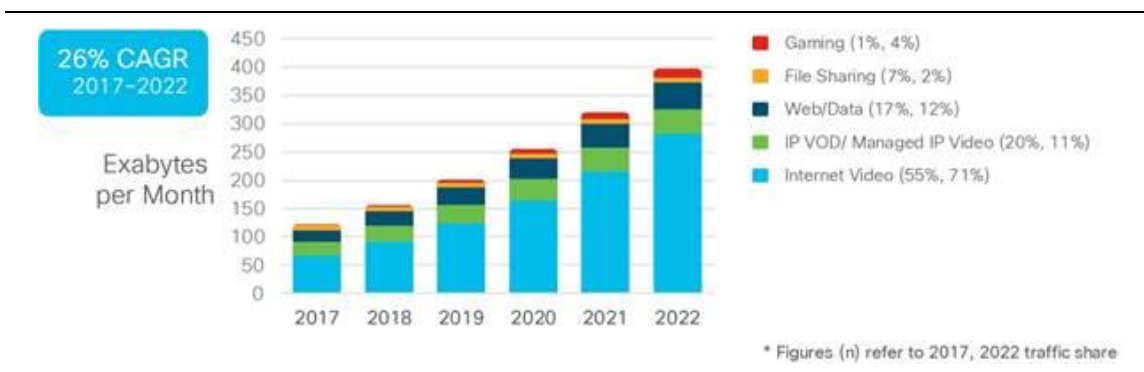
Der Energiebedarf und die THG-Emissionen von drahtgebundenen Netzen fallen im Vergleich zu anderen digitalen Infrastrukturen beim Betrieb geringer aus (vgl. u. a. Bitkom (2020); Godlovitch et al. (2022)).

Bordage et al. (2021, S. 42) gehen bei ihrer, auf ökologische Indikatoren fokussierten LCA-Analyse der europäischen IKT-Technologie weiter als andere Studien und berücksichtigen dabei auch Scope-3-Dimensionen. Sie weisen darauf hin, dass insbesondere der Materialverbrauch (besondere Metalle und seltene Erden) problematisch sind. Dabei entfallen die mit Abstand größten Effekte auf Endverbrauchergeräte. Auch der für den Bereich Festnetz festgestellte Materialverbrauch bezieht sich zum größten Teil auf die Router und nicht auf die Komponenten in der NE3.

Hinsichtlich des Energieverbrauchs wird erwartet, dass er für drahtgebundene Netze von 4,96 TWh/a im Jahr 2020 auf 5,82 TWh/a im Jahr 2025 ansteigen wird (vgl. Grünwald/Caviezel 2022, S. 67 ff.). Einer der Hauptfaktoren für diesen Anstieg im Energiebedarf im ITK-Sektor sind die exponentiell wachsenden Datenvolumina in den globalen Netzen. Die jährlichen Wachstumsraten im Durchschnitt der vergangenen 8 Jahre liegen hier bei über 25 % für Festnetze¹⁰⁸. Trotz signifikanter Verbesserung der Energieeffizienz in netzinternen Rechenzentren und den Netzen steigt der Gesamtenergieverbrauch daher weiter an. Eine Analyse¹⁰⁹ der Datenvolumina zeigt, dass ein Großteil der Daten und des Volumenwachstums auf Videostreaming zurückzuführen ist.

¹⁰⁸ Statista (2024).
¹⁰⁹ Cisco (2018).

Abbildung 4-13: Globaler IP-Verkehr nach Anwendungskategorie



Quelle: Cisco VNI Global IP Traffic Forecast, 2017–2022.

Dabei enthält die Prognose von Cisco für 2022 rund 60 % Videostreaming in HD- und nur 22 % in UHD-Auflösung. Es ist davon auszugehen, dass sich das Wachstum des Anteils von Videostreaming an den globalen Datenvolumen durch die Migration zu UHD abermals beschleunigen wird.

Zu einem ähnlichen Ergebnis kommt der Vergleich einzelner Aktivitäten im Internet in Bezug auf deren CO₂-Emissionen in der Gegenüberstellung mit den Emissionswerten einer Autofahrt über 10 km. Bemerkenswert ist hier neben dem hohen Wert insbesondere der Emissionswert für eine einzelne Bitcoin-Transaktion, die laut der Analyse einer Autofahrt von über 200 km entspräche.

Tabelle 4-3: Durchschnittliche CO₂-Emissionen (in g) verschiedener Internetprozesse

Prozess	CO ₂ -Emission (in g)
Eine Google-Suchanfrage	0,2
Eine Spam-E-Mail	0,3
Eine E-Mail ohne Anhang	4
Eine E-Mail mit angehängtem Foto	30
Eine Stunde Video streamen oder Videokonferenz	400
Eine Bitcoin-Transaktion	313.000
10 km Autofahren	1.500

Quelle: Statista 2023, <https://de.statista.com/infografik/26873/co2-vergleich-dsl-und-glasfasernetz/> (zuletzt abgerufen: 07.11.2023).

The Shift Project¹¹⁰ analysiert die Problematik des steigenden Energiebedarfs infolge massiven Datenwachstums und schlägt unter anderem vor, einen „Digital Governance Framework“ für Europa zu entwickeln, um damit die Grundlage für eine nachhaltige Entwicklung des ITK-Sektors zu legen. Dazu gehören Fragen der Priorisierung einzelner essenzieller Dienste (z. B. Gesundheit, Verkehr) und damit auch Fragen der Netzneutralität sowie die Rolle von OTT-Streaming-Diensten, die für einen Großteil des Datenvolumens in den Netzen verantwortlich sind. Entsprechend sind hierzu neben Regierungen, Regulierungsbehörden und Netzbetreibern auch die Öffentlichkeit zu involvieren und zu sensibilisieren.

Im Folgenden werden die zentralen Elemente der physischen Infrastrukturen in ihren einzelnen Lebenszyklusphasen näher betrachtet. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf den Komponenten des Zugangsnetzes. Exemplarisch wird auf Glasfasernetze abgestellt, weil diese Netze aktuell im Aufbau sind.

4.2.2.1 Errichtung

POP-Standorte

Bei der Errichtung von POP-Standorten werden mehrere Nachhaltigkeitsaspekte berührt. Im Vordergrund steht dabei der Ressourcenverbrauch, sowohl in Bezug auf das eingesetzte Material als auch hinsichtlich des Maschineneinsatzes bei Herstellung und Errichtung der Gebäude, inklusive dem Transport von Material und der Entsorgung von Aushub oder der fachgerechten Entsorgung von Abfallstoffen wie Asphalt.

Auch der Flächenverbrauch von POP-Standorten ist zu berücksichtigen, wobei er mit 6–15 m² pro Standort verhältnismäßig gering ausfällt und diese in urbanen Gebieten oftmals in bestehenden Gebäuden errichtet werden können.

Neben der Gebäudehülle und der Versorgungstechnik ist im Zusammenhang mit POPs auch die aktive Netztechnik nachhaltigkeitsrelevant. Der regelmäßige Austausch der aktiven Netzkomponenten (alle 5–10 Jahre) wirkt sich auf den Material- und Ressourcenverbrauch aus. Gleichzeitig haben signifikante Fortschritte bei der Energieeffizienz in den vergangenen Jahren aber auch die Nachhaltigkeit des Betriebs positiv beeinflusst.

Keine der derzeit vorliegenden Studien beschäftigt sich mit der Errichtung, dem Rückbau oder der Wiederverwertung von Materialien im Zusammenhang mit POP-Standorten. Da aber sowohl das Material der Gebäudehülle (Beton, Stahl) als auch der Gestelle/Racks und die aktiven Komponenten (Klimatisierung, Stromversorgung (USV)) mit denen eines Rechenzentrums durchaus vergleichbar sind, könnte eine Aufstellung anhand etablierter Vergleichswerte für Rechenzentren vorgenommen werden.

¹¹⁰ The Shift Project (2021).

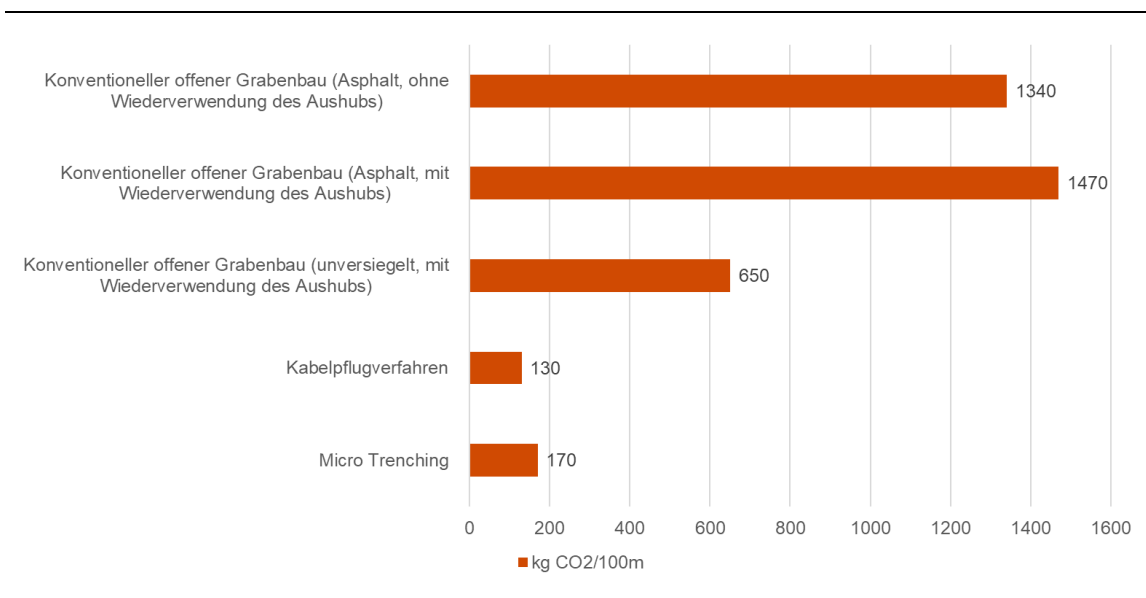
Die derzeit bestehende Forschungslücke in Bezug auf Rückbau und Wiederverwertung von Material aus POP-Standorten sowie für Festnetzkomponenten im Allgemeinen sollte behoben werden.

Zugangsnetze

Bei der Errichtung von Übertragungsleitungen sind mehrere Aspekte zu berücksichtigen. Neben der Herstellung und den Logistikaufwänden in Bezug auf die verbauten Materialien – im Wesentlichen Kabelschutzrohre, Glasfaserkabel und Zubehörmaterial wie Muffen, Schächte etc. – fallen insbesondere bei der Legung der Netze Treibhausgasemissionen an.

Rambech/Vandenbussche (2022) berechnen in ihrer Studie den CO₂-Fußabdruck verschiedener Legemethoden¹¹¹ von Glasfaser in den Zugangsnetzen. Sie wählen hierfür einen Lebenszyklusanalyse-Ansatz (LCA) und fokussieren sich auf relevante Parameter der Legemethoden wie z. B. das Volumen des Grabens, die Wiederverwertung von Aushub und die Art des Treibstoffs der benötigten Maschinen. Sowohl direkte als auch indirekte Treibhausgasemissionen werden berücksichtigt, wobei die indirekten Emissionen sich auf Aktivitäten beziehen, die mit der Produktion von Materialien (z. B. Sand, Fugenmasse, Asphalt), Transport und anderen relevanten Emissionen vor der Arbeit am Glasfaser-Baustandort zusammenhängen.

Abbildung 4-14: THG-Emissionen verschiedener Legeverfahren in kg CO₂/100m



Quelle: Eigene Darstellung nach Rambech/Vandenbussche (2022), S. 11 ff.

¹¹¹ Rambech/Vandenbussche (2022) betrachten Micro-Trenching, eine Methode, bei der schmale Furchen in Straßenoberflächen eingefräst werden, Kabelpflug, bei dem ein spezialisiertes Gerät verwendet wird, um Kabel direkt im Erdreich zu legen, sowie konventionelle Grabenbauverfahren mit versiegelter und unversiegelter Oberfläche im städtischen und ländlichen Bereich.

Laut Rambech/Vandenbussche (2022) variiert der CO₂-Ausstoß je Legemethode erheblich. Techniken wie Micro-Trenching und Kabelpflugverfahren verursachen insbesondere aufgrund ihres weniger invasiven Charakters und des geringeren Bedarfs an neuen Füllmaterialien deutlich geringere Emissionen als konventionellere Methoden¹¹².

Zu einem ähnlichen Ergebnis kommt Solivan (2015) in seiner Betrachtung verschiedener Glasfaser-Legeverfahren. Die Anforderungen an die Tiefe der Gräben beeinflussen die Emissionen, indem sie das zu grabende und wiederzufüllende Volumen sowie die Größe der potenziell zu asphaltierenden Oberfläche verändern. Die Emissionen, die durch Transport und Maschinen verursacht werden, sind hingegen relativ begrenzt. Der Übergang zu Technologien mit niedrigen oder keinen Emissionen (z. B. Biodiesel, Elektrizität) kann zu weiteren, wenn auch begrenzten Emissionsreduktionen führen. Nach Rambech/Vandenbussche (2022) und Solivan (2015) liegen die größten Möglichkeiten zur Reduktion der Emissionen in:

- der Verringerung des Einsatzes von (und der Legung in) Asphalt,
- der Wiederverwendung von Aushub,
- und einer Reduzierung der Graben-Dimensionen.

Die Studienlage zeigt auf, dass mindertiefe Legung zu einer besseren CO₂-Bilanz führt als die konventionellen Verfahren.¹¹³ Die von Experten aus verschiedenen Branchenverbänden erarbeitete und 2023 veröffentlichte DIN 18220 soll den Einsatz von Trenching in Deutschland erhöhen. Durch eine Standardisierung der Verfahren soll insbesondere das Risiko von Folgeschäden am Straßenkörper reduziert und dadurch die Akzeptanz seitens der Genehmigungsbehörden verbessert werden.

Verteiler

Keine der vorliegenden Studien beschäftigt sich gesondert mit Nachhaltigkeitsaspekten im Zusammenhang mit Verteilerpunkten.

Die Funktion und der Einsatz von Verteilern ist abhängig von der verwendeten Netztechnologie (FTTC, Glasfaser, Breitbandkabelnetz). Analog zur Betrachtung der Errichtung von POPs kommen bei einer Betrachtung von Verteilern ähnliche Nachhaltigkeitsaspekte zum Tragen, insbesondere der Materialverbrauch und Energieverbrauch bei Produktion, Logistik, Errichtung und Entsorgung.

Nachhaltigkeitsaspekt der Qualitätssicherung beim Netzbau

Obwohl dieser Aspekt von den bisher vorliegenden Studien nicht im Detail behandelt wird, sind Qualitätsaspekte in Bezug auf die Nachhaltigkeit von Kommunikationsnetzen

¹¹² Rambech und Vandenbussche (2022) S. 25.

¹¹³ Rambech und Vandenbussche (2022).

ein zentraler Faktor, der alle Phasen des Lebenszyklus betrifft. Nachfolgend einige Beispiele:

- Qualität von Material und Legung – bei mangelnder Qualität der Legung oder Montage können Schäden an aktiven und passiven Komponenten entstehen, die deren Lebensdauer und Leistungsfähigkeit negativ beeinflussen. Es kann aber auch zum Totalverlust des investierten Kapitals kommen, z. B. wenn falsche Legung oder Qualitätsmängel beim Material dazu führen, dass in das verlegte Leerrohr kein Kabel eingeblasen werden kann. Muss ein Netz dann ganz oder teilweise neu verlegt werden, fallen nicht nur die Kosten, sondern auch die negativen Umwelteffekte für diesen Abschnitt doppelt an. Dasselbe gilt für Lege- oder Materialmängel, die dazu führen, dass ein späterer Austausch eines Glasfaserkabels nicht möglich ist.
- Materialkonzept mit Redundanz – hier besteht ein potenzieller Zielkonflikt zwischen kurzfristiger und langfristiger Betrachtung von Nachhaltigkeit, sowie Nachhaltigkeitsaspekten und wirtschaftlichen Abwägungen. Die Legung von redundanten Leerrohren oder Fasern führt kurzfristig zu höheren Material- und Legekosten und auch zu zusätzlichen Emissionen. Langfristig jedoch sind solche Mehraufwände für Umwelt und Wirtschaftlichkeit immer dann positiv, wenn dadurch zukünftige Aufwände und die damit verbundenen Umwelteffekte vermieden werden können.
- Mangelnde Dokumentation – werden verlegte Leitungen nicht zeitnah und detailliert dokumentiert, können sie im Bedarfsfall nicht gefunden werden oder laufen Gefahr, bei Tiefbauarbeiten Dritter beschädigt zu werden. Beides führt zu Mehraufwand und zusätzlichen Umwelteffekten.

Im Hinblick auf Qualitätsaspekte bestehen also mehrere Zielkonflikte. In der Praxis werden diese häufig zugunsten der kurzfristigen Wirtschaftlichkeit aufgelöst.

4.2.2.2 Betrieb

POP

Aus Sicht der ökologischen Nachhaltigkeit ist beim Betrieb des POP primär der Energieverbrauch von Bedeutung. Insbesondere die Leistungsaufnahme von Klimatisierung, USV und der aktiven Netztechnik (OLT, Router, Switches, WDM) sind hierbei maßgeblich.

Bei der Ermittlung der Leistungsaufnahme eines POP kommt es in Bezug auf die Netztechnik darauf an, welche Anzahl an aktiven Komponenten benötigt wird und wie hoch deren Verbrauch ist. So benötigt beispielsweise ein PtP-Netz einen OLT-Port (Lasersignal) pro Kunde, während in GPON-Netzen ein Signal am Splitter mehrfach geteilt wird.

Dadurch benötigt ein GPON-Netz in der Regel weniger OLT-Ports und damit weniger aktive Technik. Gleichzeitig benötigen die einzelnen Ports der GPON-Netze im Vergleich zu PtP-Netzen aber mehr Strom, weil die Dämpfungswerte im Netz höher sind. Neben der Netztechnologie ist also auch die individuelle Auslegung der Netze ausschlaggebend. Die Annahmen, die diversen Vergleichsrechnungen zugrunde liegen, können diese individuellen Faktoren nur eingeschränkt berücksichtigen.

Kontinuierliche Fortschritte bei der Steigerung der Energieeffizienz aktiver Komponenten sowie Innovationen bei Kühlungssystemen (z. B. Freikühlung, verbesserte Luftströmungstechniken) haben das Potenzial, den Stromverbrauch von POP-Standorten zukünftig weiter deutlich zu reduzieren. Laut Grobe und Jansen werden Effizienzgewinne beginnen zu stagnieren, da sich die Gesamteffizienz einigen grundlegenden physikalischen Grenzen nähert.¹¹⁴

Die vorliegenden Studien beschäftigen sich nicht isoliert mit dem Energieverbrauch von POP-Standorten, sondern erfassen diesen als Teil der Leistungsaufnahme des gesamten Zugangsnetzes – siehe dazu insbesondere Obermann (2022).

Ein Aspekt, der Einfluss auf die Nachhaltigkeit hat, ist auch hier der lokale Strommix. Sofern am Standort Erneuerbare Energiequellen genutzt werden können, könnten die CO₂-Emissionen bereits vor der vollständigen Umstellung der Stromerzeugung auf Erneuerbare Energien gesenkt werden.

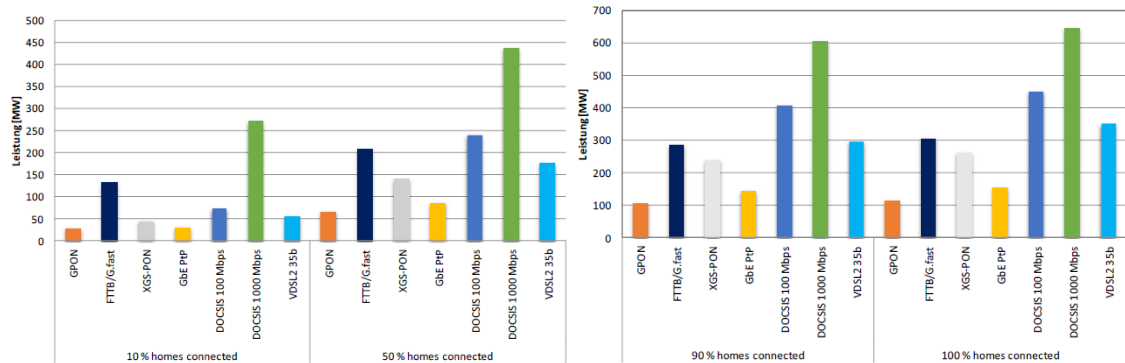
Übertragungsleitungen

Die durch die Übertragung verursachten Stromverbräuche, die dabei sämtliche Netzkomponenten beinhalten, sind vergleichsweise gut erforscht.

Obermann (2022) unterstreicht, dass FTTH-Netze sowohl in Bezug auf den Gesamtstromverbrauch als auch hinsichtlich der vermarkteten Übertragungsgeschwindigkeit von 1 Gigabit pro Sekunde die energieeffizienteste Technologie darstellen. Die Untersuchung zeigt, dass FTTH-Netze in Bezug auf den Gesamtstromverbrauch bis zu 2,6-mal weniger Strom als FTTB-Netze und im Vergleich zu FTTC-Netzen bis zu 3-mal weniger Strom verbrauchen. Der bemerkenswerteste Unterschied tritt jedoch zwischen FTTH und HFC-Netzen auf, wobei FTTH-Netze bis zu 6-mal weniger stromintensiv sind als HFC-Kabelnetze (DOCSIS 3.1) (vgl. Obermann 2022, S. 2).

114 Grobe und Jansen (2020).

Abbildung 4-15: Leistungsaufnahme der jeweiligen Zugangstechnologien für eine Gesamtversorgung Deutschlands (in MW)

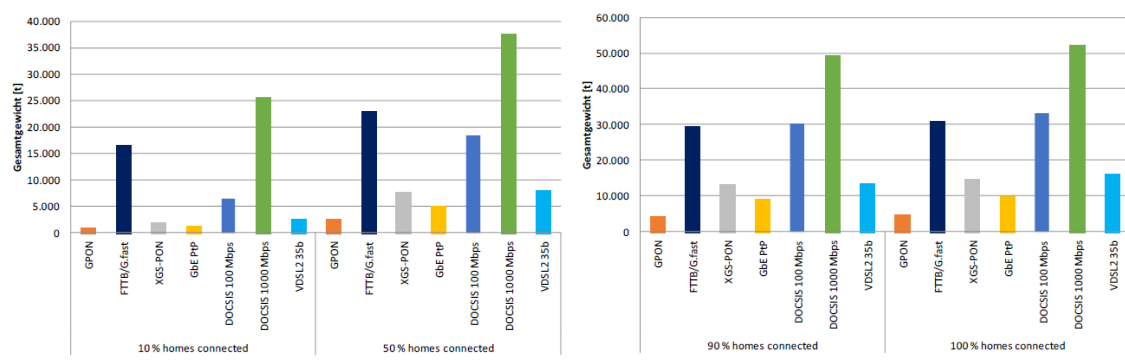


Quelle: Obermann (2022), S. 26.

In einer vertiefenden Analyse der FTTH-Technologien zeigt Obermann (2022, S. 41 f.), dass im Hinblick auf den Stromverbrauch PtP und XGS-PON die wirtschaftlichsten FTTH-Technologien sind. Diese Überlegenheit von FTTH-Technologien erstreckt sich über diverse Szenarien, sei es deutschlandweit, in städtischen, halbstädtischen oder ländlichen Gebieten und gilt für nahezu jeden Auslastungsgrad im Vergleich zu Technologien wie FTTC, DOCSIS und FTTB. Im direkten Vergleich der FTTH-Varianten stellt Obermann fest, dass PON-Technologie in Bezug auf die erhobenen Kennzahlen effizienter ist als PtP (vgl. Obermann 2022, S. 12).

In seiner Studie hat Obermann zudem das Gewicht der Systemtechnik der unterschiedlichen Varianten erhoben, um neben den emissionsrelevanten Kennzahlen auch einen Indikator für den Ressourcenverbrauch zu haben. Ähnlich wie beim Vergleich der Leistungsaufnahme, liegen auch hier die FTTH-Technologien deutlich vor HFC, FTTC und FTTB. Bei den FTTH-Technologien wiederum hat die Systemtechnik eines GPON-Netzes das geringste Gesamtgewicht, gefolgt von PtP und XGS-PON.

Abbildung 4-16: Gesamtgewicht der jeweiligen Zugangstechnologien (in t)

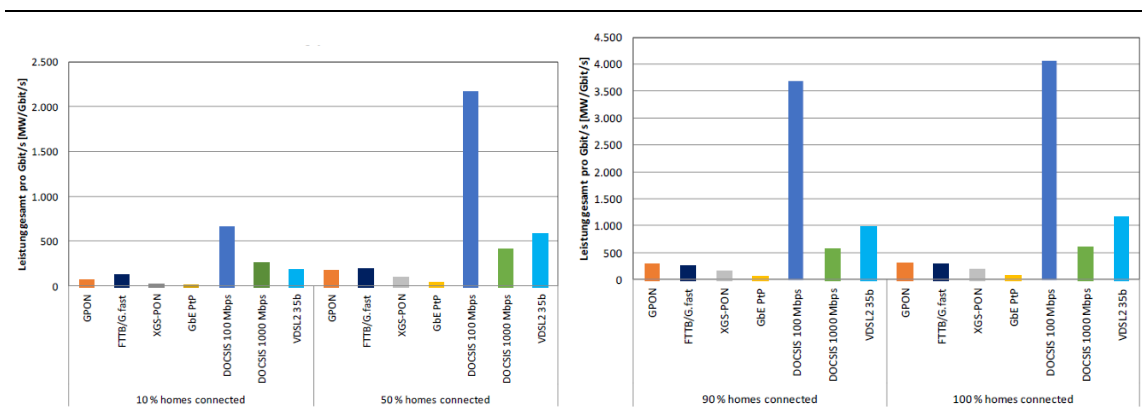


Quelle: Obermann (2022), S. 28.

