

Baischew, Dajan; Schrade-Grytsenko, Lisa; Sörries, Bernd; Stronzik, Marcus;
Wissner, Matthias

Working Paper

Ausgewählte Informations- und Kommunikationstechnologien und ihre Auswirkungen auf umweltpolitische Ziele

WIK Diskussionsbeitrag, No. 492

Provided in Cooperation with:

WIK Wissenschaftliches Institut für Infrastruktur und Kommunikationsdienste GmbH, Bad Honnef

Suggested Citation: Baischew, Dajan; Schrade-Grytsenko, Lisa; Sörries, Bernd; Stronzik, Marcus; Wissner, Matthias (2022) : Ausgewählte Informations- und Kommunikationstechnologien und ihre Auswirkungen auf umweltpolitische Ziele, WIK Diskussionsbeitrag, No. 492, WIK Wissenschaftliches Institut für Infrastruktur und Kommunikationsdienste, Bad Honnef

This Version is available at:

<https://hdl.handle.net/10419/267677>

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

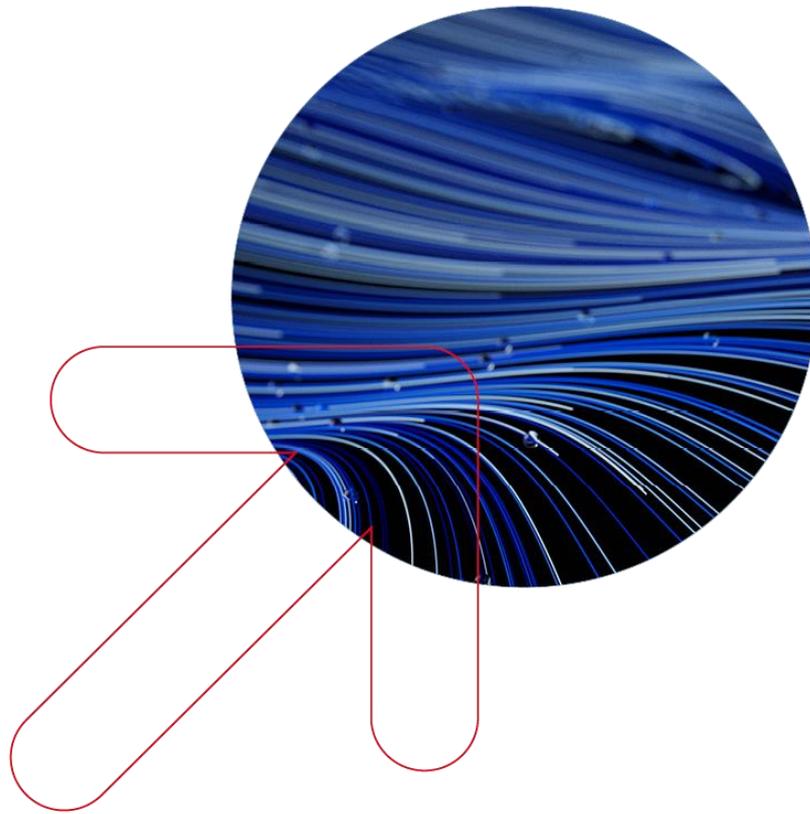
Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.

WIK • Diskussionsbeitrag

Nr. 492



Ausgewählte Informations- und Kommunikationstechnologien und ihre Auswirkungen auf umweltpolitische Ziele

Autoren:

Dajan Baischew

Lisa Schrade-Grytsenko

Bernd Sörries

Marcus Stronzik

Matthias Wissner



WIK

Wissenschaftliches Institut
für Infrastruktur und
Kommunikationsdienste

Bad Honnef, Dezember 2022

Impressum

WIK Wissenschaftliches Institut für
Infrastruktur und Kommunikationsdienste GmbH
Rhöndorfer Str. 68
53604 Bad Honnef
Deutschland
Tel.: +49 2224 9225-0
Fax: +49 2224 9225-63
E-Mail: info@wik.org
www.wik.org

Vertretungs- und zeichnungsberechtigte Personen

Geschäftsführerin und Direktorin	Dr. Cara Schwarz-Schilling
Direktor	Alex Kalevi Dieke
Direktor Abteilungsleiter Netze und Kosten	Dr. Thomas Plückebaum
Direktor Abteilungsleiter Regulierung und Wettbewerb	Dr. Bernd Sörries
Leiter der Verwaltung	Karl-Hubert Strüver
Vorsitzende des Aufsichtsrates	Dr. Thomas Solbach
Handelsregister	Amtsgericht Siegburg, HRB 7225
Steuer-Nr.	222/5751/0722
Umsatzsteueridentifikations-Nr.	DE 123 383 795

Bildnachweis Titel: © Robert Kneschke - stock.adobe.com

In den vom WIK herausgegebenen Diskussionsbeiträgen erscheinen in loser Folge Aufsätze und Vorträge von Mitarbeitern des Instituts sowie ausgewählte Zwischen- und Abschlussberichte von durchgeführten Forschungsprojekten. Mit der Herausgabe dieser Reihe bezweckt das WIK, über seine Tätigkeit zu informieren, Diskussionsanstöße zu geben, aber auch Anregungen von außen zu empfangen. Kritik und Kommentare sind deshalb jederzeit willkommen. Die in den verschiedenen Beiträgen zum Ausdruck kommenden Ansichten geben ausschließlich die Meinung der jeweiligen Autoren wieder. WIK behält sich alle Rechte vor. Ohne ausdrückliche schriftliche Genehmigung des WIK ist es auch nicht gestattet, das Werk oder Teile daraus in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren) zu vervielfältigen oder unter Verwendung elektronischer Systeme zu verarbeiten oder zu verbreiten.
ISSN 1865-8997

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	III
Summary	IV
1 Einleitung	1
2 Hintergrund	2
3 Beschreibung des Vorgehens	5
4 Ausgewählte Informations- und Kommunikationstechnologien und deren Auswirkungen auf den Energieverbrauch im Überblick	7
4.1 Infrastruktur im Festnetz	7
4.2 Infrastrukturen im Mobilfunknetz	11
4.3 Rechenzentren und weitere Komponenten	17
4.4 Rebound-Effekte	19
5 Anwendungsfälle	20
5.1 Parkraumbewirtschaftung	21
5.1.1 Beschreibung des Anwendungsfalls	21
5.1.2 Umsetzungsvarianten	22
5.1.3 Treiber für die Wahl der IKT-Infrastruktur	25
5.1.4 Nachhaltigkeitseffekte des Anwendungsfalls	25
5.2 Mobility-as-a-Service	27
5.2.1 Beschreibung des Anwendungsfalls	28
5.2.2 Umsetzungsvarianten und Treiber des Ressourcenverbrauchs	29
5.2.3 Nachhaltigkeitseffekte des Anwendungsfalls	29
6 Rückschlüsse und offene Fragen	30
6.1 Treiber der Umsetzung	31
6.2 Die Koexistenz verschiedener Lösungen	32
6.3 Nachhaltigkeit und Wettbewerb	36
6.4 Messung der Effekte	37
6.5 Nachhaltigkeit der Lösung vs. Nachhaltigkeit der IKT-Infrastruktur	38
7 Fazit und Ausblick	39
Literatur	41

Abbildungen

Abbildung 1-1:	IKT und Nachhaltigkeit	1
Abbildung 2-1:	Entwicklung der IKT-bedingten Treibhausgase weltweit	4
Abbildung 3-1:	Treibhausgasemissionen von Netzinfrastrukturen nach Lebenszyklusphasen	5
Abbildung 4-1:	Unterscheidung der Anbindung mit Glasfaser	8
Abbildung 4-2:	Koax-Architektur	9
Abbildung 4-3:	Datenrate und Netzlänge für DSL	10
Abbildung 4-4:	Stromverbrauch verschiedener Festnetztechnologien	11
Abbildung 4-5:	Schematischer Aufbau eines Mobilfunknetzes	12
Abbildung 4-6:	Network Virtualisation	14
Abbildung 4-7:	Reichweite eines 5G-Netzes	16
Abbildung 5-1:	Umsetzungsvarianten für die Digitalisierung der Parkraumbewirtschaftung	22
Abbildung 5-2:	Emissionsreduktionen durch intelligente Parkraumbewirtschaftung	26
Abbildung 5-3:	MaaS-Ökosystem	28
Abbildung 6-1:	Zusammenspiel der relevanten Treiber nachhaltiger IKT-Infrastruktur	31
Abbildung 6-2:	Treibhausgasemissionen verschiedener Technologien für denselben Anwendungsfall	32
Abbildung 6-3:	Stand-Alone-Technologie vs. Alternativen	34
Abbildung 6-4:	Angebot und Nachfrage echter Glasfaseranschlüsse (FTTB/H).	38

Tabellen

Tabelle 3-1:	Treiber des Ressourcenverbrauchs	6
Tabelle 4-1:	Wesentliche Energieverbraucher der verschiedenen Festnetztechnologien	9
Tabelle 4-2:	Hauptcharakteristika schmalbandiger Netze	12
Tabelle 4-3:	Richtwerte für den Stromverbrauch von LTE-Basisstationen	15
Tabelle 5-1:	Parkraumbewirtschaftung: schmalbandige vs. breitbandige Umsetzung	24
Tabelle 6-1:	Faktoren bei der Nutzung einer oder paralleler Infrastrukturen	34
Tabelle 6-2:	Anwendungsfälle mit signifikantem THG-Reduktionspotenzial	39

Zusammenfassung

Der Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) ist sowohl mit positiven als auch negativen Effekten verbunden. Der negative Nachhaltigkeitsbeitrag besteht z. B. im Ressourcenverbrauch für die Herstellung der einzelnen Komponenten (z. B. Antennen für die Basisstationen des Mobilfunks) und dem durch die Herstellung und Nutzung von IKT verursachten Energiebedarf mit den damit einhergehenden Treibhausgasemissionen. Positive Effekte können beispielsweise durch die Senkung von Treibhausgasemissionen aufgrund der IKT-Nutzung entstehen.

Die bisherige Literatur zu dieser Thematik verdeutlicht, dass eine Quantifizierung IKT-bedingter Nachhaltigkeitseffekte stark durch die gesetzten Annahmen getrieben ist. Aus diesem Grund liegt der Fokus in dieser Studie weniger auf der Quantifizierung als vielmehr auf der Identifizierung der wesentlichen Treiber für Nachhaltigkeitseffekte der IKT-Infrastruktur. Es zeigt sich, dass neben den technischen Treibern oftmals indirekte, nicht-technische Treiber für den Einsatz einer bestimmten technischen Lösung verantwortlich sind, bzw. diese die technischen Treiber bedingen. Während im Massenmarkt energieeffiziente Lösungen aus Kostengründen von den im Wettbewerb stehenden Unternehmen einen intrinsischen Treiber darstellen, ist es bei öffentlich umgesetzten Produkten oftmals der Fall, dass das Funktionieren der Lösung stärker im Vordergrund steht. Verschiedentlich existieren schon Ansätze seitens der Politik, die Infrastruktur auf einen nachhaltigen Pfad zu bringen. So gibt es beispielsweise im Bereich Rechenzentren oder Basisstationen von Mobilfunkanlagen von der EU-Kommission empfohlene Richtwerte für die stromverbrauchenden Elemente.

Durch die Betrachtung konkreter Anwendungsfälle aus dem Bereich Smart Traffic wird deutlich, dass die Nachhaltigkeit der eingesetzten IKT-Infrastruktur oftmals keine (besondere) Rolle spielt. Hier wird vielmehr auf bereits bestehende Strukturen zurückgegriffen bzw. aus pragmatischen Gründen auf bestimmte Lösungen gesetzt. Auch die Messung der indirekten Effekte steht nicht im Vordergrund, was der Komplexität der Materie und der fehlenden Standards für eine vergleichbare Berechnung geschuldet ist.

In vielen Bereichen stellt sich in Bezug auf die Nachhaltigkeit die Frage, ob die doppelte oder mehrfache Existenz verschiedener Lösungen sinnvoll ist. Dies umso mehr, als dass manche Technologien (noch) nicht vollständig genutzt werden bzw. ausgelastet sind. Ein „Nebeneinander“ verschiedener Technologien ist somit für eine Übergangsphase immer gegeben, da die Migration zur nächsten Technologiegeneration eine gewisse Zeit benötigt. Das Ziel sollte daher sein, ein volkswirtschaftliches Optimum im Aufbau und der Nutzung von IKT-Infrastrukturen zu erreichen. Dies bedeutet eine Kostenminimierung im Aufbau und Betrieb der Technologie, die allerdings auch die Internalisierung externer Kosten durch Umweltauswirkungen miteinschließt.

Summary

The use of information and communication technologies (ICT) is associated with both positive and negative effects. The negative contribution to sustainability consists, for example, in the consumption of resources for the production of the individual components (e.g. antennas for the base stations of mobile communication networks) and the energy requirements caused by the production and use of ICT with the associated greenhouse gas emissions. Positive effects can arise, for example, from the reduction in greenhouse gas emissions due to ICT use.

The literature on this issue shows that a quantification of ICT-related sustainability effects is strongly driven by the assumptions made. For this reason, the focus of this study is less on quantification and more on identifying the main drivers for the sustainability effects of ICT infrastructure. It turns out that in addition to the technical drivers, indirect, non-technical drivers are often responsible for the use of a specific technical solution, or that they determine the technical drivers. While in the mass market energy-efficient solutions for cost reasons are an intrinsic driver from competing companies, it is often the case with publicly implemented products that the functioning of the solution is more important. Various approaches already exist on the part of politics to put the infrastructure on a sustainable path. For example, in the field of data centers or base stations of mobile radio systems, there are guideline values recommended by the EU Commission for the power-consuming elements.

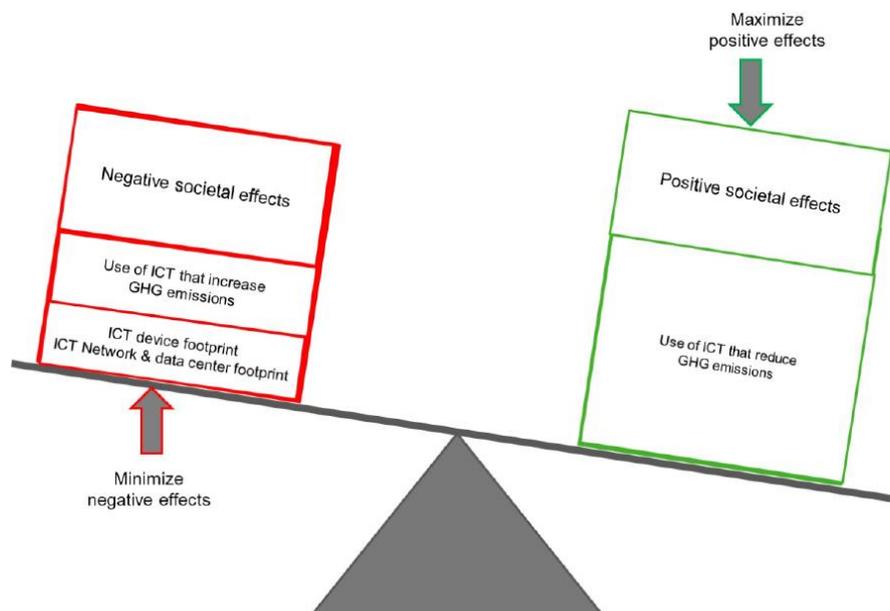
By considering specific use cases from the field of Smart Traffic, it becomes clear that the sustainability of the ICT infrastructure used often plays no (particular) role. Rather, existing structures or certain solutions are used for pragmatic reasons. The measurement of the indirect effects is also not in the foreground, which is due to the complexity of the matter and the lack of standards for a comparable calculation.

With regard to sustainability, the question arises in many fields as to whether the double or multiple existence of different solutions makes sense. All the more so because some technologies are not (yet) fully utilized. A "coexistence" of different technologies is therefore always given for a transitional phase, since the migration to the next technology generation requires a certain amount of time. The objective should therefore be to achieve an economic optimum in the development and use of ICT infrastructures. This means minimizing costs in the construction and operation of the technology, which, however, also includes the internalization of external costs caused by environmental impacts.

1 Einleitung

Nachhaltigkeit und Digitalisierung gehören neben den aktuellen Krisenherden Corona-Pandemie und Ukraine-Krieg zu den Topthemen in der öffentlichen Diskussion.¹ Wesentlicher Bestandteil zur Umsetzung der Digitalisierung ist der Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT).² In Bezug auf Nachhaltigkeit ist IKT zunächst ambivalent zu bewerten.³ Wie in Abbildung 1-1 dargestellt, ist IKT sowohl mit positiven als auch negativen Effekten verbunden. Der negative Nachhaltigkeitsbeitrag besteht z. B. im Ressourcenverbrauch für die Herstellung der einzelnen Komponenten (z. B. Antennen für die Basisstationen des Mobilfunks) und dem durch die Herstellung und Nutzung von IKT verursachten Energiebedarf mit den damit einhergehenden Treibhausgasemissionen. Ferner können negative soziale Effekte mit IKT einhergehen (z. B. Isolierung bestimmter gesellschaftlicher Gruppen). Positive Effekte können dadurch entstehen, dass infolge der Nutzung von IKT Treibhausgasemissionen gesenkt werden. Dies kann z. B. durch die Reduzierung des Verkehrs von Pendlern infolge von vermehrtem Homeoffice erfolgen. Ein weiteres Beispiel sind Effizienzsteigerungen in Produktionsprozessen durch IKT. Auch gesellschaftlich können positive Effekte mit IKT verbunden sein. Beispielhaft seien eine verbesserte gesellschaftliche Teilhabe und eine verbesserte Gesundheitsversorgung infolge von e-Health genannt.

Abbildung 1-1: IKT und Nachhaltigkeit



Quelle: Bergmark (2022: 6).

¹ Vgl. z. B. Umweltbundesamt (2022).

² Englisch: Information and Communication Technologies (ICT).

³ Vgl. z. B. Ternès (2019).

Ziel dieser Studie ist es daher, anhand konkreter Fallbeispiele aus dem Bereich Smart Traffic und der in diesen Beispielen umgesetzten IKT-Infrastruktur diese Ambivalenz näher zu beleuchten. Die bisherige Literatur zu dieser Thematik verdeutlicht, dass eine Quantifizierung IKT-bedingter Nachhaltigkeitseffekte stark durch die gesetzten Annahmen getrieben sind. Aus diesem Grund liegt der Fokus in dieser Studie weniger auf der Quantifizierung als vielmehr auf der Identifizierung der wesentlichen Treiber für Nachhaltigkeitseffekte der IKT-Infrastruktur. Der in dieser Studie gewählte Ansatz kann helfen, Prozesse auch in anderen Bereichen besser zu analysieren und zu verstehen.

Die Studie gliedert sich wie folgt: In Kapitel 2 wird der politische Kontext dargestellt, in den die Thematik IKT und Nachhaltigkeit eingebettet ist. Anschließend wird das Vorgehen für die Identifizierung der Treiber IKT-bedingter Nachhaltigkeitswirkungen näher erläutert. Kapitel 4 gibt einen Überblick über ausgewählte Informations- und Kommunikationstechnologien und deren Auswirkungen auf den Energieverbrauch. In Kapitel 5 werden vor diesem Hintergrund zwei konkrete Anwendungsfälle aus dem Bereich Smart Traffic (Parkraumbewirtschaftung und Mobility-as-a-Service) in Bezug auf ihre Nachhaltigkeitswirkungen näher untersucht. Rückschlüsse und offene Fragen auf Basis der vorhergehenden Analysen, die für zukünftige Untersuchungen maßgeblich sein können, werden in Kapitel 6 diskutiert. Abschließend wird ein kurzes Fazit gezogen.

