



CENTRAL OFFICE 2030 – EFFEKTIVE, NACHHALTIGE UND RESILIENTE TELEKOMMUNIKATIONSNETZE IM ENERGIESYSTEM

Untersuchungen und Modellierungen zu Energiebedarf und -effizienz in Telekommunikationsnetzen

Prof. Dr.-Ing. Christoph Lange

christoph.lange@htw-berlin.de



**BORDERSTEP
INSTITUT**



**RWTHAACHEN
UNIVERSITY**



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

IMPRESSUM

KURZTITEL

Untersuchungen und Modellierungen zu Energiebedarf und -effizienz in Telekommunikationsnetzen

AUTORINNEN UND AUTOREN

Prof. Dr.-Ing. Christoph Lange (Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin)

KONSORTIALFÜHRUNG

Deutsche Telekom AG

Dr. Andreas Gladisch

Winterfeldtstr. 21 | 10781 Berlin | www.telekom.com

PROJEKTPARTNER

Deutsche Telekom AG

Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit gGmbH

Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH) Aachen

Technische Universität Darmstadt

FÖRDERMITTELGEBER

Das Projekt CO 2030 wird vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) sowie seinem Projektträger TÜV Rheinland Consulting GmbH gefördert.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Digitales
und Verkehr

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

INHALTSVERZEICHNIS

Impressum.....	I
Inhaltsverzeichnis	II
Arbeitspaket 1	1
1 Zielstellung des ersten Arbeitspakets.....	2
2 Einleitung.....	2
3 Energiebedarf zum Betrieb von Telekommunikationsnetzen	4
3.1 Komponenten des Energiebedarfs von Telekommunikationsnetzbetreibern	4
3.2 Materialien und Methodik	5
3.3 Deutsche Telekom	6
3.3.1 Einleitung.....	6
3.3.2 Jährlicher Energiebedarf.....	7
3.3.3 Anschlusszahlen.....	9
3.3.4 Jährlicher Bedarf an elektrischer Energie je Anschluss	10
3.4 Vodafone Deutschland	11
3.4.1 Einleitung.....	11
3.4.2 Jährlicher Energiebedarf.....	11
3.4.3 Anschlusszahlen.....	13
3.4.4 Jährlicher Bedarf an elektrischer Energie je Anschluss	14
3.5 Telefónica	15
3.5.1 Einleitung.....	15
3.5.2 Jährlicher Energiebedarf.....	16
3.5.3 Anschlusszahlen.....	17
3.5.4 Jährlicher Bedarf an elektrischer Energie je Anschluss	18
3.6 Auswertung und Diskussion	19
4 Kennzahlen zum Energiebedarf.....	22
4.1 Einleitung zu den Kennzahlen	22
4.2 Kennzahlen mit Bezug zur technischen Leistungsfähigkeit.....	22
4.3 Kennzahlen mit Bezug zur wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit	23
4.4 Ermittlung der Daten zur Leistungsfähigkeit.....	23
4.4.1 Einleitung.....	23

4.4.2	Deutsche Telekom	24
4.4.3	Vodafone	25
4.4.4	Telefónica	26
4.5	Ergebnisse zu den Kennzahlen	28
4.5.1	Deutsche Telekom	28
4.5.2	Vodafone	29
4.5.3	Telefónica	30
4.6	Auswertung und Diskussion	31
5	Zusammenfassung und Fazit des Arbeitspakets	32
	Arbeitspaket 2	34
6	Zielstellung des zweiten Arbeitspakets	35
7	Einleitung	35
8	Anzahl und Klassifizierung der Technikstandorte	36
8.1	Anzahl der Technikstandorte in Telekommunikationsnetzen.....	36
8.2	Klassifizierung der Technikstandorte nach elektrischer Anschlussleistung	37
8.3	Randbedingungen für die Modellierung	38
9	Modell für die Leistungs- bzw. Energieaufteilung auf die Technikstandorte	39
9.1	Einleitung.....	39
9.2	Numerische Annahmen für das Technikstandorte-Modell.....	39
9.3	Technikstandorte-Modell und Ergebnisse zur Leistungsaufnahmen	40
10	Zusammenfassung und Fazit des Arbeitspakets	42
	Quellen- und Literaturverzeichnis	44

ARBEITSPAKET 1

Analyse der Energiebedarfe von
Telekommunikationsnetzbetreibern

1 Zielstellung des ersten Arbeitspakets

Im Arbeitspaket 1 sollen die Gesamtenergiebedarfe von Telekommunikationsnetzbetreibern in Deutschland und deren Entwicklung analysiert werden. Der Fokus liegt dabei auf der Beschaffung der notwendigen Angaben, der Ermittlung von geeigneten Kenngrößen (Key Performance Indicators, KPIs) zur sinnvollen Beschreibung der Entwicklung von Energiebedarfen in der Telekommunikation sowie in der Darstellung und Auswertung wichtiger Ergebnisse.

Im Mittelpunkt des Arbeitspakets steht die Recherche und die Zusammenstellung der notwendigen Energiebedarfsdaten der Telekommunikationsnetzbetreiber und weiterer notwendiger Angaben zur Leistungsfähigkeit der Telekommunikationsnetze (z. B. verarbeitete bzw. transportierte Datenraten oder -mengen). Außerdem ist die Recherche zu geeigneten KPIs Teil dieses Arbeitspaketes. Eine z. B. grafische Aufbereitung und Auswertung der gewonnenen Resultate schließt das Arbeitspaket ab.

2 Einleitung

In entwickelten Volkswirtschaften sind Telekommunikationsnetze signifikante Verbraucher elektrischer Energie (z. B. [1], [2], [3]), da ihr Betrieb eine regional bzw. landesweit sehr verteilte aktive Netzinfrastruktur erfordert, um der Versorgungsaufgabe gerecht werden zu können und die Netzabdeckung in verschiedenen geografischen Regionen sicherzustellen. Der *Energiebedarf* – oft auch *Energieverbrauch* genannt – von Telekommunikationsnetzen liegt bei landesweit operierenden Telekommunikationsnetzbetreibern oftmals in einer Größenordnung von jährlich bis zu mehreren Terawattstunden (TWh), z. B. [8] – abhängig von der Größe des jeweiligen Staates bzw. geografischen Gebietes. Es zählen dazu neben dem Bedarf an elektrischer Energie zur unmittelbaren Versorgung der Telekommunikationsanlagen auch Energiebedarfe für den Betrieb von Gebäuden – z. B. für die Heizung von Büros oder Ladengeschäften bzw. für die Kühlung von Betriebsstellen – und für weitere betriebliche Aktivitäten wie z. B. den Betrieb der Fahrzeugflotte für Service- und Entstörungstätigkeiten.

Deshalb war und ist der Energiebedarf und damit der nachhaltige und energieeffiziente Betrieb derartiger Telekommunikationsnetzinfrastrukturen von Interesse in der Öffentlichkeit und insbesondere in der Branche der Informations- und Kommunikationstechnik – nicht zuletzt deswegen, weil mit dem Energiebedarf signifikante Betriebskosten für die Netzbetreiber verbunden sind. Dabei lag und liegt der Fokus oftmals auf dem Betrieb der telekommunikationstechnischen Anlagen an sich und dessen Optimierung – und damit auf dem Bedarf an *elektrischer* Energie. Begründet ist dies dadurch, dass der Bedarf an elektrischer Energie einerseits einer physikalisch-ingenieurmäßig-technischen Betrachtung und Optimierung bzw. Minimierung zugänglich ist und andererseits der Bedarf an elektrischer Energie für den unmittelbaren Betrieb von Telekommunikationsanlagen die Ursache von weiteren nachgelagerten Energiebedarfen ist und damit ein z. B. verringerter Elektrizitätsbedarf auch verkleinerte Energiebedarfe z. B. zur Kühlung von Betriebsstellen nach sich zieht.

Vor diesem Hintergrund wurden Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten motiviert, die zu einem besseren Verständnis des Energiebedarfs von Telekommunikationsnetzen, der damit verknüpften Kohlendioxidemissionen und der Verteilung des Energiebedarfs in diesen Netzen führten, z. B. [1], [2], [4], [5],

[6], [7], [8], sowie zur Erarbeitung von Vorschlägen für eine Senkung des Energiebedarfs bzw. für eine effizientere Nutzung der (elektrischen) Energie in Telekommunikationsnetzen, z. B. [9], [10], [11], [12], [13]. Abschätzungen ergaben jährliche Bedarfe an elektrischer Energie für den weltweiten Betrieb von Telekommunikationsnetzen in der Größenordnung von mehreren Hundert Terawattstunden – dies entspricht einem Anteil zwischen 1 % und 2 % am jährlichen weltweiten Gesamtbedarf an elektrischer Energie [1]. Diese Größenordnungen unterstreichen die Bedeutung der Thematik.

Studien zum Energiebedarf und deren Ergebnisse sind jedoch oft nicht direkt vergleichbar, da zumeist unterschiedliche Methoden verwendet werden und sie in der Aufgabenstellung und im Umfang variieren [8]. So werden methodisch z. B. Schätzungen des elektrischen Energiebedarfs von Telekommunikationsnetzen auf der Grundlage modellbasierter Rechnungen angegeben oder es werden Daten zum Energiebedarf ausgewertet und die oftmals akkumulierten Daten veröffentlicht, z. B. [6], [7], [8], die auf einer Erhebung der Daten durch beispielsweise eine Abfrage bei Netzbetreibern basieren. Bezüglich des Umfangs oder der Abgrenzung wird beispielsweise in [5] der Versuch einer Abschätzung für den gesamten mit der Informations- und Kommunikationstechnik verbundenen elektrischen Energiebedarf in Deutschland – einschließlich der Endgeräte sowie Heim- und Firmennetze – unternommen, während andere Untersuchungen, z. B. [7], [8], sich auf die in der Verantwortung der Netzbetreiber stehenden Anteile der Telekommunikationsnetze einiger Betreiber in Europa beziehen – und damit der Bereich der Endgeräte und der bei den Nutzern vorhandenen Netzausrüstung z. B. in Heim- oder Firmennetzen keine Berücksichtigung findet.