Obermanns Empirie wurde dahingehend kritisch kommentiert, dass bei seinem Vergleich unterschiedliche Router zum Einsatz kämen, die HFC automatisch schlechter abschneiden ließen. Betrachtet man die Access-Infrastrukturen jedoch ohne CPE, fallen die unterschiedlichen Leistungsaufnahmen der entsprechenden Technologien bei voller Auslastung noch gravierender aus.

Bei den oben genannten Ergebnissen wird jeweils der absolute Stromverbrauch (und das Gewicht) der unterschiedlichen Technologien gezeigt. Setzt man den Stromverbrauch ins Verhältnis zur Übertragungsleistung, verschiebt sich das Bild insofern, als dass die höhere Übertragungsgeschwindigkeit von FTTB im Vergleich zu VDSL sichtbar wird. Die Technologie verbraucht also absolut betrachtet ähnlich viel Strom wie VDSL, bietet dafür aber vielfach höhere Übertragungsgeschwindigkeit.

Abbildung 4-17: Leistungsaufnahme der jeweiligen Zugangstechnologien (in MW/Gbit/s)



Quelle: Obermann (2022), S. 27.

Zu ähnlichen Ergebnissen kommen auch Breide et al. (2021). In ihrer Studie berechnen die Autoren, dass der Stromverbrauch von HFC- und VDSL2-Vectoring-Zugangsnetzen zwischen 1,8- und 2,2-mal höher ist als der von FTTH-Point-to-Point und sogar bis zu 7,5-mal höher als der von FTTH-GPON-Zugangsnetzen (vgl. Breide et al. 2021, S. 28).

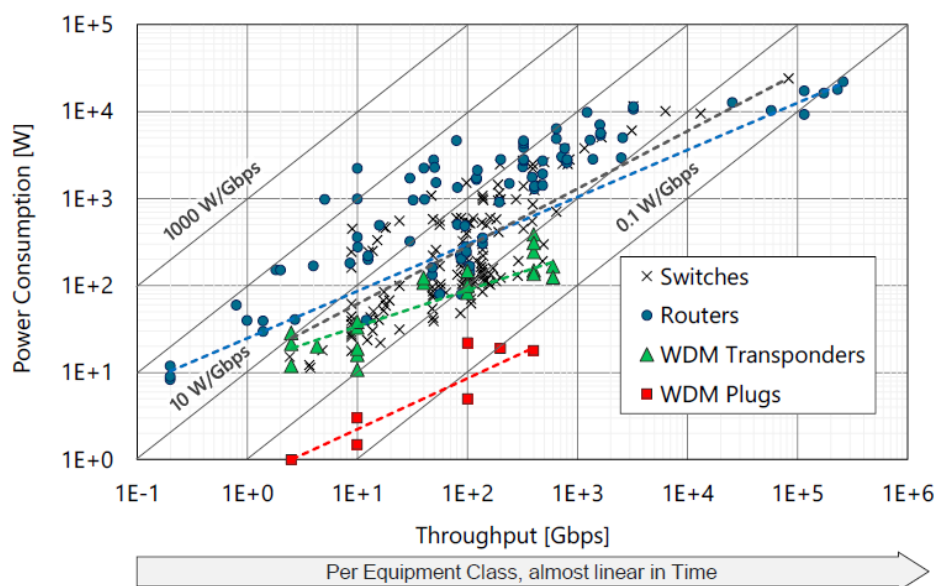
Verteiler

In der vorliegenden Literatur werden die einzelnen Knotenpunkte in der Regel nicht separat betrachtet, sondern fließen als Bestandteil der gewählten Netztechnologie in die Analyse mit ein.

Wie die Studien von Obermann und Breide et al. zeigen, ist insbesondere die Anzahl der aktiven Komponenten in den einzelnen Netztechnologien ausschlaggebend für die Nachhaltigkeitsindikatoren Leistungsaufnahme und Gewicht.

Eine Untersuchung des Lebenszyklus aktiver Komponenten am Beispiel eines PON OLT wurde von Grobe¹¹⁵ durchgeführt. Hierin führt er aus, dass die beachtlichen technischen Fortschritte in Bezug auf Effizienzsteigerung bei den aktiven Komponenten in Rechenzentren und Zugangsnetzen den exponentiellen Anstieg der Datenvolumina und den damit verbundenen Stromverbrauch nicht ausgleichen konnten. Die Gesamtleistungsaufnahme ist also kontinuierlich gestiegen.

Abbildung 4-18: Stromverbrauch von ICT-Komponenten im Kernnetz



Quelle: Grobe (2023).

Grobe zeigt anhand einer LCA auf, dass für den untersuchten PON OLT der Schwerpunkt der Nachhaltigkeitseffekte auf den Betrieb entfällt (während er bei beispielsweise bei Smartphones in der Produktion liegt). Er schlägt als Kennziffer, um den optimalen Zeitpunkt für den Austausch aktiver Komponenten zu ermitteln, das Verhältnis der Treibhausgasemissionen aus 10 Jahren Betrieb und aus der Produktionsphase vor:

$$UPR_{10} = \frac{GWP \text{ of the first 10 years in the use phase}}{GWP \text{ of the production phase}}$$

Grobe kommt unter anderem zu dem Ergebnis, dass der ideale Zeitpunkt für den Austausch aktiver Komponenten von der Nutzungsintensität einerseits und der Verfügbarkeit effizienterer Nachfolgemodelle andererseits abhängt. Für den untersuchten PON OLT kommt Grobe zu dem Ergebnis, dass ein Austausch gegen ein energieeffizienteres Nachfolgemodell auch dann zu einem geringeren UPR_{10} führt, wenn im Energiemix von 100 %

115 Grobe (2023).

Erneuerbaren Energien ausgegangen wird. Im Vergleich dazu führt der Austausch eines Monitors bei 2,5 Stunden Nutzungsdauer pro Tag nicht zu einem geringeren UPR₁₀. Das Ergebnis liegt laut Grobe neben der deutlich geringeren Nutzungsintensität auch an dem geringeren Stromverbrauch des Monitors.

Grobe zeigt auf, dass ein ausgedehnter Nutzungszeitraum für elektronische Netzkomponenten, wie er im Hinblick auf Ressourcenknappheit und Müllvermeidung zunächst ratsam erscheinen mag, in Bezug auf Treibhausgas effekte nicht pauschal sinnvoll ist, sondern vom Stromverbrauch und der Nutzungsintensität der jeweiligen Komponente abhängig gemacht werden sollte.

Vor dem Hintergrund physikalischer Grenzen in Bezug auf weitere Effizienzsteigerungen bei aktiven Komponenten sollte sich auf Basis der Ergebnisse von Grobe zukünftig der Austauschzeitpunkt zunehmend verlängern. Den Überlegungen von Grobe liegt zudem die Annahme zugrunde, dass der Zugang zu Produktionsmaterialien unbegrenzt möglich ist. Schränkt man diese Annahme ein, beispielsweise aufgrund handelspolitischer Rahmenbedingungen oder im Sinne einer verbesserter Ressourceneffizienz, ergeben sich daraus ebenfalls verlängerte Lebenszyklen und die Notwendigkeit für einen Ausbau von Kreislaufwirtschaftsmodellen im ITK-Bereich.

4.2.2.3 Entsorgung

Die Aspekte der Außerbetriebnahme und Entsorgung von Netzwerkinfrastrukturelementen werden in den vorliegenden Studien zu Festnetzen kaum berührt. Dies gilt für die aktiven Netzkomponenten und Gebäudeinfrastrukturen ebenso wie für Übertragungsleitungen, seien es Kupferdoppelader, Kabelnetze oder Glasfasertechnologien. Die materiellen und energetischen Anforderungen ihrer Dekommissionierung und Wiederaufbereitung oder Entsorgung sind Bereiche, die vertiefter Forschung bedürfen.

Wie bereits bei der Errichtung lassen sich aber auch in Bezug auf die Entsorgungsfrage zahlreiche Parallelen zu vorliegenden Erkenntnissen aus Studien zu Rechenzentren ziehen – zumindest für PoPs handelt es sich um ähnliche Komponenten.

4.2.2.4 Indikatoren im Festnetzbereich

Für die Bewertung der Nachhaltigkeit von leitungsgebundenen Netzinfrastrukturen existieren keine spezifischen, etablierten und einheitlichen Indikatoren. In Studien lassen sich trotzdem wiederkehrende Methoden der Ermittlung von Kennzahlen ausmachen. Bei der Errichtung von Übertragungsleitungen berechnen Solivan (2015) und Rambech/Vandenbussche (2022) die THG-Emissionen verschiedener Legeverfahren in kg CO₂/100m. Ein entsprechender Indikator könnte weiter ausdifferenziert werden, zum einen in ein absolutes CO₂-Äquivalent pro 100 Meter und zum anderen in ein CO₂-Äquivalent pro 100 Meter und aktiviertem Anschluss. Während mit der absoluten Zahl eine allgemeine

Vergleichbarkeit – auch international – hergestellt werden kann, zeigt das CO₂e mit dem Fokus auf aktivierte Anschlüsse die THG-Bilanz differenzierter auf.

Für den Betrieb ziehen Breide et al. (2021) und Obermann (2022) den Energieverbrauch bzw. die Leistungsaufnahme im Verhältnis zu einer festgelegten Datenübertragungseinheit einer bestimmten Anzahl an Anschlüssen zu Rate. Um die Energieeffizienz verschiedener Netztechnologien zu erörtern, berechnen beide sowohl die absolute Leistungsaufnahme als auch die Leistungsaufnahme pro Gbit/s und lassen damit eine Annäherung an einen emissionsrelevanten Indikator erkennen.

Obermann betrachtet zudem das Gesamtgewicht der Systemtechnik der unterschiedlichen Netztechnologien, um Aussagen über den Ressourcenverbrauch treffen zu können. Beide Indikatoren (Leistungsaufnahme und Gesamtgewicht) ermöglichen es ihm, die Nachhaltigkeit in diversen Szenarien (deutschlandweit, in städtischen, halbstädtischen oder ländlichen Gebieten) zu berechnen. Gleichzeitig verweist er darauf, dass sowohl das absolute Gesamtgewicht als auch das Gesamtgewicht pro Gbit/s immer weniger relevant wird, je besser das Recycling in der Dekommissionierung ausfällt.

Für die Phase der *Außerbetriebnahme* schlägt Grobe (2023) die Einführung einer Kennziffer vor, die den optimalen Zeitpunkt für den Austausch aktiver Komponenten ermittelt. Sein UPR₁₀ setzt die Treibhausgasemissionen aus 10 Jahren Betrieb und aus der Produktionsphase ins Verhältnis. Er geht damit über eine reine Effizienzbetrachtung hinaus in Richtung eines Lebenszyklus-Indikators.

Tabelle 4-4: Übersicht der Indikatoren im Festnetzbereich

CO ₂ -Äquivalent der Übertragungsleitung pro n Meter (CO ₂ e/m)	<ul style="list-style-type: none"> - Gängige Benchmark, gute Vergleichbarkeit - Enthält keine Aussage über Anzahl der erschlossenen Haushalte oder der Leistungsfähigkeit des Anschlusses
CO ₂ -Äquivalent der Übertragungsleitung pro aktiviertem Anschluss (CO ₂ e/Anschluss)	<ul style="list-style-type: none"> - Gute Vergleichbarkeit - Sagt etwas über die tatsächlichen „Nachhaltigkeitskosten“ (CO₂e) pro Erschließung aus
Leistungsaufnahme der Zugangstechnologie pro n-Anschlüsse absolut	<ul style="list-style-type: none"> - Vergleich der absoluten Leistungsaufnahme je Technologie - berücksichtigt nicht die Leistungsfähigkeit
Leistungsaufnahme der Zugangstechnologie pro n-Anschlüsse und GBit/s	<ul style="list-style-type: none"> - Leistungsaufnahme im Verhältnis zur tatsächlichen Leistungsfähigkeit (übertragene Bitrate) je Technologie
Gesamtgewicht der Zugangstechnologie pro n-Anschlüsse absolut	<ul style="list-style-type: none"> - Sagt etwas über den Ressourcenverbrauch bei Herstellung und Entsorgung je Technologie aus
Gesamtgewicht der Zugangstechnologie pro n-Anschlüsse und pro Gbit/s	<ul style="list-style-type: none"> - Hier wird das Gesamtgewicht ins Verhältnis zur tatsächlichen Leistungsfähigkeit (übertragene Bitrate) je Technologie gesetzt
UPR ₁₀	<ul style="list-style-type: none"> - relevant für aktive Komponenten - Hier wird das CO₂e aus der Produktion mit dem CO₂e aus 10 Jahren Betrieb ins Verhältnis gesetzt

Quelle: Eigene Darstellung.

Für die Ebene leitungsgebundener Netzinfrastrukturen ist der überwiegende Fokus auf Energieeffizienz wenig überraschend, da hier 90 % der THG-Emissionen in der Nutzungsphase, d. h. im Betrieb anfallen (vgl. Bitkom 2020, S. 23). Die für eine ganzheitliche Betrachtung von Nachhaltigkeit notwendige Entwicklung von Indikatoren für weitere Umweltziele wie Ressourcenverbrauch, Umweltverschmutzung oder Landnutzung steht jedoch noch aus. Es besteht an dieser Stelle also weiterer Forschungsbedarf.

4.2.3 Rechtliche und ökonomische Rahmenbedingungen

4.2.3.1 Rechtliche und regulatorische Rahmenbedingungen

Betreiber von leitungsgebundenen Netzen müssen im hier betrachteten Kontext allgemeine Umwelt- und Energieeffizienzvorschriften beachten. Relevante Vorgaben und Richtlinien sind:

- EU-Richtlinien: Auf EU-Ebene gibt es verschiedene Richtlinien und Verordnungen, die sich auf die Energieeffizienz und das Umweltmanagement von Unternehmen auswirken. Die Energieeffizienz-Richtlinie (2012/27/EU) legt Maßnahmen für die Steigerung der Energieeffizienz in der EU fest, um die EU-Energieeffizienzziele bis 2020 und darüber hinaus zu erreichen. Festnetzanbieter sind gefordert, energieeffiziente Technologien in ihren Netzwerken zu verwenden oder Betriebsverfahren zu optimieren. Die Ökodesign-Richtlinie (2009/125/EG) setzt Anforderungen an energieverbrauchsrelevante Produkte, einschließlich Netzwerkausrüstung, hinsichtlich ihrer umweltfreundlichen Gestaltung.
- Branchenspezifische Standards: Institutionen wie die Internationale Fernmeldeunion (ITU) und das Europäische Institut für Telekommunikationsnormen (ETSI) entwickeln Standards und Empfehlungen, die auch Nachhaltigkeitsaspekte für Festnetze berücksichtigen. Der Standard ITU-T L.1300 gibt Empfehlungen für umweltfreundliche Technologien in ICT-Netzwerken. Der Standard ETSI ES 203 228 definiert die Umweltverträglichkeit von ICT-Netzwerkausrüstung.
- Auf europäischer Ebene besteht ein Code of Conduct für Geräte in Breitbandnetzen.¹¹⁶ Die Marktteilnehmer sollen sich an dem im Code of Conduct erwähnten maximalen Energieverbrauchs von Geräten orientieren.
- Deutscher Rechtsrahmen: Während das Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG) primär Emissionen aus industriellen Prozessen regelt, können darin festgelegte Grenzwerte auch für den Betrieb bestimmter Festnetzausrüstungen relevant sein. Das Elektro- und Elektronikgerätegesetz (ElektroG) regelt die Rücknahme und Entsorgung von Elektro- und Elektronikaltgeräten. Netzwerkausrüstungen, die am Ende ihrer Lebensdauer stehen, fallen unter dieses Gesetz.
- Zertifizierungssysteme: Es gibt verschiedene Zertifizierungssysteme und -programme, die Unternehmen dabei unterstützen, ihre Umwelt- und Energieeffizienzmaßnahmen zu dokumentieren und zu validieren. Beispiele hierfür sind das EU-Ecolabel oder das Umweltmanagementsystem EMAS.
- Normung und Standardisierung: Kürzlich ist die DIN 18220:2023-08. Trenching-, Fräs- und Pflugverfahren zur Legung von Leerrohrinfrastrukturen und Glasfaserkabeln für Telekommunikationsnetze in Kraft getreten. In dieser Norm sind

¹¹⁶ https://e3p.jrc.ec.europa.eu/sites/default/files/documents/publications/jrc133473_01.pdf, zuletzt abgerufen am 15.10.2023.

detaillierte Vorgaben und einheitliche Qualitätsanforderungen für moderne Bauverfahren zur Errichtung von Glasfasernetzen definiert.

4.2.3.2 Ökonomische Rahmenbedingungen

Die Betrachtung der derzeitigen ökonomischen Rahmenbedingungen für mehr Nachhaltigkeit beim Ausbau von Festnetzen in Deutschland ergibt ein gemischtes Bild.

Einerseits können die ausbauenden Netzbetreiber bei der Finanzierung ihrer Aktivitäten nicht auf Kapital aus grüner Finanzierung (Green Finance, Green Bonds, ESG-linked Finance etc.) verzichten und berücksichtigen Nachhaltigkeitsaspekte daher zunehmend in Strategie und Planung.

Andererseits schlagen sich Unterbrechungen in den Lieferketten und steigende Kosten (Zinsen, Tiefbau, Material) zunehmend auf das Renditepotenzial der Netzbetreiber nieder. Das erhöht den Druck auf Netzbetreiber, an anderer Stelle Einsparungen zu realisieren.

Die mangelnde Verfügbarkeit von Tiefbaukapazitäten für den Leitungsbau hat zu einem Zuzug von Anbietern aus dem europäischen Ausland geführt, wo der Glasfaserausbau oftmals schon weiter fortgeschritten ist. Während hierdurch wichtige zusätzliche Kapazitäten für den deutschen Markt bereitgestellt werden konnten, ist hierfür meist eine vorgelegte Fortbildung zu den Besonderheiten des Glasfaserausbaus in Deutschland erforderlich. Der regulatorische Rahmen in Deutschland setzt auf Infrastrukturwettbewerb, was zur Errichtung multipler (Glasfaser-)Infrastrukturen zur Versorgung einer Adresse führen kann. Hier besteht ein Zielkonflikt mit dem Wunsch nach verbesserter erhöhter Nachhaltigkeit, da ein solcher Überbau in der Regel bedeutet, dass jeder neue Netzbetreiber erneut Tiefbaumaßnahmen durchführt.

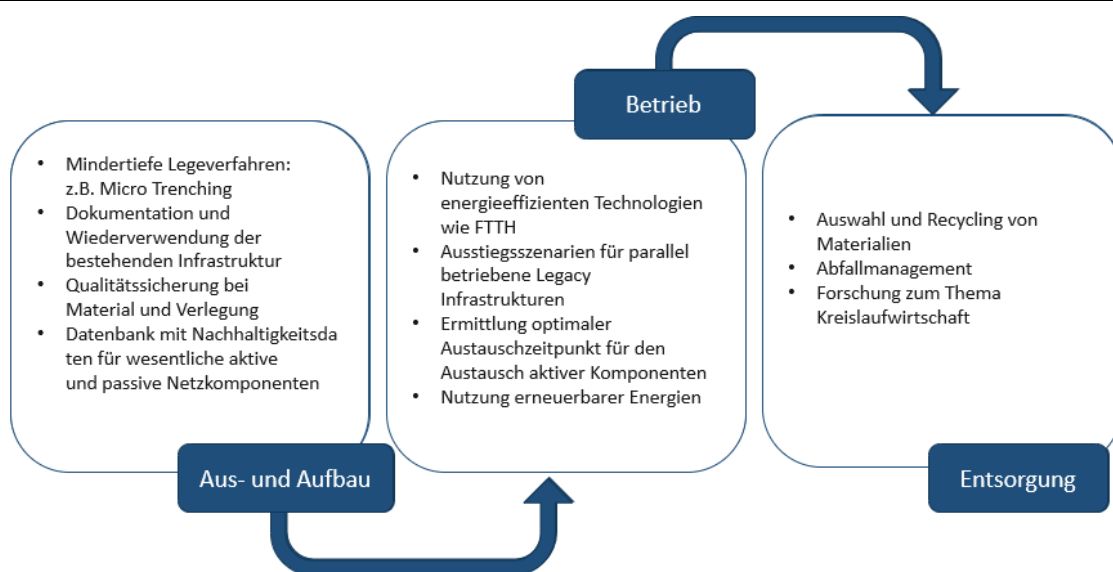
Ebenso gibt es in Deutschland, anders als in den meisten europäischen Ländern, noch keinen Entschluss über eine Abschaltung der Kupferinfrastrukturen. Bei fortgeführtem Parallelbetrieb multipler Infrastrukturen lassen sich die theoretischen Nachhaltigkeitsvorteile von Glasfaser im Festnetz nicht oder zumindest nicht vollständig realisieren.

4.2.4 Praxis

Die Praxis zeigt, dass Nachhaltigkeit auch bei Festnetzbetreibern eine zunehmende Rolle spielt. Hierbei steht der Zugang zu Green Finance im Vordergrund, auch weil sonstige wirtschaftliche Anreize für mehr Nachhaltigkeit im Glasfaserausbau kaum bestehen. Einzelne Netzbetreiber bemühen sich um eine Sensibilisierung der Endkunden hinsichtlich der Nachhaltigkeitsvorteile von Glasfaser.

Die Branche bemüht sich zudem seit Jahren um den breiteren Einsatz von mindertiefen Legemethoden, wobei hierbei neben Nachhaltigkeitserwägungen insbesondere auch die geringeren Kosten sowie die höhere Legegeschwindigkeit eine Rolle spielen. Die im Jahr 2023 hierzu veröffentlichte DIN 18220 soll den Einsatz von Trenching in Deutschland erhöhen und durch eine Standardisierung der Verfahren das Risiko von Folgeschäden am Straßenkörper reduzieren. Wenn dies erfolgreich ist, können dadurch die Emissionen bei der Legung von Glasfasernetzen reduziert werden.

Abbildung 4-19: Maßnahmen für nachhaltigere leitungsgebundene Netze



Quelle: Eigene Darstellung.

4.2.5 Zwischenfazit leitungsgebundene Netze

Die ausgewertete Literatur legt ein Augenmerk auf die Energieeffizienz und konzentriert sich in der Betrachtung des Lebenszyklus primär auf den Bau und den Betrieb von Festnetzinfrastrukturen. Der Forschungsstand und die Verfügbarkeit von Daten in Bezug auf Nachhaltigkeitsaspekte bei Herstellung der Komponenten und Materialien sowie in Bezug auf die Entsorgung von Netzkomponenten ist gering ausgeprägt. Ebenso fokussiert die vorliegende Literatur auf den Aspekt der Treibhausgasemissionen. Andere Umweltziele bleiben weitestgehend unberücksichtigt. Untersucht werden sollten insbesondere die Aspekte der Produktion und Entsorgung der verwendeten Komponenten.

Eine unabhängig erhobene und öffentlich zugängliche Datenbank mit Nachhaltigkeitsdaten für wesentliche aktive und passive Netzkomponenten hätte das Potential, die Berichterstattung zu verbessern, Transparenz und Vergleichbarkeit zu erhöhen und die Netzbetreiber zu entlasten. Insbesondere würde dadurch Nachhaltigkeit im Materialeinkauf erleichtert und nachhaltige Produktion gefördert.

Auch im Bereich der Festnetzkomponenten sollte der Aspekt der Kreislaufwirtschaft durch zusätzliche Forschung gestärkt und anhand konkreter Fallstudien den Unternehmen zugänglich gemacht werden. Dabei können neben Nachhaltigkeits- auch Resilienz-aspekte beleuchtet werden, beispielsweise im Hinblick auf die Sicherung notwendiger Ressourcen.

In Bezug auf die unterschiedlichen Legemethoden sollten auch Nachhaltigkeitsaspekte transparenter gemacht und bei den Entscheidungen berücksichtigt werden. Ähnlich gilt es, gemeinsam mit dem Markt geeignete Maßnahmen zur Sicherung der Qualität beim Netzbau zu entwickeln, da Qualitätsmängel beim Ausbau die grundsätzliche Nachhaltigkeit von Netzen gefährden, nicht nur in Bezug auf umweltrelevante Faktoren.

Bei der Untersuchung der unterschiedlichen Netztechnologien zeigt sich einerseits, dass Glasfasernetze, die als FTTH ausgebaut sind, die energieeffizienteste Technologie darstellen. Allerdings zeigt sich auch, dass FTTB-Netze absolut betrachtet kaum einen Nachhaltigkeitsvorteil gegenüber FTTC-Netzen bieten, da das Signal zwischen PoP und Kundenanschluss durch einen aktiven optisch-elektrischen Wandler transformiert werden muss. FTTB bietet daher in Bezug auf die Leistungsaufnahme allein keine nennenswerten Nachhaltigkeitsvorteile gegenüber z. B. VDSL-Technologie. Ein solcher Vorteil ergibt sich bei FTTB-Netzen erst, wenn man den Stromverbrauch in Relation zur Übertragungsgeschwindigkeit betrachtet. Soll also der Energieverbrauch in den Netzen gesenkt werden, gilt es FTTH auszubauen. Die Rahmenbedingungen für das Upgrade von FTTB-Netzen zu vollständigen FTTH-Netzen in Mehrfamilienhäusern sollten daher systematisch verbessert werden.