2 Hintergrund

Das Konzept der Nachhaltigkeit wird seit der bahnbrechenden Veröffentlichung des Club of Rome zu den Grenzen des Wachstums im Jahr 1972 und dem Brundtland-Report aus 1987 national wie international intensiv diskutiert. Es ist dabei einem ständigen Wandel unterworfen.⁴ Das Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ) definiert Nachhaltigkeit z. B. wie folgt:

„Nachhaltigkeit oder nachhaltige Entwicklung bedeutet, die Bedürfnisse der Gegenwart so zu befriedigen, dass die Möglichkeiten zukünftiger Generationen nicht eingeschränkt werden. Dabei ist es wichtig, die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit – wirtschaftlich effizient, sozial gerecht, ökologisch tragfähig – gleichberechtigt zu betrachten. Um die globalen Ressourcen langfristig zu erhalten, sollte Nachhaltigkeit die Grundlage aller politischen Entscheidungen sein.“⁵

Im Kern über die Jahre gleichgeblieben, sind die drei wesentlichen Dimensionen der Nachhaltigkeit: Ökologie, Ökonomie und Gesellschaft. Um das umfassende Konzept der Nachhaltigkeit für die folgenden Analysen greifbar zu machen, liegt im Folgenden der Fokus auf der Umweltdimension und dort auf dem Klimaschutz.

Die Untersuchung in diesem Diskussionsbeitrag findet daher vor dem Hintergrund der nationalen und internationalen Klimaziele statt. Im Pariser Klimaabkommen von 2015

⁴ Vgl. z. B. Frontier Economics und d-fine (2022: 12ff.)

⁵ Vgl. <https://www.bmz.de/de/service/lexikon/nachhaltigkeit-nachhaltige-entwicklung-14700>.

wurde das Ziel ausgegeben, dass „der Anstieg der durchschnittlichen Erdtemperatur deutlich unter 2 °C über dem vorindustriellen Niveau gehalten wird und Anstrengungen unternommen werden, um den Temperaturanstieg auf 1,5 °C über dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen [...]“⁶

Zur Erreichung dieses Ziels hat die Europäische Union im Jahr 2019 den „European Green Deal“ verabschiedet. Danach soll Europa bis 2050 klimaneutral werden und bis 2030 ihre Netto-Treibhausgasemissionen um mindestens 55 % senken gegenüber dem Stand von 1990. Der Green Deal sieht auch eine Prüfung von Maßnahmen zur Verbesserung der Energieeffizienz und der Kreislaufwirtschaftsleistung des IKT-Sektors vor, von Breitbandnetzen bis hin zu Rechenzentren und IKT-Geräten. Gleichzeitig wird die Digitalisierung als wesentlichen Enabler für die Erreichung der Klimaziele angesehen.⁷

Konkrete Ziele für den IKT-Sektor finden sich im Green Deal aber ebenso wenig wie innerhalb der wichtigsten Regulierungsinstrumente für den Sektor der elektronischen Kommunikation, dem Europäischen Kodex für die elektronische Kommunikation (EKEK) und der EU-Kostensenkungsrichtlinie.

Zu den EU-Nachhaltigkeitsmaßnahmen, die für IKT gelten, gehören die Ökodesign-Richtlinie (die den Energieverbrauch und die Kennzeichnungsanforderungen für bestimmte elektronische Geräte abdeckt) und die Richtlinie über Elektro- und Elektronik-Altgeräte, die darauf abzielt, das Recycling elektronischer Geräte zu fördern. Darüber hinaus hat die Europäische Kommission die Entwicklung freiwilliger Verhaltenskodizes für Breitbandausrüstung und Rechenzentren unterstützt. Im Jahr 2021 rief die Europäische Kommission die European Green Digital Coalition ins Leben, die Unterzeichner aus der Branche verpflichtet, sich einer Reihe von Verpflichtungen anzuschließen, darunter Netto-Null-Ziele bis zum Jahr 2040.⁸

In Deutschland sind die nationalen Klimaschutzziele im Klimaschutzgesetz (KSG) festgelegt. Danach sollen die Treibhausgasemissionen im Vergleich zum Jahr 1990 schrittweise wie folgt gemindert werden:⁹

- bis zum Jahr 2030 um mindestens 65 Prozent,
- bis zum Jahr 2040 um mindestens 88 Prozent.

Bis zum Jahr 2045 werden die Treibhausgasemissionen so weit gemindert, dass Netto-Treibhausgasneutralität erreicht wird. Nach dem Jahr 2050 sollen negative Treibhausgasemissionen erreicht werden.

Für die Sektoren Energiewirtschaft, Industrie, Verkehr, Gebäude, Landwirtschaft, sowie Abfallwirtschaft und Sonstiges werden im KSG zulässige Jahresemissionsmengen fixiert.

⁶ Übereinkommen von Paris (2015), Artikel 2a), S. 3 ff.

⁷ EU Kommission (2019), S. 9.

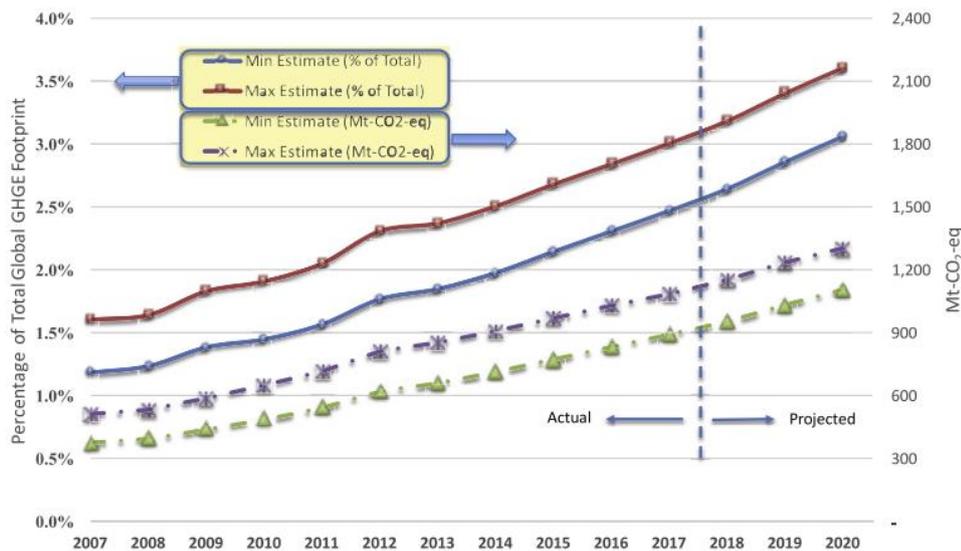
⁸ Dieser Abschnitt ist entnommen aus: Godlovitch et al. (2021), S. 6., eigene Übersetzung.

⁹ KSG, § 3 (1,2)

Der Informations- und Telekommunikationssektor wird also auch hier nicht direkt adressiert. Für die Abgrenzung der Sektoren gelten die Quellkategorien des gemeinsamen Berichtsformats (Common Reporting Format – CRF) nach der Europäischen Klimaberichterstattungsverordnung. Auch in dieser wiederum ist der IKT-Sektor allerdings nicht direkt erwähnt.

Weltweit ist der IKT-Sektor für ca. 1,5 bis 5 % der Treibhausgas (THG)-Emissionen verantwortlich.¹⁰ Abbildung 2-1 zeigt die entsprechende Entwicklung seit 2007.

Abbildung 2-1: Entwicklung der IKT-bedingten Treibhausgase weltweit



Quelle: Belkhir, und Elmelig (2018), S. 457.

In Deutschland sind für den IKT-Sektor keine eigenen Zahlen bezüglich der Treibhausgasemissionen ausgewiesen.

Schreitet die Digitalisierung in sämtlichen Lebensbereichen allerdings weiter voran, so erscheint es notwendig, bereits heute die richtigen Weichenstellungen in Richtung Nachhaltigkeit zu stellen, und zwar nicht nur bei möglichen (Energie- und Treibhausgas-)Einsparungen durch die jeweiligen Anwendungen, sondern auch bei der IKT-Infrastruktur selbst. Bei heute kleinflächig (lokal) umgesetzten Anwendungen spielt dies oft noch keine bzw. eine untergeordnete Rolle. Im Hinblick auf großflächige oder landesweit angebotene Anwendungen kann der Energieverbrauch, je nach eingesetzter Technologie, jedoch sehr unterschiedlich ausfallen. Deswegen ist es wichtig, die Treiber des Energieverbrauchs zu kennen, aber auch die derzeitigen Motive der handelnden Akteure in Bezug auf Entscheidungen für oder gegen eine bestimmte Technologie. Es wäre insoweit zu prüfen, ob, wie bei Aspekten der Datennutzung, bei der Konzeptionierung und

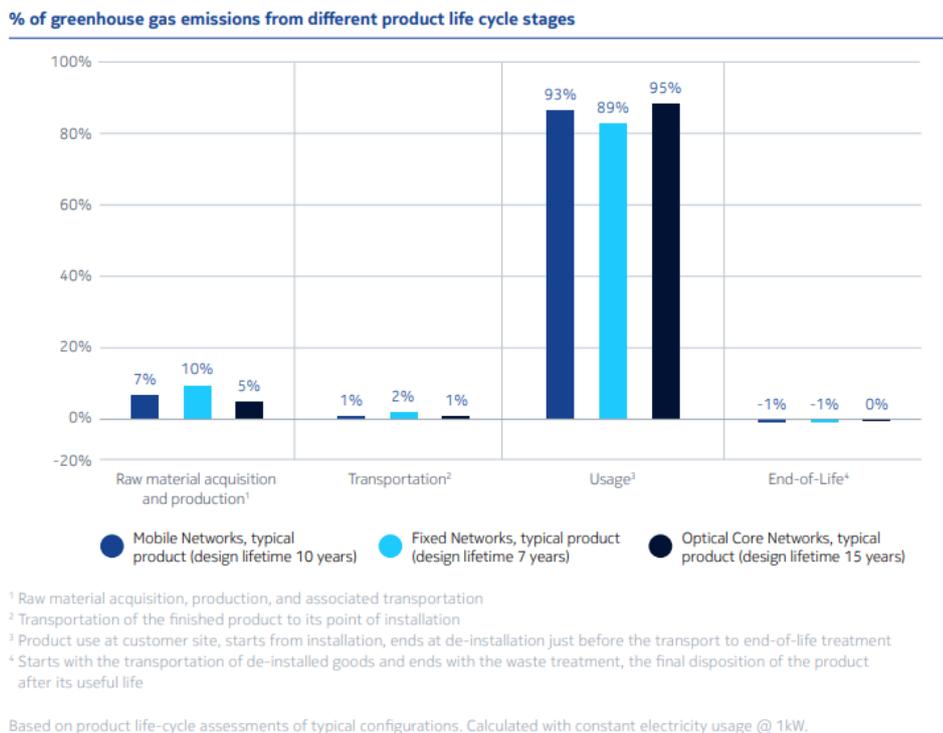
¹⁰ Ministry of Transport and Communications, Finland (2020), S. 166.

Ausgestaltung von Anwendungen mit ihren dahinterliegenden Infrastrukturen ein „Sustainability by Design“ analog zum „Privacy by Design“ zum Einsatz kommen sollte.

3 Beschreibung des Vorgehens

Vor dem Hintergrund der beschriebenen Zielsetzungen hat sich eine Vielzahl von Gutachten und wissenschaftlichen Veröffentlichungen damit befasst, wie hoch die Umweltauswirkungen bestimmter Informations- und Kommunikationstechnologien in ihrer angewendeten Form sind.¹¹ Dabei geht es zumeist um absolute Auswirkungen einzelner Technologien. In diesem Beitrag soll ein Gesamtüberblick über die wichtigsten Bereiche des IKT-Sektors im Hinblick auf deren Umweltauswirkungen gegeben sowie entsprechende Treiber identifiziert werden. Dabei stehen die Treibhausgase und somit der Energieverbrauch der Netzinfrastruktur im Vordergrund. Auf weitere Elemente, wie etwa die Endkundengeräte, wird nur am Rande eingegangen. Auch Aufbau und Rückbau der Infrastruktur werden nicht betrachtet. Dies liegt darin begründet, dass der Betrieb der Infrastruktur den wesentlichen Anteil an Emissionen ausmacht, wie Abbildung 3-1 zeigt.

Abbildung 3-1: Treibhausgasemissionen von Netzinfrastrukturen nach Lebenszyklusphasen



Quelle: Nokia (2020); S. 28

¹¹ Vgl. z. B. die Übersichtsstudie von Godlovitch et al. (2021).

Aufgrund verschiedener Einflussfaktoren ist ein Vergleich verschiedener Technologien umso aussagekräftiger, je eher sich die entsprechenden Rahmenbedingungen ähneln bzw. sich die letztlich nachgefragte Dienstleistung (z. B. ein Parkleitsystem) über verschiedene Technologien und mit unterschiedlicher Architektur realisieren lässt. Bei Anwendungen, die nur wenig Übertragungsraten (Bandbreite) erfordern (wie z. B. IoT), sollten die dafür verfügbaren Technologien miteinander verglichen werden, zumindest solange sie nicht von breitbandigen Technologien mit abgedeckt werden können.

In diesem Diskussionsbeitrag liegt, wie in der Einleitung ausgeführt, der Fokus auf der Analyse der wesentlichen Treiber für eine bestimmte Lösung eines Problems / einer Thematik und die damit verbundene spezifische Architektur von IKT-Infrastrukturen. Dazu werden in Kapitel 4 zunächst verschiedene Technologien aus dem Mobil- und Festnetzbereich in ihrer Funktionsweise kurz vorgestellt.

Auf unterschiedlichen Ebenen spielen dabei zunächst verschiedene technische Treiber eine Rolle, wie Tabelle 3-1 beispielhaft zeigt.

Tabelle 3-1: Treiber des Ressourcenverbrauchs

Ebene	Treiber des Ressourcenverbrauchs (Beispiele)
Infrastruktur	<ul style="list-style-type: none"> • Aktive/passive Infrastruktur • Ausbau in städtischen/halbstädtischen/ländlichen Regionen • Frequenzbereich • Flächenverbrauch • Verlegetechniken
Netzarchitektur	<ul style="list-style-type: none"> • Zentral/dezentral • Sicherheit • Edge-Cloud-Architektur
Netzkomponenten	<ul style="list-style-type: none"> • Verfügbarkeit • Technische Spezifika (u. a. Kapazität)
Anwendung	<ul style="list-style-type: none"> • Endgeräte • Nutzer-Netz-IT-Architektur • Rebound-Effekte

Quelle: Eigene Darstellung.

Es stellt sich also die Frage, warum bestimmte Anwendungen mit einer bestimmten Kommunikationstechnologie realisiert werden. Anschließend werden konkrete Beispiele aus dem Bereich Smart Traffic dargestellt, die zeigen, wie Lösungen in der Praxis umgesetzt

werden und an welchen Stellen die benannten (oder auch andere) Treiber eine Rolle spielen. Das Vorgehen kann als Blaupause auch auf andere Gebiete übertragen werden.

Wie die Übersicht aus Kapitel 2 zeigt, existieren noch keine konkreten Vorgaben für den IKT-Sektor bezüglich dessen Nachhaltigkeit. Als wesentliches Hindernis erscheint die Komplexität der Materie, also die Schwierigkeit, die Prozesse und wesentlichen Treiber des Energieverbrauchs in diesem Sektor zu verstehen, um entsprechende Daten zu erhalten bzw. zu erheben, die für die „richtige“ Kalibrierung von Maßnahmen und die Messbarkeit von Zielen notwendig sind.

Dieser Diskussionsbeitrag will daher durch die Darstellung der wesentlichen Treiber und Prozesse auf verschiedenen Ebenen der IKT-Infrastruktur zum Verständnis des Sektors im Hinblick auf Nachhaltigkeitsaspekte beitragen. Anhand konkreter Anwendungen werden die Treiber bestimmter Lösungen identifiziert, die als Grundlage für das Ansetzen von Politikmaßnahmen herangezogen werden können. Neben den direkten Wirkungen durch die technischen Treiber wird auch auf die indirekten Treiber eingegangen (z. B. Besiedlungsdichte eines Gebietes). Die Methodik kann helfen, Prozesse auch in anderen Bereichen besser zu analysieren und zu verstehen.

4 Ausgewählte Informations- und Kommunikationstechnologien und deren Auswirkungen auf den Energieverbrauch im Überblick

Die Infrastruktur der verschiedenen IKT-Technologien, über die sich die gleiche Anwendung realisieren lässt, ist mitunter unterschiedlich aufgebaut. Die wesentlichen Charakteristika werden im Folgenden kurz dargestellt. Dabei liegt der Fokus der jeweiligen Technologie auf dem jeweiligen Zugangsnetz und den Geräten beim Endkunden.¹²

4.1 Infrastruktur im Festnetz

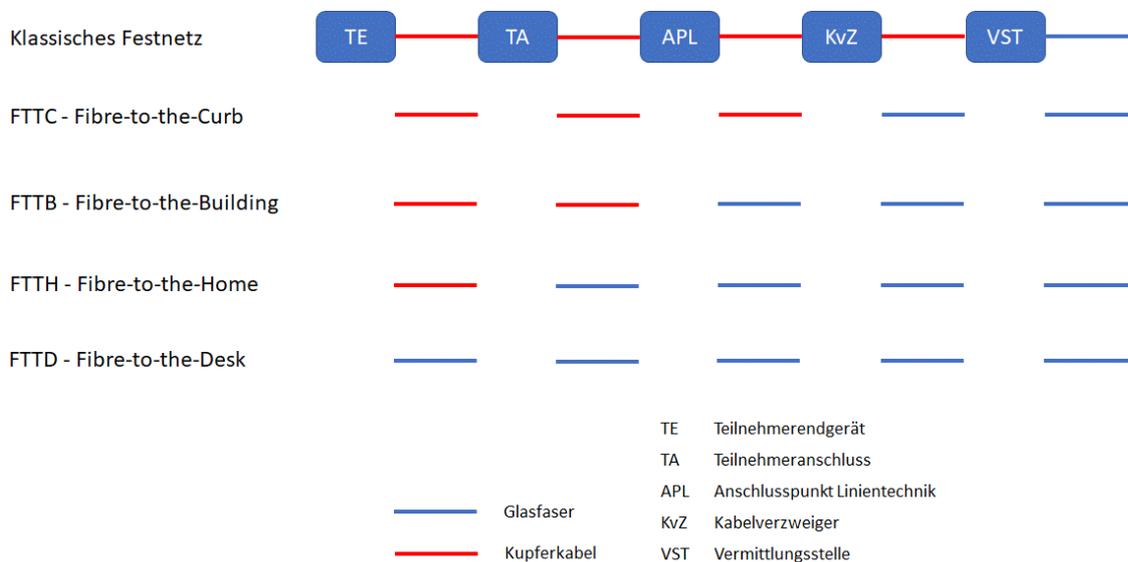
Die Technologien, die bei leitungsgebundenen Netzen zum Einsatz kommen, unterscheiden sich in ihrem jeweiligen Aufbau. Der Einsatz von Glasfaser in den Technologien wird in Abbildung 4-1 dargestellt.¹³ Bei der heute in Deutschland weit verbreiteten VDSL2-Technologie werden die Kabelverzweiger (KvZ) mit Glasfaser angeschlossen. Zwischen Kabelverzweiger und Gebäude bzw. Haushalt verläuft die Kupferdoppelader (FTTC). Bei

¹² Die vorgelagerten Netze (Backhaul- bzw. Kernnetze) werden für alle Technologien gebraucht und sind daher ihren Energieverbrauch betreffend als gleichwertig anzusehen (vgl. Breide et al., 2021).