Um den Energiebedarf von Telekommunikationsnetzen einschätzen und Verbesserungen erarbeiten zu können, ist es bedeutsam, geeignete *Kennzahlen* zu finden und festzulegen. Derartige Kennzahlen werden oftmals auch als *Key Performance Indicators* (KPIs) bezeichnet. Zunächst ist der absolute *Energiebedarf* – oder *Energieverbrauch* – über einen bestimmten Zeitraum eine solche Kenngröße: Durch den Energiebedarf über einen typischen Zeitraum von z. B. einem Tag oder einem Jahr werden beispielsweise der ökologische Fußabdruck des Energiebedarfs für den Betrieb der Telekommunikationsanlagen und ebenso die damit verbundenen Energiekosten in diesem Zeitraum bestimmt. Jedoch wird die durch diesen Energieaufwand ermöglichte *Leistungsfähigkeit* nicht mit erfasst: Diese Leistungsfähigkeit können im Zusammenhang mit Telekommunikationsnetzen z. B. die Anzahl der versorgten Nutzer bzw. Teilnehmer sein, also die Anzahl der Anschlüsse, oder das im System Telekommunikationsnetz im betrachteten Zeitraum transportierbare und verarbeitbare Datenvolumen. Es sind verschiedene relative Kenngrößen definiert worden, die diese *technische* Dimension der Leistungsfähigkeit eines Telekommunikationsnetzes erfassen, z. B. [9], [14], [15]. Die *Energieintensität* als Verhältnis von Energiebedarf und Datenvolumen, ist beispielsweise als eine solche relative Kenngröße – neben dem absoluten jährlichen Energiebedarf – in der Berichterstattung in Nachhaltigkeits- bzw. CR-Berichten als relative technische Energiekenngröße seit einigen Jahren etabliert (siehe z. B. [20], [21]).

Betrachtet man die Leistungsfähigkeit des Telekommunikationsnetzes nicht vom rein technischen Standpunkt, sondern aus der Sicht der Organisation bzw. des Unternehmens, die bzw. das ein solches Netz betreibt, können wirtschaftliche bzw. ökonomische Fragestellungen neben die genannten technischen Aspekte treten. Dann kann es sinnvoll sein, diese *wirtschaftliche* Dimension der Leistungsfähigkeit in geeigneten Kennzahlen zu erfassen: Dies können z. B. relative Energiebedarfe für den Betrieb

des Netzes sein, die auf wirtschaftliche Kenngrößen, wie Gewinn, Umsatz o. Ä. bezogen werden. Auf diesem Wege ließe sich feststellen, wieviel – z. B. elektrische – Energie beim Netzbetrieb für einen bestimmten Jahresgewinn oder -umsatz aufzuwenden ist.

Es ist bei der Motivation und Diskussion relativer Energiebedarfskenngrößen jedoch nicht die – bereits erwähnte – Tatsache aus den Augen zu verlieren, dass der ökologische Fußabdruck der Telekommunikationsnetze und nicht zuletzt auch die mit dem Energiebedarf verbundenen Energiekosten immer auf den *absoluten* Energiebedarf in einer betrachteten Zeitperiode zurückgehen (z. B. [16]).

Vor diesem Hintergrund sollen deshalb in diesem Arbeitspaket des Vorhabens zunächst Daten für den absoluten Energiebedarf der großen, landesweit operierenden Telekommunikationsnetzbetreiber in der Bundesrepublik Deutschland zusammengetragen werden, insoweit sie öffentlich verfügbar sind. Dazu werden die Nachhaltigkeitsberichte bzw. Corporate Responsibility Reports der großen Telekommunikationsnetzbetreiber in Deutschland sowie weitere Quellen, wie beispielsweise Jahresberichte der Bundesnetzagentur, herangezogen. Auf diese Weise entsteht eine Übersicht über die wesentlichen Energiebedarfe und deren Entwicklung in den vergangenen Jahren, die den großen Telekommunikationsnetzen in Deutschland während ihrer Nutzungsphase zugeordnet werden können. Es wird damit eine Lücke gefüllt, da diese Daten für Deutschland allenfalls verteilt in den genannten verschiedenen Berichten verfügbar sind. Zudem werden aus öffentlich verfügbaren Quellen Daten über die technische und wirtschaftliche Leistungsfähigkeit der einzelnen Telekommunikationsnetzbetreiber zusammengestellt, um die erwähnten relativen Energieeffizienzkennzahlen berechnen zu können. Anhand der ermittelten Kennzahlen zu Energiebedarf und technischer und wirtschaftlicher Leistungsfähigkeit der Telekommunikationsnetze in Deutschland und den für deren Betrieb verantwortlichen Unternehmen werden relative Energiekennzahlen in den Dimensionen technische und wirtschaftliche Leistungsfähigkeit berechnet, dargestellt und ausgewertet.

3 Energiebedarf zum Betrieb von Telekommunikationsnetzen

3.1 Komponenten des Energiebedarfs von Telekommunikationsnetzbetreibern

Der gesamte Energiebedarf zum Betrieb eines geografisch verteilten Telekommunikationsnetzes setzt sich aus verschiedenen Komponenten zusammen, die neben der elektrischen Energie zum unmittelbaren Betrieb der Telekommunikationsanlagen weitere Energieformen beinhalten, die Servicetätigkeiten wie Wartung und Entstörung des Netzes zugeordnet werden können sowie Energiekomponenten, die die Organisation, die das betrachtete Netz betreibt, für weitere Aktivitäten benötigt, z. B. für Büros und Ladengeschäfte.

Eine typische Einteilung des Gesamtenergiebedarfs ist:

- Elektrische Energie
- Fossile Energieträger (Kraftstoffe) zum Betrieb der Fahrzeugflotte

- Fossile Energieträger (Brennstoffe) zur Heizung
- Fernwärme und -kälte

Die Gesamtenergiebedarfe sollen – soweit, wie möglich – in dieser Klassifizierung ausgewiesen werden. Inwieweit dies gelingt, ist jedoch abhängig davon, in welcher Granularität die einzelnen Organisationen, die die Telekommunikationsnetze betreiben, also die Telekommunikationsnetzbetreiber, diese in ihrer Nachhaltigkeits- und Geschäftsberichterstattung angegeben haben – da, wie oben beschrieben, das Ziel darin besteht, öffentlich zugängliche Daten zu verwenden. Wo auf Grund der ermittelbaren Angaben die Unterteilung nicht aufrechterhalten werden kann, werden zusammengefasste Gesamtenergiebedarfe verwendet, wobei immer versucht wird, die Größenordnung der Anteile elektrischer Energie (Elektrizität) zu identifizieren, da diese vom kommunikationstechnisch-ingenieurmäßigen Standpunkt von besonderem Interesse ist.

3.2 Materialien und Methodik

Um das Ziel der Untersuchung zu erreichen, werden die Energiebedarfe der drei größten Telekommunikationsnetzbetreiber, die in Deutschland aktiv sind und damit die Versorgung mit Telekommunikationsdienstleistungen von Privat- und Geschäftskunden im Wesentlichen sicherstellen, aus öffentlich zugänglichen Quellen ermittelt und zusammengestellt.

Die angesprochenen Netzbetreiber sind die folgenden Unternehmen:

- Deutsche Telekom
- Vodafone Deutschland
- Telefónica Deutschland

Öffentlich zugängliche Quellen für die Beschaffung der Daten zum Energiebedarf und weiterer technischer und wirtschaftlicher Leistungskennzahlen sind:

- Nachhaltigkeitsberichte bzw. Corporate Responsibility Reports der Unternehmen ([20], [21], [22])
- Geschäftsberichte der Unternehmen ([23], [24], [25])
- Datenportal und Tätigkeits- und Jahresberichte der Bundesnetzagentur ([29])
- Bereits durch Dritte erfasste und ggf. aggregierte Daten aus dem Spektrum der für die vorliegende Untersuchung erforderlichen Angaben (z. B. Statista [31], Statistisches Bundesamt [32])

Aus Sicht des gesamten Lebenszyklus‘ der Telekommunikationsnetzausrüstung sind die Daten, die die Basis der vorliegenden Untersuchung bilden – und damit auch die Resultate – der Nutzungsphase zuzuordnen. Die Phasen der Herstellung und der Entsorgung der Netzausrüstung finden keine Berücksichtigung.

In der vorliegenden Untersuchung wird – wenn nicht anders angegeben – der *jährliche* Energiebedarf E für die Gesamtsicht und die einzelnen Komponenten betrachtet. Die Dimension der Energie E ist das Produkt aus den Dimensionen einer Leistung P und der Zeit t , über die diese Leistung P wirksam ist. Die Energie E lässt sich bei zeitabhängigem Verlauf der Leistung $P(t)$ als Integral

$$E = \int_{t_1}^{t_2} P(t) dt \quad (1)$$

darstellen und auf diese Weise die zwischen den Zeitpunkten t_1 und t_2 notwendige Energie E berechnen. Ist die wirksame Leistung P außerdem räumlich verteilt, ist über die verschiedenen Energiebedarfsstellen zu summieren bzw. zusätzlich örtlich zu integrieren.

Übliche Maßeinheit für die Energie in den hier vorliegenden Zusammenhängen ist die Wattstunde (Wh). Je nach Größenordnung des betrachteten Energiebedarfs kann dieser konkret in Kilo-, Mega-, Giga- oder Terawattstunden (kWh, MWh, GWh, TWh) angegeben werden.

Der jährliche Gesamtenergiebedarf eines Telekommunikationsnetzes bzw. eines Unternehmens, das ein solches Netz betreibt, hängt sehr von der Größe des Netzes und von der geografischen Abdeckung ab. Daher ist es von Interesse, eine Größe zu finden und zu definieren, die eine zumindest grobe Vergleichbarkeit von Netzen verschiedener Betreiber und Größen gestattet. Ein Indikator für die Größe eines Telekommunikationsnetzes ist die Anzahl N der Anschlüsse. Ein möglicher Ansatz, um einen ersten Eindruck von Energiebedarfen verschiedener und vor allem verschieden großer Netze zu erhalten, ist es daher, den jährlichen Gesamtenergiebedarf E auf die Anzahl N der aktiven Anschlüsse zu beziehen (z. B. [8]):

$$\epsilon = \frac{E}{N} \quad (2)$$

Es wird auf diese Weise eine grobe Vergleichbarkeit hergestellt, ohne jedoch zu detailliert auf die geografische Abdeckung und technische Lösungen bei der Netzgestaltung einzugehen.