Ebenfalls gilt, dass das volle Einsparungspotenzial nur dann gehoben werden kann, wenn weniger effiziente, parallel betriebene Legacy-Infrastrukturen abgeschaltet werden. Hierfür gilt es daher klare Ausstiegsszenarien zu entwickeln.

Nicht zuletzt sollte in Abstimmung mit den Stakeholdern im Markt das Thema Digital Governance adressiert werden, um einem exponentiellen Wachstum der Datenvolumina und damit des Energie- und Ressourcenverbrauchs des ITK-Sektors aktiv entgegenzuwirken.

4.3 Öffentliche Mobilfunknetze: Zugangs- und Kernnetz

4.3.1 Definition

Ebenso wie beim Festnetz kann bei den Mobilfunknetzen zwischen zwei Hauptkomponenten unterschieden werden: dem Zugangsnetz (Radio Access Network) und dem Kernnetz (Core Network). Das Zugangsnetz ist für die Kommunikation zwischen Mobilgeräten und Basisstationen verantwortlich, während das Kernnetz für die Realisierung der

Dienste, die Verwaltung der Ressourcen und Teilnehmer und die Verbindung mit externen Netzwerken verantwortlich ist.

4.3.1.1 Zugangsnetz

Das Zugangsnetz eines Mobilfunknetzes ist die Netzinfrastruktur, die die Kommunikation zwischen Mobilgeräten und dem Kernnetz ermöglicht. Es besteht aus einer Reihe von Komponenten und Technologien, die zusammenarbeiten, um eine nahtlose und zuverlässige drahtlose Kommunikation zu gewährleisten.

Durch die kurzen Innovationszyklen im Mobilfunk und der nachfolgenden Einführung neuer Übertragungstechnologien (2G, 3G, 4G, 5G) wurden technologische Lösungen eingeführt, die den Energieverbrauch pro übertragener Datenmenge absenken und damit die Energieeffizienz steigern (z. B. Sleep Mode). Des Weiteren wurden mit den neuen Übertragungstechnologien komplexe Multiple-Input- und Multiple-Output (MIMO)- Systeme zur Steigerung der Übertragungskapazitäten sowie die Virtualisierung und Cloudifizierung von Rechenvorgängen in den Netzen eingeführt.¹¹⁷

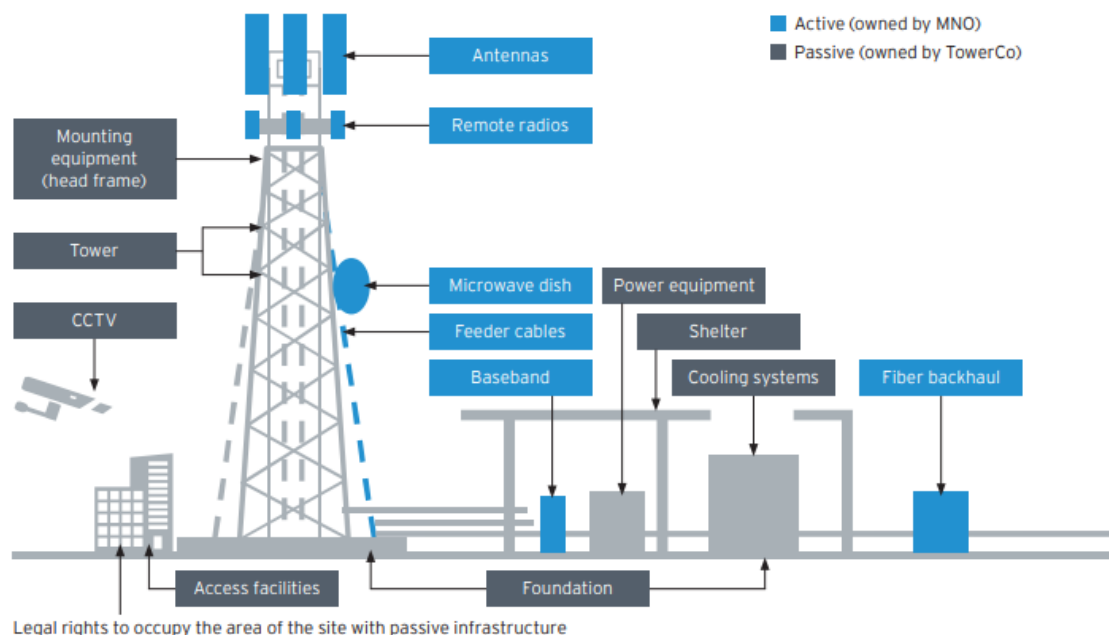
Wesentlich für die Nachhaltigkeit dieser Netze ist der Stromverbrauch, der maßgeblich von der Aussendung der Frequenzen durch die Radio Unit (RU) abhängt. Weitere wesentliche Elemente sind die Radio Remote Head (RRH) und die Basisstation. Die Hauptfunktion der Remote Radio Head besteht darin, das Funksignal zu modulieren, zu verstärken und zu übertragen, bevor es an die zentrale Steuerungseinheit der Basisstation (oft als Baseband Unit oder Control Unit bezeichnet) übertragen wird.

Im Vergleich zu älteren Mobilfunktechnologien, bei denen die Antenne oft unmittelbar mit der Basisstation verbunden war, erlaubt die Verwendung einer Remote Radio Head eine flexiblere Platzierung der Antenne und somit eine optimierte Funkabdeckung und Kapazitätsverteilung.

Abbildung 4-20 zeigt den Aufbau eines Mobilfunkstandorts, in diesem Fall getrennt nach Komponenten, auf denen ein unabhängiger Standortbetreiber (TowerCo) und ein Mobilfunknetzbetreiber (MNO) Zugriff haben.

¹¹⁷ Vgl. Agiwal et al. (2016), Alhumaima et al. (2018).

Abbildung 4-20: Aufbau eines Mobilfunkstandorts



Quelle: Wolf und Loewer (2020), S. 6.

Ein weiteres wichtiges Element eines Standorts ist die Stromversorgung, um alle Komponenten einschließlich der Kühlung von aktiven Netzbestandteilen betreiben zu können. Klimatisierungssysteme sorgen für eine optimale Betriebstemperatur, um die Leistung und Zuverlässigkeit der Komponenten zu gewährleisten.

Die Stromversorgung wird über die Stromnetze gewährleistet. Zusätzlich kann es an einzelnen Standorten eine Notstromversorgung beispielsweise mit Dieselaggregaten geben. Diese Notstromversorgung dient dazu, den Betrieb auch bei Stromausfällen aufrechtzuerhalten.¹¹⁸

Die Backhaul-Anbindung stellt die Verbindung zwischen dem Mobilfunkstandort und dem Kernnetzwerk her. Sie transportiert die Daten zwischen der Basisstation und den Netzwerkelementen im Kernnetzwerk. Die Backhaul-Anbindung kann über Glasfaser, Kupferleitungen oder drahtlose Verbindungen (Richtfunk) erfolgen.

¹¹⁸ In den öffentlichen Mobilfunknetzen ist eine Notstromversorgung an den Standorten der Sendeanlagen die Ausnahme. In kritischen, nicht öffentlichen Funknetzen besteht sie dagegen an den Standorten der Sendeanlage.

4.3.1.2 Kernnetz

Das Kernnetz eines Mobilfunknetzes ist das Zentrum der Kommunikation und Datenübertragung. Hier finden verschiedene Dienstleitungen statt, wie z. B. die Verwaltung der Bewegung von Endgeräten innerhalb des Netzwerks. Es sorgt dafür, dass ein Endgerät nahtlos von einer Funkzelle zur anderen wechseln kann, während es verbunden bleibt. Das Kernnetz überprüft weiterhin die Identität von Nutzern und Geräten, bevor sie auf das Netzwerk zugreifen dürfen. Dies hilft, die Sicherheit zu gewährleisten und unautorisierten Zugriff zu verhindern. Der Auf- und Abbau von Verbindungen für Anrufe, Nachrichten und Datenübertragungen wird im Kernnetz organisiert.

Datenpakete zwischen verschiedenen Netzwerkkomponenten, einschließlich Funkzellen und dem externen Internet, werden durch das Kernnetz weitergeleitet. Schließlich werden dort Daten über die Nutzung von Diensten und Ressourcen gesammelt, um Abrechnungsdaten zu generieren und Gebühren entsprechend festzulegen.

Es besteht aus verschiedenen Komponenten wie dem Home Subscriber Server (HSS), einer Datenbank, die die Abonnenteninformationen, einschließlich Authentifizierungsdaten, Standortdaten, Dienstprofilen und Zugriffsrechten speichert und verwaltet. ¹¹⁹

Zur Weiterleitung des Datenverkehrs werden Netzvermittlungsknoten (Network-Nodes) benötigt, *„an denen je nach Notwendigkeit Switche, Router, oder bei Übergängen in neue Netze auch Gateways zum Einsatz kommen. [...] Die Aggregationsnetze sind häufig als verknüpfte Ringe ausgelegt und dem Funkzugangnetz unmittelbar nachgelagert.“*¹²⁰

4.3.2 Aspekte der ökologischen Nachhaltigkeit

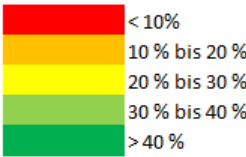
In Bezug auf die Nachhaltigkeit liegt der Schwerpunkt der veröffentlichten Studien auf dem Betrieb der Infrastruktur und deren Energieverbrauch (vgl. Abbildung 4-21).

¹¹⁹ 3GPP (2021), S. 23 ff.

¹²⁰ Stobbe et al. (2023), S. 115.

Abbildung 4-21: Literaturübersicht Mobilfunk

Umweltziel	Lebenszyklusphase		
	Herstellung	Betrieb	Entsorgung
Klimaschutz	30 % bis 40 %	30 % bis 40 %	20 % bis 30 %
Energieeffizienz	30 % bis 40 %	> 40 %	20 % bis 30 %
Erneuerbare Energien	20 % bis 30 %	20 % bis 30 %	10 % bis 20 %
Wasser	10 % bis 20 %	10 % bis 20 %	10 % bis 20 %
Ressourcenverbrauch	20 % bis 30 %	20 % bis 30 %	20 % bis 30 %
Umweltverschmutzung	10 % bis 20 %	10 % bis 20 %	10 % bis 20 %
Biodiversität	10 % bis 20 %	10 % bis 20 %	10 % bis 20 %
Landnutzung	< 10 %	< 10 %	< 10 %
Kreislaufwirtschaft	20 % bis 30 %	20 % bis 30 %	20 % bis 30 %
Gesundheitliche Auswirkungen	10 % bis 20 %	10 % bis 20 %	10 % bis 20 %



■ < 10%
■ 10 % bis 20 %
■ 20 % bis 30 %
■ 30 % bis 40 %
■ > 40 %

Quelle: Eigene Darstellung.

Anmerkung zur Interpretation der Abbildung: siehe Abbildung 4-1.

Pino (2017) analysiert die Umweltwirkung eines Mobilfunkkernnetzes auf Basis einer Lebenszyklusanalyse, beschränkt sich aber letztlich auf den Server der Infrastruktur. Nach den Ergebnissen dieser LCA-basierten Studie beträgt das globale Erwärmungspotenzial des Kernnetzes für 26 Millionen Teilnehmer für ein Jahr fast 466 Tonnen CO₂-Äquivalente oder etwa 18 g CO₂-Äquivalent pro Anschluss. Die Nutzung des Kernnetzwerks liefert dabei einen sehr geringen Beitrag zu den Umweltauswirkungen einer Person. Dennoch liegt die größte Belastung in den Kategorien Süßwasserökotoxizität (0,00126 %), Human-toxizität mit krebserzeugender Wirkung (0,00127 %) und nicht krebserregender Wirkung (0,00102 %) sowie Wasserverbrauch (0,00122 %).

Eine umfassende Analyse bieten Stobbe et al. (2023). Sie schließen alle Lebenszyklusphasen in die Betrachtung ein, fokussieren aber auf die Umweltwirkungen von Treibhausgasen.

Wesentlich ist hier auch die Entwicklung der Mobilfunktechnologie von 2G hin zu heute 5G und in naher Zukunft 6G. Die Nachhaltigkeit der verschiedenen Generationen, insbesondere hinsichtlich des Energieverbrauchs, unterscheidet sich zum Teil wesentlich. Bei der noch ausstehenden Standardisierung von 6G wird das Ziel verfolgt, die Nachhaltigkeit noch stärker als bei 5G von Anfang an mitzudenken. In welche Richtung dann künftig Effizienzgewinne in den Übertragungstechnologien mit den ökologischen Folgen des Einsatzes von KI in den Netzen gehen, bleibt abzuwarten.

Weitere Parameter, die die Umweltbilanz von Mobilfunknetzen beeinflussen, sind die Netzkapazität, der Gerätebestand, das Energiemanagement, sowie der Strommix der Energiequelle.¹²¹ Auch die Mitnutzung von Mobilfunkstandorten im Zugangsnetz (passives Infrastruktur-Sharing) oder das aktive Infrastruktur-Sharing (Mitnutzung von

¹²¹ Stobbe et al. (2023), S. 47 ff.

Frequenzen) beeinflussen den Energie- und Ressourcenverbrauch, weil sie ggf. den (vollständigen) doppelten Ausbau von Infrastrukturen vermeiden können.

4.3.2.1 Errichtung

Die Studienlage hinsichtlich der Errichtung von Mobilfunknetzen ist nicht ausgeprägt. Pino (2017) analysiert das Kernnetz nach einem LCA-Modell mit Hinblick auf folgende Umweltwirkungen: Erschöpfung der abiotischen Ressourcen, Versauerung, Klimawandel; Klimawandel inkl. Kohlenstoff, Ökotoxizität von Süßwasser, Eutrophierung von Süßwasser, Meereseutrophierung, Terrestrische Eutrophierung, Humantoxizität mit Auswirkungen auf Krebs, Humantoxizität: Nicht krebserregende Wirkungen, Ionisierende Strahlung, Ozonabbau, Feinstaub / respiratorische anorganische Stoffe, Photochemische Ozonbildung und Wassermangel.

Wie der Autor selbst ausführt, unterliegt die Studie allerdings erheblichen Unsicherheiten, insbesondere in Hinblick auf die verwendeten Daten, die keine Primärdaten darstellen.¹²²

Bordage et al. (2021) untersuchen für die EU 28 mittels einer Lebenszyklusanalyse die ökologischen Auswirkungen digitaler Infrastrukturen sowie große Rechenzentren bis zu Servern kleiner Unternehmen. Im Bereich des Mobilfunks erfolgt die Analyse nicht getrennt nach Mobilfunkgenerationen und nicht für die Nutzungsphase. Für den Bereich Errichtung werden Werte für verschiedene Umweltauswirkungen (ähnlich denen in Pino (2017), siehe oben) pro übertragenem GB und pro Endnutzer errechnet.¹²³

Eine Berechnung der Herstellungsphase liefern Stobbe et al. (2023), allerdings beschränkt auf den CO₂-Ausstoß des Zugangsnetzes.

Insgesamt bleibt das Gesamtbild an dieser Stelle also lückenhaft. Eine umfassende Analyse aller Bestandteile der Errichtung eines Mobilfunknetzes ist noch nicht verfügbar, da entweder nur Teilbereiche betrachtet werden oder der Zugang zu entsprechenden Daten unbefriedigend ist.¹²⁴

¹²² Pino (2017), S. 23.

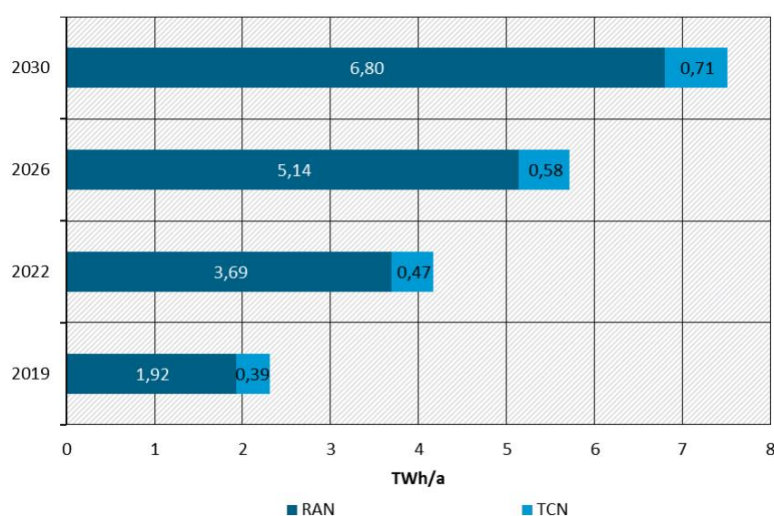
¹²³ Die Berechnungen erfolgten nach ISO 14040:2006 und nach ISO 14044:2006.

¹²⁴ Vgl. Stobbe et al. (2023), S. 32.

4.3.2.2 Infrastruktur und Betrieb

Der Großteil der Studien befasst sich mit dem Energieverbrauch der Netzwerke. Dabei macht der Verbrauch des Zugangnetzes zwischen ca. 70–90 % des Gesamtverbrauchs aus.¹²⁵ Abbildung 4-22 spiegelt die (erwartete) Entwicklung für Deutschland wider.

Abbildung 4-22: Prognose des elektrischen Energiebedarfs in TWh/a der Funkzugangnetze (RAN) und Transportkernetze (TCN) in Deutschland im Basisszenario 2019 bis 2030



Quelle: Stobbe et al. (2023), S. 26.

Es wird gleichzeitig deutlich, dass für den Energieverbrauch des Mobilfunks ein deutlicher Anstieg erwartet wird. Diese Entwicklung findet sich auch in weiteren Studien. So erwarten z. B. Madlener et al. (2020, S. 10) eine starke Zunahme des Energieverbrauchs (bis zu 57 %) in den Rechenzentren in Deutschland durch den Mobilfunkstandard 5G bis 2025 (im Vergleich zum Jahr 2015). Im Mobilfunknetz selbst sind die Baseband Units (BBU) im Zugangnetz die größten Energieverbraucher.¹²⁶

Dieser Anstieg des Stromverbrauchs ist durch den stark steigenden Datenverkehr bedingt, der sich von 6,714 Mrd. GB im Jahr 2022¹²⁷ auf mehr als 124 Mrd. GB im Jahr 2030 erhöhen soll.¹²⁸ Zur gleichen Zeit hat sich die Energieeffizienz in den Netzen in den letzten Jahren erhöht (vgl. Abbildung 4-23 für verschiedene Zugangstechnologien).

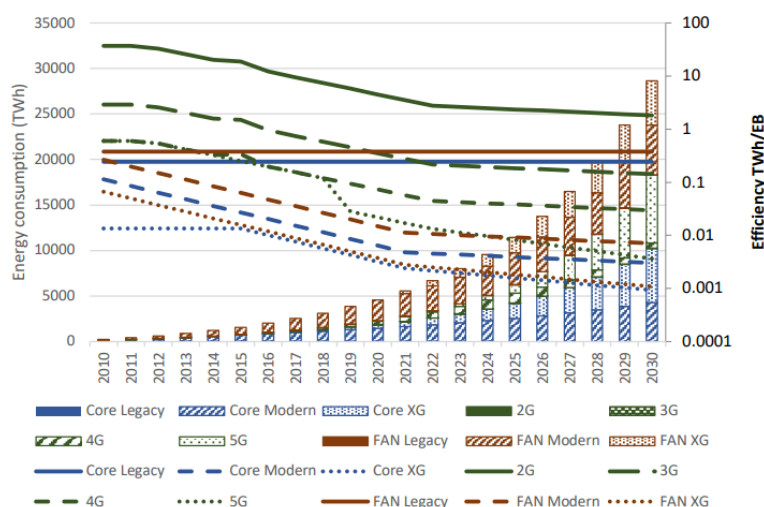
¹²⁵ <https://blog.isa.org/energy-savings-a-key-challenge-and-opportunity-in-mobile-networks>, zuletzt abgerufen am 24.08.2023, [https://www.frontiersin.org/research-topics/54287/energy-efficiency-of-open-radio-access-networks-o-ran#:~:text=The%20radio%20access%20network%20\(RAN,energy%20consumption%20of%20cellular%20networks](https://www.frontiersin.org/research-topics/54287/energy-efficiency-of-open-radio-access-networks-o-ran#:~:text=The%20radio%20access%20network%20(RAN,energy%20consumption%20of%20cellular%20networks), zuletzt abgerufen am 24.08.2023

¹²⁶ Grünwald und Caviezel (2022), S. 65.

¹²⁷ BNetzA (2023), S. 23.

¹²⁸ Vgl. <https://www.deutschland-spricht-ueber-5g.de/informieren/umwelt/wie-viel-energie-verbraucht-5g/>, zuletzt abgerufen am 29.08.2023.

Abbildung 4-23: Energieverbrauch und Effizienz mobiler Zugangstechnologien



Quelle: Wu et al. (2019), S. 45.

Sowohl aus der Literatur als auch aus den geführten Experteninterviews werden zahlreiche Ansätze für Maßnahmen deutlich, die auf eine Steigerung der Energieeffizienz abzielen.

So wird angenommen, dass die Virtualisierung von Netzwerkfunktionen dazu beitragen kann, den Stromverbrauch der BUs zu senken, da diese von der Antenne getrennt werden und die Steuerungsfunktionen in der (Edge-)Cloud vor Ort für mehrere Standorte zentriert werden.¹²⁹ Die Anpassung der Rechenleistung kann bedarfsgerecht an die Verhältnisse vor Ort erfolgen.¹³⁰

Jedoch zeigen Expertengespräche im Rahmen dieser Studie, dass die Wirkung der Virtualisierung von Netzwerkfunktionen nicht eindeutig ist, d. h. sie kann auch gegenüber heutigen, in den Netzen eingesetzten Systemen zu einer Erhöhung des Stromverbrauchs führen.

Eine eindeutige Wirkung auf den Stromverbrauch haben Maßnahmen wie das automatische Aufwachen bzw. Schlafen der Basisstation, einschließlich des Abschaltens.¹³¹ Das zugrunde liegende Konzept besteht darin, dass, da Netzwerke für den Verkehr zu Spitzenzeiten ausgelegt sind, Energie gespart werden kann, indem Basisstationen (teilweise) abgeschaltet werden, wenn sie keine aktiven Benutzer haben oder nur sehr wenig Verkehr auftritt.¹³²

¹²⁹ Mijumbi et al. (2015), S. 1.

¹³⁰ Vgl. auch <https://www.industr.com/de/energieverbrauch-von-mobilfunkbasistationen-deutlich-senken-2647344>, zuletzt abgerufen am 30.08.2023.

¹³¹ Chochliouros et al. (2021), S. 6.

¹³² Chochliouros et al. (2021), S. 4.

Als weitere Möglichkeit zur Steigerung der Energieeffizienz wurde in den Expertengesprächen der Einsatz von Massive MIMO genannt. Massive MIMO zielt darauf ab, die Übertragungseffizienz und Durchsatzkapazität drahtloser Netzwerke durch den Einsatz einer großen Anzahl von Antennen zu erhöhen, um Nutzersignale in räumlich getrennte Strahlen zu bündeln und zu übertragen. Dies führt zu einer besseren Ausnutzung des Übertragungsmediums, reduzierter Interferenz und einer erhöhten Energieeffizienz.¹³³

Unterstützt werden können diese Prozesse durch künstliche Intelligenz (KI). Mithilfe von KI kann der Datenverkehr basierend auf Tageszeit, Wetter, Ereignissen in der Nähe usw. vorhergesagt und geeignete Ruhezeiten für Leistungsverstärker, Transceiver und Basisbandkomponenten festgelegt werden.¹³⁴

4.3.2.3 Entsorgung

Die Entsorgung der Elemente von Mobilfunk ist noch nicht umfassend untersucht. Stobbe et al. (2023, S. 55) erklären dies mit der unzureichenden Datenlage und dem relativ geringen Anteil dieser Phase an der Umweltwirkung. Pino (2017) analysiert das Kernnetz nach einem LCA-Modell (vgl. Abschnitt 4.3.2.1) und somit auch die Entsorgung.¹³⁵

Auch aus den geführten Experteninterviews ergaben sich keine weitergehenden Erkenntnisse für dieses Handlungsfeld.

Anhaltspunkte sind in den Nachhaltigkeitsberichten der Telekommunikationsunternehmen zu finden (vgl. Tabelle 5-1). Allerdings wird hier nicht nach den betrachteten Bereichen getrennt bzw. die Angaben gelten konzernweit. Sofern sich bei einzelnen Unternehmen ein Best-Practice-Beispiel fände, das andere Unternehmen übernehmen könnten, wäre mehr Transparenz und somit eine differenzierte Darstellung hilfreich. Hier ist jedoch zu prüfen, ob durch Transparenz Anreize verloren gehen könnten, entsprechende Maßnahmen zu erreichen. Ein detaillierter Vergleich zwischen den Unternehmen bzw. Infrastrukturen ist nicht möglich, womit unternehmensübergreifende Lernkurven auch nicht bestehen.¹³⁶

¹³³ Rhode & Schwarz (2019), S. 52.

¹³⁴ Crawshaw et al. (2021), S. 20.

¹³⁵ Pino (2017), S. 46.

¹³⁶ Vgl. https://www.cr-bericht.telekom.com/2022/sites/default/files/pdf/cr_de_2022_dt_final.pdf, <https://www.telefonica.de/nachhaltigkeit/reporting.html>, <https://investors.vodafone.com/sites/vodafone-ir/files/2023-05/vodafone-fy23-annual-report.pdf>, https://imagepool.1und1.ag/v2/download/nachhaltigkeitsbericht/1und1-AG_NB_2022_EN.pdf, zuletzt abgerufen am 06.09.2023.