¹³ „Das Teilnehmerendgerät (TE) ist zum Beispiel ein Telefon, ein PC oder ein Router, der den Übergang in ein lokales Netzwerk darstellt. Der Teilnehmeranschluss (TA) ist die Anschlussdose ab der der Endkunde seine eigenen Endgeräte anschließen darf. Im Festnetz ist das die TAE-Dose. Der APL ist ein Übergabepunkt innerhalb eines Gebäudes in dem verschiedene Teilnehmeranschlüsse zusammenlaufen. In der Regel ist das ein einfacher Verteiler, der sich im Keller befindet. Der Kabelverzweiger (KvZ) ist ein grauer Verteilerkasten am Straßenrand, der mehrere Gebäude oder Straßenzüge mit einem Hauptkabel von der Vermittlungsstelle (VSt) verbindet.“ (<https://www.elektronik-kompensium.de/sites/kom/1403191.htm>, zuletzt abgerufen am 18.08.2022.)

FTTB/H werden die Gebäude bzw. Haushalte in Mehrfamilienhäuser mit Glasfaser in sehr unterschiedlichen Netzarchitekturen (Point-to-Point (PtP) oder GPON) angebunden.

Abbildung 4-1: Unterscheidung der Anbindung mit Glasfaser



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an:

<https://www.elektronik-kompodium.de/sites/kom/1403191.htm>, zuletzt abgerufen am 18.08.2022.

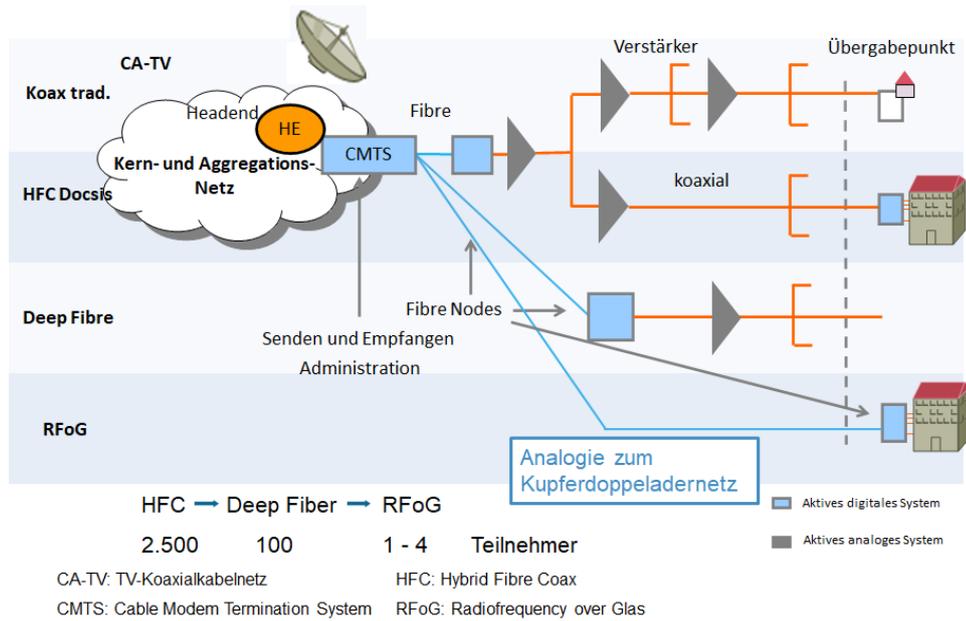
In einem passiven Glasfasernetzwerk (PON/Passive Optical Network) wird die Leitung auf mehrere Anschlüsse aufgeteilt und stellt somit ein Shared Medium dar. Im Vergleich zu aktiven Netzwerken verbrauchen sie allerdings weniger Strom. XGS-PON ist eine Weiterentwicklung der GPON-Technologie mit wesentlich höheren Datenraten. Im Bereich FTTB existiert mit G.fast eine Technologie, die in den Häusern auf bestehenden Kupferleitungen Datenraten von 1 GBit/s bis 2 GBit/s erreicht.

„Bei PtP-Ethernet ist die Netzarchitektur wie beim alten Telefonnetz aufgebaut. Vom Central Office (Vermittlungsstelle) verlaufen die Glasfasern sternförmig in jeden Haushalt. Jeder Haushalt hat dabei seine eigene Glasfaser. Zwischendrin ist ein einfacher Kabelverzweiger, der die Teilnehmeranschluss-Glasfaserleitungen mit dem Hauptkabelstrang verbindet.“¹⁴

Auch bei der Breitbandkabellösung kann die Glasfaser (Fibre) unterschiedlich weit bis zum Kunden reichen, wobei bei HFC DOCSIS ein Verstärker zum Einsatz kommt, der Strom verbraucht. (vgl. Abbildung 4-2).

¹⁴ <https://www.elektronik-kompodium.de/sites/kom/1507281.htm>, zuletzt abgerufen am 16.09.2022.

Abbildung 4-2: Koax-Architektur



Quelle: Eigene Darstellung

Treiber des Stromverbrauchs

Bezüglich des Energieverbrauchs sind für die verschiedenen Technologien die folgenden Netzwerkkomponenten von Bedeutung (vgl. Tabelle 4-1).

Tabelle 4-1: Wesentliche Energieverbraucher der verschiedenen Festnetztechnologien

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

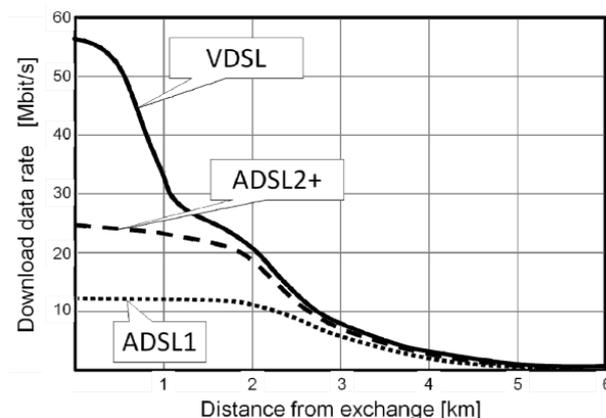
Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Breide et al. (2021).

Die Frage, wie viel Strom tatsächlich verbraucht wird, hängt von verschiedenen Parametern ab, z. B.:

- die angebotene und genutzte Bandbreite,
- die elektrische Leistung der verbauten Netzwerkelemente,
- die Auslastung der Netze,
- die Netzwerkarchitektur, u. U. abhängig von der Struktur des Einsatzgebietes (städtisch/ländlich),
- die Anzahl der aktiven und passiven Komponenten.

Dabei existieren wiederum technologiespezifische Charakteristika bzw. Zusammenhänge, die direkt oder indirekt Einfluss auf den Stromverbrauch nehmen. So besteht z. B. bei der DSL-Technologie ein Zusammenhang zwischen Datenrate und Entfernung. Wie Abbildung 4-3 zeigt, nimmt die übertragbare Datenrate mit der Netzlänge ab. Hinsichtlich der Versorgung der Endkunden mit Breitband resultiert mithin eine Längenrestriktion.

Abbildung 4-3: Datenrate und Netzlänge für DSL



Quelle: Haddon, L. (2011), S.114

Um die Netzwerklängen für VDSL zu verkürzen, müssen DSLAMS (Digital Subscriber Line Access Multiplexer) entweder in direkter räumlicher Nähe der KvZ (vgl. Abbildung 4-1) aufgestellt oder neu errichtet werden. Diese benötigen einen entsprechenden Stromanschluss, wie auch aus Tabelle 4-1 hervorgeht.

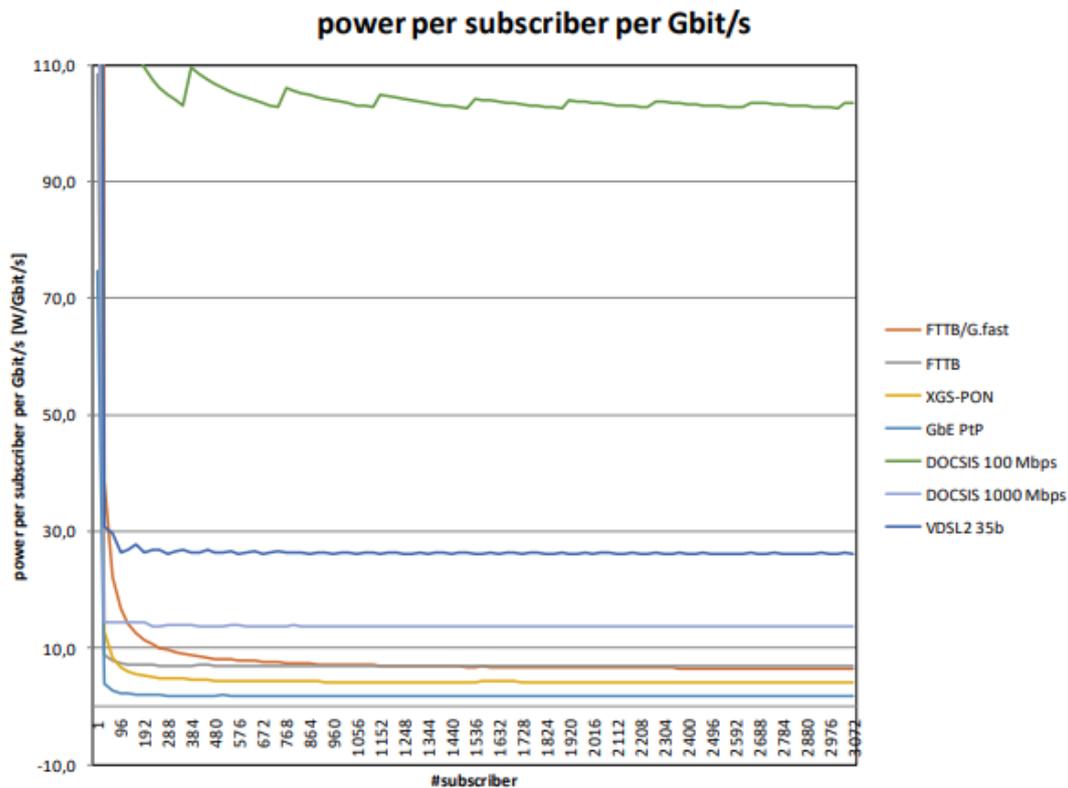
Die Frage des Stromverbrauchs von DSL hängt somit auch von der Struktur des Versorgungsgebietes ab. Je dichter ein Gebiet besiedelt ist, desto mehr Anschlüsse können (bei gleicher Downloadrate) über ein DSLAM bedient werden.¹⁵ Dies kann beispielsweise bei einer Mindestanschlussrate eine Rolle spielen. In dünn besiedelten Gebieten werden

¹⁵ Rendon, Schneir und Xiong (2016), S. 64.

an den DSLAMS weniger Ports benötigt. Gleichzeitig müssen aber mehrere dieser DSLAMS installiert werden, um eine gewisse Mindestkapazität zu erreichen, was den Strombedarf insgesamt erhöht.

Obermann (2022) hat die verschiedenen Technologien auf ihre Stromverbräuche hin untersucht. Die verschiedenen Glasfaserverbindungen schneiden dabei wesentlich besser ab als DSL und DOCSIS.

Abbildung 4-4: Stromverbrauch verschiedener Festnetztechnologien



Quelle: Obermann (2022), S. 13.

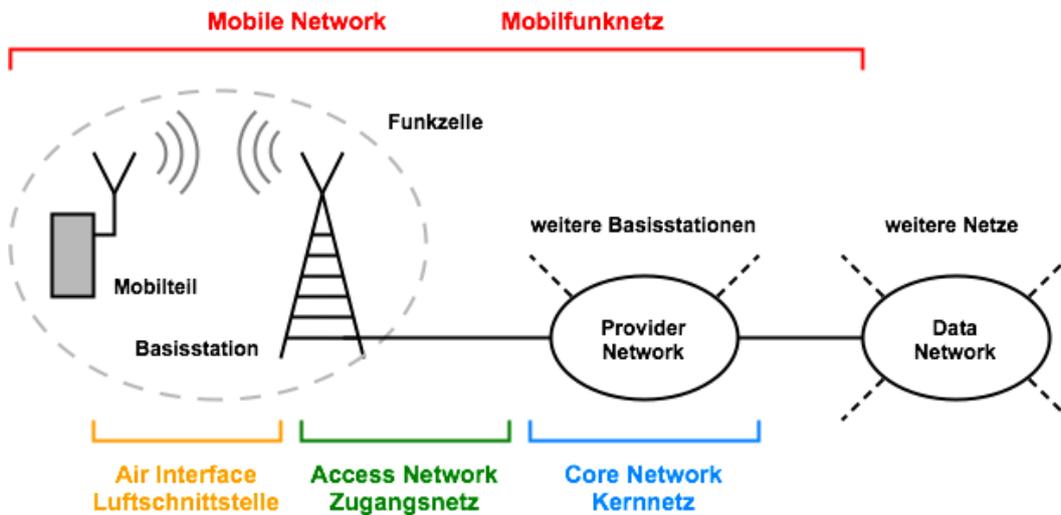
Als Vergleichsgröße wird also der Stromverbrauch pro Gbit/s herangezogen. Wie aussagefähig diese Größe ist, wird in Abschnitt 6.4 aufgegriffen und diskutiert.

4.2 Infrastrukturen im Mobilfunknetz

Im Mobilfunknetz wird zwischen Kernnetz, Transportnetz und Zugangsnetz unterschieden. Über die Transportnetze findet die Verbindung der einzelnen Zugangsnetze, die wiederum die Verbindung zum Endkunden herstellen, zum Kernnetz statt. Das Kernnetz bildet auch die Verbindung zum Internet. Während die Transportnetze somit überwiegend aus (Glasfaser-)Leitungen bestehen, befinden sich im Kernnetz Steuerungs- und Kommunikationseinheiten.

Der Aufbau eines öffentlichen Mobilfunknetzes ist in Abbildung 4-5 vereinfacht dargestellt.

Abbildung 4-5: Schematischer Aufbau eines Mobilfunknetzes



Quelle: <https://www.elektronik-kompodium.de/sites/kom/0406221.htm>

Neben den öffentlichen Mobilfunknetzen mit den vorherrschenden Funktechnologien GSM, LTE und 5G existieren weitere (private) schmalbandige Telekommunikationsnetze (sog. Low Power Wide Area Networks, LPWAN), wie z. B. LoRaWAN, Sigfox oder NB-IoT, wobei NB-IoT in öffentlichen Mobilfunknetzen realisiert wird. Die Hauptcharakteristika dieser schmalbandigen Netze sind in der untenstehenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 4-2: Hauptcharakteristika schmalbandiger Netze

Technische Daten	NB-IoT	LoRaWAN	Sigfox (EU)
Technologie	offener Standard	proprietär	proprietär
Lizenziertes Spektrum	ja	nein	nein
Maximale Datenrate (brutto)	27 kbit/s	5,47 kbit/s (SF7)	0,1 kbit/s
Worst-Case-Datenrate (~144dB Link Budget)	5-6 kbit/s	0,297 kbit/s	0,1 kbit/s
Max. Nutzdatenlänge (Daten pro Nachricht)	> 1.000 B	51 B (EU) / 11 B (US)	12 B
Downlink-Kapazität	unbegrenzt	sehr niedrig	sehr niedrig
Link Budget / Max. Path Loss (Uplink)	164 dB	141-146 dB	163 dB
Link Budget / Max. Path Loss (Downlink)	164 dB	151-156 dB	158 dB

Quelle DTAG (2021), S.6.

Diese Technologien bieten sich insbesondere bei der Übertragung kleinerer Datenmengen an, z. B. bei der Vernetzung von Sensoren im Bereich Internet der Dinge (IoT), weil durch eine vereinfachte Modulation der Signale insbesondere der Energieverbrauch der

Endgeräte gering ausfällt. Die Reichweiten betragen, anhängig von verschiedenen Faktoren (z. B. Antennenhöhe am Sender und Empfänger, Frequenz, maximales Linkbudget) 500 bis 2.400 m unter realen Bedingungen.¹⁶

Neuere Entwicklungen

Eine Entwicklung in diesem Bereich ist der stärker softwaregesteuerte Betrieb von Mobilfunknetzen (Software Defined Networks (SDN)) sowie ein flexiblerer Aufbau des Zugangsnetzes (Open RAN). Im Einzelnen bedeutet dies: In der Vergangenheit fand die Administration der Netze häufig auf unteren Ebenen, den Netzkomponenten wie Router, Switches etc. statt.¹⁷ „Eine komfortable, Dynamik fördernde Administration oder gar programmierbare Steuerung/Regelung auf hoher Ebene war bislang nicht vorgesehen. Inzwischen ist die Erkenntnis gereift, dass es signifikante Vorteile bietet, wenn es eine abstrahierende und logisch zentralisierende Steuerungsschicht gibt. Erreicht werden soll dies durch das seit ca. 2012 intensiv vorangetriebene Konzept der über Software gesteuerten Netze (programmierbare Netze), dem Software Defined Networking (SDN). Dem Konzept zugrundeliegend ist der Ansatz, dass eine Trennung von Transportschicht (Netzelemente/Netzknoten) und Steuerungsschicht erfolgt, die bislang in einzelnen Hardwarekomponenten mit deren integrierter und damit proprietärer Steuerungssoftware realisiert war. Dies bedeutete für die Administration eines Netzes, dass Einstellungen zur Konfigurierung der Netzfunktionen in jedem einzelnen Netzknoten erfolgen mussten. Zukünftig wird diese Funktion der Netzsteuerung auf einer höheren Netzebene zentralisiert. Dies hat den Vorteil, dass die Steuerungsebene nicht nur Kenntnis der Konfiguration eines einzelnen Netzknotens hat, sondern einen Überblick über das gesamte Netz bzw. relevante Teilnetze hat. Auf diese Weise wird die bisher dezentral verankerte Steuerung der Netzknoten zentral steuerbar.“¹⁸

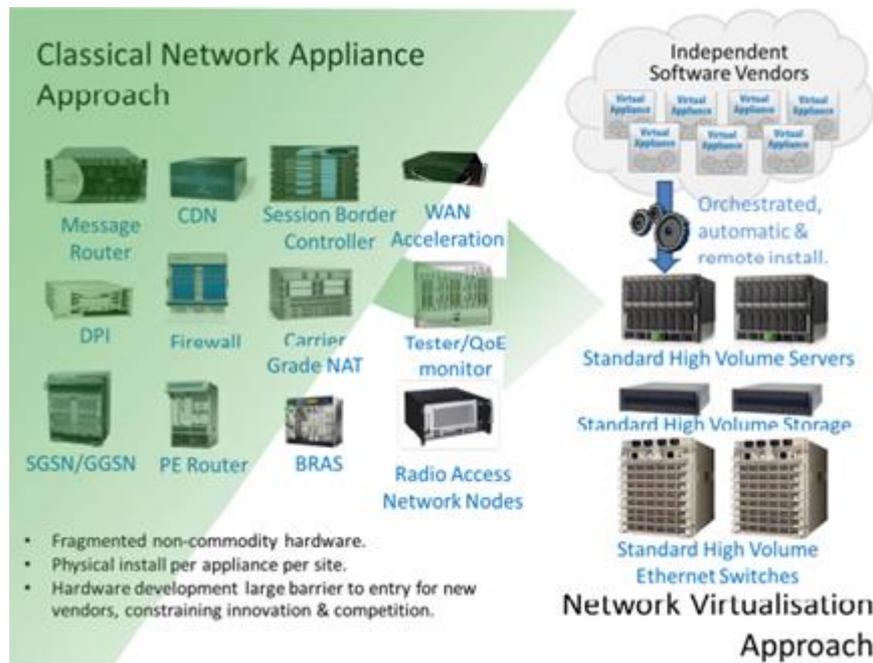
Ein solcher Ansatz bietet gleichzeitig die Möglichkeit, Netzelemente einfacher zu standardisieren und somit ein System zu schaffen, bei dem die Produkte verschiedener Hersteller interoperabel sind. Dies beruht im Wesentlichen auf der Tatsache, dass die verbaute Hardware dann nicht mehr mit einer spezifischen Software verbunden ist. Die folgende Abbildung 4-6 verdeutlicht die Entwicklung.