Weitere relative Kenngrößen zur Bewertung des Energiebedarfs werden in einem folgenden Abschnitt behandelt, diskutiert und ausgewertet.

3.3 Deutsche Telekom

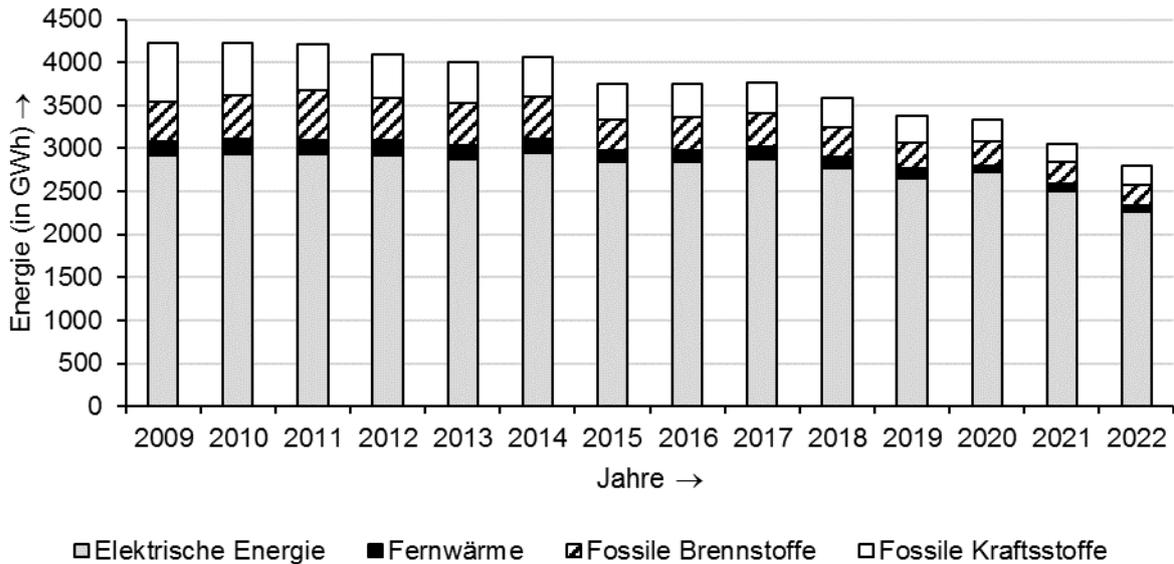
3.3.1 Einleitung

Die Deutsche Telekom ist Mitte der 1990er Jahre (1995) im Zuge der Privatisierung aus den Bereichen für Fernmeldewesen und Telekommunikation der Deutschen Bundespost hervorgegangen. Die im Zusammenhang mit der Telefonie bzw. der Fernsprechtechnik und der Datenübertragung stehende Netztechnik der Deutschen Bundespost – und zuvor der Deutschen Post – ging in die Deutsche Telekom über. Sitz des Unternehmens ist Bonn. Die Deutsche Telekom ist in Deutschland und international präsent, vor allem in europäischen Ländern, aber auch z. B. in den USA [17], [33], [34].

3.3.2 Jährlicher Energiebedarf

Im Bild 1 ist der jährliche Gesamtenergiebedarf des Unternehmens Deutsche Telekom in Deutschland für die Jahre 2009–2022 dargestellt. Die Daten entstammen der Nachhaltigkeitsberichterstattung des Unternehmens selbst [20] – und damit öffentlich zugänglichen Quellen.

Bild 1: Jährlicher Energiebedarf des Telekommunikationsnetzbetreibers Deutsche Telekom in Deutschland



Es ist anzumerken, dass die aktuell verfügbaren archivierten Nachhaltigkeitsberichte lediglich die Energiebedarfsangaben für den Konzern Deutsche Telekom in den genannten Kategorien für alle betrachteten Jahre enthalten – nicht jedoch für jedes Jahr die für den Betrieb in Deutschland gültigen Daten. Diese entstammen dem Kennzahlentool sowie einigen der Nachhaltigkeitsberichte (der Jahre 2008 und 2009 sowie seit 2016), die diese in unterschiedlicher Granularität Daten enthalten – die Energiebedarfsdaten aus dem Kennzahlentool, das jeweils die Werte für fünf zurückliegende Jahre enthält, sind über einige Jahre gesammelt worden. Unterteilt ist der Gesamtenergiebedarf in die oben genannten vier Kategorien elektrische Energie, fossile Kraft- bzw. Treibstoffe, fossile Brennstoffe und Fernwärme.

Die im vorhergehenden Abschnitt allgemein mit angegebene Fernwärme wurde für die betrachteten Jahre nicht ausgewiesen und kann somit keine Berücksichtigung finden. In diesem Detailgrad konnten die Energiebedarfsdaten für die angegebenen Jahre aus den öffentlich zugänglichen Quellen ermittelt werden.

Es ist erkennbar, dass die elektrische Energie bei der Deutschen Telekom den größten Anteil am jährlichen Energiebedarf in Deutschland ausmacht: Mit einem Anteil von ca. 70 % bis 80 % ist der Bedarf an elektrischer Energie bzw. Elektrizität am größten, gefolgt von den etwa gleich großen Anteilen für Heizung (fossile Brennstoffe und Fernwärme) sowie den fossilen Kraft- bzw. Treibstoffen. Die Anteile in den drei nicht-elektrischen Kategorien verschieben sich über den betrachteten Zeitraum etwas, sollen an dieser Stelle jedoch nicht näher untersucht werden.

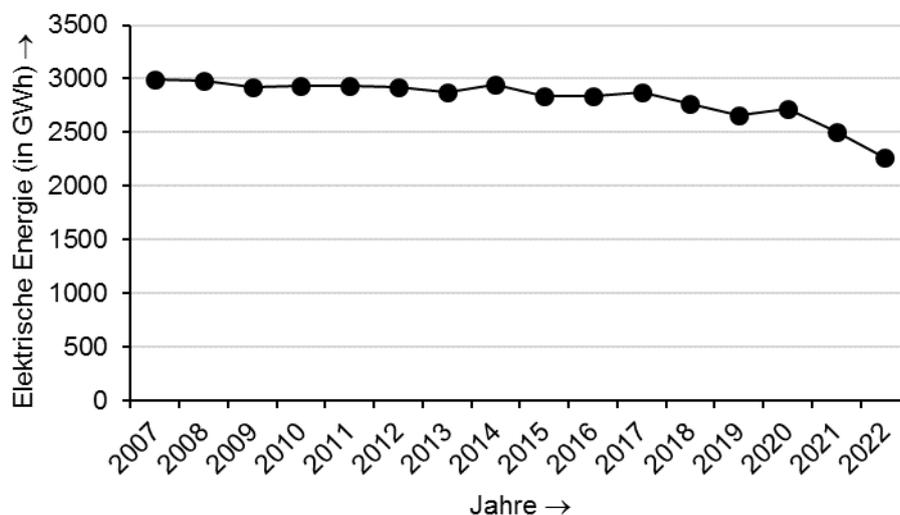
Die elektrische Energie dient dem unmittelbaren Betrieb der Komponenten des Telekommunikationsnetzes selbst, aber auch der elektrischen Energieversorgung der Informations- und Datenverarbeitungsanlagen, der Versorgungs- und Beleuchtungsanlagentechnik in Büros und Ladengeschäften sowie anderer betriebsunterstützender Systeme, die mittelbar dem Betrieb des informationsübertragenden Telekommunikationsnetzes zugeordnet werden können. Indizien in den Nachhaltigkeitsberichten [20] deuten darauf hin, dass mehr als drei Viertel der elektrischen Energie für die direkte Versorgung der Telekommunikationsnetztechnik aufgewendet wird.

Über den betrachteten Zeitraum sinkt der jährliche Gesamtenergiebedarf des Unternehmens Deutsche Telekom in Deutschland auf ca. zwei Drittel. Hierbei spielen viele Faktoren eine Rolle – z. B. Effizienzverbesserungen durch Technikfortschritt, sensiblerer und ressourcenschonenderer Umgang mit Energie und nicht zuletzt die in diesem Zeitraum stark zurückgegangene Anzahl der Mitarbeiter des Unternehmens [29] –, die jedoch nicht alle Gegenstand der vorliegenden Untersuchung sein können.

Da der Bedarf an elektrischer Energie von besonderem Interesse ist und im Weiteren im Vordergrund der Betrachtungen stehen soll, ist in Bild 2 der jährliche Bedarf an elektrischer Energie des Unternehmens Deutsche Telekom in Deutschland separat dargestellt.

Für die elektrische Energie konnten den Nachhaltigkeitsberichten [20] in Verbindung mit dem Kennzahlentool die Daten für einen Zeitraum von fünfzehn Jahren entnommen werden. Dieser Zeitraum soll den Betrachtungen, soweit möglich, auch für die weiteren Netze und Netzbetreiber zu Grunde gelegt werden. Der jährliche elektrische Energiebedarf am Anfang des Betrachtungszeitraums betrug knapp 3 TWh und verringerte sich bis zum Ende des Beobachtungszeitraumes auf knapp 2,3 TWh. Dies entspricht einer Senkung auf ca. 75 %.