4.3.2.4 Indikatoren zur Bewertung der Nachhaltigkeit

Für die Bewertung von Mobilfunknetzen existieren bereits verschiedene Indikatoren. Die ITU (2015, S. 10 ff.) schlägt zwei Indikatoren zur Energieeffizienz vor:

- Das Verhältnis von Datenvolumen und Energieverbrauch des Netzwerks, gemessen in bit/J
- Energieeffizienz der Mobilfunknetzabdeckung ist das Verhältnis zwischen der vom MNO abgedeckten Fläche und des Energieverbrauchs, gemessen in m²/J

Diese Indikatoren finden sich auch in ETSI (2017, S. 17 ff.).

Wu et al. (2019, S. 1) bezweifeln allerdings die Nützlichkeit einer solchen Metrik und stellen fest: *„Aufgrund der Unterschiede zwischen DC/WANs ist keine Metrik in der Lage, unterschiedliche Systeme zu vergleichen. Stattdessen [...] decken KPIs eine Reihe unterschiedlicher Metriken ab und dienen in erster Linie als Tools zur betrieblichen Verfolgung und Verwaltung der Effizienz im Laufe der Zeit.“*¹³⁷

Stobbe et al. (2023, S. 224 ff.) stellen weitere Indikatoren vor:

- Jährlicher Energiebedarf pro Nutzer
- Wirkungsgrad der Netzteile
- Jährlicher Energiebedarf in Abhängigkeit der Auslastung

Hinsichtlich des letzten Indikators führen die Autoren aus: *„Eine solche Kennzahl wäre interessant. Sie existiert nicht und müsste zunächst spezifiziert werden. Eine grundlegende Voraussetzung ist die Entwicklung eines methodischen Ansatzes zur Messung der Auslastung. Der potenzielle Nutzen der Kennzahl liegt in der Identifizierung der durchschnittlichen Auslastungshöhe der existierenden Technik.“*¹³⁸

Ähnliche Überlegungen gehen dahin, den Energieverbrauch ins Verhältnis zu einem optimalen System zu setzen, wobei unklar ist, wie ein optimales System angesichts unterschiedlicher Topografien und weiterer Unterschiede von Märkten definiert werden kann.

Auch wird von einzelnen Marktteilnehmern die Frage gestellt, ob es sinnvoll sein könnte, den Nutzen der Datenübertragung (z. B. zur Steuerung von Energienetzen, Videoinhalte) zu betrachten.

Die Diskussion bewegt sich hier noch im akademischen Bereich, eine praktische Umsetzung ist noch nicht bekannt. Es besteht an dieser Stelle also weiterer Forschungsbedarf.

¹³⁷ Eigene Übersetzung.

¹³⁸ Stobbe et al. (2023), S. 224 ff.

4.3.3 Rechtliche und ökonomische Rahmenbedingungen

4.3.3.1 Rechtsrahmen

Spezifische rechtliche Vorgaben für ökologische Aspekte der Nachhaltigkeit im Mobilfunk gibt es derzeit weder auf nationaler noch auf internationaler Ebene. Auf internationaler Ebene existieren Standards der ITU, der ETSI und der ISO/IEC, die, wie im letzten Abschnitt beschrieben, auch Empfehlungen für die Mobilfunknetze enthalten.

Daneben unterliegen Mobilfunknetze in Deutschland verschiedenen allgemeinen rechtlichen Vorschriften im Bereich Umweltschutz. Einige der relevanten Gesetze und Regelungen sind:

- Strahlenschutzgesetz (StrlSchG): Das Strahlenschutzgesetz regelt den Schutz von Mensch und Umwelt vor nicht ionisierender Strahlung, zu der auch die elektromagnetischen Felder von Mobilfunkanlagen gehören. Es legt Grenzwerte für die Exposition der Bevölkerung fest und beinhaltet Anforderungen an die Standorte von Mobilfunkanlagen, um die Einhaltung dieser Grenzwerte sicherzustellen.¹³⁹
- Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG): Das Bundes-Immissionsschutzgesetz regelt den Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen, zu denen auch Immissionen von Mobilfunkanlagen zählen. Es enthält Regelungen zur Genehmigungspflicht von Anlagen und den damit verbundenen Umweltauflagen.
- Verordnung über elektromagnetische Felder (26. BImSchV): Diese Verordnung setzt die Grenzwerte des Strahlenschutzgesetzes um und legt technische Regelungen fest, die sicherstellen sollen, dass Mobilfunkanlagen die Grenzwerte einhalten. Dazu gehören Vorgaben zur Messung, Bewertung und Dokumentation elektromagnetischer Felder.
- Baurecht: Im Rahmen des Baurechts müssen Mobilfunkanlagen je nach Größe und Standort genehmigt werden. Die Länder haben teilweise unterschiedliche Regelungen zur Genehmigung von Mobilfunkanlagen.
- Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP): In bestimmten Fällen kann eine Umweltverträglichkeitsprüfung erforderlich sein, insbesondere wenn größere Mobilfunkprojekte geplant sind, die potenziell erhebliche Umweltauswirkungen haben könnten.
- Natur- und Artenschutz: Bei der Planung von Mobilfunkanlagen müssen auch Aspekte des Natur- und Artenschutzes berücksichtigt werden, insbesondere wenn

¹³⁹ Dazu existiert auch eine Selbstverpflichtung der Mobilfunkunternehmen, vgl. <https://www.bmuv.de/pressemitteilung/mobilfunk-und-strahlenschutz-neue-selbstverpflichtung-der-mobilfunkbranche>, zuletzt abgerufen am 30.08.2023.

sich die Anlagen in schützenswerten Gebieten befinden oder Auswirkungen auf Tier- und Pflanzenarten haben könnten.

Die Mobilfunkinfrastruktur ist noch kein Element der EU-Taxonomie. Dies kann zu schlechteren Ratings am Markt führen und sich negativ auf mögliche Investitionen auswirken (siehe nächster Abschnitt).

Neben den rechtlichen Rahmenbedingungen beeinflusst die Frequenzpolitik und -regulierung die ökologische Nachhaltigkeit der Mobilfunknetze. Der Rollout der öffentlichen Mobilfunknetze wird neben eigenen wirtschaftlichen Überlegungen der Netzbetreiber von Versorgungsaufgaben determiniert.¹⁴⁰ Die Versorgungsaufgaben wiederum berücksichtigen Ziele im Telekommunikationsgesetz, wonach eine flächendeckende unterbrechungsfreie Versorgung erzielt werden soll. Über symmetrische Versorgungsaufgaben soll in allen etablierten öffentlichen Mobilfunknetzen eine sehr hohe Versorgung gewährleistet werden. Damit werden der Infrastruktur- und Innovationswettbewerb sowie die Resilienz der Dienste gestärkt. Aus Sicht der ökologischen Nachhaltigkeit stellt sich jedoch die Frage, ob die flächendeckende Verfügbarkeit von drei parallelen Netzinfrastrukturen zwingend ist bzw. ob (verstärkte) Kooperationen, die nach dem regulatorischen Rahmen möglich sind, den Energie- und Ressourcenverbrauch verringern könnten.¹⁴¹

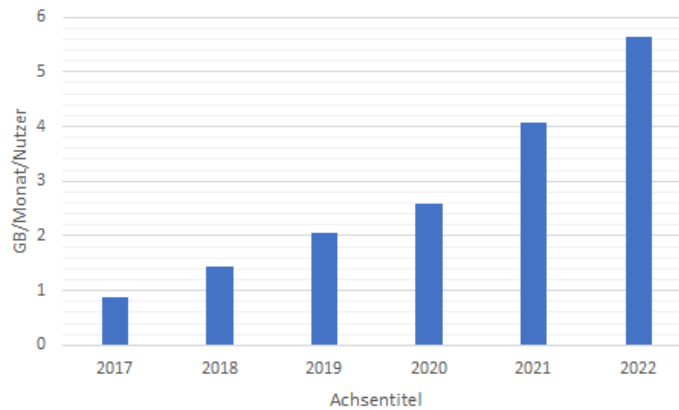
4.3.3.2 Ökonomische Rahmenbedingungen

Die Nachfrage nach drahtlosen Telekommunikationsdiensten, die in öffentlichen Mobilfunknetzen angeboten werden, ist in Deutschland in den letzten Jahren stark angestiegen (vgl. Abbildung 4-24).

¹⁴⁰ Siehe dazu <https://www.wik.org/veroeffentlichungen/veroeffentlichung/nr-470-einfluss-von-versorgungsaufgaben-auf-die-mobilfunkabdeckung-in-der-eu>, zuletzt abgerufen am 30.10.2023.

¹⁴¹ Hier finden bereits entsprechende Tätigkeiten, beispielsweise in grauen Flecken, statt, vgl. z. B. <https://www.telekom.com/de/medien/medieninformationen/detail/mobilfunk-telekom-und-o2-telefonica-graue-flecken-kooperation-1015466>, zuletzt abgerufen am 05.02.2024.

Abbildung 4-24: Monatliches Datenvolumen pro Mobilfunkanschluss in Deutschland in Gigabyte (GB), 2017–2022



Der Wert für das Jahr 2022 ist geschätzt.

Quelle: Eigene Grafik auf der Basis von VATM und Dialog Consult (2022), S. 28.

Trotz dieses hohen Wachstums konnte der Stromverbrauch in den Mobilfunknetzen nahezu konstant gehalten werden.

Dem Stromverbrauch kommt insoweit eine hohe wirtschaftliche Bedeutung zu, weil er ein Bestandteil der Betriebskosten ist. Bei weitgehend stabilen Umsätzen verringern steigende Betriebskosten den Ertrag für die Mobilfunkanbieter, so dass die Anbieter bereits seit Jahren bestrebt sind, den Energieverbrauch abzusenken. In diesen Zusammenhang ist auch die Abschaltung von UMTS einzuordnen. Diese Mobilfunktechnologie hat im Vergleich zu Nachfolgetechnologien einen deutlich höheren Stromverbrauch pro Bit.¹⁴² Mit dem Rollout von 5G versprechen sich die Mobilfunknetzbetreiber eine weitere Steigerung der Energieeffizienz, die aber nicht verhindern wird, dass der Stromverbrauch aufgrund eines exponentiellen Datenwachstums sehr wahrscheinlich ansteigen wird.

Die steigende Nachfrage nach drahtlosen Telekommunikationsdiensten wird dazu führen, dass die Mobilfunknetze verdichtet werden müssen. Ebenso können die technologischen Vorteile von 5G nur im 3,6-GHz-Band vollständig ausgeschöpft werden. Eine verstärkte Nutzung dieses Frequenzbands wird zu kleineren Funkzellen führen und infolgedessen die Anzahl von Mobilfunkstandorten erhöhen.

Die Adressierung der steigenden Nachfrage wird in urbanen und suburbanen Kommunen ohne neue Standorte für Mobilfunksendeanlagen nicht auskommen.¹⁴³ Ob die

¹⁴² Im Vergleich zu 4G etwa um den Faktor 3, im Vergleich zu 5G etwa um den Faktor 8, vgl. Gröger et al. (2021), S. 102.

¹⁴³ Vgl. dazu https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/Studien/StudieZukunftUHF-Band.pdf?__blob=publicationFile&v=2, zuletzt abgerufen am 15.10.2023.

Verdichtung auch in ländlichen Kommunen stattfinden wird, hängt auch davon ab, ob die Mobilfunknetzbetreiber zusätzliche Frequenzen (UHF-Band) unterhalb von 1 GHz einsetzen können. Mit zusätzlichen Frequenzen könnte in Abhängigkeit von der Nachfrageentwicklung (temporär) die Nachfrage ohne Standortverdichtung gedeckt werden. Damit würde sich der Energie- und Ressourcenverbrauch (Herstellung, Betrieb, Entsorgung) verringern.

Die bereits von den Marktteilnehmern verfolgten Ziele der Steigerung der Energieeffizienz zahlen somit unmittelbar auch auf die Umweltziele der EU und Deutschlands ein. Komplementiert werden die Maßnahmen durch ein verbessertes Ressourcenmanagement und eine Abfallreduktion, die ebenfalls Betriebskosten bei den Mobilfunknetzbetreibern senken. Insgesamt üben die Mobilfunknetzbetreiber (weltweit) Druck auf die Hersteller aus, die Energieeffizienz der eingesetzten Hard- und Software sowie die Umweltverträglichkeit der verwendeten Materialien (Recycling) zu verbessern.

Neben den Mobilfunknetzbetreibern spielen beim Rollout der Mobilfunknetze die Funkturmgesellschaften (Tower Companies, kurz TowerCos) eine maßgebliche Rolle. Sie sind für die Errichtung der passiven Infrastrukturen im Zugangsnetz verantwortlich.

Da die in Deutschland tätigen TowerCos mittlerweile unabhängig von den Mobilfunknetzbetreibern agieren, kommt dem Infrastruktur-Sharing-Ansatz eine noch maßgeblichere Bedeutung als in der Vergangenheit zu. Das Ziel einer TowerCo ist es, möglichst viele Mieter für die einzelnen Standorte (Dachstandorte, Maststandorte) zu gewinnen, so dass bereits im Geschäftsmodell eine Motivation darin besteht, Energie- und Ressourcenverbrauch durch eine Duplizierung von Infrastrukturen zu vermeiden. Die von den TowerCos bewirtschafteten Mobilfunkstandorte zeichnen sich im Wesentlichen durch Fixkosten aus, so dass bei Betrieb und Vermietung an mehrere Nutzer auch mehr Gewinn anfällt.

Ob sich die grundsätzliche Ausrichtung der TowerCos in der Praxis uneingeschränkt widerspiegelt, lässt sich angesichts der laufenden Beschwerde von 1&1 beim Bundeskartellamt noch nicht abschließend beurteilen.¹⁴⁴ Hinsichtlich des hier einschlägigen Rechtsrahmens ist zu beachten, dass er dem Personenschutz dient.

4.3.4 Praxis und Handlungsbedarf

Die Praxis zeigt, dass die Marktteilnehmer mit unterschiedlichen Maßnahmen das Ziel verfolgen, ihren Beitrag zur Bekämpfung des Klimawandels zu leisten. Vor dem Hintergrund des bestehenden CO₂-Fußabdrucks von Zugangsnetzen (sofern nicht ausschließlich grüner Strom genutzt wird) kommen technologischen Anstrengungen zur Reduzierung des Energieverbrauchs (z. B. Sleep Mode) eine zentrale Rolle zu. Ob und in

¹⁴⁴ https://www.bundeskartellamt.de/SharedDocs/Meldung/DE/Pressemitteilungen/2023/02_06_2023_Vodafone_1_1.html, zuletzt abgerufen am 15.10.2023.

welchem Ausmaß diese Anstrengungen erfolgreich werden, hängt maßgeblich vom weiteren Datenwachstum in den Netzen und externen Anforderungen u. a. an die (Versorgungs-)Qualität sämtlicher Mobilfunknetze ab.

Sowohl neue Technologien wie Open RAN, die auf eine Öffnung von Schnittstellen zwischen heute integrierten Netzkomponenten abzielen als auch die Virtualisierung von Netzwerkfunktionen sollen es den Mobilfunknetzbetreibern ermöglichen, Hardware-Komponenten unterschiedlicher Hersteller miteinander zu verknüpfen, wodurch die Abhängigkeit von einzelnen Herstellern reduziert werden kann. Zudem könnte eine Vergrößerung des Angebots zu preiswerten Angeboten führen.

Inwiefern Open RAN in Bezug auf die Nachhaltigkeit vor- oder nachteilhafter ist, ist nicht abschließend geklärt. Die Studienlage ist dazu nicht eindeutig. Auch die Expertengespräche zeigen, dass eindeutige Aussagen erst vorliegen werden, wenn die Technologien ausgereift sind. Somit steht aktuell noch nicht fest, ob sich mit diesen neuen Konzepten de facto (Energie-)Effizienzvorteile ergeben.

Die Nachhaltigkeit der Netze wird aktuell auch durch Aspekte der digitalen Souveränität bzw. der Sicherheit der Datenübertragung beeinflusst. So führt ein (frühzeitiger) Austausch von aktiven Netzteilen im Zugangnetz dazu, dass sich der Ressourcenverbrauch und ggf. Energieverbrauch erhöht.

Beim Rollout von Mobilfunknetzen sind folgende Aspekte relevant:

- In der Praxis kann die Wahl des Mobilfunkstandorts Auswirkungen auf die Nachhaltigkeit besitzen. Laut Aussage einer unabhängigen TowerCo werden zunächst solche Standorte gewählt, die bereits über Infrastruktur verfügen, um den Bedarf an neuen Masten zu minimieren. Dies senkt den Bedarf an Fläche, eventuelle Auswirkungen auf die Biodiversität, sowie den Energie- und Ressourcenverbrauch.
- Die Mitnutzungspotenziale kommunaler Trägerinfrastrukturen für weitere 5G-Standorte sowohl für Makro- als auch für Mikrozellen wurden vom BMDV bereits untersucht.¹⁴⁵ Für die Erweiterung bestehender und den Aufbau neuer Makro-Standorte eignen sich demnach Antennenmasten und Gebäudedächer sehr gut, für die Mikrozellen insbesondere Beleuchtungsmasten, Fahrgastinformationstafeln (U-Bahn) und Gebäudefassaden.¹⁴⁶
- Mitnutzungspotenziale gerade im Bereich von Dachstandorten hängen davon ab, wie sich die gesetzlichen und regulatorischen Rahmenbedingungen, die auf den Personenschutz abzielen, künftig auf den Zugang zu Standorten auswirken. Hier gibt es erste Ansätze im Markt, die entsprechenden Prozesse zu modifizieren, um

¹⁴⁵ BMDV (2020).

¹⁴⁶ BMDV (2020), S. 33.

Mitnutzungspotenziale zu heben. Gelingt dieses nicht, wird sich der Ressourcenverbrauch erhöhen.

- Ein weiterer Aspekt ist die Auswahl der Materialien für den Bau der Masten. Hier stehen Stahlgittermasten, Betonmasten oder Holzmasten zur Auswahl. Sofern ein Neubau notwendig wird, kann je nach Ausleuchtungsbedarf ein möglichst ressourcenschonender Mast gewählt werden. Neben dem eingesetzten Mast ist insbesondere die Wahl des Fundaments (bspw. Schraubfundamente, die keine Flächenversiegelung beinhalten) und die Auslegung (Höhe, Größe) ein wichtiger Hebel. Dabei kann die betroffene Gemeinde mitentscheiden. Die Wahl hängt aber auch von äußeren Faktoren wie etwa dem Untergrund oder den Windverhältnissen ab. Somit sind die Tower Companies in ihrer Entscheidung oft eingeschränkt. Eine direkte Vergleichbarkeit bezüglich der Nachhaltigkeit ist daher oft schwierig. Manchmal sehen Baurichtlinien-Vorschriften auch vor, dass zum Beispiel ein Stahlkern eingezogen werden muss.

Die deutschen Mobilfunknetzbetreiber decken ihren Strombedarf bereits heute zum überwiegenden Teil aus Erneuerbaren Energien, wobei dies nicht mit einem direkten Bezug von Erneuerbaren Energien (lokaler Strommix) verwechselt werden darf.¹⁴⁷ Hinsichtlich des vor Ort produzierten und genutzten Stroms gibt es bereits einzelne Projekte mit Modellcharakter.¹⁴⁸ Ziel ist es, Erneuerbare Energien zusammen mit Sendeanlagen zu verknüpfen. Hierbei zeichnen sich jedoch Zielkonflikte ab, wenn beispielsweise der verstärkte Einsatz von Solaranlagen auf Dächern zu einer Verknappung an Standorten für Mobilfunksendeanlagen führt.

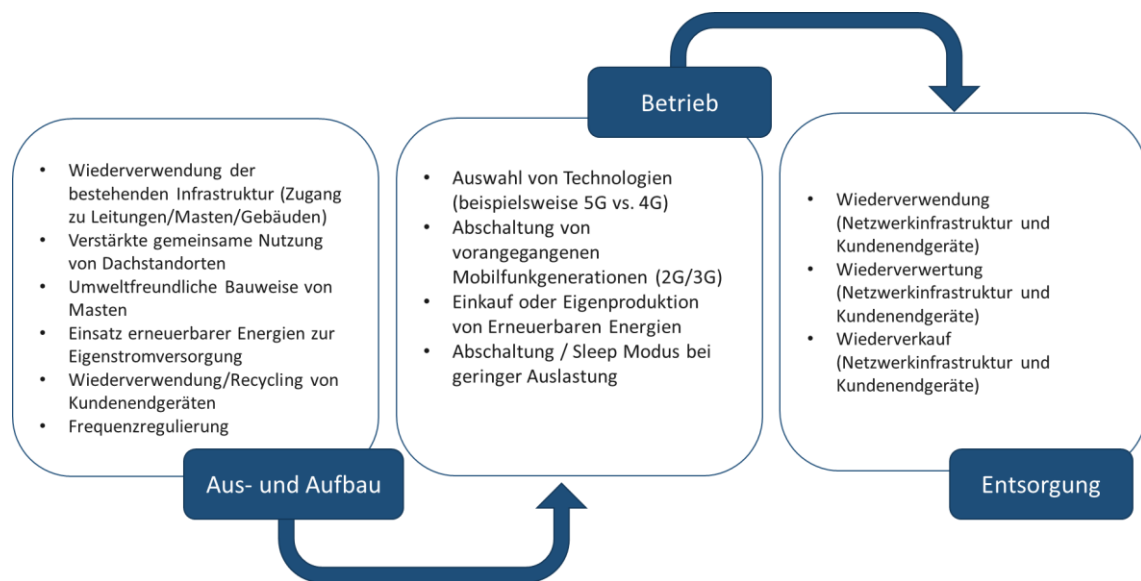
Hinsichtlich der Umsetzung von Scope-3-Zielen bestehen Herausforderungen bei der Gewinnung notwendiger Daten. In den Expertengesprächen wurde beispielsweise deutlich, dass bezüglich der Herstellung der Komponenten für Mobilfunknetze (z. B. Mikrochips) noch große Unsicherheiten hinsichtlich Nachhaltigkeitsaspekten bestehen bzw. Informationen über die Nachhaltigkeit des Produktionsprozesses nicht verfügbar sind.

Abbildung 4-25 zeigt mögliche Maßnahmen zur Verbesserung der Nachhaltigkeit im Mobilfunk in den verschiedenen Wertschöpfungsstufen.

147 <https://www.vodafone.de/unternehmen/soziale-verantwortung/co2-ausstoss.html>, zuletzt abgerufen am 12.11.2023,
<https://www.telekom.com/de/blog/netz/artikel/sauber-trick-mobilfunk-mit-strom-aus-der-sonne-1017886>, zuletzt abgerufen am 12.11.2023,
<https://www.telefonica.de/news/corporate/2021/10/verantwortungsvoller-umgang-mit-gruenstrom-o2-steigert-energieeffizienz-und-senkt-co2-emissionen.html>, zuletzt abgerufen am 12.11.2023,
<https://unternehmen.1und1.de/unternehmen/umwelt-und-klimaschutz/>, zuletzt abgerufen am 12.11.2023.

148 Vgl. z. B. <https://industrie.de/technik/telekom-und-ericsson-verwenden-solarstrom-fuer-mobilfunk-standorte/>, zuletzt abgerufen am 29.08.2023.

Abbildung 4-25: Maßnahmen für nachhaltigeren Mobilfunk



Quelle: Eigene Darstellung.

4.3.5 Zwischenfazit Mobilfunknetz

Die Studien zur Nachhaltigkeit von Mobilfunknetzen konzentrieren sich hauptsächlich auf den Betrieb der Infrastruktur und deren Energieverbrauch.

Anders als in Glasfasernetzen wird der steigende Datenverkehr in den Mobilfunknetzen zu einer Steigerung des Stromverbrauchs führen. Die Anstrengungen der Hersteller und Mobilfunknetzbetreiber gehen deshalb dahin, die in der Vergangenheit angestrebte Entkoppelung von Stromverbrauch und Verkehrswachstum möglichst lange weitgehend fortzuschreiben. Ob dieses Vorhaben gelingt, wird von den Marktteilnehmern unterschiedlich eingeschätzt.

Um den Energieverbrauch zu reduzieren, setzen die Mobilfunknetzbetreiber darauf, die Kunden auf bestimmte, effizientere Technologien zu migrieren. Diese Migration wird im Vergleich zum Festnetz dadurch erleichtert, dass die Mobilfunknetzbetreiber die Ende-zu-Ende-Kommunikation bis auf die Endgeräte kontrollieren, wobei bei Letzterem die Mobilfunknetzbetreiber durch Absatzstrategien von Endgeräten das Kaufverhalten beeinflussen können. Ebenso beeinflussen die Mobilfunknetzbetreiber durch ihre Endkundenangebote die Nutzung der Endgeräte.

Der künftige Energiebedarf wird unter anderem davon abhängig sein, inwieweit jedes Mobilfunknetz in der Fläche die gleichen Mindestqualitäten anbieten muss. Somit beeinflusst die konkrete Ausprägung der Frequenzregulierung die ökologische Nachhaltigkeit der Mobilfunknetze. Dies wiederum hängt im Sinne eines Zielkonflikts vom angestrebten Ausmaß des Infrastrukturwettbewerbs ab. Festzuhalten bleibt, dass in der Praxis bereits

Lösungen proaktiv umgesetzt werden, so dass Forschung und Praxis zumindest im Bereich Betrieb gut zu funktionieren scheinen.

Frequenzeinsatz, Standortauswahl, Materialwahl und Infrastruktur-Sharing sind weitere Praxisaspekte, die die Nachhaltigkeit von Mobilfunknetzen beeinflussen. Eine besondere Rolle kann dabei Open RAN spielen, mit dem die Abhängigkeit von einzelnen Herstellern, Materialien, Komponenten und Standorten reduziert und Infrastruktur-Sharing erleichtert werden kann, wobei die Auswirkungen auf die Nachhaltigkeit bislang unklar sind.