¹⁶ Vgl. DTAG (2021: 10).

¹⁷ Eltges et al. (2020).

¹⁸ Eltges et al. (2020).

Abbildung 4-6: Network Virtualisation



Quelle: Chiosi et al. (2012), S. 12.

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

Eine zentrale Umsetzung wie bei SDN erlaubt es auch, Optimierungsmaßnahmen, die beispielsweise auf einen geringeren Stromverbrauch abzielen und damit die Nachhaltigkeit von Netzen unterstützen, einfacher durchzuführen. Wird die Steuerung zentral installiert, so kann auf wenige Einrichtungen (Server/Rechenzentren) fokussiert werden und es können neben dem Einsatz energieeffizienter Technologien auch weitere Maßnahmen (z. B. Abwärmenutzung) zentraler und somit kosten- und energieeffizienter realisiert werden.

Auf der anderen Seite kann es auch sinnvoll sein, Anwendungen und Dienste näher am Ende des Netzwerks zu platzieren (Mobile Edge Computing oder Fog Computing) um den Datentransfer zu einer zentralen Stelle zu verringern.

Treiber des Stromverbrauchs und Ansätze für verstärkte Energieeffizienz

Wesentliche Treiber des Stromverbrauchs **eines öffentlichen Mobilfunknetzes** sind im Zugangsnetz die Basisstationen (BS), also die Knotenpunkte des Netzes. Sie bestehen im Wesentlichen aus einer Remote Radio Unit (RRU), der Baseband Unit (BBU) und der Antenne.

Das BBU übernimmt die eigentliche Signalverarbeitung und fungiert auch als digitales Interface zum Kernnetzwerk.¹⁹ Die Remote Radio Unit (RRU) dient als Empfänger des digitalen Signals aus der BBU, das von der RRU in ein Radiosignal umgewandelt wird. Umgekehrt wandelt das RRH empfangene analoge Signale in digitale Signale zur Weitergabe an die BBU um.²⁰ Die Antennen sind direkt an die RRU angeschlossen.²¹

Für die gesamten Basisstationen hat die EU-Kommission im „Code of Conduct“ des Energieverbrauchs für Breitbandinfrastruktur Richtwerte der elektrischen Leistung festgelegt. Diese ist wiederum abhängig von der Leistung der Antenne. Für LTE-Basisstationen wurden so verschiedene Richtwerte festgelegt, die im Zeitablauf sinken. Dabei wird zusätzlich die Auslastung der Basisstation (busy-hour, medium-load, low-load) unterschieden.

Tabelle 4-3: Richtwerte für den Stromverbrauch von LTE-Basisstationen

Power targets for LTE wireless broadband network equipment	Tier 2021 (1.1.2021-31.12.2021) (W)	Tier 2022 (1.1.2022-31.12.2022) (W)	Tier 2023 (1.1.2023-31.12.2023) (W)
	0,8/1,8/2,6 GHz		
Nominal output power of Radio Unit <= 80W			
LTE Radio Base Station – Busy-hour-load-state	790	710	tbd
LTE Radio Base Station – Medium-load-state	660	595	tbd
LTE Radio Base Station – Low-load-state	565	510	tbd
80W < Nominal output power of Radio Unit <= 200W			
LTE Radio Base Station – Busy-hour-load-state	870	780	tbd
LTE Radio Base Station – Medium-load-state	725	650	tbd
LTE Radio Base Station – Low-load-state	620	560	tbd
200W < Nominal output power of Radio Unit <= 500W			
LTE Radio Base Station – Busy-hour-load-state	975	880	tbd
LTE Radio Base Station – Medium-load-state	810	730	tbd
LTE Radio Base Station – Low-load-state	695	625	tbd

Source: JRC, 2021.

Configuration of LTE Radio Base Station:

- 1) 3 sectors, 10 MHz bandwidth channel 2 x 2MIMO. Nominal output power of Radio Unit: see table above.
- 2) Output power: 40W (20W x 2) at antenna interface for each sector.

For LTE Radio base station the state definitions in ETSI ES 202 706-1 v.1.6.1 [9] shall be used.

Quelle: Bertoldi und Lejeune (2021).

Für das Kernnetz existieren keine originären Daten bezüglich des Energieverbrauchs. Berechnungen von Stobbe et al. (2015) beruhen zunächst auf Abschätzungen und sagen voraus, dass der Energieverbrauch im Kernnetz mit wachsendem Datenvolumen perspektivisch höher sein wird als in den einzelnen Zugangsnetzen.²²

Die Anzahl der Basisstationen und somit der Stromverbrauch hängen von den benötigten Übertragungskapazitäten und der Reichweite der jeweils am Standort eingesetzten Frequenzen ab. „Die erzielte Reichweite ist grundsätzlich von mehreren Faktoren abhängig, wie z. B. der umgebenden Bebauung, der Topografie, der vorhandenen Vegetation, aber auch von den Antennenhöhen von Sender und Empfänger, von den verwendeten Sende-

¹⁹ Sauter (2022), S. 6.

²⁰ Sauter (2022), S. 6.

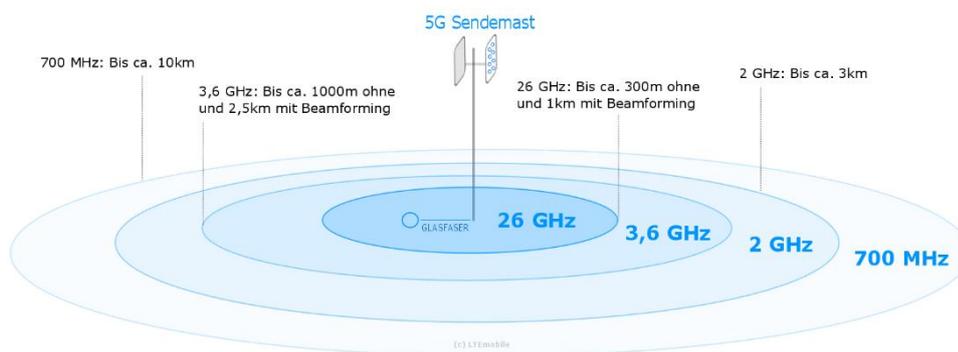
²¹ Sauter (2022), S. 6.

²² Stobbe et al. (2015), S. 106.

und Empfangsantennen, **der Sendeleistung** und dem verwendeten Mobilfunkstandard sowie von der aktuellen Auslastung der umliegenden Funkzelle (z. B. Anzahl der Nutzer und Art der genutzten Telekommunikationsdienste) und der Geschwindigkeit eines sich bewegenden Teilnehmers.“²³

Der Zusammenhang zwischen Frequenz und Reichweite ist in Abbildung 4-7 beispielhaft für 5G dargestellt.

Abbildung 4-7: Reichweite eines 5G-Netzes



Quelle: <https://lfemobile.de/5g-sendereichweiten-mit-unterschiedlichen-frequenzen/>, letzter Abruf am 09.09.2022.

Die Frage, ob 5G umweltschonender sein wird als die Vorgängergenerationen, ist umstritten. Sollen die Vorteile von 5G realisiert werden (eMBB (enhanced Mobile Broadband), URLLC (Ultra Reliable Low Latency Communications) und mMTC (massive Machine Type Communications)), dann muss die Ausbringung von Antennen auf kleinem Raum erfolgen, da die Frequenzen entsprechend höher sein müssen.

Auf der einen Seite wird 5G somit eine höhere Rechenleistung beanspruchen und die zu verarbeitenden Daten werden massiv ansteigen. Dadurch kommt es perspektivisch zu einer erhöhten Zahl kleiner als auch großer Rechenzentren. Höfer et al. (2019)²⁴ gehen davon aus, dass die meisten 5G-Anwendungen Edge-Computing benötigen werden. Edge-Data-Center übernehmen dabei dort Aufgaben ergänzend zur Cloud, wo kurze Latenzzeiten und die Verarbeitung großer Datenmengen vor Ort ankommen.²⁵ Je mehr Edge-Rechenzentren entstehen, desto mehr zentrale Rechenzentren wird es danach auch geben, und der Stromverbrauch entsprechend ansteigen.²⁶

²³ umlaut communications und WIK-Consult (2022), S. 15.

²⁴ Höfer et al. (2019), S. 21.

²⁵ Höfer et al. (2019), S. 21.

²⁶ Höfer et al. (2019), S. 21.

Auf der anderen Seite bieten sich durch 5G auch Potenziale zur Energieeffizienzsteigerung. Die Vorteile sind:²⁷

- "90 % energieeffizienter (Verhältnis der Energie zur gleichen übertragenen Datenmenge) als 4G
- Größere „Energieelastizität“ bedeutet, dass 5G außerhalb der Spitzenzeiten heruntergefahren werden kann
- Virtualisierung bedeutet schnellere, günstiger Erneuerungszyklen und kontinuierlich verbessert Leistung in Soft- und Hardware
- Größere Möglichkeiten zur gemeinsamen Nutzung von Ressourcen
- Stilllegung des 2G/3G/4G-Netzes"

Wie beim Vergleich der Festnetztechnologien (vgl. Abschnitt 4.1) weist 5G im Vergleich mit älteren Mobilfunktechnologien also dann eine bessere Treibhausgasbilanz auf, wenn der Stromverbrauch bezogen auf die Datenrate betrachtet wird. Weitere Effizienzgewinne bei 5G können durch Standby-Strategien erreicht werden, z. B. durch das zeitweilige Ausschalten von Komponenten in den Basisstationen (z. B. Verstärker oder Kühlung) bei geringem Datenverkehr. Des Weiteren können die Basisstationen in ihrer Größe den Gegebenheiten vor Ort angepasst werden und dadurch sowie durch geringere Distanzen zu den Endgeräten Energie einsparen.²⁸

Durch das beschriebene Software Defined Networking (SDN) ergeben sich ebenfalls Energieeffizienzpotenziale.²⁹

Der Stromverbrauch in sog. LPWANs (Low Power Wide Area Networks) wie NB-IoT oder LoRaWAN hängt ebenfalls von verschiedenen Faktoren ab. Starken Einfluss haben dabei die Anzahl von aktiven Komponenten und das übertragene Datenvolumen.³⁰ Oelers und Nauman (2021) sehen NB-IOT im Vergleich zu anderen Technologien bezüglich des Energieverbrauchs als überlegen an.

4.3 Rechenzentren und weitere Komponenten

Ein wesentlicher Bestandteil sowohl im Fest- als auch im Mobilfunknetz sind die Rechenzentren. Sie verursachen ca. 15 % der Treibhausgasemission des IKT-Sektors.³¹ Auch hier existiert bereits ein Code of Conduct der EU-Kommission bezüglich des

²⁷ Laidler und Bamforth (2021), S. 11, Eigene Übersetzung

²⁸ Williams et al. (2022), S. 3.

²⁹ Vgl. dazu z. B. Assefa, B.G., Özkasap, Ö. (2019): A Survey of Energy Efficiency in SDN: Software-based Methods and Optimization Models, in: Journal of Network and Computer Applications, Volume 137, 1 July 2019, S 127-143.

³⁰ Oelers und Nauman (2021), S. 12, S.32 ff.

³¹ Godlovitch et al. (2021), S.2.

Energieverbrauchs. Dieser beschreibt Treiber des Energieverbrauchs und mögliche Gegenmaßnahmen. Dies sind u. a.³²

- Bestandsaufnahme und Prüfung der installierten Technologie auf ihre Umweltverträglichkeit (z. B. durch ein Life Cycle Assessment (LCA))
- Nutzung erneuerbarer Energiequellen
- Beachtung der Energieeffizienz bei der Anschaffung und Installation neuer Software (z. B. durch Aufnahme in den Ausschreibungsprozess)
- Installation von Geräten mit der Möglichkeit der externen Kontrolle des Energieverbrauchs
- Einsatz virtualisierter/virtualisierbarer Technologien
- Reduktion des Daten-(Speicher)-Volumens
- Effiziente Kühlung
- Nutzung der Abwärme

Der Code of Conduct stellt eine Empfehlung für die Unternehmen auf Basis von Best Practice dar.

Vor dem Hintergrund der diskutierten Entwicklungen stellt sich die Frage, wo Daten in Zukunft verarbeitet und gespeichert werden und wie sich dies auf den Energieverbrauch auswirkt. Die Alternativen sind zentrale Rechenzentren, wie oben beschrieben, versus dezentrale Einheiten vor Ort. Hier kann zunächst auf das Edge-Computing abgestellt werden, eine dezentrale Lösung.

Die Entscheidung für oder gegen Edge-Computing hängt von der Art der Anwendung ab. Sollen Prozesse realisiert werden, bei denen eine sehr schnelle Datenverarbeitung vor Ort notwendig ist, so kann dies über Edge-Computing einfacher gewährleistet werden.³³

In Bezug auf die Energieeffizienz kann Edge-Computing Vorteile haben. Da die Daten vor Ort verarbeitet und gespeichert werden, kann der Datentransfer zu einem zentralen Rechenzentrum entfallen. Dies kann sowohl Kapazität als auch Energie sparen. Allerdings sind Edge-Geräte sowohl in ihrer Rechenkapazität als auch in ihrem Zugang zur Stromversorgung oft limitiert, so dass datenintensive Anwendungen dort nicht stattfinden können.³⁴

Eine weitere Lösung in diesem Zusammenhang stellt das Fog-Computing dar. Durch Kleinstrechenzentren bzw. Nanoserver wird mehr Rechenkapazität an den Rand des Systems verlagert, so dass auch hier der Effekt der kürzeren Datenübertragungswege

³² Acton et al. (2022), S. 6 ff.

³³ Beck et al. (2016), S. 1. Beispiele sind Autonomes Fahren oder Industrie 4.0.

³⁴ Jiang et al. (2020), S. 556.

greift und potenziell Energie eingespart wird, ohne auf zu viel Rechenleistung (im Vergleich zu „reinem“ Edge-Computing) verzichten zu müssen.³⁵

Sakar und Misra (2016) stellen fest, dass bei der Anwendung von Fog-Computing im Bereich IoT der Energieverbrauch höher ist als bei Cloud-Computing, wenn die Anzahl der IoT-Anwendungen mit niedriger Latenzzeit deutlich geringer ist. „Im Zusammenhang mit IoT-Anwendungen, bei denen etwa 25 % der Anfragen Echtzeitdienste erfordern, wird beobachtet, dass die Fog-Computing-Architektur den durchschnittlichen Energieverbrauch um 40,48 % senkt.“³⁶

Nach Ansicht von Jalali et al. (2016) spielen verschiedene Faktoren bei der Beurteilung der Vorteilhaftigkeit von Fog-Computing eine Rolle. Energieeinsparungen sind dabei abhängig von Faktoren des Systemdesigns wie der Art von Zugangnetzwerk, 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.³⁷

Eine wesentliche Rolle hinsichtlich des Energieverbrauchs spielen die Komponenten beim Endkunden. Diese machen den Großteil des Energieverbrauchs aus,³⁸ stehen aber nicht im Mittelpunkt der Betrachtung dieses Diskussionsbeitrags. Hierunter fallen z. B. Router, smarte TV-Geräte, Laptops und PCs oder Mobilfunktelefone. Auch hier existieren bereits Verordnungen seitens der EU zur Beschränkung des Energieverbrauchs.³⁹

Perspektivisch scheint hier mehr die Frage im Mittelpunkt zu stehen, wie eine gewisse Dienstleistung (z. B. der Abruf von Video-Content im privaten Bereich oder die Berechnung von mathematischen Modellen im beruflichen Bereich) aus Energieeffizienzgesichtspunkten optimal organisiert werden kann. Das heißt, an welcher Stelle wird Intelligenz (und Energie) aufgewendet und wie kann der Datenfluss optimiert, sprich minimiert werden? Hier ist wiederum ein Vergleich der oben diskutierten zentralen vs. dezentralen Lösungen in den Blickpunkt zu nehmen.

4.4 Rebound-Effekte

Neben den oben beschriebenen Potenzialen für eine höhere Energieeffizienz existiert auch seit längerer Zeit eine Debatte um die Frage, ob erzielte Einsparungen Rebound-

³⁵ Vgl. <https://www.cloudcomputing-insider.de/was-ist-fog-computing-a-736757/>, zuletzt abgerufen am 29.09.2022.

³⁶ Sakar und Misra (2016), S. 28.

³⁷ Jalali et al. (2016), S. 1738.

³⁸ Vgl. Godlovitch et al. (2021), S. 2.

³⁹ Vgl. Verordnung 1275/2008 zur Regelung des Stromverbrauchs von elektrischen und elektronischen Haushalts- und Bürogeräten im Bereitschafts- und Auszustand.

effekte auslösen, die konträr wirken und den Energieverbrauch wieder ansteigen lassen. Dabei wird auch diskutiert, wie solchen Rebound-Effekten begegnet werden kann.

Grundsätzlich kann zwischen direkten und indirekten Rebound-Effekten unterschieden werden.⁴⁰ Der Effekt kann entweder direkt sein, d. h. der Verbrauch der (IKT-)Lösung selbst steigt aufgrund der eingesparten Energie und der dadurch geringer aufzuwendenden finanziellen Mittel. Oder der Effekt ist indirekt, das bedeutet, die Effizienzgewinne werden für andere Güter oder Dienstleistungen aufgewendet, deren Auswirkungen den Effizienzgewinn teilweise oder vollständig ausgleichen.