Bild 2: Jährlicher Bedarf an elektrischer Energie (Elektrizität) des Telekommunikationsnetzbetreibers Deutsche Telekom in Deutschland

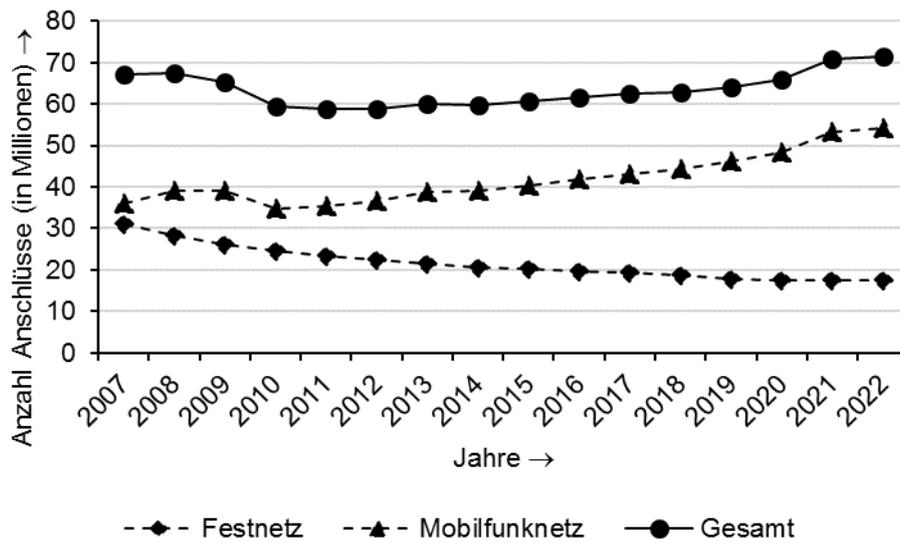


3.3.3 Anschlusszahlen

Der ermittelte jährliche elektrische Gesamtenergiebedarf hängt stark von der Größe des Telekommunikationsnetzes ab. Deshalb soll nun der Bedarf an elektrischer Energie je Anschluss angegeben werden, um Netze unterschiedlicher Größe in Bezug auf den elektrischen Energiebedarf vergleichen zu können.

Im Bild 3 sind die Anschlusszahlen der Deutschen Telekom in Deutschland – unterteilt nach Fest- und Mobilfunknetz sowie insgesamt – für den Betrachtungszeitraum dargestellt.

Bild 3: Anzahl der Anschlüsse der Deutschen Telekom in Deutschland



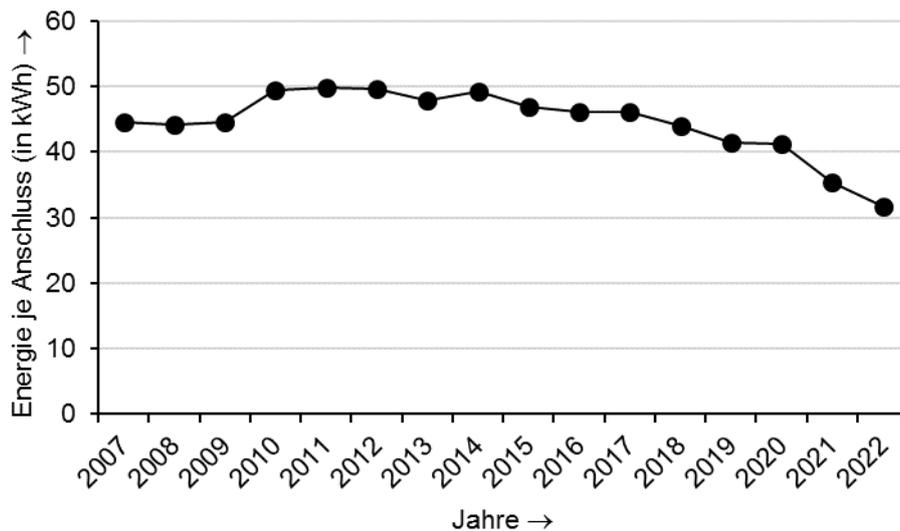
Die Daten entstammen [35], [36] und gehen auf die Geschäftsberichterstattung des Unternehmens [23] zurück. Die Anschlusszahlen für das Festnetz nehmen kontinuierlich ab, während die Anzahl der Mobilfunkanschlüsse nach einer anfänglichen Delle kontinuierlich wächst. Die Gesamtzahl der Anschlüsse wird durch Addition beider Größen ermittelt, um eine einerseits aussagekräftige und andererseits möglichst einfache Kennzahl für die Anzahl der Anschlüsse zu erhalten: Diese Gesamtzahl steigt nach einer anfänglichen Abnahme und einer Periode der Konstanz von mehreren Jahren gegen Ende des Betrachtungszeitraumes. Die Zunahme der Gesamtanzahl der Anschlüsse wird vor allem getragen durch die steigende Anzahl der Mobilfunkanschlüsse.

Die Gründe für diese Verläufe und damit verbundene Interpretationsmöglichkeiten sind vielfältig: Beispielsweise ist ein Trend erkennbar, dass tendenziell Festnetzanschlüsse weniger werden und Mobilfunkanschlüsse in ihrer Anzahl zunehmen. Dies kann eine Ursache im veränderten Kommunikations- und Nutzungsverhalten junger, nachwachsender Generationen gegenüber älteren Generationen haben. Diese Ursachenforschung und damit einhergehende Interpretationen sind jedoch nicht Gegenstand der vorliegenden Untersuchung.

3.3.4 Jährlicher Bedarf an elektrischer Energie je Anschluss

Teilt man den jährlichen Bedarf an elektrischer Energie (Bild 2) durch die Anzahl der Anschlüsse (Bild 3), erhält man den Elektrizitätsbedarf je Anschluss und Jahr. In Bild 4 ist dieser elektrische Energiebedarf je Anschluss der Deutschen Telekom in Deutschland dargestellt.

Bild 4: Jährlicher elektrischer Energiebedarf je Anschluss der Deutschen Telekom in Deutschland



Der jährliche Elektroenergiebedarf je Anschluss liegt im Bereich zwischen 50 kWh und 30 kWh. Es wird deutlich, dass die netzbetreiberseitig jährlich erforderliche elektrische Energie im Betrachtungszeitraum zunächst etwas ansteigt und dann in der Tendenz abnimmt. Wie bereits erwähnt, enthält die elektrische Energie (Bild 2) Komponenten, die nicht direkt und unmittelbar dem Netzbetrieb zugeschlagen werden können (sogenannter *Overhead*). Insofern ist die Abnahme des elektrischen Energiebedarfs je Anschluss einerseits den tendenziell steigenden Anschlusszahlen (Bild 3) bei abnehmendem Elektroenergiebedarf (Bild 2) zuzuschreiben, wobei jedoch dem abnehmenden Elektroenergiebedarf sehr vielfältige Ursachen zu Grunde liegen können, deren Erkundung nicht Gegenstand dieser Untersuchung ist.

Die hier ermittelten elektrischen Energiewerte je Anschluss liegen in vergleichbaren Größenordnungen, wie die z. B. in [8] ermittelten und berichteten Werte. Um eine Unterteilung in z. B. Festnetz und Mobilfunknetz vornehmen zu können, würden die elektrischen Energiebedarfe in diesen beiden Kategorien benötigt – wie die dargestellten Anschlusszahlen. Diese Unterteilung nach Fest- und Mobilfunknetz hinsichtlich des elektrischen Energiebedarfes liegt jedoch nicht öffentlich zugänglich vor – ließe aber weitere Einsichten erwarten.

3.4 Vodafone Deutschland

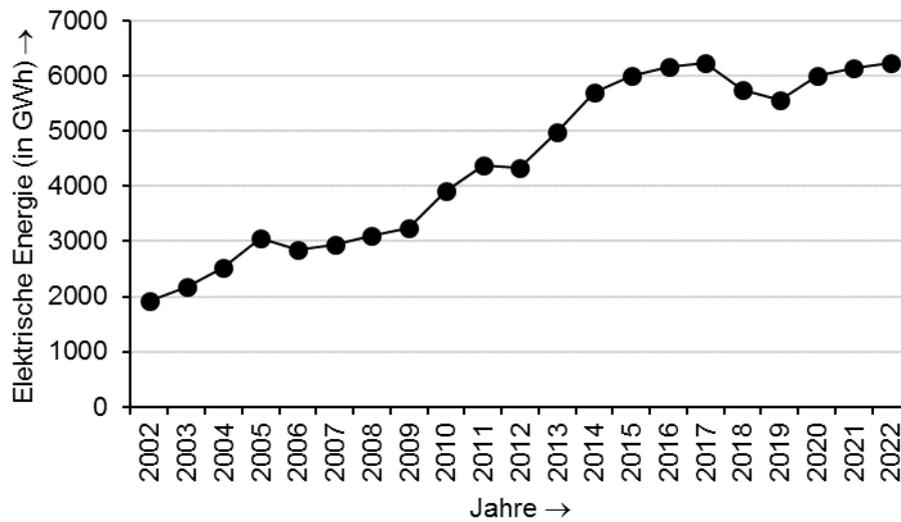
3.4.1 Einleitung

Vodafone ist ein Telekommunikationsunternehmen mit Sitz in England, das weltweit operiert. Der Name ist eine Zusammensetzung aus *Voice*, *data* und *fax over net* [38], [40]. In Deutschland startete Ende der 1980er Jahre die Mannesmann Mobilfunk GmbH als erster privater Mobilfunknetzbetreiber mit dem D2-Netz. Sie wurde Anfang der 2000er Jahre von Vodafone übernommen. Über die Einbindung des Festnetzes des Unternehmens Mannesmann Arcor bzw. Arcor konnten auch Festnetzanschlüsse angeboten werden; diese Sparte ist seit 2009/10 in das Unternehmen Vodafone integriert. Später wurden Kabelnetzbetreiber durch Vodafone in Deutschland übernommen, die im Zuge der Liberalisierung des Telekommunikationsmarktes Mitte der 1990er Jahre den Zuschlag für den Betrieb der Fernseekabelnetze erhalten hatten, die aus Wettbewerbsgründen nicht der Deutschen Telekom übertragen wurden. Damit wurde Vodafone in Deutschland in den 2010er Jahren ein integrierter Telekommunikationsnetzbetreiber, der nahezu flächendeckend über Fest- und Mobilfunknetz verfügt [38], [39], [40]. In Gegenden, die nicht durch ein Vodafone-Festnetz abgedeckt sind, werden Breitbandfestnetzdienste über das Netz der Deutschen Telekom angeboten.