Bezüglich der Funkmasten gilt: Je stärker das TowerCo-Geschäftsmodell auf kooperative Nutzung und somit Effizienzgewinne ausgelegt ist, desto mehr schlägt sich dies in der Energiebilanz bzw. Nachhaltigkeit nieder.

Insgesamt gibt es noch Unsicherheiten und Lücken in der Forschung zur Nachhaltigkeit von Mobilfunknetzen. Dies gilt insbesondere für die Herstellung, die Wiederverwendung von Netzkomponenten und Entsorgung der Infrastruktur.¹⁴⁹ Eine umfassende Analyse aller Bestandteile der Errichtung eines Mobilfunknetzes ist noch nicht verfügbar, da entweder nur Teilbereiche betrachtet werden oder der Zugang zu entsprechenden Daten unbefriedigend ist.

Bezüglich des Betriebs könnten weitere Studien im Sinne eines Gesamtüberblicks hilfreich sein. Dazu gehört auch die Forschung im Bereich der Kernnetze, die noch sehr schwach ausgeprägt ist.

4.4 Gebäudenetze

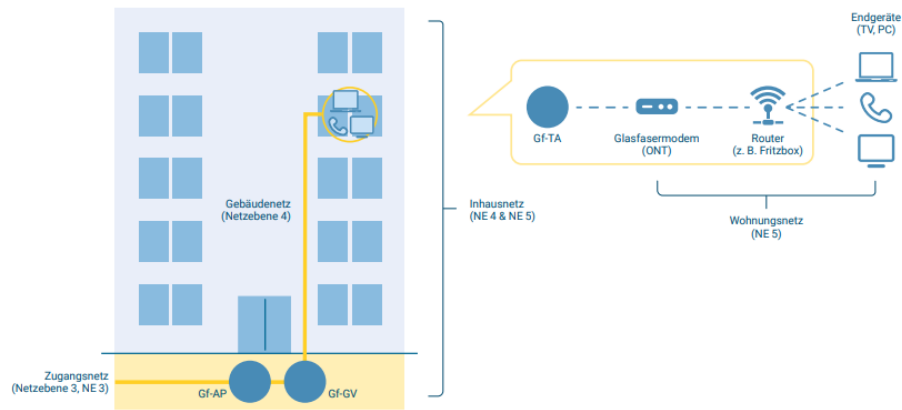
Die vorliegenden Studien zu Nachhaltigkeitsaspekten auf der Verteilnetzebene betrachten die Gebäudeebene nicht separat, sondern im Kontext der unterschiedlichen Netztechnologien. Dies ist insofern schlüssig, als dass die bekannten Zugangstechnologien die erforderlichen passiven und aktiven Netzkomponenten bis zum Kunden implizieren. Die wesentlichen Nachhaltigkeitsaspekte in Bezug auf die Gebäudenetze sind daher bereits in den Ausführungen in Abschnitt 4.2 enthalten.

4.4.1 Definition

Das Gebäudenetz (NE 4) beschreibt den Netzabschnitt zwischen Glasfaser-Gebäudeverteiler (Gf-GV) und Glasfaser-Teilnehmeranschlussdose (Gf-TA) bzw. Optical Network Terminal (ONT) in der Wohnung. Bei Einfamilienhäusern entfällt in der Regel die NE 4.

¹⁴⁹ Hier existieren bereits Angebote, z. B. zur Rücknahme von Routern, vgl. z. B. <https://seloca.de>.

Abbildung 4-26: Netzebenen im Mehrfamiliengebäude



Quelle: Deutsche Telekom in Zerson et al. (2020), S. 7.

Die Netzebene 5 (Signalverteilung innerhalb der Wohnung) wird in dieser Studie nicht berücksichtigt, da sie außerhalb des Einflussbereiches der Netzbetreiber liegt. In Bezug auf den Aspekt der Signalverteilung liegt der wesentliche Unterschied auf der Netzebene 5 zwischen der kabelbasierten (LAN-) und der funkbasierten (WLAN-)Verteilung. Letztere verbraucht in der Regel mehr Energie und auch die Endgeräte haben im WLAN-Modus einen höheren Energieverbrauch. Der tatsächliche Unterschied im Energieverbrauch der Netzwerkgeräte hängt dabei von der spezifischen Hardware, der Intensität der Nutzung und anderen Faktoren ab. Im Vergleich zu anderen ITK-Geräten im Haushalt macht der Verbrauch dieser Komponenten aber einen relativ geringen Anteil aus, weshalb er zu meist nicht näher betrachtet wird (Deutsche Telekom in Zerson et al. (2020), S. 8 ff.)

Mehrfamilienwohnhäuser sind heute bereits häufig an Breitbandkabel (HFC)- und VDSL-Vectoring-Netze angeschlossen. Mit dem Rollout von FTTB/H-Netzen kommt nun in einzelnen Liegenschaften eine dritte leitungsgebundene Übertragungstechnologie hinzu.

4.4.2 Aspekte der ökologischen Nachhaltigkeit

Wissenschaftliche Literatur, die Aspekte dieser Studie explizit für gebäudeinterne Netze betrachtet, liegt nicht vor. Für die Nachhaltigkeit der hausinternen Netze können jedoch Erkenntnisse aus dem Kapitel zu den leitungsgebundenen Netzen herangezogen werden. Sie gelten analog.

Aus Nachhaltigkeitsgesichtspunkten ist in Bezug auf die Gebäudeebene im Wesentlichen der Energieverbrauch der aktiven Komponenten der unterschiedlichen Zugangstechnologien relevant. Wie in Abschnitt 4.2. ausgeführt, weisen FTTH-Netze den niedrigsten und HFC-Netze den höchsten Energieverbrauch auf. Die Mehrzahl der derzeit errichteten Glasfaseranschlüsse werden jedoch als FTTB realisiert. Im Falle von FTTB in

Mehrfamilienhäusern endet das optische Signal im Keller, wird über eine aktive Komponente gewandelt, um von dort über bestehende Kupferleitungen zu den verschiedenen Wohnungen transportiert zu werden. Entsprechend gleicht der absolute Energieverbrauch von FTTB-Netzen dem von VDSL-Netzen, bei denen das optische Signal ebenfalls gewandelt wird, und zwar vorgelagert im DSLAM auf der Netzebene 3. Im Fall von Mehrfamilienhäusern ist der Nachhaltigkeitsvorteil von FTTB-Technologie gegenüber VDSL und HFC-Netzen daher deutlich reduziert. Eine signifikante Einsparung gegenüber den Bestandsnetzen (HFC, VDSL) ist nur über FTTH-Technologie zu erzielen.

Aus Nachhaltigkeitsgesichtspunkten gilt es daher, den Ausbau von Glasfasernetzen auf der Netzebene 4 voranzutreiben, um dadurch die Effizienzpotentiale der Glasfasertechnologie ausschöpfen zu können.

Unabhängig davon gilt auch auf der NE4, dass die vollen Nachhaltigkeitspotenziale der Glasfasertechnologie nur gehoben werden können, wenn redundante alte Infrastrukturen abgeschaltet werden. Die für die Verteilnetze festgestellten Zielkonflikte in Bezug auf Resilienz und Infrastrukturwettbewerb gelten hier analog.

4.4.3 Rechtliche und ökonomische Rahmenbedingungen

Im Zusammenhang mit der hausinternen Infrastruktur sind insbesondere folgende Rahmenbedingungen relevant:

- Telekommunikationsmodernisierungsgesetz (TKMoG), insbesondere
 - § 72 (Glasfaserbereitstellungsentgelt)
 - § 145 (Netzinfrastuktur von Gebäuden)
 - § 230 Ziff.5 (Sonderkündigungsrechte zum 1.7.2024)
- Betriebskostenverordnung, insbesondere:
 - § 2 Nr. 15 BetrKV (Wegfall der Umlagefähigkeit)
- Bürgerliches Gesetzbuch, insbesondere:
 - § 555b 4a (Glasfaseranschluss als Modernisierungsmaßnahme)
 - § 559 (Mieterhöhung nach Modernisierungsmaßnahmen)
- Wohnungseigentumsgesetz (WEG) bzw. Wohnungseigentumsmodernisierungsgesetz (WEMoG), insbesondere:
 - § 20 (Bauliche Veränderungen)
 - § 23 (Wohnungseigentümersammlung)
- Europäische Bauproduktenverordnung (BauPVO)
- Europäische Niederspannungsrichtlinie
- Musterbauordnung (MBO) der Bauministerkonferenz, inkl. Muster-Leitungsanlagen-Richtlinie (MLAR), einer Musterrichtlinie zum baulichen Brandschutz
- Landesbauordnungen (LBO)

Zudem sind Normen aus den Bereichen Elektrische Sicherheit, Sicherheitsanforderungen und Produktnormen, sowie Lasersicherheit zu berücksichtigen, insbesondere:

- DIN VDE 0100-444 und DIN VDE 0100-520 „Errichten von Niederspannungsanlagen“,
- DIN VDE 0888 „Lichtwellenleiterkabel“,
- DIN VDE 18015 „Elektrische Anlagen in Wohngebäuden“,
- DIN EN 50173 „Anwendungsneutrale Kommunikationskabelanlagen“,
- DIN EN 50174 „Installation von Kommunikationsverkabelung“,
- DIN EN 50700 „Informationstechnik – Standortverkabelung als Teil des optischen Zugangsnetzes von optischen Breitbandnetzen“,
- DIN EN 60603-7 „Steckverbinder für elektronische Einrichtungen“,
- DIN EN 61280-4-2 „Prüfverfahren für Lichtwellenleiter“,
- DIN EN 61386-22 „Elektroinstallationsrohrsysteme für elektrische Energie und für Informationen“.

Durch diverse Überarbeitungen im TKG sowie auch im WEG sollte unter anderen der Ausbau von Glasfasernetzen in Gebäuden erleichtert und befördert werden. Durch die Abschaffung des sogenannten Nebenkostenprivilegs, die Öffnung der Inhouse-Netze für den Wettbewerb und das Recht von Netzbetreibern, Glasfaserleitungen auch bis in die Wohnung zu legen, wurden diesbezüglich wesentliche Weichenstellungen vorgenommen.

In Bezug auf Wohnungseigentümergeinschaften wurde das Recht einzelner Eigentümer gestärkt und die Beschlussfassung erleichtert, sodass Eigentümer in diesen Liegenschaften auch kurzfristig auf Ausbauangebote der Netzbetreiber reagieren können.

In Bezug auf die Finanzierung des Ausbaus ermöglicht § 72 TKG („Glasfaserbereitstellungsentgelt“) in Verbindung mit § 2 Nr. 15c BetrKV eine Umlage von maximal 540 € auf die Mieter. Zwingende Vorgabe hierbei ist, dass die so refinanzierten Inhouse-Netze „open access“ sind und der Zugang zu transparenten und diskriminierungsfreien Bedingungen unentgeltlich gewährt wird. Das TKG begrenzt diese Möglichkeit zur Refinanzierung auf Maßnahmen, die bis einschließlich 2027 durchgeführt wurden.

Als Alternative dazu ist auch eine Umlage auf Basis von § 555b 4a in Verbindung mit § 559 BGB möglich. Voraussetzung hierfür ist, dass der Mieter seinen Telekommunikationsdienstleister frei wählen kann. Anders als beim Glasfaserbereitstellungsentgelt gibt es keine Deckelung der umlagefähigen Ausbaukosten.

4.4.4 Ökonomische Rahmenbedingungen

Wie oben dargestellt, wurden seitens des Gesetzgebers diverse Änderungen der Rahmenbedingungen vorgenommen, um den Glasfaserausbau in Gebäuden zu erleichtern

und zu beschleunigen. Seit Inkrafttreten des novellierten TKG hat sich allerdings noch keine dominante Umsetzungsvariante herausgebildet und insgesamt bleibt der Ausbau von Glasfaser auf der Netzebene 4 meist eine Zukunftsperspektive. Neben den unten aufgeführten, praktischen Hürden bestehen auch ökonomische Herausforderungen.

Die im TKGMoG vorgesehene Deckelung von maximal 590 € pro Wohneinheit ist in den meisten Fällen nicht ausreichend und erfordert deshalb ein zusätzliches Investment seitens des Netzbetreibers oder des Eigentümers. Diese zusätzlichen Ausgaben können aber weder auf die Mieter noch auf andere Netzbetreiber (im Falle von Open Access) umgelegt werden. Da die Refinanzierung also in der Regel nicht gegeben ist und der zusätzlichen Investition auch kein strategischer Nutzen (beispielsweise zeitlich begrenzte exklusive Nutzungsrechte) entgegenstehen, entfaltet das Glasfasernutzungsentgelt bislang wenig Wirkung.

Eine Umlage auf Basis von § 555 BGB (Modernisierungsmaßnahme) könnte diese Deckelung vermeiden, wird aber bislang nicht in größerem Umfang von Eigentümern umgesetzt. Hier ist zu vermuten, dass von Eigentümern und Mietern anderen, insbesondere energetischen Investitionen der Vorrang gegeben wird, auch weil die bestehende Versorgung über HFC und FTTC den Mietern derzeit noch ausreichend Leistungsfähigkeit bietet, sodass hier für die Eigentümer noch wenig Handlungsdruck besteht.

Die ökonomischen Rahmenbedingungen in Deutschland sind aktuell nicht ausreichend attraktiv, um dem Ausbau von Glasfaser auf der Netzebene 4 Vortrieb zu leisten.

4.4.5 Praxis

Das TKG (§ 145, vormals § 77k) verlangt, dass für Neubauten oder bei umfangreichen Renovierungen hochgeschwindigkeitsfähige passive Infrastruktur verbaut wird. Um Bauherren, Architekten und ausführenden Unternehmen die Umsetzung zu erleichtern, wurden hierzu von der Fokusgruppe „Digitale Netze“ eine Reihe von umfangreichen Leitfäden und Handreichungen erarbeitet. Dennoch sind die Vorgaben des TKG bei den Stakeholdern nach wie vor weniger bekannt als beispielsweise energetische Bauvorgaben. An dieser Stelle ist daher weiterhin Informationsarbeit zu leisten, um Synergiepotenziale für den Ausbau von Gebäudenetzen bestmöglich zu nutzen.

Zusätzlich hat das TKG das Recht von Mietern und ausbauenden Netzbetreibern gestärkt, sodass auch die Glasfasererschließung einzelner Anschlüsse in Mehrfamilienhäusern möglich wäre. Die Praxisrelevanz dieser Regelungen wird dadurch begrenzt, dass eine Leitungsverlegung in den Gebäuden ohne das Einverständnis des Eigentümers kaum durchführbar ist. Ohne die vorherige Überprüfung der gebäudeseitig vorhandenen Voraussetzungen, den Zugang zu Kellerräumen sowie die ausbaubegleitende Koordination durch Hausverwaltung und/oder Eigentümer lässt sich Ausbau in Gebäuden in der Praxis nicht realisieren. In der Praxis findet daher ein Ausbau ohne die Unterstützung des

Eigentümers nicht statt. Alle einschlägigen Netzbetreiber bauen also auch nach Inkrafttreten des neuen TKG nur mit vorheriger Zustimmung des Eigentümers (GEE) aus. Dazu kommt, dass der Ausbau einzelner Wohneinheiten für die Netzbetreiber nicht effizient durchgeführt werden kann. Die veränderten Rahmenbedingungen entfalten daher bislang wenig Wirkung.

Der Ausbau von Glasfasernetzen in Bestandsgebäuden stellt die Netzbetreiber in der Praxis vor eine Reihe von Herausforderungen, die eine konsequente und effiziente Umsetzung von FTTH-Netzen erschweren. Dazu gehören laut der Fokusgruppe „Digitale Netze“¹⁵⁰ insbesondere: Komplexe und uneinheitliche kommunale Prozesse zur Eigentümeridentifikation, komplizierte Brandschutzregelungen und ein Mangel an erfahrenen Fachkräften. Hinzu kommen die aufwendige Bestandsaufnahme und Planung, die für jedes Gebäude individuell durchgeführt werden müssen. Der aus den vorgenannten Faktoren resultierende Planungsaufwand führt dazu, dass der Ausbau der Gebäudenetze bei Mehrfamilienhäusern heute in den meisten Fällen nicht durchgeführt wird.

In Kombination mit den oben aufgeführten, ökonomischen Rahmenbedingungen führen diverse Hürden bei der praktischen Umsetzung dazu, dass der FTTH-Ausbau in Mehrfamilienhäusern in Deutschland derzeit eher der Einzelfall ist. Wo FTTH-Ausbau stattfindet, ist er in der Regel das Resultat einer expliziten Vergabe dieser Leistung von der Wohnungswirtschaft an die Netzbetreiber.

Hinsichtlich der Migration auf nachhaltigere Netzinfrastrukturen zeigt das Beispiel im Mobilfunk mit der Abschaltung von UMTS, dass Migrationsprozesse gelingen, wenn der Betreiber der Netzinfrastruktur weitgehend die Kontrolle über die Wertschöpfungsprozesse ausübt. Sofern bei gebäudeinternen Netzen unterschiedliche Betreiber von Bestands- und neuen Netzinfrastrukturen vorhanden sind, stellt sich wie bei der vorgelagerten Netzebene 3 die Frage der (erfolgreichen) Migration auf die nachhaltigere Netzinfrastruktur.

In Bezug auf den Glasfaserausbau auf der NE4 besteht also weiterhin Handlungsbedarf. Analog zu den Bemühungen in den Bereichen Mobilfunk und leitungsgebundene Netzinfrastrukturen gilt es auch hier, bundeseinheitliche Rahmenbedingungen für eine effiziente und rentable Migration auf neue Infrastrukturen zu schaffen.

4.4.6 Zwischenfazit Gebäude

Um FTTH in Deutschland zu etablieren und die damit verbundenen Nachhaltigkeitsvorteile zu realisieren, benötigt ein Großteil der Mehrfamilienwohnhäuser neue hausinterne Glasfasernetze.

¹⁵⁰ Fokusgruppe Digitale Netze (2020).

Die regulatorischen und marktseitigen Anreize hierfür reichen nicht aus, um einen Ausbau der Gebäudenetze voranzutreiben. Allerdings dürfte der Wegfall der Umlagemöglichkeit für TV-Dienste zum 1.7.2024 sowie eine steigende Mieternachfrage nach leistungsfähigem Internet zumindest mittelfristig zu einer erhöhten Ausbauaktivität führen.

Die marktwirtschaftlichen Effekte sollten von Verbesserungen der Rahmenbedingungen in unterschiedlichen Bereichen begleitet werden, zum Beispiel:

- Erhöhung der Begrenzung des Glasfaserbereitstellungsentgelts auf ein auskömmliches Niveau;
- Fortgesetzte Information und Unterstützung der Bauherren, Architekten und ausführenden Unternehmen, damit mindestens bei Neubauten und umfangreichen Renovierungen ein paralleles Upgrade der Gebäudenetze auf Glasfaser erfolgt;
- Erleichterung und Vereinheitlichung der Eigentümeridentifikation für ausbauende Unternehmen;
- Einschlägige Vorschriften (insbesondere im Bereich Brandschutz) auf Relevanz für den Glasfaserausbau überprüfen, überarbeiten und vereinfachen.

5 Zusammenfassende Überlegungen und Handlungsbedarfe

Die Ergebnisse des Kapitels 4 lassen sich wie folgt zusammenfassend darstellen:

- Die Literaturlauswertung und die im Rahmen dieser Studie geführten Expertengespräche zeigen eindeutig, dass die Marktteilnehmer in der Regel im Zusammenhang mit der Reduzierung von Betriebskosten sowie des Zugangs zum Kapitalmarkt ein hohes Interesse haben, ökologische Aspekte der Nachhaltigkeit (insbesondere den Ressourcen- und Energieverbrauch) zu beachten. Es bestehen wesentliche betriebswirtschaftlich motivierte Maßnahmen, mit denen Beiträge für den Umwelt- und Klimaschutz geleistet werden. Staatliche Maßnahmen können die Anstrengungen der Marktteilnehmer, die sich auch in der Forschung von Wissenschaft und Herstellern widerspiegeln, unterstützen, indem sie beispielsweise die ökologischen Aspekte der digitalen Transformation gegenüber den Nachfragern (Endkunden) transparenter machen. Ebenso können sie helfen, Datenräume zu etablieren, mit denen die Marktakteure Scope-3-Ziele besser erreichen können. Kritisch sind staatlichen Maßnahmen zu bewerten, die die Transaktionskosten bei den Unternehmen erhöhen, jedoch hinsichtlich der Verbesserung der ökologischen Nachhaltigkeit kaum Mehrwerte liefern. Dies gilt insbesondere bei der Festlegung von technischen Indikatoren zur Messung von Nachhaltigkeit mit den damit verbundenen Aufwänden bei der Erhebung und Verarbeitung von Daten. Diese Indikatoren dienen den Unternehmen in der Regel herauszufinden, wo sie Verbesserungen hinsichtlich der ökologischen Nachhaltigkeit in den Wertschöpfungsprozessen erzielen können.

- Die Literaturanalyse zeigt, dass die ökologische Nachhaltigkeit in den Netzinfrastrukturen verbessert werden kann. Gesetzliche Regelungen für Rechenzentren zeigen, wohin sich die Marktakteure bewegen werden. Die empirischen Analysen zeigen aber auch, dass ohne einen Fokus auf die Nachfrage mit ihren jeweiligen Endgeräten das Risiko besteht, dass Anstrengungen auf den vorgelagerten Wertschöpfungsebenen konterkariert werden, wenn die bisherigen Entwicklungen und Verhaltensweisen fortgesetzt werden. Dies betrifft ganz wesentlich Aspekte des Austausches von Endgeräten und Aspekte der Kreislaufwirtschaft, d. h. der Wiederverwendung von (überholten) gebrauchten Endgeräten.
- Die bisherige Literatur zur Nachhaltigkeit digitaler Infrastrukturen fokussiert maßgeblich auf technische Indikatoren zu Messung und ggf. einer nachfolgenden Steuerung von Maßnahmen zur Verbesserung der ökologischen Nachhaltigkeit. Hierbei ist zu beachten, dass die Indikatoren nicht für jeden der hier betrachteten Märkte in gleicher Art und Weise interpretationsfähige Aussagen bereithalten. Eine Differenzierung von leitungsgebundenen und drahtlosen Telekommunikationsdiensten bzw. Wertschöpfungsprozessen scheint angezeigt zu sein. Ebenso zeigen die Diskussionen mit Stakeholdern, dass teilweise die Daten für die Indikatoren nicht vorliegen, nicht unter den an der Wertschöpfung beteiligten Unternehmen ausgetauscht werden und die Semantik der Daten nicht zwangsläufig klar definiert ist. Insoweit bestehen wenige Informationen über Best Practice von Unternehmen (z. B. bei der Kreislaufwirtschaft). Vergleiche von Unternehmen, die beispielsweise bei LCA oder beim Energieverbrauch im Mobilfunk auch keine weiterführenden Erkenntnisse liefern, können kaum durchgeführt werden, weil die bestehende Berichterstattung in der Regel die Daten der betrachteten Netzinfrastrukturen zusammenfasst. Die Identifizierung von Best Practice im Markt wird dadurch restringiert.
- Nur wenige wissenschaftliche Analysen beziehen sich auf den gesamten Lebenszyklus von digitalen Infrastrukturen. Der Fokus liegt auf den Phasen des Betriebs und vereinzelt auf der Errichtung. Daten über die Entsorgung oder die Wiederverwendung liegen kaum vor, werden aber mit dem Abschalten von Netzinfrastrukturen wichtiger. Um die Nachhaltigkeit zu steigern, ist es zweckmäßig die Wissenslücken zu füllen, um nachfolgend neue oder bereits marktgetriebenen Anstrengungen zu unterstützen. Um das entsprechende Wissen zu generieren, sollte es einen Austausch von Staat, Wirtschaft und Wissenschaft geben.
- Der aktuelle Ausbau von Gigabitinfrastrukturen wird vom Regulierungsrahmen in vielfältiger Weise beeinflusst. Hier liefert die Metastudie Erkenntnisse dazu, über welche Ansatzpunkte beim Rollout der Netzinfrastrukturen diskutiert werden sollte, um die Nachhaltigkeit der betrachteten Infrastrukturen selbst zu verbessern.
- In den Expertengesprächen wurde deutlich, dass bezüglich der Herstellung der Komponenten für Mobilfunknetze (z. B. Mikrochips) noch große Unsicherheiten hinsichtlich der Nachhaltigkeitsaspekte bestehen bzw. Informationen über die Nachhaltigkeit des Produktionsprozesses nicht verfügbar sind.

- Im Festnetz und im Mobilfunk verfolgen die Marktteilnehmer bereits Ziele der Steigerung der Energieeffizienz, so dass sie somit unmittelbar die Umweltziele der EU und Deutschlands unterstützen. Komplementiert werden die Maßnahmen durch ein verbessertes Ressourcenmanagement und eine Abfallreduktion, die ebenfalls Betriebskosten senken. Insgesamt üben die Netzbetreiber (weltweit) einen Druck auf die Hersteller aus, die Energieeffizienz der eingesetzten Hard- und Software sowie die Umweltverträglichkeit der verwendeten Materialien (Recycling) zu verbessern.
- Der Weg zu nachhaltigeren Netzinfrastrukturen ist unumkehrbar. Jedoch ist noch offen, wie schnell die neuen Netzinfrastrukturen so genutzt werden, dass sie ihr ökologisches Potenzial voll ausschöpfen können. Ebenso werden Wirkungszusammenhänge beispielsweise der Frequenzpolitik auf die Nachhaltigkeit noch zu wenig erforscht und empirisch dokumentiert.