Lange et al. (2020) konstatieren, dass die Literatur keine eindeutigen Erkenntnisse liefert, ob die Digitalisierung in Summe zu einer Zunahme der Energieeffizienz führt. Aber selbst wenn dies möglich wäre, ist die Gesamtwirkung auf den Energieverbrauch aufgrund mehrerer Rebound-Effekte unklar.⁴¹

Gossart (2015, S. 445) stellt fest, dass der IKT-Sektor allerdings hinsichtlich der Rebound-Effekte noch nicht hinreichend untersucht wurde. Dennoch können aus Sicht des Autors schon gewisse Rückschlüsse gezogen werden: Effizienzstrategien sollten nicht ausschließlich auf technischem Fortschritt beruhen, sondern auch den Gedanken der Suffizienz beinhalten, etwa durch ein höheres generelles Bewusstmachen solcher Effekte. Dies kann z. B. auch durch die Integration von Rebound-Effekten in Lebenszyklusanalysen geschehen. Des Weiteren sollte der Blick weg von einzelnen Lösungen hin zu einem Blick auf das Gesamtbild gehen.

5 Anwendungsfälle

Die Ausführungen in Abschnitt 4 haben gezeigt, an welchen Stellen IKT-Infrastrukturen Energie verbrauchen und welche neueren Entwicklungen hier zu erwarten sind. Vor dem Hintergrund der beschriebenen Technologien und der möglichen verschiedenen Architekturen werden in diesem Abschnitt konkrete Anwendungsfälle betrachtet. Beispielhaft für Smart-City-Anwendungen fokussieren wir auf den Bereich Smart Traffic. Durch Gespräche mit Projektbeteiligten wurde eruiert, warum bestimmte Umsetzungen so erfolgten, wie sie erfolgten, d. h. welche Treiber für den Einsatz spezifischer Technologien verantwortlich waren. Dies können sowohl rein technische als auch ökonomische oder rechtliche Faktoren sein.

⁴⁰ Gossart (2015), S.437 ff.

⁴¹ Lange et al. (2020), S. 5.

5.1 Parkraumbewirtschaftung

5.1.1 Beschreibung des Anwendungsfalls

Die Digitalisierung der Parkraumbewirtschaftung im öffentlichen Raum erfolgt über Funknetze, da eine Anbindung an das Festnetz aufgrund der Verteilung der Parkplätze in der Fläche zu kostenintensiv wäre.⁴² Hierbei wird die Belegung eines Parkplatzes über einen Sensor erfasst, der diese Information entweder gesammelt über ein Gateway oder individuell an einen zentralen Server weitergibt. Dort werden die Informationen plausibilisiert und entsprechend für die Bereitstellung einer Dienstleistung in Echtzeit aufbereitet. Bei der Plausibilisierung wird zum Beispiel überprüft, ob der Sensor nur temporär überfahren wurde oder eine Belegung des Parkplatzes für einen längeren Zeitraum vorliegt und mit hin der durch den Sensor erfasste Parkplatz tatsächlich belegt ist.

Die bereitgestellten Dienstleistungen variieren von Anwendungsfall zu Anwendungsfall. In der Regel werden die Informationen sowohl über ein Web-Interface als auch in einer App bereitgestellt. Dort können sich potenzielle Nutzer über die aktuelle Parkplatzsituation informieren. Teilweise findet über die App auch eine automatische Hinführung des Autofahrers zum nächstgelegenen freien Parkplatz statt. Die Informationen zu den Parkplätzen umfassen neben der Angabe, ob sie belegt sind oder nicht, auch Hinweise zur Ausstattung der Parkplätze (z. B. Vorhandensein einer Ladesäule für Elektrofahrzeuge, Behindertenparkplatz, Ladezone). Aufgrund der begrenzten Nutzung der bereitgestellten Apps wird diese oft durch Anzeigen im öffentlichen Raum ergänzt, die Hinweise über die Parkplatzsituation geben.⁴³ Dies kann z. B. über Richtungspfeile mittels LED-Anzeigen im öffentlichen Raum erfolgen, die den Fahrer darauf hinweisen, in welcher Richtung freie Parkmöglichkeiten gegeben sind.

Grundsätzliches Ziel ist es, das Informationsangebot über die Parkplatzsituation zu verbessern, um den Parksuchverkehr zu reduzieren und somit einen Beitrag zur Senkung der Treibhausgasemissionen zu leisten. Ferner werden die Informationen auch zu Planungszwecken herangezogen, indem mittels statistischer Auswertungen genauere Erkenntnisse über die tatsächliche Belegungssituation und somit den Parkplatzbedarf generiert werden. Dies wiederum kann dann in umfassendere städteplanerische Aktivitäten einfließen (z. B. für den Bau neuer Parkplätze). Darüber hinaus können die Informationen mit anderen kommunalen Dienstleistungen kombiniert werden (z. B. für die Routenplanung des Ordnungsdienstes für die täglichen Kontrollgänge).

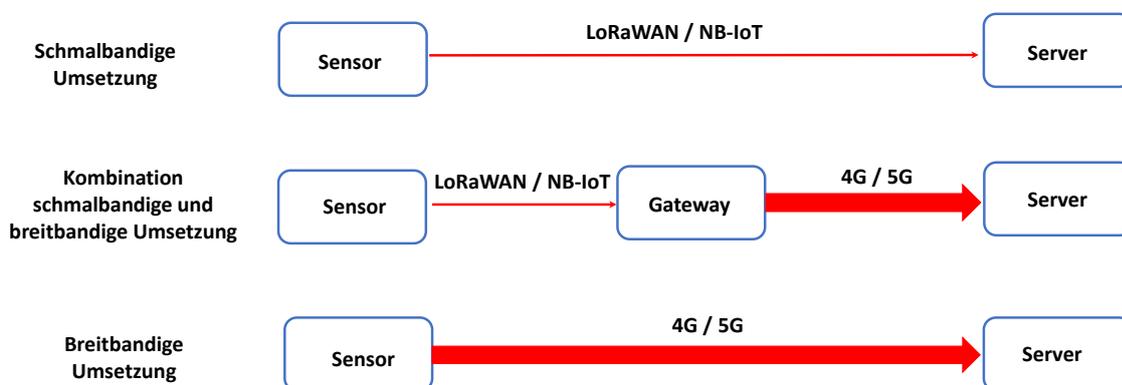
⁴² Die folgenden Ausführungen basieren im Wesentlichen auf Interviews von Experten, die entsprechende Konzepte tatsächlich umgesetzt haben.

⁴³ Ein Grund liegt darin, dass die bisher konzipierten Apps nicht mit anderen Dienstleistungen (z. B. Google Maps) verlinkt sind und daher in der Regel nur eine sehr begrenzte räumliche Abdeckung haben.

5.1.2 Umsetzungsvarianten

Es sei darauf hingewiesen, dass es sich bei den bisherigen Umsetzungen eher um begrenzte Pilotvorhaben handelt, die nicht flächendeckend ausgerollt sind, weshalb es sich eher um Insellösungen handelt. Aufgrund der Heterogenität der angebotenen Dienstleistungen liegt der Fokus im Folgenden auf der Anbindung der Sensoren für die Feststellung der Belegung eines Parkplatzes an den Server, wo die Sensordaten verarbeitet und für die Erbringung der Dienstleistung aufbereitet werden.

Abbildung 5-1: Umsetzungsvarianten für die Digitalisierung der Parkraumbewirtschaftung



Quelle: eigene Darstellung.

Im Rahmen der Interviews haben sich drei Umsetzungsvarianten herauskristallisiert (siehe Abbildung 5-1):

- Variante 1: Die Kommunikation zwischen Sensor und Server erfolgt ausschließlich mittels der schmalbandigen Funkstandards LoRaWAN oder NB-IoT.
- Variante 2: Die zweite Variante beinhaltet eine Kombination aus der Nutzung schmalbandiger und breitbandiger Funknetze, wobei die Information der Sensoren zunächst mittels LoRaWAN oder NB-IoT an ein Gateway übertragen werden und dann gesammelt mittels 4G bzw. 5G an den Server übermittelt werden.
- Variante 3: Die dritte Umsetzungsvariante nutzt ausschließlich das breitbandige öffentliche Mobilfunknetz, was impliziert, dass die Sensoren mit entsprechenden SIM-Karten ausgestattet sein müssen.

Die gewählten Umsetzungsvarianten korrelieren dabei mit der verwendeten Sensortechnik. Es kann zwischen Boden- und Überkopfsensoren unterschieden werden.⁴⁴ Bodensensoren werden auf den Boden montiert,⁴⁵ arbeiten mit Radar- und/oder

⁴⁴ Vgl. Liebe und Hillebrand (2020: 6ff.).

⁴⁵ Die Bodensensoren können entweder nur auf den Boden aufgeklebt oder mittels Tiefbauarbeiten in den Boden eingelassen werden. Das Klebverfahren ist kostengünstiger und erfordert nur einen geringen

Magnetsensorik und erfassen bei Überfahren, ob ein Parkplatz belegt ist. Sie zeichnen sich durch einen geringen Energieverbrauch aus und sind in der Regel batteriebetrieben. Es werden üblicherweise Lithium-Batterien mit einer Nennspannung von 3,6 V und einer Kapazität von 2600 mAh verwendet, was einem Stromverbrauch über die Lebenszeit der Batterie von rund 9,36 Wh entspricht.⁴⁶ Die Sensoren erfordern nur eine geringe Datenrate und können daher über schmalbandige Mobilfunkstandards angeschlossen werden. Während die Batterielaufzeit bei LoRaWAN rund 5 Jahren beträgt, liegt sie bei NB-IoT aufgrund der besserer Energieeffizienz bei rund 7 Jahren. Die Anzahl der zur Abdeckung der Parkflächen erforderlichen Sensoren kann mittels serverbasierter KI reduziert werden. Unter Berücksichtigung der Verkehrsflüsse und der bisherigen Belegungsmuster kann es ausreichend sein, nur jeden fünften bis zehnten Parkplatz mit einem Sensor auszustatten. In der Regel übersteigen die Einsparungen für die nicht benötigten Sensoren (Kosten und Energieverbrauch) die Aufwendungen für die zusätzliche Serverleistung. Die Gateways bei der zweiten Umsetzungsvariante werden in der Regel solarbetrieben. Der Stromverbrauch ist dabei zu vernachlässigen.

Bei der dritten Variante werden üblicherweise videobasierte Überkopfsensoren verwendet. Ein Videosensor kann je nach Ortsbedingungen ca. 10 bis 80 Einzelstellplätze erfassen. Je höher der Sensor über dem Boden angebracht ist und je geringer eventuelle Sichtbehinderungen (z. B. durch Baumbestand) sind, desto mehr Stellplätze können durch einen Sensor abgedeckt werden. Die intelligente Bildauswertung findet im Sensor selbst statt. Die Ermittlung des Parkplatzstatus erfolgt mithin bereits vor Ort im Sensor (Edge-Computing). Es werden lediglich die Metadaten (z. B. in Form von GPS-Koordinaten) an den Server übermittelt. Überkopfsensoren haben eine Leistungsaufnahme von 5 bis 15 W und weisen daher einen deutlich höheren Stromverbrauch (typischer Jahresstromverbrauch von rund 15 kWh) als Bodensensoren auf. Sie erfordern zudem eine höhere Datenübertragungsrate.⁴⁷

Zeitaufwand, weshalb es bei laufendem Betrieb durchgeführt werden kann. Demgegenüber hat die Anbringung der Sensoren mittels Tiefbauarbeiten den Vorteil, dass die Sensoren geschützter (insbesondere gegen Abriss) sind und daher seltener ausgetauscht werden müssen.

⁴⁶ Vgl. zu den technischen Charakteristika von Bodensensoren z. B. <https://smart-city-system.com> und <https://www.mz-connect.com/shop/elsys-lithium-batterie-fuer-sensoren-der-ers-und-ems-serie-p-167150>.

⁴⁷ Zu den technischen Charakteristika von Überkopfsensoren vgl. z. B. <https://www.swarco.com/de/produkte/detektion-und-sensoren/parkdaten-erfassung/parkdaten-erfassung-fuer-den-aussenbereich/video>.

Tabelle 5-1: Parkraumbewirtschaftung: schmalbandige vs. breitbandige Umsetzung

Parameter	Schmalbandige Umsetzung	Breitbandige Umsetzung
<i>Sensor</i>	Boden	Überkopf
<i>Erfasste Stellplätze</i>	Ca. 1 - 10	Ca. 10 – 80
<i>Stromverbrauch p.a.</i>	Ca. 2 Wh	Ca. 15 kWh
<i>Stromverbrauch je Stellplatz p.a.</i>	Ca. 0,2 – 2 Wh	Ca. 0,2 – 2 kWh
<i>Erforderliche Datenrate</i>	niedrig	Hoch
<i>Installation</i>	Nicht bei laufendem Betrieb Evtl. Tiefbauarbeiten erforderlich	Bei laufendem Betrieb
<i>Flexibilität/Skalierbarkeit</i>	Eher gering	hoch

Quelle: Eigene Zusammenstellung.

Tabelle 5-1 stellt die wesentlichen Charakteristika der Umsetzungsvarianten zusammenfassend gegenüber, wobei nur die beiden Reinformen der Varianten 1 und 3 betrachtet werden. Wie eben ausgeführt, weisen die Überkopfsensoren (Variante 3) einen höheren Stromverbrauch auf, können dabei aber mehr Stellplätze abdecken. Nichtsdestotrotz liegt der Stromverbrauch bei Überkopfsensoren je Stellplatz und Jahr ca. um den Faktor 1.000 über dem der Bodensensoren.⁴⁸ Allerdings kann die Installation der Überkopfsensoren bei laufendem Betrieb erfolgen. Der Parkraum muss dafür nicht gesperrt werden. Aus der einfacheren Installation folgt zudem, dass das Konzept flexibler an geänderte Bedingungen angepasst werden kann, was auch eine bessere Skalierbarkeit impliziert. Insbesondere sind keine größere Rückbaumaßnahmen bei der Deinstallation erforderlich.

Wie erwähnt, werden ergänzend zur appbasierten Bereitstellung der Dienstleistung teilweise LED-Richtungsanzeigen für die Parkplatzsuche im öffentlichen Raum aufgestellt. Handelsübliche LED-Anzeigen für ein Parkleitsystem haben je nach Größe Geräteleistungen zwischen ca. 600 bis 1.100 W, woraus ein typischer Jahresstromverbrauch von 900 bis 1.500 kWh resultiert.⁴⁹

⁴⁸ Der Stromverbrauch bei den Überkopfsensoren entspricht bei der derzeitigen Emissionsintensität des deutschen Strommixes von rund 400 g/kWh einer Jahresemission von ca. 6 kg CO₂. Zum Vergleich: Ein handelsüblicher Server emittiert bei einem Stromverbrauch von rund 2.500 kWh ca. eine Tonne CO₂ p.a. Zur Emissionsintensität des deutschen Strommixes siehe z. B. Icha und Lauf (2022).

⁴⁹ Zu den technischen Charakteristika von LED-Anzeigen vgl. z. B. <https://www.swarco.com/de/produkte/anzeigen/parkleit-anzeigen/on-street/led-rgb-vollmatrix-anzeige>.

5.1.3 Treiber für die Wahl der IKT-Infrastruktur

Aus den Experteninterviews ging hervor, dass ein wesentlicher Treiber für die Wahl der Umsetzungsvariante die bereits vorhandene Infrastruktur war, in die das Konzept der Parkraumbewirtschaftung eingebettet werden kann. Daraus folgt, dass in der Regel kein Greenfield-Ansatz, sondern eher Brownfield-Ansätze zur Anwendung kommen, wobei die bestehende Infrastruktur den wesentlichen Ausgangspunkt für die Planungen spielt. In einem Fall wurde z. B. die Variante 1 mittels NB-IoT umgesetzt, da der Projektträger auf ein eigenes, bereits bestehendes Netz zurückgreifen konnte. In einem anderen Fall wurde die Variante 3 mit Überkopfsensoren gewählt, da sich die Straßenlaternen im Eigentum des Projektträgers befinden, so dass diese für die Anbringung der Sensoren genutzt werden konnten. Auf diese Weise konnten Genehmigungsprozesse deutlich vereinfacht sowie die Komplexität und zusätzlich erforderliche Kosten beim Roll-out der Sensoren reduziert werden. Variante 2 kommt in der Regel dann zur Anwendung, wenn keine derartigen eindeutigen infrastrukturellen Vorteile bestehen.

Weitere Aspekte bei der konkreten Projektumsetzung betreffen den Datenschutz (z. B. keine Weitergabe von Bildinformationen vom Sensor an den Server) und die Flexibilität bzw. Skalierbarkeit der Umsetzungsvariante. In der Regel spielten diese Aspekte bei der initialen Entscheidung für eine der Varianten jedoch eher eine untergeordnete Rolle. Die initiale Entscheidung (Boden- oder Überkopfsensoren) determiniert zudem die benötigte Bandbreite. Latenz ist bei der Parkraumbewirtschaftung von nachrangiger Bedeutung. Alle bestehenden Mobilfunktechnologien wären in dieser Hinsicht kompatibel mit den derzeit relativ geringen Latenzanforderungen der Parkraumbewirtschaftung.

Die Frage der Nachhaltigkeit war bei der Initiierung der Pilotvorhaben zur Parkraumbewirtschaftung eine der wesentlichen Triebfedern. Hauptziel ist es ja gerade, den Parksuchverkehr und die damit verbundenen Lärm-, Abgas- und Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Hinsichtlich der Wahl der IKT-Infrastruktur zur Umsetzung des Vorhabens spielten Nachhaltigkeitsaspekte wie der erforderliche Energieverbrauch jedoch kaum eine Rolle.

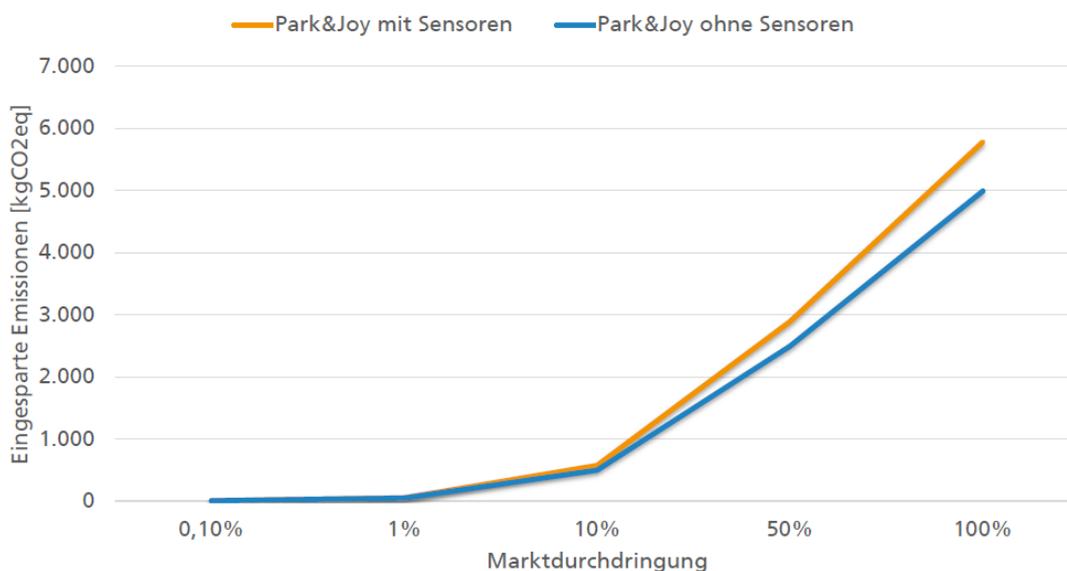
5.1.4 Nachhaltigkeitseffekte des Anwendungsfalls

Intelligente Parkraumbewirtschaftungssysteme (Smart Parking) werden hinsichtlich ihrer Nachhaltigkeitsaspekte in der Literatur tendenziell positiv gesehen. McKinsey (2018: 56) weisen z. B. aus, dass die Treibhausgasemissionen in Ballungsräumen durch Smart Parking um 0,3 % bis 0,6 % reduziert werden können. Zur Verkürzung der Parksuche können sowohl die Bereitstellung der Informationen für die Nutzer über die Parksituation mittels eines Parkleitsystems als auch die Erfassung des tatsächlichen Belegungszustandes mittels Sensoren als wesentliche Faktoren identifiziert werden. Die Frage ist nun, welchen Beitrag diese beiden Elemente zum Gesamteffekt leisten.