3.4.2 Jährlicher Energiebedarf

Der jährliche Energiebedarf ist in öffentlich zugänglichen Quellen nicht sehr detailliert dargestellt. In den Corporate Responsibility Reports der Vodafone Group [22] ist der globale Bedarf der Vodafone Group an elektrischer Energie aufgeführt, eine Unterteilung nach Ländern wird nicht vorgenommen. Im Bild 5 ist der jährliche elektrische Energiebedarf der Vodafone Group dargestellt. Da das Geschäftsjahr des Unternehmens vom April eines Jahres bis zum März des darauffolgenden Jahres währt, wurde eine Umrechnung auf Kalenderjahre vorgenommen. Es zeigt sich ein ansteigender Trend für den elektrischen Energiebedarf der Vodafone Group bis 2017, danach ein Rückgang für wenige Jahre mit darauffolgendem erneutem Anstieg auf das vorherige Niveau. Eine genauere Bestimmung und Diskussion der Gründe würde weitere Untersuchungen zu technischen und wirtschaftlichen Hintergründen des Netzes und der Unternehmenspolitik der Vodafone Group erfordern.

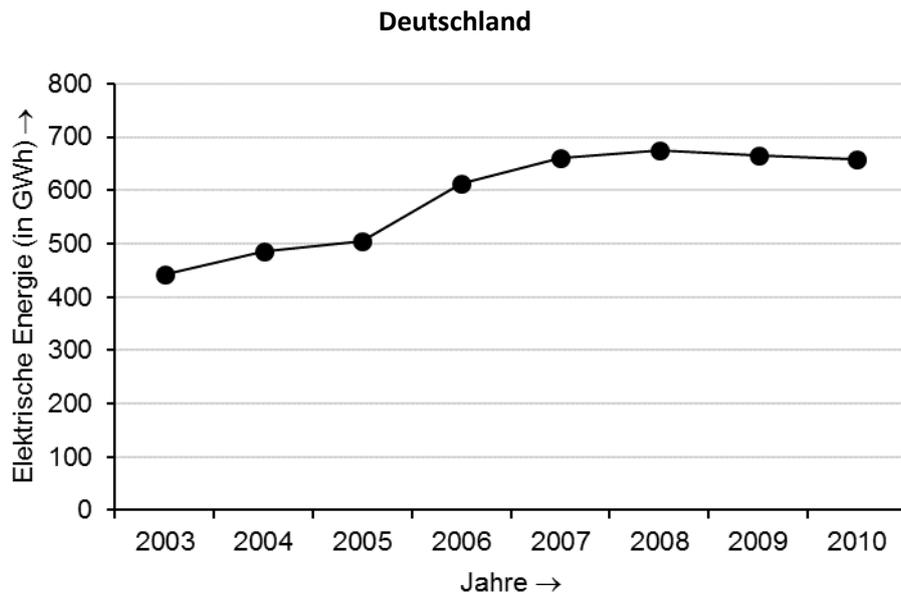
Bild 5: Jährlicher elektrischer Energiebedarf des Telekommunikationsnetzbetreibers Vodafone Group (global)



Für Vodafone Deutschland lassen sich aus öffentlich zugänglichen Quellen die elektrischen Energiebedarfsdaten für die in **Error! Reference source not found.** dargestellten Jahre aus den Nachhaltigkeitsberichten [26], [27], [28] ermitteln. Der Wert für 2004/05 war nicht auffindbar – deshalb wurden für die Kalenderjahre 2004 und 2005 Schätzwerte aus den Werten für die Berichtsjahre 2003/04 und 2005/06 berechnet. Für nachfolgende Jahre (nach 2010/11) sind keine gesonderten Nachhaltigkeitsberichte und Angaben über die Energiebedarfe von Vodafone in Deutschland in öffentlichen Quellen zugänglich.

Im **Error! Reference source not found.** ist für die Jahre der elektrische Energiebedarf des Telekommunikationsnetzbetreibers Vodafone in Deutschland dargestellt, für die sich Angaben dafür ermitteln ließen. Es ist erkennbar, dass dieser ansteigt und für die letzten der dargestellten Jahre ein Plateau erreicht.

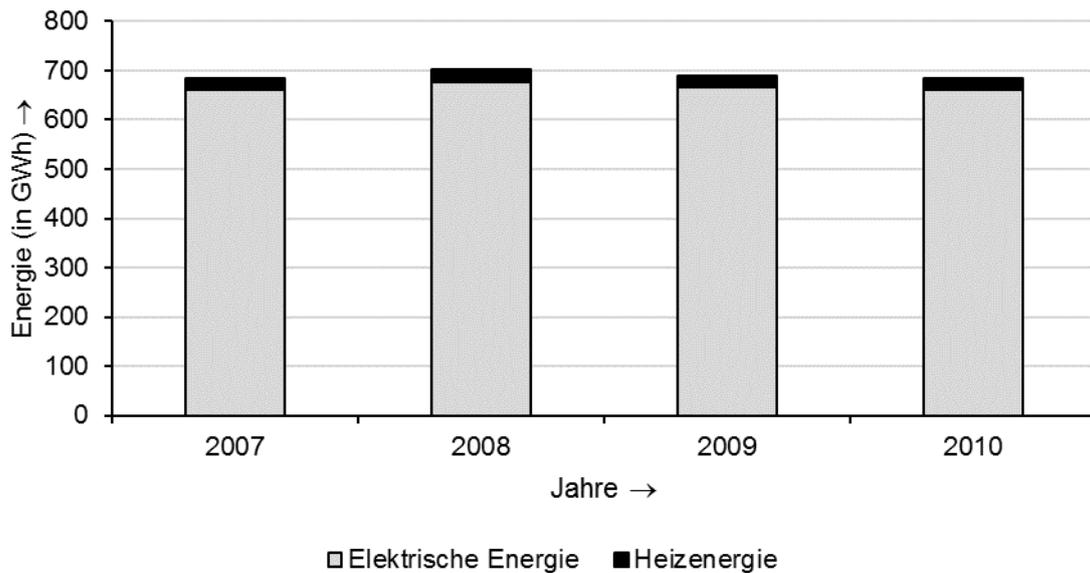
Bild 6: Jährlicher elektrischer Energiebedarf des Telekommunikationsnetzbetreibers Vodafone in



Sollen fehlende Energiebedarfsdaten von Vodafone Deutschland ermittelt werden, so sind weitere Untersuchungen erforderlich. Als sinnvoll erscheint die Möglichkeit, auf das Unternehmen selbst zuzugehen, um diese Daten in Erfahrung zu bringen – wobei der Erfolg natürlich abhängig davon ist, wie zugänglich das Unternehmen in dieser Frage ist, da es sich prinzipiell um Unternehmensinterna handelt.

In Bild 7 ist der elektrische Energiebedarf und der Heizenergiebedarf von Vodafone Deutschland dargestellt für die Jahre, in den für beide Größen ermittelt werden konnten (aus [27], [28]). Es wird deutlich, dass der weitaus größte Anteil der Energie, die das Unternehmen benötigt, in Form elektrischer Energie zum Betrieb des Telekommunikationsnetzes und der Büros und Ladengeschäfte verwendet wird. Die Energie zur Heizung der Arbeitsräume und Ladengeschäfte ist vergleichsweise niedrig: Sie liegt für die betrachteten Jahre jeweils unterhalb von 5 %. Die Energiemenge, die zum Betrieb von Fahrzeugen aufgewendet wurde, konnte nicht ermittelt werden. Die Energiebedarfskategorien, die durch Vodafone Deutschland in der Nachhaltigkeitsberichterstattung verwendet werden, weichen also von den oben genannten vier Kategorien ab, die z. B. die Deutsche Telekom verwendet.

Bild 7: Jährlicher Energiebedarf des Telekommunikationsnetzbetreibers Vodafone in Deutschland



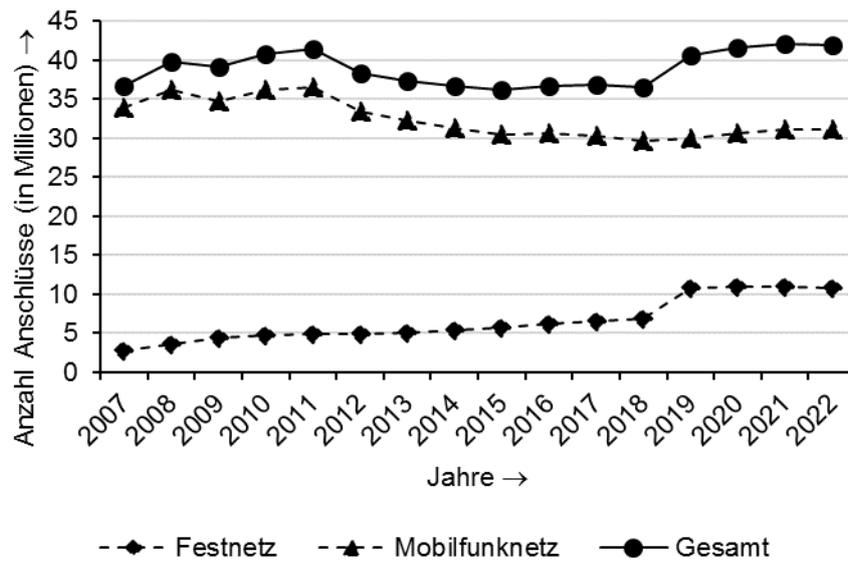
3.4.3 Anschlusszahlen

Da der ermittelte jährliche elektrische Gesamtenergiebedarf stark von der Größe des Telekommunikationsnetzes abhängt, soll wieder der Bedarf an elektrischer Energie je Anschluss angegeben werden, um Netze unterschiedlicher Größe in Bezug auf den elektrischen Energiebedarf vergleichen zu können.