Die Literaturanalyse und die Stakeholder-Diskussion zeigen, dass der Grad der ökologischen Nachhaltigkeit maßgeblich von den folgenden drei Aspekten abhängig ist:

1. Berücksichtigung unterschiedlicher Ziele,
2. Migration auf nachhaltige Infrastrukturen,
3. Transparenz über ökologische Aspekte der IKT.

Auf diese drei Aspekte werden wir nachfolgend näher eingehen.

5.1 Berücksichtigung unterschiedlicher Ziele

Im Zusammenhang mit digitalen Infrastrukturen werden sowohl im einschlägigen Rechtsrahmen als auch in politischen Diskursen folgende Ziele diskutiert:

- Infrastrukturwettbewerb zur Steigerung von Innovationen und Gewährleistung von geringen Endkundenpreisen,
- Digitale Souveränität und Resilienz von (kritischen) Infrastrukturen,
- Nachhaltigkeit von Infrastrukturen.

In diesem Dreieck von Zielen ist aktuell die Zielsetzung, die Nachhaltigkeit zu steigern, am geringsten ausgeprägt. Das liegt schon allein daran, dass es dazu in der sektorspezifischen Regulierung keine klare Verankerung gibt. Während Infrastrukturwettbewerb und Resilienz von Infrastrukturen Ziele sind, die aufeinander abgestimmt werden können, können jeweils Zielkonflikte mit der Nachhaltigkeit bestehen. Hier geht es darum, dass das komplexe Verhältnis von Wettbewerb und Nachhaltigkeit zu betrachten und in konkreten Entscheidungen auszutarieren.¹⁵¹

¹⁵¹ Vgl. Haucap et al. (2023), S. 13.

Eine möglichst breite Flächenabdeckung mit Gigabit-Infrastrukturen entfaltet ebenfalls Umweltwirkungen durch Bau und Betrieb der Netze. Obwohl sie aus betriebswirtschaftlicher Sicht ohne Förderung nicht rational ist, ist sie staatlicherseits gewollt, da der volkswirtschaftliche Nutzen höher angesehen wird als die (sozialen) Kosten der Umweltauswirkungen.¹⁵²

Diese Überlegung gilt auch im Hinblick auf die Resilienz der Infrastruktur. Dies beinhaltet vier wesentliche Aspekte, gegen die die Netze gewappnet sein sollten: ¹⁵³

- Versorgungsstörungen, z. B. Strommangel und -ausfälle oder Einschränkungen in der Lieferkette,
- (Netzübergreifende) Cyberangriffe,
- Elementarschäden, extreme Temperaturen,
- Vorsätzliche Beschädigung, Sabotage, Vandalismus oder Diebstahl.

Grundsätzlich ist eine höhere Resilienz mit einer stabilen Energieversorgung der wesentlichen Netzelemente verbunden. Dies kann zunächst zu einem höheren Energieverbrauch bzw. der Vorhaltung von Kapazitäten führen. Wenn die Energie aus Erneuerbaren Energien bezogen oder die Energieeffizienz erhöht wird, besteht an dieser Stelle kein Zielkonflikt. Auch ist zu bedenken, dass ein Ausfall der Infrastruktur sehr wahrscheinlich negative Auswirkungen auf die Nachhaltigkeit hätte, da dies weitere Handlungen auslösen würde bzw. effiziente Prozesse ersetzt werden müssten (z. B. Fahrten in Gebiete mit funktionierender Infrastruktur, Videokonferenzen durch Vor-Ort-Treffen etc.).

Wie zu Beginn der Metastudie erwähnt, ist die Sicherstellung eines effizienten infrastrukturasierten Wettbewerbs als Regulierungsziel im TKG verankert. Dies kann im Widerspruch zur Steigerung der Nachhaltigkeit stehen. Grundsätzlich sind doppelte Infrastrukturen aus ökologischer Sicht dann als problematisch anzusehen, wenn ihr Auslastungsgrad sehr gering ist und die Angebots- und Tarifvielfalt auch über einen Wettbewerb auf der Infrastruktur sichergestellt werden kann.

Aus Sicht des Kunden ist die Auswahl aus mehreren Wettbewerben grundsätzlich positiv, da durch Wettbewerb üblicherweise das Preisniveau sinkt. Die Frage an dieser Stelle ist, ob Infrastrukturwettbewerb dazu eine notwendige Voraussetzung darstellt oder ob andere Modelle wie „Open Access“, d. h. Wettbewerb auf der Infrastruktur, nicht auch diesen Zweck erfüllen können.

Sofern am Marktdesign mit der Zielsetzung des Infrastrukturwettbewerbs uneingeschränkt festgehalten wird, kann dem Verbraucher durch erhöhte Transparenz über

¹⁵² Sind die ökologischen Wirkungen der Enabling-Effekte der Infrastruktur größer als deren eigene Wirkung auf die Nachhaltigkeit, ergeben sich die positiven, ökologischen Mehrwerte innerhalb der Infrastruktur selbst.

¹⁵³ Bitkom (2022), S. 4.

nachhaltige Telekommunikationsdienste ein Mittel in die Hand gegeben werden, auch nach Nachhaltigkeitsgesichtspunkten eine Auswahl zu treffen (vgl. Abschnitt 5.3).

Schließlich kann Nachhaltigkeit im Gegensatz zu Digitaler Souveränität stehen. Hierzu gehören Überlegungen, aus den Telekommunikationsnetzen Komponenten von bestimmten Anbietern aus Gründen der Sicherheit zu verbieten; ein Austausch von Geräten führt zu einem erhöhten Energie- und Ressourcenbedarf. Ferner kann es bei nicht vergleichbarer Qualität der Ersatzkomponenten zu Qualitätseinbußen bei der Netzperformance kommen.

5.2 Migration auf nachhaltige Infrastrukturen

Wie aus den Analysen in den Abschnitten 4.2 und 4.3 hervorgeht, ist die Migration auf neuere Technologien, zumindest in den erforschten Umweltzielen, grundsätzlich als nachhaltiger einzustufen. Dies gilt sowohl für Mobilfunk- als auch für Festnetztechnologien. Während die Umstellung im Mobilfunk teilweise bereits erfolgt ist (Abschaltung der UMTS-Netze), ist die Migration im Festnetz (von Kupfer/Koaxial auf Glasfaser) noch nicht geklärt. Auch wird hier über Kupferanschlüsse diskutiert, obwohl aus Sicht der Nachhaltigkeit die HFC-Anschlüsse schlechter abschneiden. Die HFC-Anschlüsse leisten aber einen Beitrag zur Gigabitfähigkeit Deutschlands.

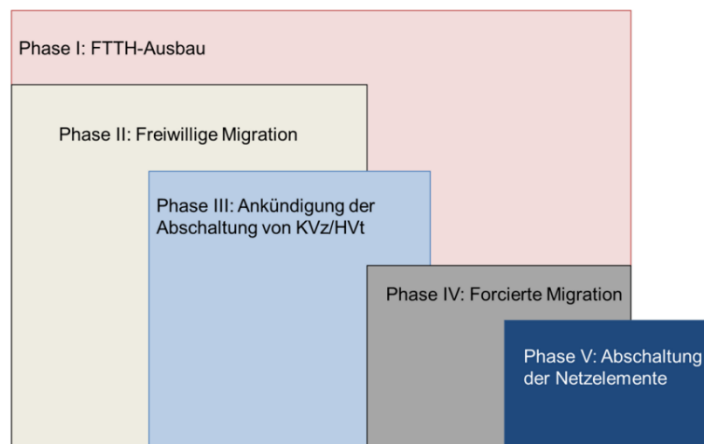
Anders als im Mobilfunk, wo die Netzbetreiber fast die gesamte Wertschöpfung kontrollieren, bestehen bei der Migration folgende Herausforderungen:

- Bei FTTH sind bei Mehrfamilienwohnhäuser mehrere Unternehmen an der Wertschöpfung beteiligt, so dass nur eine koordinierte, technisch aufeinander abgestimmte Migration aus Sicht der Nachhaltigkeit sinnvoll ist.
- Nicht ausgeschlossen ist, dass Kunden von FTTH wieder auf FTTC- oder HFC-Anschlüsse migrieren.

Es stellt sich somit die Frage, wann bzw. wie aus Nachhaltigkeitsgesichtspunkten migriert werden sollte (vgl. Abschnitt 3.2) Grundsätzlich sind für den Ausstieg aus Kupfer im Festnetzbereich schon verschiedene Phasen identifiziert und konkretisiert worden, wie Abbildung 5-1 zeigt.¹⁵⁴

¹⁵⁴ Neumann et al. (2022), Neumann et al. (2021).

Abbildung 5-1: Phasenkonzept zur Migration im Festnetzbereich



Quelle: Neumann et al. (2022), S. 42.

Wie der Abbildung zu entnehmen ist, kann die Migration dabei in fünf Phasen ablaufen.¹⁵⁵

5.3 Transparenz über ökologische Aspekte von IKT

Ein Weg zu mehr Nachhaltigkeit kann eine höhere Transparenz über die Aspekte der ökologischen Nachhaltigkeit bzw. ökologische Auswirkungen der Nutzung von ITK sein. Die Transparenz kann sich auf verschiedenen Ebenen bzw. Wertschöpfungsprozesse darstellen:

- beim Rollout von Netzinfrastrukturen über ein umfassendes Kataster über vorhandene Netzinfrastrukturen;
- bei der Berichterstattung der Unternehmen;
- beim Angebot und der Auswahl von Produkten der digitale Produktpass;
- durch verbesserte Kundeninformationen.

¹⁵⁵ Vgl. Neumann et al (2022), S. 41: „Der FTTH-Ausbau (Phase I) im Sinne der Herstellung HC muss spätestens mit dem Beginn der Abschaltung und dem Ende der Phase der forcierten Migration abgeschlossen sein. Mit der Verfügbarkeit der ersten FTTH-Anschlüsse und ihrer Vermarktung beginnt die freiwillige Migration der Endkunden auf das FTTH-Netz (Phase II). Freiwillige Migration endet definitivonsgemäß mit Beginn der forcierten Migration (Phase IV). Die Ankündigungsphase (Phase III) beginnt mit der Beantragung der Genehmigung nach § 34 (bzw. ihrer Erteilung) und der Vorlage eines Abschaltplans. Die forcierte Migration (Phase IV) kann beginnen, sobald der Abschaltplan genehmigt ist bzw. kurze Zeit danach. Die definitive Abschaltung der Netzelemente (Phase V) erfolgt nach Abschluss der Migration der Endkunden.“

5.3.1 Kataster über vorhandene Netzinfrastrukturen

Ein guter Hebel für mehr Nachhaltigkeit wäre die Koordination der Legung der unterschiedlichen Infrastrukturen. Allerdings haben die Kommunen nur sehr begrenzte Einflussmöglichkeiten. Die Telekommunikationsunternehmen haben aufgrund des Wegerechts einen Anspruch, unkoordiniert ihre Leitungen zu legen. Eine Möglichkeit wäre die Einschränkung des Wegerechts bzw. die Ausweitung der Verweigerung für Kommunen. Ob dieses möglich ist, wäre rechtlich zu prüfen.

Ein Thema bei der Mitnutzung bestehender Infrastrukturen ist die Information über die genaue Lage bestehender Netzkomponenten. Ein Kataster, in das diese Informationen eingestellt werden, könnte diese Informationslücke füllen. Bestehende Datenbanken beinhalten häufig nicht sämtliche Informationen, um festzustellen, welche Leitungen (Leerrohre) bereits existieren, insbesondere im Bereich Strom und Telekommunikation (nicht jedoch bei Gas oder Wasser). Die Einführung eines umfassenden, maschinenlesbaren Katasters würde im Sinne der Nachhaltigkeit einen bedeutenden Fortschritt bedeuten.

5.3.2 Berichterstattung der Unternehmen

Transparenz kann auch in der Information der Unternehmen über die Nachhaltigkeit ihrer Tätigkeiten liegen.¹⁵⁶ Die Berichterstattung zur Nachhaltigkeit wird mit der CSRD-Richtlinie, die am 5. Januar 2023 in Kraft getreten ist, auf mehr Unternehmen ausgeweitet und inhaltlich erweitert. Folgende Unternehmen müssen Berichte erstellen:

- Ab 2025 (für das Berichtsjahr 2024) alle Unternehmen, die bereits nach der Non Financial Reporting Directive (NFRD) berichten müssen;
- Ab 2026 (für das Berichtsjahr 2025) alle großen Unternehmen, die zwei der drei folgenden Kriterien erfüllen:¹⁵⁷
 - mehr als 250 Mitarbeiter*innen,
 - mehr als 20 Mio. Euro Bilanzsumme,
 - mehr als 40 Mio. Euro Umsatz,
 - Ab 2027 (für das Berichtsjahr 2026) alle kapitalmarktorientierten kleinen und mittleren Unternehmen (KMUs) sowie kleine und nicht komplexe Kreditinstitute und firmeneigene Versicherungsunternehmen;
- Ab 2029 (für das Berichtsjahr 2028) Nicht-EU-Unternehmen mit EU-Niederlassungen oder EU-Tochterunternehmen.

Inzwischen hat die EU-Kommission auch entsprechende Standards (European Sustainability Reporting Standards (ESRS)) veröffentlicht, die die Art der Berichterstattung

¹⁵⁶ Vgl. Tabelle 5-1.

¹⁵⁷ <https://www.mazars.de/Home/Services/Sustainability/Was-Sie-auf-dem-Schirm-haben-sollten/CSRD-Auf-Unternehmen-kommt-Grosses-zu>, zuletzt abgerufen am 19.09.2023.

konkretisieren.¹⁵⁸ So wird die Berichterstattung in verschiedene Teilbereiche bzw. Umweltziele unterteilt, die im Wesentlichen der EU-Taxonomie entsprechen, nämlich ¹⁵⁹

- ESRS E1: Klimawandel,
- ESRS E2: Umweltverschmutzung,
- ESRS E3: Wasser- und Meeresressourcen,
- ESRS E4: Biodiversität und Ökosysteme,
- ESRS E5: Ressourcennutzung und Kreislaufwirtschaft.

Ein wesentlicher Aspekt ist dabei, dass für den Bereich Klimawandel auch über Scope-3-Emissionen berichtet werden soll.¹⁶⁰ Dies kann für die Unternehmen mit hohen Herausforderungen verbunden sein, insbesondere wenn Daten aus außereuropäischen Ländern erhoben werden müssen. Auch werden damit indirekt kleinere Unternehmen in die Berichterstattung einbezogen, da nur diese, wenn sie Produkte zuliefern, über die THG-Emissionen Auskunft geben können.

Des Weiteren haben sich viele Unternehmen Nachhaltigkeitsziele gesetzt. Tabelle 5-1 gibt einen Überblick über die Ziele der vier größten deutschen TK-Unternehmen.¹⁶¹ Zu beachten ist dabei, dass die Angaben nicht auf die verschiedenen Bereiche abgegrenzt sind, sondern es sich um Konzernzahlen handelt. Eine solche Abgrenzung wäre zur Vergleichbarkeit der verschiedenen Sparten wünschenswert.

Daneben existieren verschiedene Aktivitäten bei den Verbänden, wie z. B.

- die BMDV-Dialogreihe „Digitalisierung nachhaltig gestalten“,¹⁶²
- der Arbeitskreis „Nachhaltigkeit“ beim VATM,
- der Arbeitskreis „Digitalisierung & Nachhaltigkeit“ des Bitkom,
- das BREKO-Positionspapier Nachhaltigkeit,¹⁶³
- das Verbändepapier „Digitalisierung und nachhaltiger Netzausbau“.¹⁶⁴

¹⁵⁸ Vgl. https://finance.ec.europa.eu/regulation-and-supervision/financial-services-legislation/implementing-and-delegated-acts/corporate-sustainability-reporting-directive_en, zuletzt abgerufen am 19.09.2023.

¹⁵⁹ Europäische Kommission (2023), S. 1.

¹⁶⁰ Europäische Kommission (2023), S. 74 ff.

¹⁶¹ Nach Kunden im Festnetzsektor, vgl. VATM und Dialog Consult (2022), S. 13.

¹⁶² Vgl. <https://bmdv.bund.de/DE/Themen/Digitales/AG-Digitale-Netze/Digitalisierung-nachhaltig-gestalten/digitalisierung-nachhaltig-gestalten.html>, zuletzt abgerufen am 12.11.2023.

¹⁶³ <https://www.brekoverband.de/aktuelles/news/position-hintergrund/breko-positionspapier-nachhaltigkeit/>, zuletzt abgerufen am 12.11. 2023.

¹⁶⁴ https://anga.de/media/file/4201.Digitalisierung_und_nachhaltiger_Netzausbau.pdf, zuletzt abgerufen am 12.11.2023.

Tabelle 5-1: Nachhaltigkeitsziele der größten deutschen TK-Unternehmen

Umweltziel	Deutsche Telekom	Vodafone	Telefónica Deutschland	United Internet
Treibhausgas-minderung	<ul style="list-style-type: none"> Bis Ende 2025: <ul style="list-style-type: none"> Senkung der konzernweiten Scope-1- und -2-Emissionen um bis zu 95 Prozent gegenüber 2017 Reduktion der CO₂-Emissionen über die Scopes 1–3 um 55 Prozent gegenüber 2020 Bis 2040: Netto-Null-Emissionen in gesamter Wertschöpfungskette (Scope 1,2 und 3) 	<ul style="list-style-type: none"> Bis 2030: <ul style="list-style-type: none"> CO₂ aus Scope-1 u. 2: 0% CO₂ aus Scope-3: 50% Bis 2040: Netto-Null-Emissionen in gesamter Wertschöpfungskette (Scope 1,2 und 3) 	<ul style="list-style-type: none"> Bis spätestens 2025: <ul style="list-style-type: none"> CO₂ aus Scope-1 u. 2: 0% Bis 2040: Netto-Null-Emissionen in gesamter Wertschöpfungskette (Scope 1,2 und 3) 	<p>„Wir werden im Laufe des Geschäftsjahres 2023 eine klare Vision und Zielsetzung erarbeiten, die unsere Selbstverpflichtung zu wesentlichen ESG-Themen übermittelt. Sowohl unser bisheriges Engagement als auch unsere zukünftigen Ambitionen werden wir in konkrete Handlungsfelder zusammenfassen, die den strategischen Rahmen unseres Nachhaltigkeitsmanagements darstellen werden.“</p>
Anteil EE	<ul style="list-style-type: none"> 100% Grünstrom seit 2021 	<ul style="list-style-type: none"> 100% Grünstrom seit 2021 	<ul style="list-style-type: none"> 100% Grünstrom seit 2021 	
Energieeffizienz	<ul style="list-style-type: none"> Bis 2024: Stabilisierung des Energieverbrauchs durch Verdoppelung der Energieeffizienz in Europa bei weiter stark wachsendem Datenvolumen und Netzausbau Bis 2030: Steigerung der Effizienz der Rechenzentren und klimaneutrale eigene sowie extern 	<ul style="list-style-type: none"> Kein konkretes Ziel 	<ul style="list-style-type: none"> Bis 2025: Steigerung der Effizienz des Netzes durch Senkung des Energieverbrauchs pro Datenvolumen (GWh/PB) um 87 % im Vergleich zu 2015. 	

Umweltziel	Deutsche Telekom	Vodafone	Telefónica Deutschland	United Internet
Ressourcenverbrauch	<p>betriebene Rechenzentren (gemäß Climate Neutral Data Centre Pact)</p> <ul style="list-style-type: none"> Ab Mitte 2022 sollen in Deutschland und Europa alle neuen Telekom-gebrandeten Produkte entsprechend unserer „Sustainability Packaging Guideline“ nachhaltig verpackt werden (bereits umgesetzt). Bis Ende 2024 sollen in Europa über 90 % aller durch die Telekomverkauften Smartphones auf nachhaltige Produktverpackungen umgestellt werden. 	Kein konkretes Ziel	Kein konkretes Ziel	
Kreislaufwirtschaft	<ul style="list-style-type: none"> Bis 2024 wollen die europäischen Landesgesellschaften (außer Deutschland) eine Million alte Mobilgeräte einsammeln und durch Wiederaufbereitung oder Recycling in den Kreislauf zurückführen. Bis 2024 sollen keine bei der Telekom in Europa 	<ul style="list-style-type: none"> Bis 2025: 100 % des Netzwerkabfalls wiederverwenden, weiterverkaufen oder recyceln 	<ul style="list-style-type: none"> Bis 2030 „Zero ICT-Waste Company“ Bis 2024 werden 90 % der stationären Endgeräte wie Router und Decoder, die von den Kund:innen zurückkommen, wiederaufbereitet und wiederverwendet. Bis 2025 werden für alle Einkäufe von 	

Umweltziel	Deutsche Telekom	Vodafone	Telefónica Deutschland	United Internet
	<p>anfallenden elektronischen Abfälle oder zurückgenommene Geräte, wie beispielsweise Smartphones, Router oder Laptops, auf der Mülldeponie ohne Einsatz von Recyclingprozessen landen.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Bis 2030 sollen alle in Umlauf gebrachten Produkte in den Kreislauf zurückgeführt werden. 		<p>elektronischen Geräten für Kund:innen Zirkularitäts-Kriterien eingeführt.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ende 2025 wird kein Abfall von Geräten der Netzwerktechnik mehr auf Deponien entsorgt. 	

Quellen: DT AG: Corporate Responsibility Bericht 2022; Vodafone Group Plc: Annual Report 2022; Telefónica Deutschland Holding GmbH: Corporate Responsibility Report 2022; united internet: Nachhaltigkeitsbericht 2022.

Wie zu erkennen ist, spielen bei den Unternehmen die Themen Treibhausgasminderung und Erneuerbare Energien eine wesentliche Rolle. Auch im Bereich Energieeffizienz und Kreislaufwirtschaft gibt es Ziele. Dies ist nicht der Fall für andere Bereiche (z. B. Wasser Biodiversität, Landnutzung).

Einzelne Anbieter am Markt werben bereits gezielt mit der Umweltfreundlichkeit ihres Angebots.¹⁶⁵ Die Website Utopia schreibt dazu: „*Wetell aus Freiburg ist aktuell der einzige uns bekannte Mobilfunkanbieter mit konsequent nachhaltigem Konzept und durchdachtem Datenschutz.*“¹⁶⁶ Auf der Webseite findet sich auch eine Einschätzung zu den Aktivitäten der drei großen Wettbewerber Deutsche Telekom, Vodafone und Telefónica. Ein klarer Vorreiter in Sachen Nachhaltigkeit wird dort nicht identifiziert, allerdings ist die Wirkung eines Wechsels des Handytarifs auf die Nachhaltigkeit lt. Website schwerer konkret belegbar „als beispielsweise beim Wechsel zu einem guten Ökostromanbieter oder zu einer nachhaltigen Bank.“¹⁶⁷ Eine detaillierte Untersuchung könnte hier ggf. für mehr Klarheit sorgen.

5.3.3 Kundeninformationen

Letztlich entscheiden die Kunden, welche Produkte ihnen den höchsten Nutzen stiften. Dabei ist Nachhaltigkeit nur eines von vielen Kaufkriterien wie Preis, Qualität oder sonstigen Vertragsbedingungen. Derzeit erscheint das Kundeninteresse an nachhaltigen Gigabitprodukten nach Angaben der Anbieter noch gering zu sein.

Die Endkunden fragen derzeit nicht gezielt nach nachhaltigen Produkten. Danach zeigt eine Umfrage in acht europäischen Ländern (darunter Deutschland) im Januar 2023, dass 53 % der Befragten zwar Wert auf nachhaltige Netze der TK-Anbieter legen, aber nur 25 % der Kunden sind „bereit, ihr Verhalten hin zu einem nachhaltigeren digitalen Lebensstil zu verändern.“¹⁶⁸

Um einen nachhaltigen Anbieter auswählen zu können, bedarf es für den Kunden einer Auswahlmöglichkeit (d. h. Wettbewerb) und einer entsprechenden Information über die Nachhaltigkeit des Wirtschaftens der Unternehmen. Letzteres kann über verschiedene Wege erfolgen.

Für Endkundenprodukte gibt es Überlegungen zur Einführung eines digitalen Produktpasses.¹⁶⁹ Die darin enthaltenen Informationen zu den verwendeten Materialien würden Recycling vereinfachen, insbesondere bei Kunststoffen zum sortenreinen Recycling.

¹⁶⁵ Vgl. <https://www.wetell.de/vision/klimaschutz/>, zuletzt abgerufen am 20.10.2023.

¹⁶⁶ Vgl. <https://utopia.de/ratgeber/nachhaltige-mobilfunkanbieter-gruene-handytarife-im-vergleich/>, zuletzt abgerufen am 12.11.2023.

¹⁶⁷ Vgl. <https://utopia.de/ratgeber/nachhaltige-mobilfunkanbieter-gruene-handytarife-im-vergleich/>, zuletzt abgerufen am 12.11.2023.

¹⁶⁸ Titjen und Hafer (2023).

¹⁶⁹ Vgl. EU-Kommission 2022), S. 29; Wuppertal Institut, University of Cambridge (2022).

Diese Informationen würden u. U. zu Fortschritten hin zu einem chemischen Ansatz (Trennung der Additive) führen und mehr Anreize für modulare Bauweisen schaffen.

Zum einen kann sich der Kunde selbst in den Nachhaltigkeitsberichten der Unternehmen informieren. Dies erscheint aufgrund der hohen Transaktionskosten eher unwahrscheinlich. Ein anderer Weg wäre die direkte Information des Kunden z. B. auf der Kundenrechnung. In Frankreich müssen Internetdienstanbieter und Telekommunikationsbetreiber (physisch und virtuell) für Fest- und Mobilfunknetze ab dem 1. Januar 2024 ihre Abonnenten über die Menge der verbrauchten Daten informieren und das Äquivalent an Treibhausgasemissionen angeben. Diese Methodik muss die Treibhausgasemissionen aus verschiedenen Lebenszyklusphasen berücksichtigen.¹⁷⁰

6 Fazit und Ausblick

Der nachhaltige Ausbau von Gigabitnetzen findet in einem Spannungsfeld zwischen verschiedenen politischen, regulatorischen, rechtlichen und volkswirtschaftlichen Zielen statt. Durch Wettbewerb entsteht für die ausbauenden Unternehmen oftmals ein Kostendruck, der sie zu einem möglichst schonenden Ressourcen- und Energieverbrauch anreizt.