Stobbe (2018) hat u. a. diese Fragestellung auf Basis eines Pilotvorhabens in Hamburg näher untersucht. Neben einem Referenzszenario ohne Parkleitsystem hat er zwei weitere Szenarien betrachtet:

- Szenario 1: Smart Parking mittels Parkleitsystems ohne Sensoren,⁵⁰
- Szenario 2: Smart Parking mittels Parkleitsystems in Kombination mit Sensoren (Bodensensoren).

Abbildung 5-2: Emissionsreduktionen durch intelligente Parkraumbewirtschaftung



Quelle: Stobbe (2018: 46).

Dabei wurden auch die mit der Herstellung und Nutzung der einzelnen Komponenten der Kommunikationsinfrastruktur (insbesondere Server und Sensoren) verbundenen Emissionen berücksichtigt. Abbildung 5-2 zeigt die in den beiden Szenarien gegenüber dem Referenzszenario eingesparten CO₂-Emissionen. Dabei steigen die Einspareffekte mit zunehmender Marktdurchdringung des Parkleitsystems (App-Nutzung durch Autofahrer). Der wesentliche Einspareffekt wird bereits durch die App-Nutzung erreicht. Der zusätzliche Einspareffekt durch die Ausbringung von Sensoren fällt deutlich geringer aus. Hintergrund sind die Annahmen über die Wahrscheinlichkeiten einer erfolgreichen Parkplatzsuche. Während für das Referenzszenario eine Erfolgswahrscheinlichkeit von 33 % angenommen wird, steigt diese in Szenario 1 auf 78 % und in Szenario 2 auf 96 %.⁵¹ Es ist jedoch fraglich, ob eine Erfolgswahrscheinlichkeit unter 80 % unter

⁵⁰ Zur Ableitung der Information über die Belegungssituation der Stellplätze wird in diesem Fall ausschließlich auf externe Datenquellen zurückgegriffen (z. B. Verkehrsflüsse, Wochentag, Veranstaltungskalender etc.).

⁵¹ Vgl. Stobbe (2018: 37).

Akzeptanzgesichtspunkten ausreichend ist. Wenn Autofahrer wiederholt die negative Erfahrung machen, dass das System sie zu einem bereits belegten Parkplatz leitet, so wird dies die Akzeptanz des Systems bei den Nutzern deutlich senken. Die Einspareffekte bei den Emissionen können jedoch nur erreicht werden, wenn das Parkleitsystem von den Autofahrern hinreichend genutzt wird. Potenzielle Einspareffekte lassen sich nur bei einer hohen Akzeptanz in der Nutzung realisieren. Bei der Ausgestaltung des Systems (mit oder ohne Sensoren) sind daher neben den möglichen Einspareffekten auch Akzeptanzgesichtspunkte zu berücksichtigen, um entsprechende Nachhaltigkeitseffekte zu generieren.

Ferner lohnt sich der zusätzliche Aufwand für die Ausbringung der Sensoren (Szenario 2) allein unter Emissionsgesichtspunkten bereits bei einer sehr geringen Marktdurchdringung. Der Break-even in Relation zu Szenario 1 wird bereits bei einer App-Nutzungsquote von 0,3 % erreicht. Ab diesem Zeitpunkt übersteigen die Emissionseinsparungen von Szenario 2 diejenigen von Szenario 2.⁵²

Neben der Emissionsreduktion führt RheinEnergie (2021) infolge ihres Pilotprojektes weitere Aspekte an, die aus Nachhaltigkeitsgesichtspunkten interessant sind. So konnten sowohl die Belegungsquote der Stellplätze als auch die Bezahlquote der Parkplatznutzer gesteigert werden. Während ersteres eine bessere Auslastung der öffentlichen Infrastruktur bedeutet und somit zu einer besseren Ressourcennutzung beiträgt, mindert die erhöhte Bereitschaft, für einen gebührenpflichtigen Parkplatz zu zahlen, die bekannte Freifahrerproblematik bei der Nutzung öffentlicher Güter.

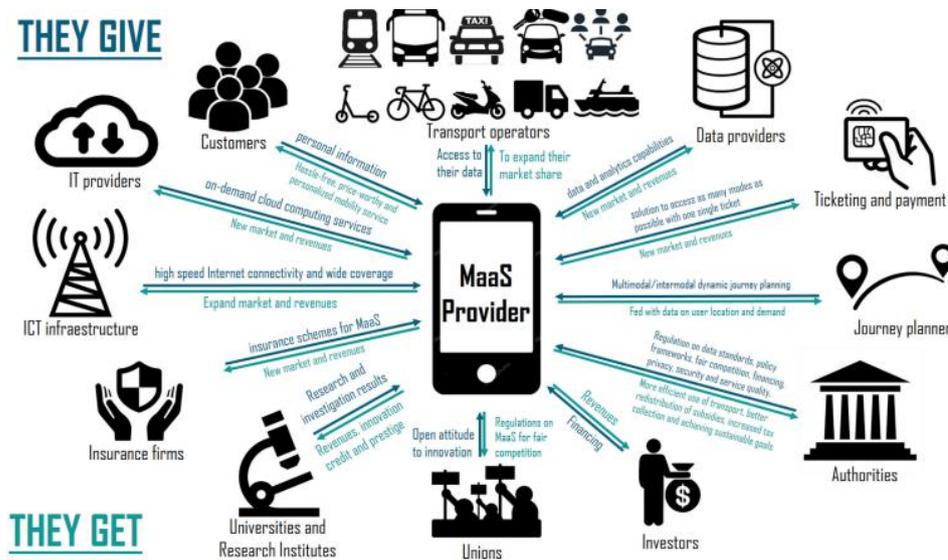
Zukünftig sind bei einem flächendeckenden Roll-out intelligenter Parkleitsysteme eventuelle Rebound-Effekte jedoch nicht auszuschließen. So könnten durch die verbesserte Informationslage zur Parkplatzsituation zusätzliche Autofahrer angereizt werden, doch wieder in die Innenstädte zu fahren, was die Einspareffekte zumindest teilweise konterkarieren könnte.

5.2 Mobility-as-a-Service

Unter Mobility-as-a-Service (MaaS) versteht man die Bündelung bzw. Bereitstellung verschiedener, öffentlich zugänglicher Verkehrsmittel, die vom Kunden (im Regelfall über eine Handy-App) gebucht werden können, um von Punkt A nach Punkt B zu kommen. Die Akteure eines MaaS-Ökosystems sind in Abbildung 5-3 dargestellt.

⁵² Vgl. Stobbe (2018: 47). Bei der Verwendung von Überkopfsensoren wäre aufgrund des wesentlich höheren Stromverbrauchs in der Nutzungsphase eine höhere Marktdurchdringung für eine Vorteilhaftigkeit von Szenario 2 in Relation zu Szenario 1 erforderlich. Siehe Tabelle 5-1.

Abbildung 5-3: MaaS-Ökosystem



Quelle: Arias-Molinares und García-Palomares (2020), S. 260.

Von Bedeutung für die technische Umsetzung sind in diesem Fall die IKT-Infrastruktur sowie der Umgang mit den Daten.

5.2.1 Beschreibung des Anwendungsfalls

MaaS-Konzepte existieren in unterschiedlichen Realisierungsvarianten, z. B. in der Frage, welche Verkehrsmittel einbezogen werden. Gemeinsam haben sie die Notwendigkeit, die Daten aus Sensoren in den Verkehrsmitteln oder auch von Parkplätzen zusammenzuführen, aufzubereiten und dem Nutzer in sinnvoller Weise zur Verfügung zu stellen. Laut Marktteilnehmern ist dies einer der Gründe, warum kommerzielle Angebote kaum verfügbar sind. In Deutschland werden entsprechende Angebote z. B. von Kommunen, Städten oder Bundesländern bereitgestellt.⁵³

Auf der anderen Seite bieten Open-Data-Konzepte neue Möglichkeiten externe Datenquellen für MaaS zu nutzen, z. B. durch Daten aus Car-Sharing-Angeboten, Lastenrädern, Fahrgemeinschaften oder Ladesäulen. Es bedarf aber einer zentralen Stelle, bei der alles zusammenläuft und die Daten aufbereitet werden.

Perspektivisch können dann auch vorausschauende Analysen (Predictive Analysis), angewendet werden, denn nur durch die konsequente Auswertung großer Datenmengen im Rahmen von Big-Data-Projekten lassen sich die notwendigen Informationen zur

⁵³ Vgl. z. B. Stadtnavi der Stadt Herrenberg (<https://stadtnavi.de>), movA der Stadt Aachen (<https://www.aseag.de/mova-app>), bbnavi in Brandenburg (<https://bbnavi.de>).

Steuerung der Verkehrsströme ermitteln. Dies erfordert aber wiederum (Rechen-)Ressourcen mit entsprechenden Auswirkungen auf die Nachhaltigkeit.

5.2.2 Umsetzungsvarianten und Treiber des Ressourcenverbrauchs

Aus Gesprächen mit Projektverantwortlichen und aus der Literatur konnten nur wenige Informationen gewonnen werden, mit welcher IKT-Infrastruktur MaaS-Projekte in der Realität umgesetzt werden. Aus diesem Grund bleiben auch die Motive für den Einsatz einer bestimmten Technologie/Architektur im Unklaren. Es kam allerdings zum Ausdruck, dass das „Funktionieren“ der Lösung im Vordergrund steht und weniger bzw. gar nicht die Nachhaltigkeit der IKT-Infrastruktur selbst. Damit verbunden ist auch, dass die Skalierbarkeit von Lösungen, d. h. die Anwendung in der breiten Fläche und über die Grenze der Kommune hinaus, oft noch nicht oder nur in Ansätzen angelegt ist.

Ein Treiber für die Einführung eines MaaS ist oft der politische Wille und die damit verbundene Motivation, den Bürgern ein umweltfreundliches und preisgünstiges Angebot zu unterbreiten. Das Ziel der Nachhaltigkeit wird also durch das Angebot selbst verfolgt, die Nachhaltigkeit der technologischen Umsetzungsvariante steht nicht im Fokus. Aber auch die Nachhaltigkeit der Anwendung wird tatsächlich nur in wenigen Fällen und in Ansätzen gemessen (siehe dazu auch Abschnitt 5.2.3).

Auch Ausführungen in der Literatur zu diesem Thema sind überschaubar. König et al. (2017) zeigen allgemein verfügbare Technologien für MaaS auf. Eine wesentliche Rolle spielen dabei Mobilfunktechnologien, wobei bei 5G der Vorteil gesehen wird, dass Daten näher an der Anwendung genutzt und verarbeitet werden können. WLAN wird als Komplementärtechnologie zu den Funknetzen betrachtet und eine mobile Edge-Cloud-Lösung wird als mögliches Szenario von Vehicle-to-Infrastructure-Anwendungen gesehen.⁵⁴

5.2.3 Nachhaltigkeitseffekte des Anwendungsfalls

Die Messung der (ökologischen) Nachhaltigkeit von MaaS-Konzepten in der Literatur ist in ihren Aussagen nicht eindeutig bzw. hängt wiederum von verschiedenen Faktoren ab. Jang et al. (2021, S. 361) weisen darauf hin, dass Effekte in zwei Richtungen entstehen können. Zum einen kann MaaS Kunden anziehen, die bisher weniger nachhaltige Transportmittel genutzt haben (z. B. KFZ). Dann ergibt sich ein positiver Beitrag für die Umwelt. Auf der anderen Seite können nun aber Nutzer, die bisher ausschließlich umweltfreundlichere Alternativen, insbesondere den ÖPNV, genutzt haben, nun z. B. auch Car-Sharing-Angebote nutzen, was die Umweltbilanz verschlechtern würde.

⁵⁴ König et al (2017), S. 24 ff.

Die Nutzung von MaaS hängt nach Darstellung von Jang et al. (2021, S. 361) von Faktoren ab, wie z. B. die zeitlichen Verpflichtungen der Nutzer oder verschiedene Preisschemata für die Transportmodi, die mit bestimmten MaaS-Angeboten verbunden sind.

Wittstock (2019, S. 71) hält es sogar für unwahrscheinlich, dass in naher Zukunft empirische Belege für die Auswirkungen von MaaS verfügbar sein werden, sondern erwartet, dass jede Bewertung sowohl der Richtung der Auswirkungen als auch ihrer Größenordnung von der Entwicklung von Szenarien abhängen. Diese könnten sodann die erwarteten Entwicklungen in Bezug auf technologischen Fortschritt, Geschäftsmodelloptionen, Regulierungen und andere politische Instrumente berücksichtigen.

6 Rückschlüsse und offene Fragen

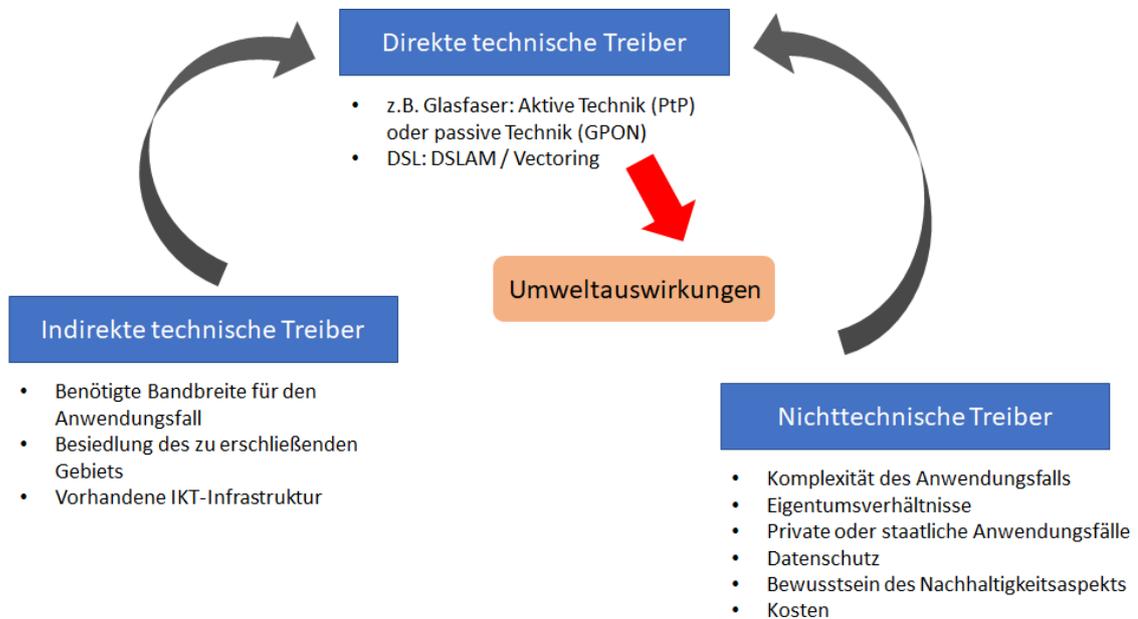
Sowohl die Beschreibung der bestehenden Infrastrukturen und deren Energieverbräuche in Abschnitt 4 als auch die Analyse der Anwendungsfälle in Abschnitt 5 lassen verschiedene Rückschlüsse zu, die in Hinblick auf die weitere Entwicklung im Bereich der Nachhaltigkeit von Bedeutung sind. Diese sind in den folgenden Thesen festgehalten, die weiter unten noch einmal detaillierter diskutiert werden.

1. Die Nachhaltigkeit der Lösungen wird durch eine Vielzahl technischer und ökonomischer Treiber beeinflusst.
2. Welche Treiber dominant sind, hängt sehr stark von der konkreten Situation ab, für die IKT als Lösung eingesetzt wird.
3. Die Diskussion über Nachhaltigkeit der IKT-Infrastruktur wird in der akademischen Literatur für viele Teilbereiche vor allem auf technischer Ebene diskutiert.
4. Die Treiber für die Umsetzung sind dagegen oft nichttechnischer Natur.
5. Oftmals steht bei der Umsetzung das Ziel der Funktionsfähigkeit der Lösung im Mittelpunkt.
6. Nachhaltigkeitsaspekte werden in der Umsetzung einer Lösung gesehen, bei der IKT-Infrastruktur selbst aber oftmals nicht mitgedacht.
7. Dadurch sind Lösungen oft einzelfallbezogen, Skalierbarkeit spielt nur eine untergeordnete Rolle.
8. Proprietäre Lösungen sind vorherrschend.
9. Durch die Existenz verschiedener Technologien ist die volkswirtschaftlich wünschenswerteste Lösung nicht immer eindeutig zu bestimmen.
10. Eine einheitliche Vorgehensweise bei der Messung (wenn diese in der Praxis überhaupt erfolgt) der Effekte existiert nicht.
11. Die Ableitung einer Metrik ist aufgrund der Komplexität des Sachverhalts (z. B. der Berücksichtigung von Rebound-Effekten) sehr anspruchsvoll.

6.1 Treiber der Umsetzung

In Abschnitt 4 und 5 wurden verschiedene direkte und indirekte Treiber bezüglich der Nachhaltigkeit von IKT-Infrastrukturen aufgezeigt. Direkte Treiber sind solche, die aufgrund der jeweiligen Technologie einen direkten Einfluss auf den Energieverbrauch und somit die Treibhausgasemissionen besitzen. Wesentlich ist hier die Frage, wie viele aktive Komponenten eingesetzt werden. Dies wiederum ist abhängig von den indirekten Treibern, also z. B. der Struktur der zu erschließenden Umgebung, dem Ziel des Einsatzes einer gewissen Infrastruktur und der bereits vorhandenen Infrastruktur. In der Umsetzung wiederum spielen auch nichttechnische Treiber eine Rolle. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt diesen Zusammenhang noch einmal zusammenfassend anhand von Beispielen auf.

Abbildung 6-1: Zusammenspiel der relevanten Treiber nachhaltiger IKT-Infrastruktur



Quelle: Eigene Abbildung

In der Realität finden zwischen den verschiedenen Treibern Wechselwirkungen statt. So kann z. B. eine schon vorhandene Glasfaserinfrastruktur in einer Stadt dazu genutzt werden, über den ursprünglichen Zweck hinaus Dienstleistungen anzubieten und somit die Kosteneffizienz der Infrastruktur zu erhöhen. Dies kann wiederum weitere Investitionen in Glasfaser bedingen. Welche Treiber dabei dominant sind, ist sehr stark situationsabhängig.