Im Bild 8 sind die Anschlussanzahlen von Vodafone in Deutschland dargestellt, die aus öffentlich zugänglichen Quellen ermittelt werden konnten – unterteilt nach Fest- und Mobilfunknetz sowie insgesamt. Die Daten entstammen [41], [42] und gehen auf die Meldungen des Unternehmens an die Bundesnetzagentur zurück [29].

Die Anzahl der Mobilfunkanschlüsse ist – in der Entwicklung des Unternehmens begründet – gegenüber der Anzahl der Festnetzanschlüsse vergleichsweise hoch. Die Anschlusszahlen im Mobilfunknetz unterliegen Schwankungen: Sie nehmen im Beobachtungszeitraum zunächst etwas zu, dann über einige Jahre hinweg ab und stabilisieren sich zuletzt auf etwas geringerem als dem Anfangsniveau. Die Anschlüsse im Festnetz nehmen kontinuierlich zu und stabilisieren sich zuletzt auf (gegenüber der Anzahl der Mobilfunkanschlüsse) niedrigem Niveau. Die Gesamtzahl der Anschlüsse wird durch Addition beider Größen ermittelt, um eine einerseits aussagekräftige und andererseits möglichst einfache Kennzahl für die Anzahl der Anschlüsse zu erhalten: Diese Gesamtzahl unterliegt ähnlichen Schwankungseinflüssen wie die Anzahl der Mobilfunkanschlüsse, da diese dominieren; gegen Ende des Beobachtungszeitraums verhilft die steigende Anzahl der Festnetzanschlüsse der Gesamtzahl zu einer Stabilisierung auf einem etwas höheren Niveau, als zu Anfang des untersuchten Zeitraumes.

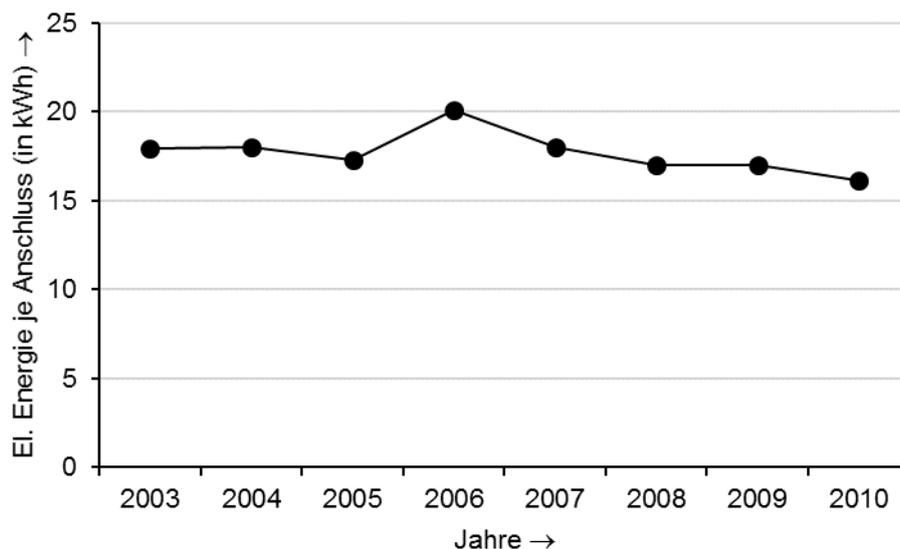
Bild 8: Anzahl der Anschlüsse von Vodafone in Deutschland



3.4.4 Jährlicher Bedarf an elektrischer Energie je Anschluss

Teilt man den jährlichen Bedarf an elektrischer Energie (**Error! Reference source not found.**) durch die Anzahl der Anschlüsse (Bild 8), erhält man den Elektrizitätsbedarf je Anschluss und Jahr. In Bild 9 ist dieser elektrische Energiebedarf je Anschluss von Vodafone in Deutschland für die Jahre dargestellt, für die die beiden Angaben vorliegen.

Bild 9: Jährlicher elektrischer Energiebedarf je Anschluss von Vodafone in Deutschland



Es zeigt sich ein nahezu konstanter Verlauf mit einer Tendenz zur Abnahme zum Ende des dargestellten Zeitraumes. Absolut liegt dieser Wert vergleichsweise niedrig – auch im Vergleich zu Bild 4 und zu [8] – so dass es hier einen Bedarf an weiterer Untersuchung dieses Sachverhaltes und nach Verifikation bzw. Falsifikation gibt. Auch hier wären detailliertere Zahlen für weitere Untersuchungen hilfreich. In

Teilen lässt sich die geringere Energie je Anschluss dadurch erklären, dass Vodafone in Deutschland wesentlich weniger Alttechnik und Liegenschaften übertragen bekommen hat, als beispielsweise die Deutsche Telekom.

3.5 Telefónica

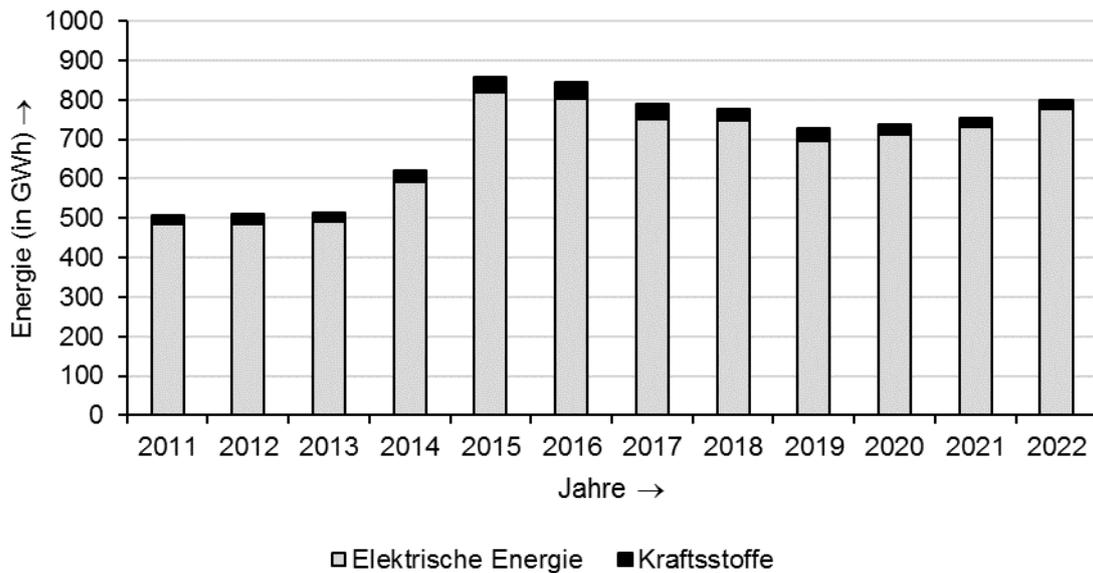
3.5.1 Einleitung

Telefónica ist ein spanisches Telekommunikationsunternehmen, das vorwiegend in Europa und in Lateinamerika aktiv ist. Telefónica Deutschland ist eine Tochtergesellschaft von Telefónica; das Unternehmen wurde 1995 als Viag Interkom in einem Zusammenwirken von E.on, British Telecom (BT) und Telenor mit Hauptsitz in München gegründet und ist in Deutschland vor allem unter der Marke O₂ tätig, die aus der Übernahme der britischen Mobilfunk-Telefongesellschaft O₂ durch Telefónica 2005/06 herührt (wobei dieses Unternehmen seinerseits einer vorherigen Abspaltung des Mobilfunkgeschäfts aus der BT Group entsprungen ist). Im Jahr 2010 wurde HanseNet (mit der Marke Alice DSL) von Telecom Italia übernommen und 2014 wurde die E-Plus-Gruppe vom niederländischen Telekommunikationskonzern KPN erworben und in das Unternehmen Telefónica Deutschland integriert. Telefónica Deutschland ist ein integrierter Anbieter von Telekommunikationsdienstleistungen mit dem Schwerpunkt im Mobilfunkgeschäft [19], [44], [45].

3.5.2 Jährlicher Energiebedarf

Der jährliche Energiebedarf von Telefónica Deutschland ist in Bild 10 für die Jahre 2011–2022 dargestellt. Die Daten entstammen der Nachhaltigkeitsberichterstattung des Unternehmens [21] – und damit öffentlich zugänglichen Quellen. Unterteilt ist der Gesamtenergiebedarf in die zwei Kategorien *elektrische Energie* und *Kraftstoffe*. In den Nachhaltigkeitsberichten ist die elektrische Energie weiterhin in zwei Unterkategorien untergliedert – Netzwerk und Rechenzentren sowie Büros, Shops und Call Center –, die hier nicht detaillierter untersucht werden sollen. Die Energiebedarfskategorie Kraftstoffe umfasst Diesel, Erdgas und Fernwärme – und damit sowohl die Heizenergie als auch alle im Zusammenhang mit Dieserverbrauch stehenden Bedarfsträger (z. B. Kraftfahrzeugbetrieb und der Betrieb von Notstromgeneratoren). Die Unterteilung des Energiebedarfs in Kategorien erfolgt hier also wieder anderes, als bei der Deutschen Telekom und bei Vodafone.