Unabhängig von betriebswirtschaftlichen Gründen, die ökologische Nachhaltigkeit der Wertschöpfung zu verbessern, gibt es in vielen Bereichen auf europäischer und nationaler Ebene Vorgaben und Maßnahmen, die auf eine Messung und Steuerung von Nachhaltigkeit abzielen.

In den in dieser Metastudie betrachteten Infrastrukturen wie Rechenzentren, drahtgebundenen Netze, öffentlicher Mobilfunk und Gebäude sind das Bewusstsein und der Erkenntnisstand bezüglich der ökologischen Nachhaltigkeit unterschiedlich stark ausgeprägt. Es zeigt sich, dass z. B. auch in Bezug auf Nachhaltigkeit von relativ gut erforschten Bereichen wie den Rechenzentren noch Handlungsbedarf in der Umsetzung besteht. Eine umfangreiche Niederlegung zur Messung und Indikatoren zur Nachhaltigkeit in (internationalen) Standards steht die Ausrichtung der Rechenzentren an den jeweiligen technischen Gegebenheiten vor Ort gegenüber. Mit dem Energieeffizienzgesetz gibt es in Deutschland an dieser Stelle erstmals einen gesetzlichen Rahmen.

Im Bereich der drahtgebundenen Netze und Mobilfunknetze ist der Stromverbrauch trotz steigender Datenraten relativ stabil geblieben bzw. nur mäßig gestiegen.¹⁷¹ Dies liegt in erster Linie an der verbesserten Energieeffizienz¹⁷² und deutet darauf hin, dass die Unternehmen den Technologiewechsel vorantreiben. Hier spielt auf der einen Seite der

¹⁷⁰ ADEME (2023), S. 11.

¹⁷¹ Grünwald, Caviezel (2022), S. 64 ff.

¹⁷² Grünwald, Caviezel (2022), S. 64 ff.

erwähnte Kostendruck eine Rolle, auf der anderen Seite aber z. B. im Mobilfunk auch die (erwartete) Nachfrage der Kunden nach der neuesten Technologie sowie entsprechende Ausbaupflichtungen.¹⁷³

Insgesamt üben die Netzbetreiber (weltweit) Druck auf die Hersteller aus, die Energieeffizienz der eingesetzten Hard- und Software sowie die Umweltverträglichkeit der verwendeten Materialien (Recycling) zu verbessern. Schließlich ist es wichtig festzuhalten, dass die Anstrengungen zu mehr Nachhaltigkeit im Kontext gesehen werden müssen. Dies bedeutet, dass die Endkundengeräte der Kunden (Mobilfunkgeräte, PCs, Laptops, Smart TVs etc.) einen mindestens genauso großen ökologischen Fußabdruck im Bereich der THG-Emissionen hinterlassen wie die in dieser Studie beschriebene Netzinfrastruktur

Für die nahen Zukunft gilt es, das Thema Nachhaltigkeit noch klarer zu erforschen, zu kommunizieren und zu positionieren, um somit deren Stellenwert im Zielsystem des Netzauf- und Netzausbaus zu definieren.

Erste Schritte auf diesem Weg werden im Rahmen dieses Projektes in einem gesonderten Eckpunktepapier¹⁷⁴ festgehalten. Im Anschluss sollen unter intensiver Einbindung der relevanten Akteure konkrete Handlungsempfehlungen entwickelt werden. Damit wird ein direkter Arbeitsauftrag aus der Gigabitstrategie der Bundesregierung umgesetzt.

¹⁷³ Siehe z. B. www.smartweb.de/mobilfunk-report-deutschland-2023, zuletzt abgerufen am 20.10.2023.

¹⁷⁴ Grundlage für die Eckpunkte bildet das Thesenpapier, das auf einem Workshop am 5. September in Berlin diskutiert wurde. Dieses findet sich in Anhang 2 dieser Studie.

Literatur

- Acton, M., Bertoldi, P., Booth, J. (2023): 2023 Best Practice Guidelines for the EU Code of Conduct on Data Centre Energy Efficiency, Version 14.1.0 (Final version).
- ADEME [Agence de la Transition Ecologique] (2023): General principles for the environmental labelling of consumer products, Methodological standard for the environmental assessment for Internet Service Provision (ISP).
- Agiwal, M., Roy, A., Saxena, N. (2016): Next Generation 5G Wireless Networks: A Comprehensive Survey, in: IEEE Communications Surveys & Tutorials, vol. 18, no. 3, S. 1617-1655.
- Alhumaima, R., Shireen, J., Al-raweshidy, H. (2018): On the Energy Efficiency of Virtual Machines' Live Migration in Future Cloud Mobile Broadband Networks, in: Broadband Communications Networks - Recent Advances and Lessons from Practice, S. 407-420.
- Arthur D. Little, eco Verband (2023): Digitale Transformation für mehr Nachhaltigkeit, Positive Effekte digitaler Technologien und Infrastrukturen auf die Klimabilanz von Wirtschaft und Gesellschaft.
- Behrendt, S., Göll, E., Korte, F. (2018): Effizienz, Konsistenz, Suffizienz; Strategeanalytische Betrachtung für eine Green Economy, IZT-Text 1-2018.
- BEREC [Body of European Regulators for Electronic Communications] (2022): BEREC Report on Sustainability: Assessing BEREC's contribution to limiting the impact of the digital sector on the environment.
- BEREC [Body of European Regulators for Electronic Communications] (2023): BEREC Report on Sustainability Indicators for Electronic Communications Networks and Services.
- Bermejo, B., Juiz, C. (2023): Improving cloud/edge sustainability through artificial intelligence: A systematic review, in: Journal of Parallel and Distributed Computing 176, S. 41–54.
- Bitkom (2020): Klimaschutz durch digital Technologien - Chancen und Risiken. abrufbar unter: https://www.bitkom.org/sites/default/files/2020-05/2020-05_bitkom_klimastudie_digitalisierung.pdf, zuletzt abgerufen am 15.11.2023.
- Bitkom (2021): Bitkom-Stellungnahme zu den Umweltzeichen Blauer Engel Energieeffizienter Rechenzentrumsbetrieb (DE-UZ 161) und Blauer Engel Klimaschonendes Colocation Rechenzentrum (DE-UZ 214).
- Bitkom (2022): Resilienz der Telekommunikationsnetze stärken, Herausforderungen & Handlungsempfehlungen.
- Bitkom (2023): Rechenzentren in Deutschland, Aktuelle Marktentwicklungen – Update 2023.
- Blauer Engel (2023): Rechenzentren, DE-UZ 228, Vergabekriterien, Ausgabe Januar 2023, Version 1.
- BMDV [Bundesministerium für Digitales und Verkehr] (2020): Mitnutzungspotentiale kommunaler Trägerinfrastrukturen für den Ausbau der nächsten Mobilfunkgeneration 5G, Eine Handreichung der AG Digitale Netze des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur.

- BMDV [Bundesministerium für Digitales und Verkehr] (2022): Gigabitstrategie der Bundesregierung.
- BNetzA [Bundesnetzagentur] (2023): Jahresbericht Telekommunikation 2022.
- Bordage, F., de Montenay, L., Lees-Perasso, E., Prunel, D., Domon, F., Vateau, C., Benqassem, S., Orgelet, J. (2021): Digital technologies in Europe: an environmental life cycle approach.
- Bundesregierung (2023): Entwurf eines Gesetzes zur Steigerung der Energieeffizienz und zur Änderung des Energiedienstleistungsgesetzes.
- CBRE (2023): Market Outlook 2023, Deutschland Real Estate Report.
- CEN [European Committee for Standardization], CENELEC [European Committee for Electrotechnical Standardization] und ETSI [European Telecommunications Standards Institute] (2022): Energy Management and Environmental Viability of Data Centres, Based on the Edition 9 Report of the CEN/CENELEC/ETSI Coordination Group on Green Data Centres.
- Chochliouros, I.P., Kourtis, M.A., Spiliopoulou, A.S., Lazaridis, P., Zaharis, Z., Zarakovitis, C., Kourtis, A. (2021): Energy Efficiency Concerns and Trends in Future 5G Network Infrastructures, in: Energies 2021, 14, 5392, S. 1- 14.
- Cisco (2018): Cisco Visual Networking Index: Forecasts and Trends 2017–2022.
- Cloud&Heat (2019): CO2- und Kosteneinsparpotenziale durch das Cloud&Heat-Kühlsystem mit Abwärmenutzung in Rechenzentren, Whitepaper.
- Corning (2023): A sustainable future with optical fiber, abrufbar unter: <https://www.corning.com/media/worldwide/coc/documents/Fiber/white-paper/WP1000.pdf>, zuletzt abgerufen am 15.11.2023.
- Crawshaw, J., Wang, S., Lambert, P. (2021): The Path to Net Zero for ICT Requires Technology Innovation, Informa Tech research, commissioned by Huawei.
- Dehli, M. (2020): Energieeffizienz in Rechenzentren, in: Energieeffizienz in Industrie, Dienstleistung und Gewerbe, Springer Vieweg, Wiesbaden.
- Deutscher Bundesrat (2023): Gesetz zur Steigerung der Energieeffizienz und zur Änderung des Energiedienstleistungsgesetzes, Drucksache 478/23 (Beschluss), Stand: 20.10.2023.
- D-fine, Frontier Economics (2022): Nachhaltigkeit digitaler Geschäftsmodelle. Entwicklung eines analytischen Bewertungskonzepts und Anwendung im Rahmen von ausgewählten Fallstudien in Netzsektoren.
- ekwb/SDIA [Sustainable Digital Infrastructure Alliance] (2022): The cooling requirements of data centers and their environmental and economic impact, White Paper.
- ETSI [European Telecommunications Standards Institute] (2017): ETSI ES 203 228 V1.2.1 (2017-04), Environmental Engineering (EE); Assessment of mobile network energy efficiency.
- Europäische Kommission (2021): Anhang der Delegierten Verordnung (EU) .../... der Kommission zur Ergänzung der Verordnung (EU) 2020/852 des Europäischen Parlaments und des Rates durch Festlegung der technischen Bewertungskriterien, anhand deren bestimmt wird, unter welchen Bedingungen davon auszugehen ist, dass eine Wirtschaftstätigkeit

einen wesentlichen Beitrag zum Klimaschutz oder zur Anpassung an den Klimawandel leistet, und anhand deren bestimmt wird, ob diese Wirtschaftstätigkeit erhebliche Beeinträchtigungen eines der übrigen Umweltziele vermeidet.

Europäische Kommission (2022): Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Ökodesign-Anforderungen für nachhaltige Produkte und zur Aufhebung der Richtlinie 2009/125/EG.

Europäische Kommission (2023): Annex 1 to the Commission Delegated Regulation supplementing Directive 2013/34/EU as regards sustainability reporting standards.

Fokusgruppe Digitale Netze (2020): Inhaus-Glasfaserertüchtigung, Handlungsempfehlung der Fokusgruppe „Digitale Netze“, Plattform „Digitale Netze und Mobilität“.

Freitag, C., Berners-Lee, M., Widdicks, K., Knowles, B., Blair, G.S., Friday, A. (2021): The real climate and transformative impact of ICT: A critique of estimates, trends, and regulations, in: Patterns (Bd. 2, Nummer 9). Cell Press.

Fritsch, M, Wein, T., Ewers, H.-J. (1999): Marktversagen und Wirtschaftspolitik, 3. Auflage, Verlag Vahlen.

Fung, B., Beran, L. (2022): Achieving sustainable data centre growth, White Paper.

Grobe, K. (2023): ICT energy efficiency and sustainability, ITG Fachkonferenz BBVID, Berlin, June 2023.

Grobe, K., Jansen, S. (2020): Limits to exponential Internet Growth, EGG 2020+, online conference, September 2020.

Gröger, J., Stobbe, L., Druschke, J., Richter, N. (2021): Green Cloud Computing, Lebenszyklus-basierte Datenerhebung zu Umweltwirkungen des Cloud Computing, Herausgeber: Umweltbundesamt.

Grünwald, R., Caviezel, C. (2022): Energieverbrauch der IKT-Infrastruktur, Endbericht zum TA-Projekt.

Haucap, J., Podszun, R., Hahn, R., Kreuter-Kirchhof, C., Rohner, T., Rösner, A., Offergeld, P., May, A. (2023): Wettbewerb und Nachhaltigkeit in Deutschland und der EU. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz.

Hintemann, R. (2020): Energiebedarf der Rechenzentren steigt trotz Corona weiter an, Cloud Computing profitiert von der Krise.

Hintemann, R., Clausen, J., Beucker, S., Hinterholzer, S. (2021): Studie zu Nachhaltigkeitspotenzialen in und durch Digitalisierung in Hessen.

ifeu-Institut für Energie- und Umweltforschung (2007): Ableitung von Kriterien zur Beurteilung einer hochwertigen Verwertung gefährlicher Abfälle, Forschungsprojekt im Auftrag des Umweltbundesamtes.

ITU [International Telecommunication Union] (2015): ITU-T L.1330, Series L: Construction, installation and protection of cables and other elements of outside plant, Energy efficiency measurement and metrics for telecommunication networks.

- Jalali, F., Hinton, K., Ayre, R., Alpcan, T., Tucker, R.S. (2016): Fog computing may help to save energy in cloud computing, in: IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 34, no. 5, S. 1728–1739.
- Jayaprakash, S., Nagarajan, M.D., Pérez de Prado, R., Subramanian, S., Divakarachari, P.B. (2021): A Systematic Review of Energy Management Strategies for Resource Allocation in the Cloud: Clustering, Optimization and Machine Learning, in: Energies 2021,14, 5322.
- Kubeneck, A., Kirchdorfer, R., Abraham, V., Wissner, M., Sörries, B. (2023): Identifizierung und Entwicklung von maßgeblichen Indikatoren zur Beurteilung der ökologischen Nachhaltigkeit von elektronischer Telekommunikationsinfrastruktur, Bericht für die Bundesnetzagentur.
- Lykou, G., Mentzelioti, D., Gritzalis, D. (2018): A new methodology toward effectively assessing data center sustainability, Computers & Security, Volume 76, S. 327-340.
- Madlener, R., Höfer, T., Bierwirth, S. (2020): Energie-Mehrverbrauch in Rechenzentren bei Einführung des 5G Standards, Tagung „Nachhaltige Rechenzentren – Chancen und Entwicklungsmöglichkeiten am Standort Baden-Württemberg“, Stuttgart, 10. März 2020.
- Mijumbi, R., Serrat, J., Gorricho, J.-L., Rubio-Loyola, J. (2015): On the Energy Efficiency Prospects of Network Function Virtualization. ArXiv, abs/1512.00215.
- Neuman, K.H., Plückebaum, T., Strube Martins, S., Schwarz-Schilling, C. (2021): Übergang von Kupfer- auf Glasfasernetze: Interessen, Spannungsfelder und mögliche Schnittmengen–Studie zur Erörterung im Gigabit-Forum
- Neumann, K.H., Strube Martins, S., Schwarz-Schilling, C. (2022): Übergang von Kupfer- auf Glasfasernetze: Phasen und Prozesse der Migration, WIK-Diskussionsbeitrag Nr. 483.
- 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.
- Rambech, E., Vandenbussche, V. (2022): Klimafotavtrykk fra utrulling av fiber, Prosjekt for IKT Norge [„Klimafußabdruck durch Glasfaserausbau, Projekt für ICT Norwegen“].
- Ramesohl, S., Berg, H., Wirtz, J. (2023): Circular Economy und Digitalisierung – Strategien für die digital-ökologische Industrietransformation. Eine Studie im Auftrag von Huawei Technologies Deutschland GmbH.
- Rhode & Schwarz (2019): Was ist Massive MIMO?, in : hf-praxis 11/2019, S. 52-55.
- Schödwell, B. et al. (2018): Kennzahlen und Indikatoren für die Beurteilung der Ressourceneffizienz von Rechenzentren und Prüfung der praktischen Anwendbarkeit.
- Solivan, S. (2015): Life Cycle Assessment on fiber cable construction methods, abrufbar unter: <http://www.diva-portal.se/smash/get/diva2:839631/FULLTEXT01.pdf>, zuletzt abgerufen am: 14.11.2023.
- Statista (2023): What is the average annual power usage effectiveness (PUE) for your largest data center?, abrufbar unter: <https://www.statista.com/statistics/1229367/data-center-average-annual-pue-worldwide/>, zuletzt abgerufen am 21.08.2023.
- Statista (2024): Volumen der jährlich generierten/replizierten digitalen Datenmenge weltweit von 2010 bis 2022 und Prognose bis 2027, abrufbar unter:

<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/267974/umfrage/prognose-zum-weltweit-generierten-datenvolumen/>, zuletzt abgerufen am 14.06.2024.

- Stahlmann, V., Clausen, J. (2000): Umweltleistung von Unternehmen, Von der Öko-Effizienz zur Öko-Effektivität, 1. Auflage, Verlag Gabler.
- Stephan, M. (2020): Power Delivery in Data Centers, Ausgewählte Kapitel der Systemsoftware (WS 2020/21), Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.
- Stobbe, L., Richter, N., Quaeck, M., Knüfermann, K., Druschke, J., Fahland, M., Höller, V.W., Wahry, N., Zedel, H., Kaiser, M., Hoffmann, S., Töpfer, M., Nissen, N.F. (2023): Umweltbezogene Technikfolgenabschätzung Mobilfunk in Deutschland (UTAMO-Projekt), Herausgeber: Umweltbundesamt.
- The Shift Project (2021): Environmental impacts of digital technology: 5-year trends and 5G governance.
- Titjen, M., Hafer, J. (2023): Network Sustainability: Mehr Nachhaltigkeit in der Telekommunikation.
- TÜV Nord (o.D.): EN 50600 Data Center Standard, What you need to know about the EN 50600.
- UBA [Umweltbundesamt] (2023): Server und Datenspeicherprodukte, Leitfaden zur umweltfreundlichen öffentlichen Beschaffung.
- VATM, Dialog Consult (2022): 24. TK-Marktanalyse Deutschland 2022.
- Vishwakarma S., Kumar, V., Arya, S., Tembhare, M., Rahul, Dutta, D., Kumar, S. (2022): E-waste in Information and Communication Technology Sector: Existing scenario, management schemes and initiatives, in: Environmental Technology & Innovation, Volume 27, 2022.
- Whitehead, B., Andrews, D., Shah, A. (2015): The life cycle assessment of a UK data centre, in: Int J Life Cycle Assess 20, S. 332–349.
- Wissner, M., Baischew, D., Schrader-Grytsenko, L., Sörries, B., Stronzik, M. (2022): Ausgewählte Informations- und Kommunikationstechnologien und ihre Auswirkungen auf umweltpolitische Ziele, WIK-Diskussionsbeitrag Nr. 492.
- Wolf, O., Loewer, U. (2020): The economic contribution of the European tower sector, A report for the European Wireless Infrastructure Association.
- World Business Council for Sustainable Development und World Resources Institute (2015): The Greenhouse Gas Protocol, A Corporate Accounting and Reporting Standard, Revised Edition.
- Wuppertal Institut, University of Cambridge (2022): Digital Product Passport: The ticket to achieving a climate neutral and circular European economy?
- Zerson M. et al. (2020): Leitfaden zur Errichtung von Glasfasergebäudenetzen, Handreichung der Fokusgruppe „Digitale Netze“ Plattform „Digitale Netze und Mobilität“, abrufbar unter: https://plattform-digitale-netze.de/app/uploads/2020/11/Leitfaden_zur_Errichtung_von_Glasfasergebäudenetzen.pdf, zuletzt abgerufen am 14.11.2023.
- Zhang, Y., Li, H., Wang, S. (2023): The global energy impact of raising the space temperature for high-temperature data centers, in: Cell Reports Physical Science, Volume 4, Issue 10.

3GPP (2021): 3GPP TS 23.002 V17.0.0 (2021-03). Technical Specification, 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Network architecture (Release 17).

Abkürzungen

ARF	Aufbau- und Resilienzfähigkeit
BBU	Baseband Unit
BImSchG	Bundes-Immissionsschutzgesetz
BImSchV	Verordnung über elektromagnetische Felder
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
CEN	Comité Européen de Normalisation (Europäisches Komitee für Normung)
CENELEC	Comité Européen de Normalisation Electrotechnique (Europäisches Komitee für elektrotechnische Normung)
CO	Central Office
CoC	Code of Conduct (Europäischer Verhaltenskodex)
CPE	Customer Premises Equipment
CSDDD	Corporate Sustainability Due Diligence Directive (Richtlinie Unternehmerische Nachhaltigkeit)
CSRD	Corporate Sustainability Reporting Directive (Richtlinie zur Unternehmens-Nachhaltigkeitsberichterstattung)
DOCSIS	Data Over Cable Service Interface Specification
DSL	Digital Subscriber Line
DSLAM	Digital Subscriber Line Access Multiplexer
EDE	Electronic Disposal Efficiency
EEEF	Europäischer Energieeffizienzfonds
EFRE	Europäischer Fonds für regionale Entwicklung
ElektroG	Elektro- und Elektronikgerätegesetz
EnEfG	Energieeffizienzgesetz
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
EVE	Energieverbrauchseffektivität
EVPG	Energieverbrauchsrelevante-Produkte-Gesetz
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoffe
FTTB	Fibre-to-the-Building
FTTC	Fibre-to-the-Curb
FTTH	Fibre-to-the-Home
GHG	Greenhouse Gas
GPON	Gigabit Passive Optical Network
GWP	Globing Warming Potential
HFC	Hybrid Fibre Coax
HSS	Home Subscriber Server
HVt	Hauptverteiler

IKT	Informations- und Telekommunikationstechnologien
IoT	Internet of Things (Internet der Dinge)
ITU	International Telecommunication Union
JRC	Joint Research Centre
KI	Künstliche Intelligenz
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
KPI	Key Performance Indicator
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)
KSG	Klimaschutzgesetz
KVz	Kabelverzweiger
LAN	Local Area Network
LCA	Life Cycle Assessment
LkSG	Lieferkettensorgfaltspflichtengesetz
LTE	Long Term Evolution
MFG	Multifunktionsgehäuse
MIMO	Multiple Input, multiple Output
MNO	Mobilfunknetzbetreiber
MRR	Material Recycling Ratio
Mt	Millionen Tonnen
NOx	Stickstoffoxide
NRA	National Regulatory Authority (Nationale Regulierungsbehörde)
OLT	Optical Line Termination
ONU	Optical Network Unit
PB	Petabyte
PM	Particulate Matter (Feinstaub)
PON	Passive optische Netzwerke
POP	Point of Presence
PtoP, PtP	Point-to-point-Netztopologie
PUE	Power Usage Effectiveness
RAID	Redundant Array of Independent Disks
REF	Renewable Energy Factor
RRH	Radio Remote Head
RU	Radio Unit
RZ	Rechenzentrum
SFRD	Sustainable Finance Disclosure Regulation (Verordnung über die Offenlegung nachhaltiger Finanzprodukte)
SSD	Solid State Drive
StrlSchG	Strahlenschutzgesetz

THG	Treibhausgasemissionen
TKG	Telekommunikationsgesetz
TWh	Terrawattstunden
UHF	Ultra-High-Frequency
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System
ÜP	Übergabepunkt
UPR	Use Phase over Production Phase Ratio
USV	Unterbrechungsfreie Stromversorgung
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
VDSL	Very High Speed Digital Subscriber Line
WDM	Wavelength Division Multiplexing
WEMoG	Wohnungseigentumsmodernisierungsgesetz
WLAN	Wireless Local Area Network
xPON	Verschiedene passive optische Netzwerke

Anhang 1: Literaturübersicht

Nr.	Publikation	Autor(en)	Art der Publikation	Jahr	Geografischer Bezug	Untersuchte Bereiche	Lebenszyklusphasen	Umweltziele	LCA für Umweltziel und Bereich	Indikatoren enthalten
1	Entwicklung des IKT-bedingten Strombedarfs in Deutschland	Stobbe et al.	Studie	2015	Deutschland	Festnetz, Mobilfunk, Rechenzentren, Gebäude	Betrieb	Erneuerbare Energien, Energieeffizienz	-	Nein
2	Energieverbrauch der IKT-Infrastruktur. Endbericht zum TA-Projekt	Grünwald, Caviezel	Studie	2022	Deutschland	Festnetz, Mobilfunk, Rechenzentren	Betrieb	Erneuerbare Energien, Energieeffizienz	-	Nein
3	Nachhaltigkeitsvergleich Internet Zugangstechnologien	Obermann	Studie	2022	Deutschland	Festnetz	Betrieb, (Herstellung, Entsorgung)	Ressourcenverbrauch, Energieeffizienz	-	Ja
4	Energy consumption of telecommunication access networks	Breide, Schindler, Waßmuth, A.	Studie	2021	Deutschland	Festnetz	Betrieb	Energieeffizienz	-	Nein