Als nichttechnische Treiber spielen z. B. auch die Eigentumsverhältnisse eine Rolle. Zum einen wurde in den Expertengesprächen als Motiv für die Entscheidung für eine gewisse Infrastruktur die Hoheit über deren Verwendung angegeben. Dies ist etwa beim (lizenzfreien) LoRaWAN einfacher als bei NB-IoT. Zum anderen können zu viele beteiligte

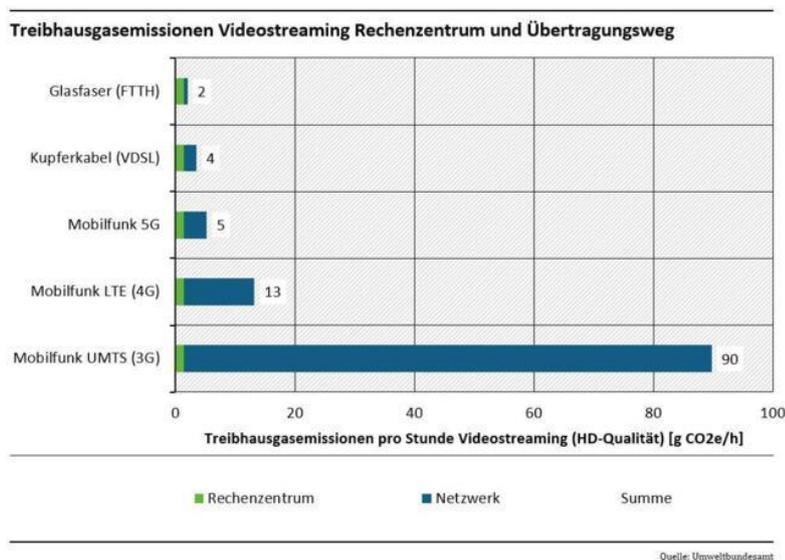
Akteure für höhere bzw. prohibitive Transaktionskosten sorgen, so dass auf solche Infrastrukturen zurückgegriffen wird, zu denen der Zugang relativ einfach ist, da nicht zu viele Akteure im Spiel sind.

Wird über konkrete Anwendungsfälle gesprochen, so steht oftmals die Funktionalität der Lösung im Vordergrund und nicht die Nachhaltigkeit der IKT-Infrastruktur. Die Skalierbarkeit der Lösung spielt ebenfalls eine untergeordnete Rolle, da Projekte oft regional begrenzt sind.⁵⁵

6.2 Die Koexistenz verschiedener Lösungen

Manche Dienstleistungen bzw. Produkte können durch unterschiedliche Technologien bereitgestellt werden und besitzen unterschiedliche Umweltauswirkungen. Beispielhaft sind in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** die Auswirkungen des Abrufs eines Videos mit verschiedenen Technologien dargestellt.

Abbildung 6-2: Treibhausgasemissionen verschiedener Technologien für denselben Anwendungsfall



Quelle: Umweltbundesamt (2020): <https://publicarea.admiralcloud.com/p/iRg9WDwNJTyYr1D21Bx4mY>.
Zuletzt abgerufen am 31.10.2022.

In vielen Bereichen stellt sich daher in Bezug auf die Nachhaltigkeit die Frage, ob die doppelte oder mehrfache Existenz verschiedener Lösungen sinnvoll ist. Dies umso mehr,

⁵⁵ Dies ist jedenfalls das Ergebnis der im Rahmen dieses Projektes geführten Gespräche, die allerdings keine Repräsentativität beanspruchen. Für eine empirische Überprüfung der These besteht weiterer Forschungsbedarf.

als dass manche Technologien (noch) nicht vollständig genutzt werden bzw. ausgelastet sind (vgl. auch Abschnitt 6.4).

Mit der 5G-Technologie wird es erstmals möglich, verschiedene Endkunden gezielt über eine Plattform mit der benötigten Kapazität zu versorgen (Network-Slicing). Dabei kommen SDN und NFV zum Einsatz (vgl. Abschnitt 4.2): „Beispielsweise sind in Netzwerken, die eine große Gerätedichte zulassen, die maximalen Bandbreiten und Datenraten pro Endgerät begrenzt. Für jeden Anwendungsfall ein eigenes physisches Netzwerk zu schaffen, ist aufwendig und kostspielig. Das Network Slicing schafft Abhilfe aus diesem Dilemma, indem es auf einer gemeinsamen physischen Netzwerkinfrastruktur virtuelle Netzwerkpartitionen mit den jeweils gewünschten Eigenschaften bereitstellt. Es sind keine zusätzlichen Investitionen in Hardware notwendig, da die Network Slices softwarebasiert realisiert sind.“⁵⁶

Sind 5G-Netze installiert, könnten damit also verschiedene Anforderungen erfüllt und somit auch verschiedene Anwendungen bedient werden. Anwendungen, die auf Einzellösungen setzen wie z. B. LoRaWAN, wären sodann nicht mehr notwendig. Dies setzt allerdings ein entsprechendes Ökosystem an Komponenten voraus, die für 5G konzipiert sind. Ein „Nebeneinander“ verschiedener Technologien ist somit für eine Übergangsphase immer gegeben, da die Migration zur nächsten Technologiegeneration eine gewisse Zeit benötigt.

Das Ziel sollte es daher sein, ein volkswirtschaftliches Optimum im Aufbau und der Nutzung von IKT-Infrastrukturen zu erreichen. Dies bedeutet eine Kostenminimierung im Aufbau und Betrieb der Technologie, die allerdings auch die Internalisierung externer Kosten durch Umweltauswirkungen miteinschließt.

Ein flächendeckender Ausbau von 5G-Netzen ist (zumindest im Frequenzbereich ab 3,6 GHz) jedoch insbesondere in ländlichen Gebieten mit hohen Kosten verbunden (vgl. Abschnitt 4.2), da die Reichweite der eingesetzten Frequenzen relativ gering ist. Somit können hier kleinteilige bzw. proprietäre Lösungen kurzfristig kostengünstiger und nachhaltiger sein. Verschiedene Faktoren stehen sich hier gegenüber. Sie sind in Tabelle 6-1 zusammenfassend aufgeführt.

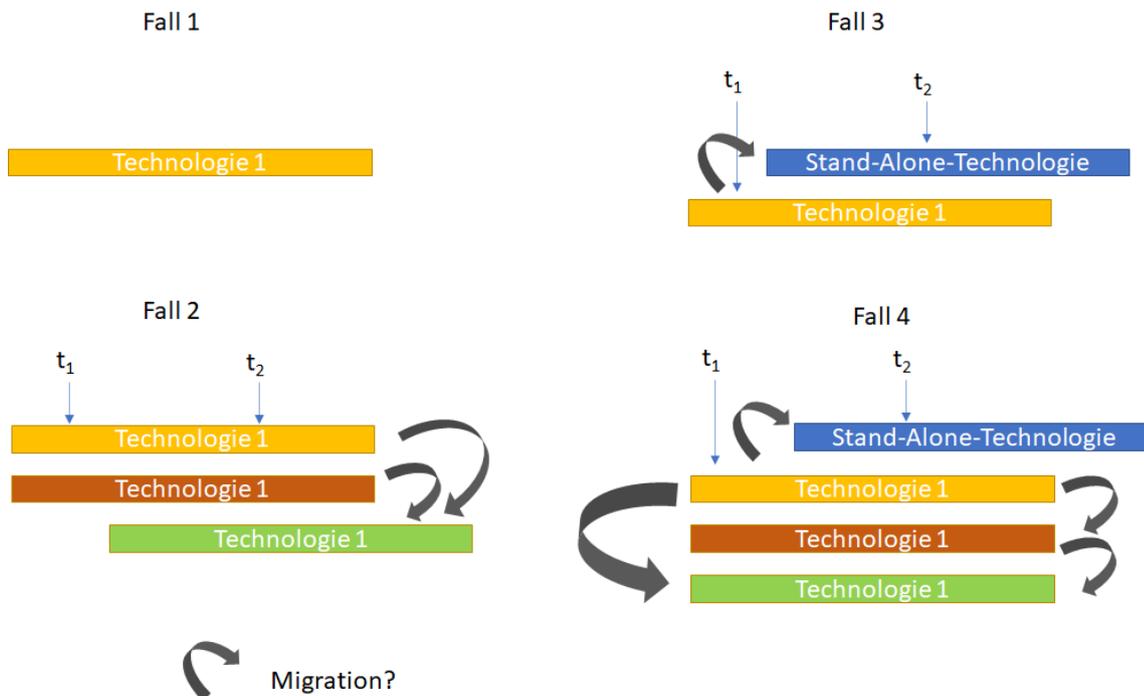
⁵⁶ <https://www.ip-insider.de/was-ist-network-slicing-a-828834/>, zuletzt abgerufen am 02.11.2022.

Tabelle 6-1: Faktoren bei der Nutzung einer oder paralleler Infrastrukturen

Faktor	Eine Infrastruktur (z. B. 5G)	Parallele Infrastrukturen
Governance	<ul style="list-style-type: none"> • Aufgabe von Verfügungshoheit bei Nachfragern (so lange keine Campus-Netze) • Netzbetreiber verfügt über alle Informationen 	<ul style="list-style-type: none"> • Proprietäre Lösungen • Mangelnde Interoperabilität
Wettbewerb	<ul style="list-style-type: none"> • Bestenfalls Wettbewerb mehrerer Anbieter derselben Technologie 	<ul style="list-style-type: none"> • Infrastrukturwettbewerb
Bestehende Strukturen	<ul style="list-style-type: none"> • Ökosystem muss sich erst bilden 	<ul style="list-style-type: none"> • Nutzung bis zum Lebenszyklusende, falls Wechsel auf andere Infrastruktur ökonomisch nicht attraktiv • z. T. mangelnde Skalierbarkeit

Es ergeben sich aus Sicht des Technologienutzers in der Realität mithin verschiedene Fälle, die auch unter dynamischen Aspekten zu betrachten sind. Im Folgenden werden diese dargestellt.

Abbildung 6-3: Stand-Alone-Technologie vs. Alternativen



Quelle: Eigene Abbildung

Im Fall 1 gibt es nur eine Technologie bzw. spezifische Lösung, die für die Bewältigung der Aufgabe zur Verfügung steht. Somit kann im Hinblick auf Nachhaltigkeit keine andere Entscheidung getroffen werden. Im Fall 2 existieren drei Technologien, ohne dass eine Stand-Alone-Lösung wie z. B. 5G zur Verfügung steht, die neben der Bewältigung der spezifischen Aufgabe die gesamte restliche Nachfrage bedienen kann. Der Nutzer der Technologie hat sich für eine spezifische Lösung (1) entschieden. Er könnte im Zeitpunkt t_1 oder t_2 auf Technologie 2 oder im Zeitpunkt t_2 auf Technologie 3 wechseln. Wann wird ein solcher Wechsel stattfinden (unter der Annahme, dass beide Lösungen denselben Output erzeugen können)? Immer dann, wenn der Barwert der Kosten für Investition, Betrieb und Entsorgung der neu gewählten Technologie geringer ist als der Barwert der

- Betriebskosten,
- Entsorgungskosten und
- mit dem Wechsel verbundenen Transaktionskosten

der alten Technologie. Volkswirtschaftlich wünschenswert wäre es, wenn auch die externen Kosten der Lösungen mit in die Entscheidung einbezogen würden. Hier sind in erster Linie die Herstellung, der Stromverbrauch und die Entsorgung zu nennen. Entscheidet sich der Nutzer z. B. für eine energieintensivere Technologie, weil die laufenden Stromkosten geringer sind als die sonstigen ausgeführten Kosten im Vergleich zu einer anderen Technologie, so sollten aus volkswirtschaftlicher Sicht die externen Kosten des Stromverbrauchs mitberücksichtigt werden. Betriebswirtschaftliche und volkswirtschaftliche Rationalitäten können an dieser Stelle somit auseinanderfallen. Ob dies der Fall ist, hängt auch vom Nachfrager der Infrastruktur ab. Ist dieser beispielsweise eine Gemeinde oder Stadt, so kann eher davon ausgegangen werden, dass dieser perspektivisch im Sinne des Gemeinwohls eher den Nachhaltigkeitsaspekt berücksichtigt.

Im Fall 3 steht dem Nachfrager, der bisher eine Technologie nutzen konnte, eine weitere Technologie zur Verfügung, die neben dem spezifischen Zweck auch die Restnachfrage bedient. Aus Nachhaltigkeitsgesichtspunkten macht ein paralleler Betrieb der Infrastrukturen somit keinen Sinn, wenn dieselbe Qualität der Dienste besteht. Hier sollte es also Anreize geben, auf die Stand-Alone-Technologie zu wechseln, d. h. diese Technologie sollte für den Nachfrager mindestens marginal günstiger sein. Im Zeitablauf kann sich der Preis der Stand-Alone-Technologie nach unten entwickeln, so dass es für den Nachfrager günstig sein kann, mit seiner Entscheidung zu warten (sog. Realoption). Ähnliches gilt für Fall 4, wobei dem Nutzer hier weiterhin die Optionen für verschiedene Technologien offenstehen.

Die Frage paralleler Infrastrukturen hängt also stark von den konkreten Gegebenheiten ab. Volkswirtschaftliche und betriebswirtschaftlich Logiken unterscheiden sich teilweise. Ob es Anbieter von Stand-Alone-Technologien gibt, hängt stark von der Nachfrage des Massenmarktes ab.

In Bezug auf die Nachhaltigkeit sollten Doppel- oder Mehrfachstrukturen vermieden werden. Dies kann sich allerdings wiederum auf den Wettbewerb auswirken (vgl. Abschnitt 6.3).

6.3 Nachhaltigkeit und Wettbewerb

Wie in Abschnitt 6.2 dargestellt, hat die Nachfrageseite einen wesentlichen Einfluss auf die installierten Infrastrukturen. Letztlich kann aber eine nachhaltige Stand-Alone-Technologie von einem einzigen Anbieter oder einem Kartell von Anbietern bereitgestellt werden. Dies wiederum würde sich negativ auf den Wettbewerb auswirken, welcher im Normalfall ebenfalls die gesamtgesellschaftliche Wohlfahrt steigert. Wie also können Nachhaltigkeit und Wettbewerb vereinbart werden?

Die Diskussion um diese Frage ist noch relativ jung.⁵⁷ Der traditionelle Ansatz sieht Wettbewerb als Grundpfeiler der sozialen Marktwirtschaft mit verschiedenen Vorteilen.⁵⁸ Auf der anderen Seite bejaht die Wissenschaft auch Gründe für Marktversagen, das die schon angesprochenen negativen externen Effekte erzeugt.⁵⁹ Eine Diskussion wird derzeit über Ausnahmen im Wettbewerbsrecht bezüglich der Nachhaltigkeit geführt.⁶⁰ So plant die EU in 2023 neue Horizontalleitlinien für das Wettbewerbsrecht, die die Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten bei der wettbewerbsrechtlichen Beurteilung von Kooperationen behandeln. Entsprechende Regelungen wurden bereits in Österreich und den Niederlanden getroffen.

Aus volkswirtschaftlicher Sicht könnte das Kaldor-Hicks-Kriterium zur Anwendung kommen, bei dem die zusätzliche Wohlfahrt durch Nachhaltigkeit den Wohlfahrtsverlusten gegenübergestellt werden. Die Kosten für mehr Nachhaltigkeit (z. B. Investitionen in Glasfaser) würden mit den Wohlfahrtsverlusten, z. B. Ernteauffällen durch Klimawandel, aufgerechnet und bei einem positiven Saldo umgesetzt. In der Realität ist diese Rechnung nur mit einem gewissen Maß an Abstraktion möglich. Weitere Ansatzpunkte für mehr Nachhaltigkeit sind etwa gemeinsame Label: „Durch Label und Zertifizierungssysteme können Informationsasymmetrien abgebaut und die Vergleichbarkeit von Produkten erhöht werden, sodass die Verbraucher:innen eine bewusster Kaufentscheidung treffen können. Gleichzeitig können die Unternehmen den Verbraucher:innen auf diese Weise glaubhaft signalisieren, dass die Produkte im Einklang mit bestimmten Nachhaltigkeitszielen hergestellt wurden.“⁶¹

⁵⁷ Vgl. z. B. <https://www.wirtschaftsdienst.eu/inhalt/jahr/2022/heft/5/beitrag/nachhaltigkeitsziele-in-der-wirtschaftspolitik.html>, zuletzt abgerufen am 04.11.2022.

⁵⁸ Vgl. Kronberger Kreis (2022), S. 17 ff.

⁵⁹ Vgl. z. B. Mankiw und Taylor (2017), S. 211 ff.

⁶⁰ Inderst (2022), S. 338 ff.

⁶¹ Wambach u. Zulehner (2022), S. 332.

6.4 Messung der Effekte

Wie die Analyse in den vorherigen Abschnitten gezeigt hat, ist die Erreichung eines volkswirtschaftlich optimalen Zustands, der eine nachhaltige Infrastruktur inkludiert, in der Realität durch die Komplexität (Parallele Infrastrukturen, nichttechnische Treiber für Entscheidungen etc.) sehr schwierig. Dennoch ist es dazu unerlässlich, die mit der Nutzung der IKT-Infrastruktur verbundenen Umweltauswirkungen zu messen.

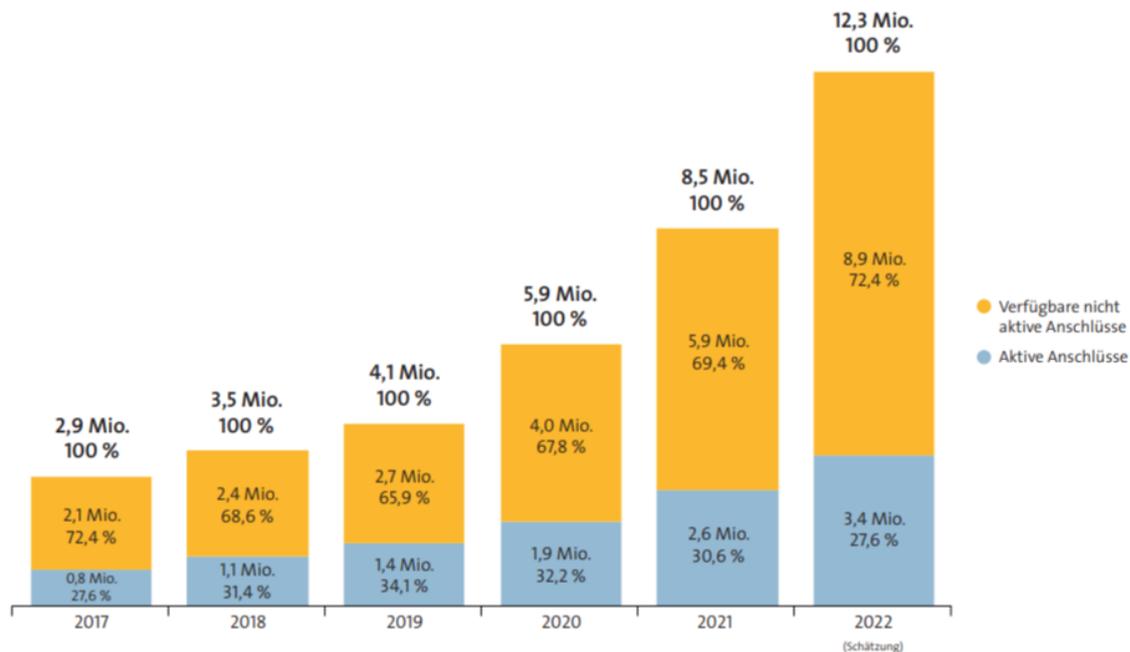
Dies kann einerseits über die Messung der Gesamtauswirkungen des Sektors, der einzelnen Netze und deren Komponenten oder eine bestimmte Lösung geschehen. Wie in Abschnitt 5 aufgezeigt, wird die Messung in der Realität bei der Umsetzung von IKT-basierten Lösungen aber oft nicht als primäres Projektziel gesehen. Dies liegt darin begründet, dass zum einen die Funktionalität der Lösung im Vordergrund steht und zum anderen noch keine allgemeine Metrik für die Messung von Nachhaltigkeit implementiert ist. Auf Unternehmensebene hat die EU-Kommission nun konkretere Vorgaben für die Berichterstattung bezüglich der Nachhaltigkeit geplant.⁶²

Die Messung kann andererseits auf eine bestimmte Einheit bezogen sein (z. B. elektrische Leistung pro Nutzer pro Gbit/s (vgl. Abbildung 4-4)). Dies geschieht zu dem Zweck, die Technologien entsprechend vergleichbar zu machen. Hier stellen sich allerdings weitere Fragen, da sich zum einen unterschiedliche Technologien für unterschiedliche Zwecke und in unterschiedlichen Umgebungen unterschiedlich gut eignen. So dienen Mobilfunknetze eher als Komplemente denn als Ersatz für Festnetzlösungen.⁶³ Zum anderen sind die Netze oft nicht ausgelastet. Dies ist sowohl im Festnetz als auch im Mobilfunknetz zu beobachten. Für das (umweltfreundliche) Glasfasernetz stieg zwar die absolute Zahl der verfügbaren Anschlüsse, der Anteil der genutzten Anschlüsse war dagegen in den letzten Jahren rückläufig, wie Abbildung 6-4 zeigt, da der Ausbau schneller voranging als der Take-up.