Bild 10: Jährlicher Energiebedarf des Telekommunikationsnetzbetreibers Telefónica Deutschland



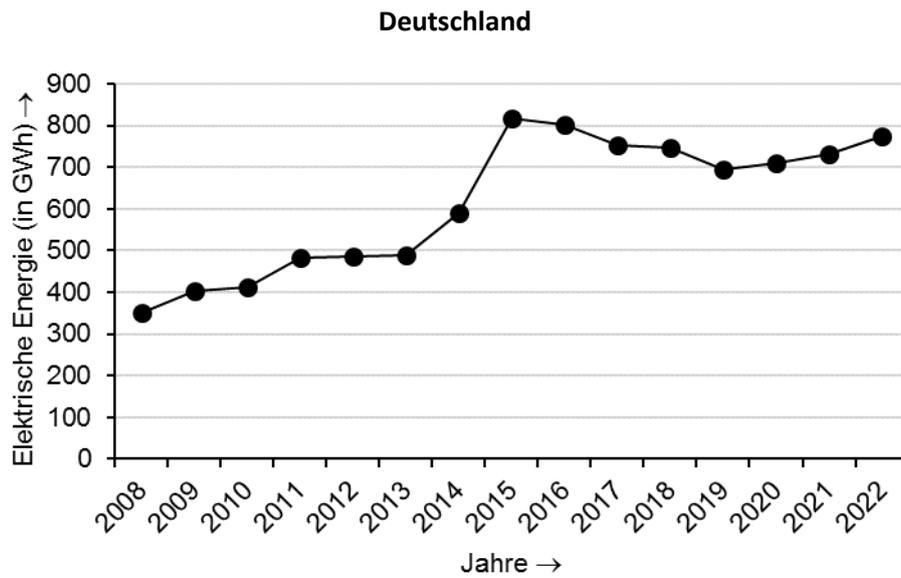
Der Gesamtenergiebedarf des Unternehmens ist in den Jahren 2011–2013 nahezu konstant, steigt dann deutlich bis 2015 und sinkt danach bis 2019, wonach ein moderater Anstieg bis 2022 erkennbar ist. Den Großteil des Energiebedarfs mit ca. 95 % macht in jedem Jahr die elektrische Energie aus; der durch Kraftstoffe verursachte Anteil liegt jährlich bei etwa 5 %.

Eine Besonderheit ist der starke Anstieg des Energiebedarfs zwischen 2013 und 2015: Es wurde mit der Übernahme von E-Plus zum Jahr 2014 ein Telekommunikationsunternehmen und damit Netztechnik sowie zugehörige Liegenschaften in das Unternehmen Telefónica Deutschland integriert. Der Zusammenschluss der beiden Unternehmen erfolgte zum vierten Quartal 2014, dementsprechend sind nur für das vierte Quartal dieses Jahres die Energiebedarfe beider Unternehmensteile berücksichtigt, später dann für alle Quartale des Jahres. Aus diesem Grund ist für 2014 ein zwar erkennbarer, aber moderater Anstieg des Jahresenergiebedarfs erkennbar.

Die Gründe für den weiteren Verlauf des Gesamtenergiebedarfs in den Jahren 2015–2022 wären bei Bedarf zu untersuchen – insoweit das von unternehmensextern möglich ist. Zu vermuten ist, dass die Abnahme des Energiebedarfs auf technische Effizienzsteigerungen in der Netzausrüstung zu suchen ist und der spätere Anstieg auch auf geschäftliche Entwicklungen zurückzuführen ist.

In Bild 11 der jährliche Bedarf an elektrischer Energie Telefónica Deutschland separat dargestellt. Dieser ließ sich den Nachhaltigkeitsberichten [21] für einen etwas längeren Zeitraum von ca. 15 Jahren entnehmen als der in Bild 10 dargestellte Gesamtenergiebedarf. Es ist ein von 2008–2013 steigender Bedarf an elektrischer Energie erkennbar, mit einem Plateau in den Jahren 2011–2013. Der 2014 erfolgte Zusammenschluss mit E-Plus und die dadurch erforderliche Integration von Unternehmen und Netzen führte zu einem Anstieg des elektrischen Energiebedarfs bis 2015, von wo aus bis 2019 eine fallende Tendenz und anschließend ein Anstieg beim elektrischen Energiebedarf sichtbar werden.

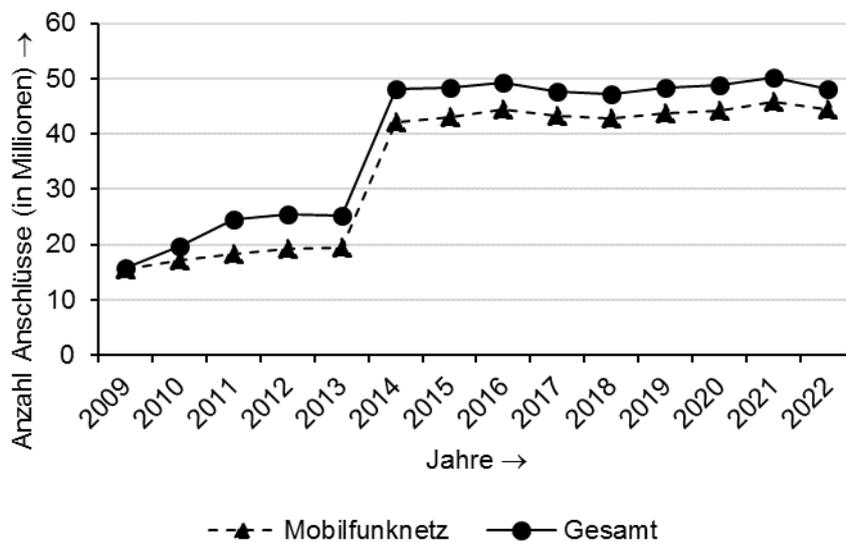
Bild 11: Jährlicher elektrischer Energiebedarf des Telekommunikationsnetzbetreibers Telefónica



3.5.3 Anschlusszahlen

Im Bild 12 sind die Anschlussanzahlen von Telefónica Deutschland dargestellt, die aus öffentlich zugänglichen Quellen ermittelt werden konnten. Die Daten zur Gesamtzahl der Anschlüsse entstammen den Nachhaltigkeitsberichten [21] und die Daten zu den Mobilfunkanschlüssen [46] – diese gehen ebenfalls auf die Nachhaltigkeits- und Geschäftsberichterstattung des Unternehmens [21], [24] zurück. Telefónica vermarktet in Deutschland darüber hinaus auch Telefon-, Breitband- und sonstige Anschlüsse – über diese ließen sich keine konsistenten Angaben aus öffentlich frei zugänglichen Quellen ermitteln. Insofern sind sie in Bild 12 nicht separat ausgewiesen, lassen sich jedoch in ihrer Gesamtheit aus der Differenz der Gesamtzahl der Anschlüsse und der Anzahl der Mobilfunkanschlüsse gewinnen.

Bild 12: Anzahl der Anschlüsse von Telefónica Deutschland

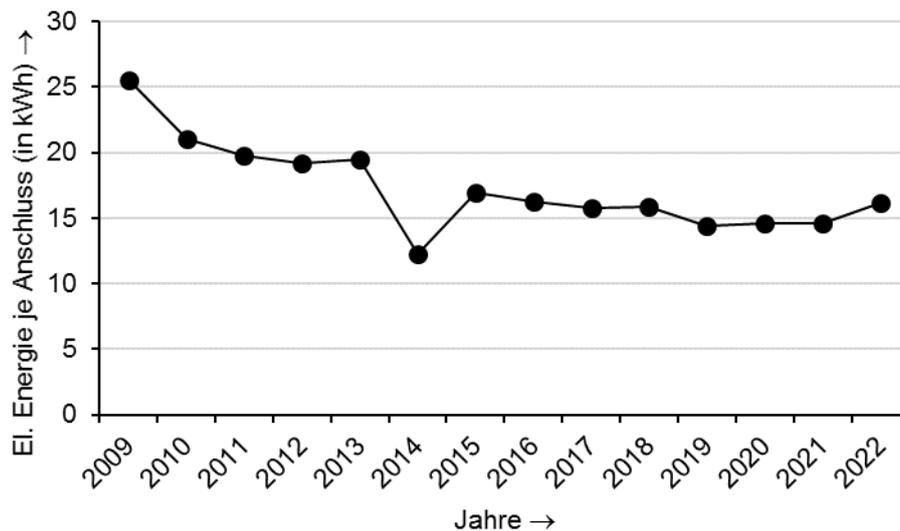


Vor 2010 war Telefónica vor allem als Mobilfunknetzbetreiber in Deutschland tätig, insofern sind dort Gesamtzahl der Anschlüsse und die Anzahl der Mobilfunkanschlüsse nahezu identisch. Mit der Integration von HanseNet ab 2010 kam eine signifikante Anzahl von Festnetzanschlüssen hinzu. Der deutliche Anstieg der Anschlusszahlen von 2013 nach 2014 resultiert aus dem Zusammenschluss mit E-Plus im Jahr 2014. Anschließend bleiben die Anschlusszahlen auf dem dann erreichten hohen Niveau – mit leichten Schwankungen – nahezu konstant.

3.5.4 Jährlicher Bedarf an elektrischer Energie je Anschluss

Teilt man den jährlichen Bedarf an elektrischer Energie (Bild 11) durch die Anzahl der Anschlüsse (Bild 12), erhält man den Elektrizitätsbedarf je Anschluss und Jahr. In Bild 13 ist dieser jährliche elektrische Energiebedarf je Anschluss von Telefónica Deutschland dargestellt.

Bild 13: Jährlicher elektrischer Energiebedarf je Anschluss von Telefónica Deutschland



Es zeigt sich ein abnehmender Verlauf zwischen 2009 und 2019, danach ist nach mehrjähriger Konstanz ein leichter Anstieg erkennbar. Eine Besonderheit ist der Wert für das Jahr 2014: Wie zuvor bereits erwähnt, ist im (elektrischen) Energiebedarf für 2014 für das vierte Quartal der Wert für E-Plus mit enthalten, also für ein Viertel des Jahres, da der Unternehmenszusammenschluss zum vierten Quartal 2014 erfolgt ist. Bei den Anschlusszahlen werden jedoch in jedem Jahr jeweils die Daten vom vierten Quartal verwendet, so dass für 2014 bei der Anschlusszahl der Zusammenschluss der Unternehmen und der Netze voll zum Tragen kommt – bei den Energiedaten geht dieser Zusammenschluss jedoch nur teilweise, zu einem Viertel, ein. Deshalb ist der Wert für die elektrische Energie je Anschluss für 2014 vergleichsweise klein – und in gewissem Sinne als Ausreißer zu betrachten.