Nr.	Publikation	Autor(en)	Art der Publikation	Jahr	Geografischer Bezug	Untersuchte Bereiche	Lebenszyklusphasen	Umweltziele	LCA für Umweltziel und Bereich	Indikatoren enthalten
5	Study on Greening Cloud Computing and Electronic Communications Services and Networks	Bilsen et al.	Studie	2022	Europa	Festnetz, Mobilfunk, Rechenzentren, Gebäude	Herstellung, Betrieb, (Entsorgung)	Kreislaufwirtschaft, Energieeffizienz	-	Ja
6	6G Energy Efficiency and Sustainability	Couronné et al.	White Paper	2023	-	Mobilfunk	Betrieb	Energieeffizienz, Erneuerbare Energien	-	Ja
7	BEREC Report on Sustainability: Assessing BEREC's contribution to limiting the impact of the digital sector on the environment	BEREC	Studie	2022	Europa	Festnetz, Mobilfunk, Rechenzentren	(Herstellung, Betrieb, Entsorgung)	Kreislaufwirtschaft, Energieeffizienz, Erneuerbare Energien, Ressourcenverbrauch, Klimaschutz	-	Nein

Nr.	Publikation	Autor(en)	Art der Publikation	Jahr	Geografischer Bezug	Untersuchte Bereiche	Lebenszyklusphasen	Umweltziele	LCA für Umweltziel und Bereich	Indikatoren enthalten
8	BEREC Report on Sustainability Indicators for Electronic Communications Networks and Services	BEREC	Studie	2023	Europa	Festnetz, Mobilfunk, Rechenzentren	Herstellung, Betrieb, Entsorgung	Gesundheitliche Auswirkungen, Kreislaufwirtschaft, Landnutzung Biodiversität Wasser, Erneuerbare Energien, Ressourcenverbrauch, Energieeffizienz, Klimaschutz	-	Ja
9	DIGITAL TECHNOLOGIES IN EUROPE: an environmental life cycle approach	Bordage et al.	Studie	2021	Europa	Festnetz, Mobilfunk, Rechenzentren	Herstellung, Betrieb, Entsorgung	Biodiversität, Umweltverschmutzung Klimaschutz, Energieeffizienz, Ressourcenverbrauch, Gesundheitliche Auswirkungen	Alle Ziele Betrieb, Herstellung, Entsorgung	Ja
10	General principles for the environmental labelling of consumer products	ADEME	Studie	2023	Frankreich	Festnetz, Mobilfunk	(Herstellung, Betrieb, Entsorgung)	Klimaschutz	(Betrieb, Herstellung, Entsorgung)	Ja

Nr.	Publikation	Autor(en)	Art der Publikation	Jahr	Geografischer Bezug	Untersuchte Bereiche	Lebenszyklusphasen	Umweltziele	LCA für Umweltziel und Bereich	Indikatoren enthalten
11	Studie zu Nachhaltigkeitspotenzialen in und durch Digitalisierung in Hessen	Hintemann et al.	Studie	2021	Hessen, Deutschland	Festnetz, Mobilfunk, Rechenzentren	Herstellung, Betrieb, Entsorgung	Energieeffizienz, Klimaschutz	Klimaschutz Herstellung, Betrieb, Entsorgung	Ja
12	Kennzahlen und Indikatoren für die Beurteilung der Ressourceneffizienz von Rechenzentren und Prüfung der praktischen Anwendbarkeit	Schödwell et al.	Studie	2018	-	Rechenzentren	Herstellung, Betrieb, Entsorgung	Erneuerbare Energien, Wasser, Energieeffizienz, Ressourcenverbrauch, Klimaschutz	Alle Ziele Herstellung, Betrieb, Entsorgung	Ja
13	Data centres in future European energy systems - energy efficiency, integration and policy	Koronen, Åhman, Nilsson	Aufsatz in Fachzeitschrift	2020	Europa	Rechenzentren	Betrieb	Kreislaufwirtschaft, Erneuerbare Energien, Energieeffizienz	-	Nein

Nr.	Publikation	Autor(en)	Art der Publikation	Jahr	Geografischer Bezug	Untersuchte Bereiche	Lebenszyklusphasen	Umweltziele	LCA für Umweltziel und Bereich	Indikatoren enthalten
14	Achieving sustainable data center growth	Fung, Beran	White Paper	2022	Global	Rechenzentren	Herstellung, Betrieb, Entsorgung	Kreislaufwirtschaft, Wasser, Klimaschutz, Erneuerbare Energien, Energieeffizienz	-	Ja
15	Umweltbezogene Technikfolgenabschätzung Mobilfunk in Deutschland (UTAMO-Projekt)	Stobbe et al.	Studie	2023	Deutschland	Mobilfunk	Herstellung, Betrieb	Kreislaufwirtschaft, Erneuerbare Energien, Energieeffizienz, Ressourcenverbrauch, Klimaschutz	-	Ja
16	Estimating the resource intensity of the Internet: A meta-model to account for cloud-based services in LCA	Ullrich et al.	Aufsatz in Fachzeitschrift	2022	Global	Festnetz, Rechenzentren	Betrieb	Energieeffizienz, Klimaschutz	Energieeffizienz Herstellung und Betrieb	Ja

Nr.	Publikation	Autor(en)	Art der Publikation	Jahr	Geografischer Bezug	Untersuchte Bereiche	Lebenszyklusphasen	Umweltziele	LCA für Umweltziel und Bereich	Indikatoren enthalten
17	Green Cloud Computing Lebenszyklus-basierte Datenerhebung zu Umweltwirkungen des Cloud Computing	Gröger et al.	Studie	2021	Deutschland	Rechenzentren	Herstellung, Betrieb	Erneuerbare Energien, Wasser, Energieeffizienz, Ressourcenverbrauch, Klimaschutz	Energieeffizienz, Wasser, Ressourcenverbrauch, Klimaschutz für Herstellung und Betrieb	Ja
18	Klimaschutz durch digitale Technologien – Chancen und Risiken	Bitkom	Kurzstudie	2020	Global	Rechenzentren, Festnetz, Mobilfunk	Herstellung, Betrieb, Entsorgung	Erneuerbare Energien, Energieeffizienz, Klimaschutz	-	Nein
19	The Environmental Impacts of Core Networks for Mobile Telecommunications A Study Based on the Life Cycle Assessment (LCA) of Core Network Equipment	Pino	Masterarbeit	2017	Schweden	Mobilfunk (Kernnetz)	Herstellung, Betrieb, Entsorgung	Biodiversität, Umweltverschmutzung, Gesundheitliche Auswirkungen, Kreislaufwirtschaft, Energieeffizienz, Ressourcenverbrauch, Klimaschutz	Alle Ziele Betrieb, Herstellung, Entsorgung	Nein

Nr.	Publikation	Autor(en)	Art der Publikation	Jahr	Geographischer Bezug	Untersuchte Bereiche	Lebenszyklusphasen	Umweltziele	LCA für Umweltziel und Bereich	Indikatoren enthalten
20	Environmental impact of electronic communications	Godlovitch et al (WIK, Ram-boll)	Studie	2022	Europa	Mobilfunk, Fest-netz	Herstellung, Betrieb, Ent-sorgung	Wasser, Gesund-heitliche Auswirkungen, Kreislaufwirt-schaft, Erneuerbare Energien, Energieeffizienz, Ressourcen-verbrauch, Klima-schutz	-	Nein
21	Next generation mobile networks - Problem or opportunity for climate protection?	Bieser et al.	Studie	2020	Schweiz	Mobilfunk	Herstellung, Betrieb, Ent-sorgung	Erneuerbare Ener-gien, Energieeffizi-enz, Klimaschutz	Klimaschutz für Betrieb, Herstellung	Ja
22	A new meth-odology to-ward effec-tively as-sessing data center sus-tainability.	Lykou, Ment-zelioti, Gri-tzalis	Aufsatz in Fachzeitschrift	2018	Global	Rechenzentren	Herstellung, Betrieb, Ent-sorgung	Erneuerbare Ener-gien, Energieeffizi-enz, Klimaschutz	-	Ja

Nr.	Publikation	Autor(en)	Art der Publikation	Jahr	Geografischer Bezug	Untersuchte Bereiche	Lebenszyklusphasen	Umweltziele	LCA für Umweltziel und Bereich	Indikatoren enthalten
23	The life cycle assessment of a UK data centre	Whitehead, Andrews, Shah	Aufsatz in Fachzeitschrift	2015	Großbritannien	Rechenzentren	Herstellung, Betrieb, Entsorgung	Gesundheitliche Auswirkungen, Kreislaufwirtschaft, Landnutzung, Wasser, Erneuerbare Energien, Energieeffizienz, Ressourcenverbrauch, Klimaschutz	Alle Ziele Betrieb, Herstellung, Entsorgung	Nein
24	The Water Footprint of Data Centers	Ristic, Kaveh, Makuch	Aufsatz in Fachzeitschrift	2015	Global	Rechenzentren	Betrieb	Energieeffizienz, Wasser	-	Ja
25	Life Cycle Assessment on fiber cable construction methods	Solivan	Masterarbeit	2015	Global	Festnetz	Herstellung	Gesundheitliche Auswirkungen, Kreislaufwirtschaft, Landnutzung, Umweltverschmutzung, Wasser, Erneuerbare Energien, Energieeffizienz, Ressourcenverbrauch, Klimaschutz	Alle Ziele Herstellung	Nein

Nr.	Publikation	Autor(en)	Art der Publikation	Jahr	Geografischer Bezug	Untersuchte Bereiche	Lebenszyklusphasen	Umweltziele	LCA für Umweltziel und Bereich	Indikatoren enthalten
26	Trends in Data Center Energy Consumption under the European Code of Conduct for Data Centre Energy Efficiency	Bertoldi, Avgerinou, Castellazzi	Studie	2017	Europa	Rechenzentren	Betrieb	Energieeffizienz	-	Ja
27	Electricity Intensity of Internet Data-Transmission	Aslan et al.	Aufsatz in Fachzeitschrift	2017	Global	Festnetz, Rechenzentren	Betrieb	Energieeffizienz	-	Ja
28	The Energy and Carbon Footprint of the Global ICT and E&M Sectors 2010–2015	Malmodin, Lundén	Aufsatz in Fachzeitschrift	2018	Global	Rechenzentren, Festnetz, Mobilfunk	Herstellung und Betrieb	Energieeffizienz, Klimaschutz	Klimaschutz für Herstellung und Betrieb	Ja

Nr.	Publikation	Autor(en)	Art der Publikation	Jahr	Geografischer Bezug	Untersuchte Bereiche	Lebenszyklusphasen	Umweltziele	LCA für Umweltziel und Bereich	Indikatoren enthalten
29	Impacts of the digital transformation on the environment and sustainability	Liu et al.	Studie	2019	Global	Rechenzentren, Festnetz, Mobilfunk	(Herstellung, Betrieb, Entsorgung)	Gesundheitliche Auswirkungen, Kreislaufwirtschaft, Landnutzung Umweltverschmutzung Biodiversität Wasser, Ressourcenverbrauch	-	Ja
30	BLAUER ENGEL Das Umweltzeichen Rechenzentren DE-UZ 228	UBA	Richtschnur	2023	Deutschland	Rechenzentren	Betrieb	Wasser, Erneuerbare Energien, Energieeffizienz, Ressourcenverbrauch, Klimaschutz	-	Ja
31	Energy Efficiency on Fully Cloudified Mobile Networks: Survey, Challenges, and Open Issues	Alnoman et al.	Aufsatz in Fachzeitschrift	2018	Global	Mobilfunknetz	Betrieb	Erneuerbare Energien, Energieeffizienz	-	Nein

Nr.	Publikation	Autor(en)	Art der Publikation	Jahr	Geografischer Bezug	Untersuchte Bereiche	Lebenszyklusphasen	Umweltziele	LCA für Umweltziel und Bereich	Indikatoren enthalten
32	Energy Efficiency and Delay in 5G Ultra Reliable Low Latency Communications System Architectures	Deepa, Beena, Girinath	Aufsatz in Fachzeitschrift	2018	Global	Mobilfunknetz	Betrieb	Energieeffizienz	-	Nein
33	Estimating a Data Center's Electrical Carbo Footprint	Bouley	White Paper	2010	Global	Rechenzentren	Herstellung, Betrieb, Entsorgung	Erneuerbare Energien, Energieeffizienz, Klimaschutz	-	Nein
34	Climate footprint of fibre deployment	Rambech, Vandebussche	Kurzstudie	2022	Norwegen	Festnetz	Herstellung	Energieeffizienz, Klimaschutz	Klimaschutz für Herstellung, Betrieb und Entsorgung	Ja
35	The cooling requirements of data centres and their environmental and economic impact	ekwb / SDIA	White Paper	2022	Global	Rechenzentren	Betrieb	Energieeffizienz, Klimaschutz, Wasser	-	Ja

Nr.	Publikation	Autor(en)	Art der Publikation	Jahr	Geografischer Bezug	Untersuchte Bereiche	Lebenszyklusphasen	Umweltziele	LCA für Umweltziel und Bereich	Indikatoren enthalten
36	Forschungsvorhaben Indikatoren Nachhaltigkeit	Kubeneck et al. (WIK, Ramboll)	Studie	2023	Global	Rechenzentren, Festnetz, Mobilfunk	Herstellung, Betrieb, Entsorgung	Gesundheitliche Auswirkungen, Kreislaufwirtschaft, Landnutzung, Umweltverschmutzung, Wasser, Erneuerbare Energien, Energieeffizienz, Ressourcenverbrauch, Klimaschutz	-	Ja
37	ICT Energy Efficiency and Sustainability	Grobe	Studie	2023	Global	Rechenzentren, Festnetz, Gebäude	Herstellung, Betrieb, Entsorgung	Ressourcenverbrauch, Energieeffizienz, Kreislaufwirtschaft, Umweltverschmutzung	ja	Ja
38	The real climate and transformative impact of ICT. A critique of estimates, trends, and regulations	Freitag et al.	Studie	2021	Global	Rechenzentren, Festnetz, Mobilfunk	Herstellung, Betrieb, Entsorgung	Energieeffizienz, Klimaschutz	-	Ja

Nr.	Publikation	Autor(en)	Art der Publikation	Jahr	Geografischer Bezug	Untersuchte Bereiche	Lebenszyklusphasen	Umweltziele	LCA für Umweltziel und Bereich	Indikatoren enthalten
39	Geschäftsmodelle zur Förderung einer Kreislaufwirtschaft. Grundlagenbericht und Workshopergebnisse	Fasko, Glättli	Studie	2016	Schweiz	-	Entsorgung	Kreislaufwirtschaft	-	Ja
40	Environmental impacts of digital technology: 5-year trends and 5G governance	Ferreboeuf et al.	Studie	2021	Global	Rechenzentren, Festnetz, Mobilfunk	Herstellung, Betrieb, Entsorgung	Energieeffizienz, Klimaschutz	-	ja

Anhang 2: Thesenpapier des Workshops vom 5. September 2023

Betrieb von Gigabitnetzen (Diskussionsgrundlage)

Nachhaltigkeit spielt beim Ausbau der digitalen Infrastruktur eine immer größere Rolle. Das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) hat daher die WIK-Consult GmbH und die PricewaterhouseCoopers GmbH WPG (PwC) mit einer Studie rund um die nachhaltige Netzinfrastruktur beauftragt. Das vorliegende Thesenpapier dient als erste Grundlage für den im Projekt vorgesehenen Stakeholder-Dialog und gemeinsam mit der parallel erarbeiteten Metastudie der Ableitung von Handlungsempfehlungen zur Stärkung der ökologischen Nachhaltigkeit der Gigabitinfrastruktur in Deutschland.

a) Zielsetzung

These 1: Der Fokus ökologischer Nachhaltigkeit liegt in der derzeitigen Diskussion primär auf dem Energieverbrauch und den Emissionen im Betrieb von Gigabitinfrastrukturen, weitere Aspekte ökologischer Nachhaltigkeit werden weniger berücksichtigt. Das Thema Nachhaltigkeit nimmt vorrangig der Energieverbrauch sowie CO₂-Emissionen beim Betrieb von Gigabitinfrastrukturen in den Blick. Ökologische Nachhaltigkeit geht jedoch darüber hinaus und erfordert im gesamten Lebenszyklus die effiziente Nutzung von Ressourcen wie Wasser, den Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft, die Vermeidung und Verminderung von Umweltverschmutzungen sowie den Schutz von Biodiversität.

Inwiefern sollten weitere Nachhaltigkeitsziele neben Energie und Emissionen eine größere Rolle spielen?

These 2: Ökologische Nachhaltigkeit verfügt noch nicht über passende Anreizstrukturen; der Rahmen für Rechts-, Regulierungs- und Fördermaßnahmen ist jedoch komplex. Die ökologische Nachhaltigkeit ist durch bestehende rechtliche Regelungen, die Interessen der Kapitalmärkte und betriebswirtschaftliche Anforderungen bereits Gegenstand vielfältiger Aktivitäten von Unternehmen, die Gigabitinfrastrukturen herstellen, aufbauen, betreiben und zurückbauen. Die EU hat ambitionierte Klimaziele – nicht nur die Reduzierung von Emissionen, sondern auch die Förderung umweltfreundlicher Infrastrukturen. Ökologische Nachhaltigkeit erfordert daher auch eine Betrachtung im internationalen Kontext sowie im Zusammenhang mit dem europäischen Binnenmarkt. Anreize, Rechts-, Regulierungs- und Fördermaßnahmen sollten zu diesen Zielen passen.

Braucht es ein gemeinsames Zielbild, um Regelungen auch international konform zu gestalten?

These 3: Ökologische Nachhaltigkeit bewegt sich in einem Konfliktfeld mit anderen Ausbau- und Betriebszielen von Gigabitnetzen. Ausbau und Betrieb von Gigabitinfrastrukturen sind unterschiedlichen gesellschaftlichen, politischen und ökonomischen Zielsetzungen unterworfen. Nachhaltigkeit bewegt sich zum Teil in Konflikt mit anderen Zielen, z. B.

Wettbewerb und Nachhaltigkeit, ökologische Nachhaltigkeit und Resilienz, Nutzung nachhaltiger Netzinfrastrukturen und Auswahlfreiheit auf Vorleistungs- und Endkundenmärkten, digitale Souveränität und Nachhaltigkeit.

Welche Priorität sollte das Thema Nachhaltigkeit bei der Zielsetzung genießen?

b) Operationalisierung

These 4: Innovationen können für niedrigere Energieverbräuche sorgen – die vollen Effekte durch neue Technologien manifestieren sich jedoch erst nach Abschaltung alter Technologien. Moderne Technologien wie FTTH (Fiber to the Home – Glasfaser bis in die Wohnung statt nur ins Gebäude), der Umstieg auf 5G und 6G sowie Glasfaser statt Kupfer weisen eine höhere Energieeffizienz und niedrigen Ressourceneinsatz auf und reduzieren so perspektivisch CO₂-Emissionen. Dieser Einspareffekt stellt sich dann ein, wenn der Ausbau von Glasfaser-basierten Infrastrukturen die Bestandsinfrastrukturen substituiert. Komplementäre Netzinfrastrukturen hingegen erhöhen aktuell die Auswahlmöglichkeiten des Endkunden, fördern den Infrastrukturwettbewerb, verringern aber nicht die Emissionen.

Wie kann sichergestellt werden, dass eine ganzheitliche Migration erreicht werden kann?

These 5: Der maßgebliche Hauptteil von Emissionen entsteht in Scope 3 und ist nur bedingt und mit mehr Aufwand von Unternehmen beeinflussbar. Im Sektor Informations- und Kommunikationstechnik (IKT, Wirtschaftszweig-Klasse J) entfallen etwa 3 % auf die direkt von Unternehmen kontrollierten Emissionen in Scope 1 und etwa 9 % auf Emissionen aus der eingekauften Energie in Scope 2. Scope 3 umfasst indirekte Emissionen innerhalb der Wertschöpfungskette und macht mit ca. 88 % den größten Anteil aus. Diese verteilen sich im IKT-Sektor global und lassen sich im Gegensatz zu Scope 1 und 2 nur indirekt beeinflussen. Dies erschwert die Umsetzung von mehr Nachhaltigkeit in der Branche und erfordert größere Anstrengungen.

Welche Hebel stehen dem Sektor zur Verfügung, um auch Emissionen in Scope 3 zu verringern?

These 6: Die Integration Erneuerbarer Energien in die Gigabitinfrastruktur kann den CO₂-Fußabdruck signifikant reduzieren. Für den IKT-Sektor ist Strom ein wesentlicher Hebel. Im IKT-Sektor ist der Anteil an Strom bei den eingesetzten Energieträgern überdurchschnittlich hoch: Mehr als 50 % der eingesetzten Energie entfällt auf Strom, im Durchschnitt aller Branchen entfällt auf Strom nur rund 10 %. Ein hoher CO₂-Faktor für Strom erhöht dabei die Emissionen, während Strom und Wärme bzw. Kühlung aus Erneuerbaren Energien (EE) den Effekt reduzieren.

Wie kann der Anteil Erneuerbarer Energien weiter gesteigert werden?

These 7: Semantisch vergleichbare Indikatoren für Messung und Vergleich der ökologischen Nachhaltigkeit liegen noch nicht in allen Handlungsfeldern vor. Die Verbesserung der ökologischen Nachhaltigkeit setzt Indikatoren und Daten voraus, die semantisch über alle in den Wertschöpfungsprozessen beteiligten Unternehmen zumindest annähernd vergleichbar sind. Zum nachhaltigen Ausbau und Betrieb von Gigabitnetzen ist entlang der betrachteten Netzebenen bereits eine Ausrichtung an verschiedenen Klima- und Umweltindikatoren erkennbar. Für aktuelle und geplante gesetzliche Regelungen wie die CSRD besteht kein (auditierbares) Indikatorenset.

Welcher Schritte bedarf es, um zu einem vergleichbaren Indikatorenset zu gelangen?

c) Studienlage, Benchmarks und KPIs

These 8: Bei Rechenzentren sind hohe Stromverbräuche und der Wasserverbrauch während des Betriebs gut erforscht. Während der Betrieb von Rechenzentren in Bezug auf Energieverbrauch wissenschaftlich gut untersucht ist und hier bereits einschlägige Normen existieren, besteht insbesondere für die Phasen Herstellung, Bau und Entsorgung bzw. Rückbau weiterer Forschungsbedarf. Die Nutzung der Indikatoren im Bereich Betrieb ist am fortgeschrittensten.

Wo sollte angesetzt werden, um die Effizienz des Energie- und Wasserverbrauchs weiter zu steigern?

These 9: Der Mobilfunk ist geprägt von steigenden Datenraten und einer Zunahme der Energieeffizienz. Ohne technologische Fortschritte wird der Stromverbrauch insbesondere in den Mobilfunknetzen mittel- bis langfristig deutlich ansteigen. Während 5G allgemein als energieeffizienter angesehen wird als die Vorgängergenerationen, wird dies nach derzeitigem Stand durch höhere Datendurchsätze überkompensiert. Die aktuelle wissenschaftliche Diskussion fokussiert stark auf den Energieverbrauch während der Nutzungsphase.

Wie können steigende Datenmengen und Energieeinsparung in Einklang gebracht werden?

These 10: Festnetz: Strategisches Verhalten und die mangelnde Datenlage für bestehende Netzinfrastrukturen führen zu Überbau und erhöhen damit den Ressourcenbedarf. Allgemein bietet die wissenschaftliche Literatur bereits eine umfassende Analyse des Betriebs von Festnetzen und des damit verbundenen Energieverbrauchs. Jedoch sind erhebliche Forschungslücken in Bezug auf die Herstellung, Legung, Entsorgung und die damit einhergehenden Umweltauswirkungen von Festnetzen zu verzeichnen. Diese Bereiche erfordern weiterführende Untersuchungen, um eine umfassende und nachhaltige Entwicklung dieser Technologien zu gewährleisten. Das Fehlen einer einheitlichen Datengrundlage, bspw. eines Katasters, stellt eine Herausforderung für die Kooperation im Netzbetrieb dar, v. a. für eine gemeinsame Nutzung bestehender Infrastrukturen.

Wie können Nachhaltigkeit und Überbau in Einklang gebracht werden?

These 11: Auf der Ebene Gebäude haben Unternehmen und Politik nur eingeschränkte Einflussmöglichkeiten, da hier ein großer Hebel bei Haushalten besteht. Obwohl Kennzahlen zur Energieeffizienz der Gebäudetechnik während der Nutzungsphase umfangreich erforscht sind, besteht eine gewisse Unsicherheit hinsichtlich der Festlegung von Berechnungsvorschriften und Datenerhebungskonzepten. Die Verfügbarkeit von Daten hängt auch von einer präzisen Definition und Abgrenzung der Netzebene „Gebäude“ ab. Die klare Abgrenzbarkeit der Netzebene „Gebäude“ birgt Herausforderungen und Komplexität, insbesondere in Bezug auf die Integration von Endgeräten wie Routern.

Wie kann die Nachhaltigkeit beim Breitbandausbau in den Gebäuden gesteigert werden?

Anhang 3: Übersicht Experteninterviews

Wissenschaft	Julius-Maximilians-Universität Würzburg
	Technische Hochschule Mittelhessen (THM)
	Fachhochschule Südwestfalen
Verbände	Verband kommunaler Unternehmen e.V. (VKU)
	Deutscher Städtetag
	ANGA Der Breitbandverband e.V.
	Bundesverband Breitbandkommunikation (BREKO)
	eco – Verband der Internetwirtschaft e. V.
	Hauptverband der Deutschen Bauindustrie (HDB)
	Bundesverband deutscher Wohnungs- und Immobilienunternehmen (GdW)
	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V. (VDE)
Unternehmen	NetCologne
	Deutsche Telekom
	Vodafone
	Deutsche Glasfaser
	DE-CIX
	Vantage Towers
	Ericsson
	GVG Glasfaser
	1&1 Drillisch
	Stadtwerke Münster
	Zweckverband Breitband Ostholstein (ZVO)
Sonstige	DIN-, CEN- und ISO- Normenausschuss für Energiemanagement
	EU Joint Research Centre
	Verbraucherzentrale Bundesverband (vzbv)
	Resilio
	Norwegian Communications Authority (NKOM)
	Vattenfall (derzeit Shell)