⁶² EU Kommission (2021): Proposal for a Directive of the European Parliament and of the Council amending Directive 2013/34/EU, Directive 2004/109/EC, Directive 2006/43/EC and Regulation No 537/2014, as regards corporate sustainability reporting, COM(2021) 189 final.

⁶³ Obermann (2022), S. 4.

Abbildung 6-4: Angebot und Nachfrage echter Glasfaseranschlüsse (FTTB/H).



Quelle: Dialog Consult / VATM (2022): 24. TK-Marktanalyse Deutschland 2022, S. 14.

Auf der anderen Seite stieg das genutzte gesamte Datenvolumen im Festnetzbereich in den letzten vier Jahren jährlich zwischen 20,8 % und 35,7 % an, so dass langfristig mit einem Anstieg der Glasfasernutzung zu rechnen ist.⁶⁴ Im Hinblick auf die Nachhaltigkeit wäre ein zügige Migration der Kupfernetze auf die Glasfasernetze wünschenswert.

Im Mobilfunk hat sich das nachgefragte Datenvolumen in den letzten Jahren ebenfalls stark erhöht, im Jahr 2022 werden voraussichtlich 11,2 Mrd. GB abgerufen, was etwa einem Zehntel des Breitband-Internetverkehrs in den Festnetzen entspricht.⁶⁵

Eine wirkliche Vergleichbarkeit bezogen auf die Größe Nutzer pro Gbit/s erscheint aber erst gegeben, wenn die Technologien vollständig ausgelastet sind. Erfolgt die Messung anhand der theoretisch möglichen Bandbreite, so kann dies den Vergleich von Infrastrukturen verzerren, da die Auswirkungen der vorgehaltenen, aber nicht genutzten Kapazität auf die Umwelt nicht mit in den Vergleich einfließt.

6.5 Nachhaltigkeit der Lösung vs. Nachhaltigkeit der IKT-Infrastruktur

Aus den Gesprächen mit Vertretern der in Abschnitt 5 beschriebenen Anwendungsfälle geht hervor, dass die durch die Lösung entstehenden Effekte stark im Vordergrund

⁶⁴ Dialog Consult / VATM (2022), S. 14.

⁶⁵ Dialog Consult / VATM (2022), S. 22, S.28.

stehen. Das Bewusstsein für die Nachhaltigkeit der IKT-Infrastruktur selbst ist weniger stark ausgeprägt.

Grundsätzlich ist also neben den Auswirkungen der Infrastruktur selbst, auch deren Fähigkeit mitzubetrachten, andernfalls (d. h. bei Nichtnutzung der Infrastruktur) entstehende negative Auswirkungen auf die Umwelt und Nachhaltigkeit zu vermeiden.

Hier sind in der Literatur verschiedene Potenziale berechnet worden. Die wesentlichen Felder sind in Tabelle 6-2 aufgeführt.

Tabelle 6-2: Anwendungsfälle mit signifikantem THG-Reduktionspotenzial

Sektor	Anwendungsfälle
Elektrizität und Wärme	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Laststeuerung
Transport: Virtuelle Mobilität	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Vermeidung von Pendelwegen durch mobiles Arbeiten ▪ Vermeidung von Geschäftsreisen durch Videokonferenzen
Transport: Intelligenter Transport	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Optimierte Routenplanung ▪ Intelligente Verkehrsüberwachung und -steuerung ▪ Reduktion des Treibstoffverbrauchs durch Einsatz digitaler Technologien im Fahrzeug (z. B. effizientere Motorsteuerung)
Transport: Logistik	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Höhere Kapazitätsauslastung der Fahrzeuge und Vermeidung von Wegstrecken und Leerfahrten
Gebäude	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Automatisierung der Gebäudesteuerung
Industrieproduktion	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Produktionsprozessoptimierung (z. B. Fernwartung) ▪ Intelligente Motorsteuerung
Landwirtschaft	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Produktionsprozessoptimierung in der Landwirtschaft (z. B. Automatisierung) ▪ Verbesserte Überwachung und Steuerung von landwirtschaftlichen Maschinen ▪ Überwachung des Gesundheitszustands von Nutztieren und optimierte Fütterung ▪ Reduktion von Lebensmittelabfällen und -verlusten durch Erhöhung der Transparenz entlang der Wertschöpfungskette

Quelle: bitkom (2020), S. 41

7 Fazit und Ausblick

In diesem Diskussionsbeitrag wurden Treiber für den Ressourcen- und Energieverbrauch verschiedener IKT-Infrastrukturen untersucht. Es zeigt sich, dass neben den technischen Treibern oftmals indirekte, nichttechnische Treiber für den Einsatz einer bestimmten technischen Lösung verantwortlich sind, bzw. diese die technischen Treiber bedingen.

Während im Massenmarkt energieeffiziente Lösungen aus Kostengründen von den im Wettbewerb stehenden Unternehmen einen intrinsischen Treiber darstellen, ist es bei öffentlich umgesetzten Produkten oftmals der Fall, dass das Funktionieren der Lösung

stärker im Vordergrund steht. Verschiedentlich existieren schon Ansätze seitens der Politik, die Infrastruktur auf einen nachhaltigen Pfad zu bringen. So gibt es beispielsweise im Bereich Rechenzentren oder Basisstationen von Mobilfunkanlagen von der EU-Kommission empfohlene Richtwerte für die stromverbrauchenden Elemente.

Durch die Betrachtung konkreter Anwendungsfälle aus dem Bereich Smart Traffic wurde deutlich, dass die Nachhaltigkeit der eingesetzten IKT-Infrastruktur oftmals keine (besondere) Rolle spielt. Hier wird vielmehr auf bereits bestehende Strukturen zurückgegriffen bzw. aus pragmatischen Gründen auf bestimmte Lösungen gesetzt. Auch die Messung der indirekten Effekte steht nicht im Vordergrund, was der Komplexität der Materie und den fehlenden Standards für eine vergleichbare Berechnung geschuldet ist.

Aus diesem Grund besteht auf vielen Feldern weiterer Forschungsbedarf, etwa den Umweltauswirkungen verschiedener Lösungen (wie z. B. MaaS) oder den zu erwartenden Rebound-Effekten durch die Anwendung IKT-basierter Lösungen. Auch eine aussagekräftige Metrik zum Vergleich verschiedener Lösungen stellt vor dem Hintergrund der in diesem Beitrag beschriebenen komplexen Strukturen eine Herausforderung dar und ist nur mit Abstrichen umsetzbar.

Literatur

- Acton, M., Bertoldi, P., Booth, J. (2022): Best Practice Guidelines for the EU Code of Conduct on Data Centre Energy Efficiency, Version 13.1.1 (Final Version).
- Arias-Molinares, D., García-Palomares, J.C. (2020): The Ws of MaaS: Understanding mobility as a service from a literature review, IATSS Research, Volume 44, Issue 3, Pages 253-263.
- Beck, M. T., Feld, S., Linnhoff-Popien., Pützscher, U. (2016). Mobile Edge Computing. Informatik-Spektrum, 39(2), S. 108–114.
- Bergmark, P. (2022): The Climate Classroom, Information and Communication Technologies for the Net Zero Transition, ITU.
- Bertoldi P., Lejeune, A. (2021): Code of Conduct on Energy Consumption of Broadband Equipment Version 8.0.
- Bitkom (2020): Klimaschutz durch digitale Technologien – Chancen und Risiken, Kurzstudie.
- Breide, S., Helleberg, S., Schindler, J., Waßmuth, A. (2021): Energy consumption of telecommunication access networks.
- Chiosi et al. (2012): Network Functions Virtualisation, An Introduction, Benefits, Enablers, Challenges & Call for Action, published at the “SDN and OpenFlow World Congress”, Darmstadt-Germany.
- Dialog Consult / VATM (2022): 24. TK-Marktanalyse Deutschland 2022.
- DTAG [Deutsche Telekom AG](2021): NB-IoT, LoRaWAN, Sigfox: ein aktueller Vergleich.
- Eltges, F., Kulenkampff, G., Plückebaum, T., Sabeva, D. (2020): SDN/NFV und ihre Auswirkungen auf die Kosten von Mobilfunk und Festnetz im regulatorischen Kontext, WIK Diskussionsbeitrag Nr. 461.
- EU Kommission (2019): Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of The Regions The European Green Deal, COM(2019) 640 final.
- Frontier Economics und d-fine (2022): Nachhaltigkeit digitaler Geschäftsmodelle, Entwicklung eines analytischen Bewertungskonzepts und Anwendung im Rahmen von ausgewählten Fallstudien in den Netzsektoren, 23. März 2022.
- Godlovitch, I., Louguet, A., Baischew, D., Wissner, M., Pirlot, A. (2021): Environmental impact of electronic communications, Study for BEREC.
- Gossart, C. (2014): Rebound Effects and ICT: A Review of the Literature. ICT Innovations for Sustainability, S. 435–448.
- Haddon, L. (2011): Contemporary internet: national and cross-national European studies.
- Höfer, T, Bierwirth, S., Madlener, R.(2019) C15 – Energie-Mehrverbrauch in Rechenzentren bei Einführung des 5G Standards.
- Icha, P., und T. Lauf (2022): Entwicklung der spezifischen Treibhausgas-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 – 2021, Umweltbundesamt, Dessau.

- Inderst, R. (2022): Nachhaltigkeit und Wettbewerbsrecht, in: Wirtschaftsdienst, 102. Jahrgang, Heft 5, S. 338–340.
- Jalali et al. (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.
- Jang, S., Caiati V., Rasouli, S., Timmermans, H., Choi, K. (2021): Does MaaS contribute to sustainable transportation? A mode choice perspective, in: International Journal of Sustainable Transportation, 15:5, S. 351-363.
- Jiang et al. (2020): Energy aware edge computing: A survey, in: Computer Communications, Volume 151, S. 556-580.
- König, D. et al. (2017): Technology for MaaS, Deliverable Nr 5, MAASiFiE-Projekt.
- Kronberger Kreis (2022): Green Deal auf Kosten des Wettbewerbs?, Kronberger Kreis-Studien, No. 69, Stiftung Marktwirtschaft, Berlin.
- Lange, S., Pohl, J., Santarius, T. (2020): Digitalization and energy consumption. Does ICT reduce energy demand?, in: Ecological Economics, Volume 176.
- Liebe, A., und A. Hillebrand (2020): Platz da ?! Datenbasierte Systeme zur Parkplatzerkennung, Eine Studie der mFUND-Begleitforschung des WIK, Dezember 2020, Bad Honnef.
- Mankiw, N.G., Taylor, M.P. (2017): Economics, 4th Edition, Cengage Learning EMEA.
- McKinsey (2018): Smart Cities: Digital Solutions for a more Livable Future, June 2018.
- Ministry of Transport and Communications, Finland (2020) - The ICT sector, climate and the environment.
- Narayanan, S., Tsolkas, D., Passas, N. und L. Merakos (2018): NB-IoT: A Candidate Technology for Massive IoT in the 5G Era, 2018 IEEE 23rd International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD), S. 1-6.
- Nokia (2020): People & Planet Report 2019.
- Obermann, K. (2022): Nachhaltigkeitsvergleich Internet-Zugangsnetz-Technologien.
- Oelers, W, Nauman, H. (2021): LPWAN Comparison, Low Energy Consumption with NB-IoT, LoRaWAN and Sigfox.
- RheinEnergie (2021): Weniger Stress, Lärm und Emissionen: Kölner Parkleitsystem senkt Suchverkehr deutlich, 21.07.2021.
- Sauter, M. (2022): Grundkurs Mobile Kommunikationssysteme, 5G New Radio und Kernnetz, LTE-Advanced Pro, GSM, Wireless LAN und Bluetooth, 8. Auflage.
- Schneir, J.R., Xiong, Y. (2016): A cost study of fixed broadband access networks for rural areas, Telecommunications Policy, Volume 40, Issue 8, Pages 755-773.
- Stobbe, L. (2018): Park & Joy Projekt Report, Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration, 27.11.2018.

- Stobbe et al. (2015): Entwicklung des IKT-bedingten Strombedarfs in Deutschland, Abschlussbericht, Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, Projekt-Nr. 29/14.
- Ternès, A. (2019): Nachhaltigkeit und Digitalisierung als Chance für Unternehmen, in: Englert, M., und A. Ternès (Hrsg.): Nachhaltiges Management. Springer Gabler, Berlin, Heidelberg, S. 79 – 104.
- Umweltbundesamt (2022): Umweltbewusstsein in Deutschland.
- Wambach, A., Zulehner, C.(2022): Nachhaltigkeitsziele in der Wirtschaftspolitik – volkswirtschaftliche Überlegungen, in: Wirtschaftsdienst, 102. Jahrgang, Heft 5, S. 331–333.
- Williams, L., Sovacool, B.K., Foxon, T.J. (2022): The energy use implications of 5G: Reviewing whole network operational energy, embodied energy, and indirect effects, in: Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 157, S. 1-18.
- Wittstock, R. (2019): Sustainability Impacts of Mobility as a Service: A Scoping Study for Technology Assessment., in: The Handbook of Environmental Chemistry, Chapter 5, S.61–74.

- Nr. 473: Gabriele Kulenkampff, Martin Ockenfels, Konrad Zoz, Gonzalo Zuloaga:
Kosten von Breitband-Zugangsnetzen, Clusterbildung und Investitionsbedarf unter Berücksichtigung des bestehenden Ausbaus – bottom-up Modellierung und statistische Analyse –, Dezember 2020
- Nr. 474: Lorenz Nett, Bernd Sörries:
Ausgestaltung und Umsetzung eines Universaldienstregimes (insbesondere mit Blick auf die Realisierung einer Versorgung mit schnellem Internet) in anderen Ländern, November 2021
- Nr. 475: Christin-Isabel Gries, Martin Lundborg, Peter Stamm:
Digitale Arbeitswelten im Mittelstand - Auswertung von Studien zu Arbeit 4.0, November 2021
- Nr. 476: Menessa Ricarda Braun, Julian Knips, Christian Wernick:
Analyse der Angebotsentwicklung für leitungsgebundene Breitbanddienste für Privatkunden im deutschen Festnetzmarkt von 2017-2020, Dezember 2021
- Nr. 477: Christian Märkel, Marcus Stronzik, Martin Simons, Matthias Wissner, Martin Lundborg:
Einsatz von Blockchain in KMU: Chancen & Hemmnisse, Dezember 2021
- Nr. 478: Matthias Wissner, Ahmed Elbanna, Bernd Sörries, Thomas Plückebaum:
Open RAN und SDN/NFV: Perspektiven, Optionen, Restriktionen und Herausforderungen, Dezember 2021
- Nr. 479: Dajan Baischew, Ahmed Elbanna, Stefano Lucidi, Bernd Sörries, Thomas Plückebaum:
Die Grundzüge von 6G, Dezember 2021
- Nr. 480: Marie-Christin Papen, Martin Lundborg, Sebastian Tenbrock:
360-Grad-Überblick über den Digitalisierungsstand in KMU, Dezember 2021
- Nr. 481: Nico Steffen, Lukas Wiewiorra, Peter Kroon, unter Mitarbeit von Philipp Thoste:
Wettbewerb und Regulierung in der Plattform- und Datenökonomie, Dezember 2021
- Nr. 482: Dr. Cara Schwarz-Schilling, Dr. Sonia Strube Martins:
Kupfer-Glas-Migration in Frankreich und im Vereinigten Königreich, Juli 2022
- Nr. 483: Dr. Karl-Heinz Neumann; Dr. Cara Schwarz-Schilling, Dr. Sonia Strube Martins:
Übergang von Kupfer- auf Glasfasernetze: Phasen und Prozesse der Migration
- Nr. 484: Dr. Andrea Liebe; Martin Lundborg, Pirmin Puhl, Katrin Marques Magalhaes, Mitarbeit: Philipp Thoste:
Chancen digitaler Reifegradmodell für KMU
- Nr. 485: Julian Knips, Dr. Christian Wernick, Dr. Sebastian Tenbrock:
Analyse von Angeboten auf gigabitfähigen Infrastrukturen in Europa
- Nr. 486: Menessa Ricarda Braun, Dr. Christin Gries, Dr. Christian Wernick:
Politische und regulatorische Ansätze zur Verlängerung der Nutzungsdauer von SmartphoneS
- Nr. 487: Dr. Nico Steffens, Dr. Lukas Wiewiorra:
Device Neutrality – Softwaremarktplätze und mobile Betriebssysteme
- Nr. 488: Dr. Lorenz Nett, Dr. Bernd Sörries:
Flexibilisierung der Frequenzregulierung und des Frequenzplans
- Nr. 489: Stefano Lucidi, Dajan Baischew, Dr. Bernd Sörries:
Signifikante Entwicklungen hin zu 6G
- Nr. 490: Dr. Sonia Strube Martins, Julian Knips, Dr. Christian Wernick:
eSIM – Potentiale, Anforderungen und Wettbewerbsprobleme
- Nr. 491: Dr. Christin-Gries, Dr. Christian Wernick, Menessa Ricarda Braun:
Die Rolle von Refurbishment-Anbietern im Smartphone-Markt
- Nr. 492: Dajan Baischew, Lisa Schrade-Grytsenko, Bernd Sörries, Marcus Stronzik, Matthias Wissner:
Ausgewählte Informations- und Kommunikationstechnologien und ihre Auswirkungen auf umweltpolitische Ziele

ISSN 1865-8997