Absolut liegt der Wert der elektrischen Energie je Anschluss vergleichsweise niedrig – auch im Vergleich zu Bild 4 und zu [8] – so dass es hier einen Bedarf an weiterer Untersuchung dieses Sachverhaltes und nach Verifikation bzw. Falsifikation gibt. In Teilen lässt sich die geringere Energie je Anschluss dadurch erklären, dass Telefónica in Deutschland wesentlich weniger Alttechnik und Liegenschaften zu betreiben und zu verwalten hat, als beispielsweise die Deutsche Telekom.

3.6 Auswertung und Diskussion

Ziel dieses Kapitels war es, die Daten für den Energiebedarf der drei größten Telekommunikationsnetzbetreiber Deutsche Telekom, Vodafone und Telefónica zu ermitteln und darzustellen. Um eine faire Vergleichsmöglichkeit in Anbetracht der unterschiedlichen Größen der zu Grunde liegenden Netze zu eröffnen, wurden außerdem die Anschlusszahlen recherchiert.

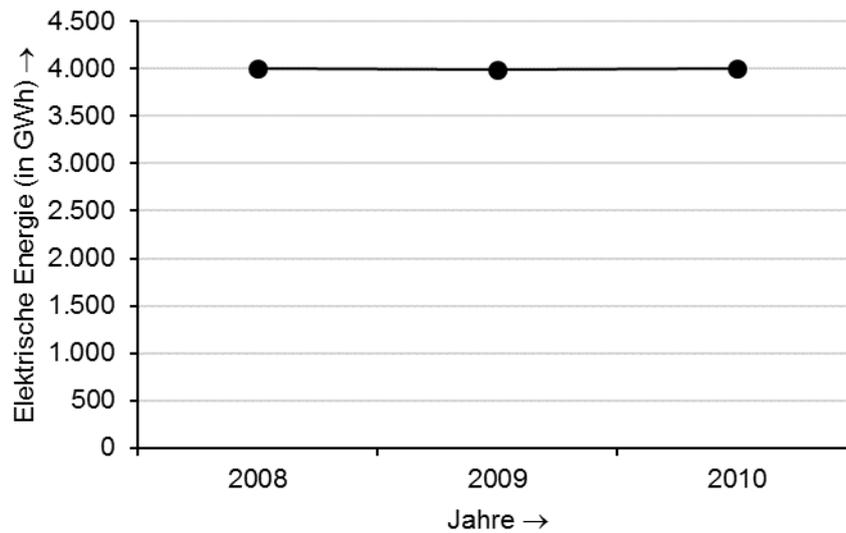
Die Berichterstattung der drei Unternehmen Deutsche Telekom, Vodafone und Telefónica im Hinblick auf den jährlichen Energiebedarf ist sehr unterschiedlich und die Datenlage nicht immer vollständig: So werden von allen drei Unternehmen unterschiedliche Kategorisierungen hinsichtlich der Einteilung in Energieklassen vorgenommen – elektrische Energie, fossile Brennstoffe, Fernwärme, fossile Kraftstoffe oder elektrische Energie und Heizenergie bzw. elektrische Energie und Kraftstoffe –, wobei die elektrische Energie jeweils ausgewiesen wird. Außerdem liegen die Daten für den Betrieb in Deutschland nicht immer gesondert vor: So waren für Vodafone nur für einige schon länger zurückliegende Jahre die Energiebedarfsdaten für Deutschland zu finden. Für den gesamten Betrachtungszeitraum ließen sich nur Gesamtenergiebedarfe für die Vodafone Group ermitteln. Bei der Deutschen Telekom liegen die für Deutschland gültigen Zahlen in einem eigenen sogenannten Kennzahlentool für die jeweils vergangenen fünf Jahre vor. In den archivierten Nachhaltigkeitsberichten finden sich nur Zahlen für die gesamte Deutsche-Telekom-Gruppe; für Deutschland werden die Zahlen nur auszugsweise detailliert dargestellt (für die Jahre 2006–2008) oder in Teilen implizit – bei der Angabe zur (technischen) Energieintensität (Gesamtenergiebedarfe der Deutschen Telekom in Deutschland seit 2016). Für Telefónica Deutschland konnten die jährlichen Energiebedarfsdaten den Nachhaltigkeitsberichten für den gesamten Betrachtungszeitraum entnommen werden.

Die Ergebnisse für die Gesamtenergiebedarfe der drei betrachteten Netzbetreiber sind sehr unterschiedlich, sie unterscheiden sich um Faktoren im Bereich von drei bis vier von größten zu kleinsten Energiebedarfen – zur jeweils selben Zeit. Hierbei spielen viele Faktoren eine Rolle, sie reichen von der technischen Ausstattung über die Overhead-Energiebedarfe für Büros und Ladengeschäfte bis hin zur historisch-wirtschaftlichen Entwicklung der Unternehmen.

Auf Grund der – letztlich auch historisch bedingt – sehr unterschiedlichen Größen der Telekommunikationsnetze der drei Netzbetreiber ist ein direkter Vergleich der Energiebedarfsergebnisse schwierig bzw. wenig aussagekräftig. Er wäre es auch dann, wenn die Datenlage dazu für Deutschland vollständiger wäre. Deshalb wurde die Anzahl der Anschlüsse für jeden Netzbetreiber ermittelt und der Energiebedarf je Anschluss bestimmt: Dies ist eine Größe, die einen Vergleich der Größenordnungen der Energiebedarfe und eine – zumindest im groben Rahmen – faire Bewertung zulässt, siehe z. B. auch [8]. Die Ergebnisse zeigen, dass die Deutsche Telekom einen größeren (elektrischen) Energiebedarf je Anschluss aufweist als Vodafone und Telefónica in Deutschland. Erklären ließe sich dieser Befund mit der größeren Vielzahl der Liegenschaften und ggf. der Alttechnik, die die Deutsche Telekom im Zuge des Übergangs in den 1990er Jahren übertragen bekommen hat. Jedoch sind die erhobenen Zahlen ebenfalls noch einmal zu verifizieren und zu vervollständigen (bezüglich Energiebedarf und Anzahlen der Anschlüsse) – wie weiter oben schon erwähnt.

Für die Jahre, in denen für den elektrischen Energiebedarf der drei untersuchten Telekommunikationsnetzbetreiber in Deutschland Daten vorliegen (2008–2010), ist der daraus resultierende summarische jährliche Elektroenergiebedarf in **Error! Reference source not found.** dargestellt: Es zeigt sich, dass dieser Energiebedarf relativ konstant bei ca. 4 GWh jährlich liegt.

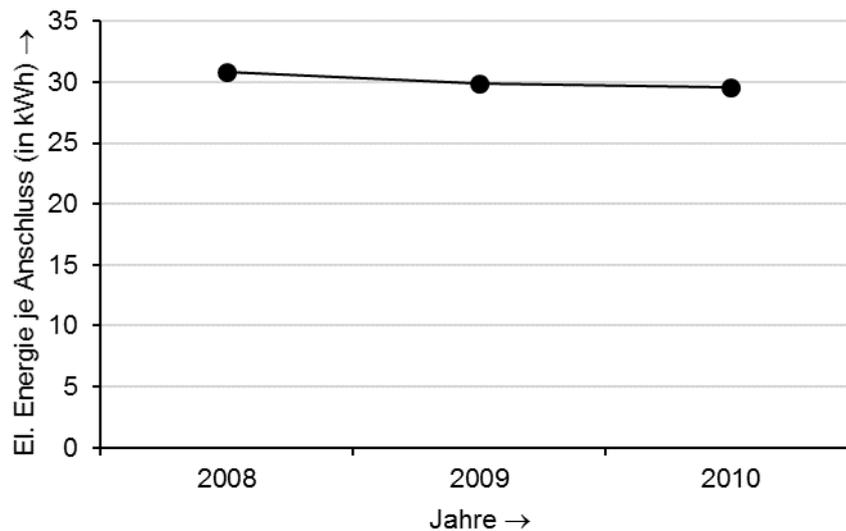
Bild 14: Jährlicher, summarischer elektrischer Energiebedarf der Telekommunikationsnetzbetreiber Deutsche Telekom, Vodafone und Telefónica Deutschland



Teilt man diesen elektrischen Energiebedarf durch die Anzahl der Anschlüsse [29], so erhält man den mittleren jährlichen elektrischen Energiebedarf je Anschluss (s. Bild 15): Dieser liegt im Bereich von 30 kWh und fällt leicht – dies ist bei nahezu konstantem Energiebedarf (**Error! Reference source not found.**) vor allem auf die steigende Zahl der Anschlüsse zurückzuführen.

Bild 15: Jährlicher, mittlerer elektrischer Energiebedarf je Anschluss der

Telekommunikationsnetzbetreiber Deutsche Telekom, Vodafone und Telefónica Deutschland



Um weitere und aussagekräftige Ergebnisse für die nicht so weit zurückliegende Vergangenheit auch für die Energiebedarfe der Telekommunikationsnetzbetreiber in ganz Deutschland zu erzielen, ist es eine wichtige Aufgabe, die Energiebedarfsdaten zu vervollständigen. Am vordringlichsten ist es dabei, zumindest für den elektrischen Energiebedarf von Vodafone in Deutschland Angaben bzw. Schätzwerte zu ermitteln.

4 Kennzahlen zum Energiebedarf

4.1 Einleitung zu den Kennzahlen

Kennzahlen zum Vergleich des Energiebedarfs oder der Energieeffizienz von Telekommunikationssystemen und -netzen spielen eine wichtige Rolle, wenn Energiebedarfe identifiziert und Verbesserungen erarbeitet werden sollen [15]. Im Zusammenhang mit dem Energiebedarf und der Energieeffizienz werden solche Kennzahlen auch *Energieeffizienzmetriken* genannt.

Derartige Energieeffizienzmetriken oder -kennzahlen können mit Bezug zur *technischen* Leistungsfähigkeit – z. B. eines Gerätes, einer Anlage oder eines Netzes – definiert werden [15] oder mit Bezug zur *wirtschaftlichen* Leistungsfähigkeit – eines Unternehmens oder einer Volkswirtschaft [47]. Beide Möglichkeiten sollen hier exemplarisch untersucht und dargestellt werden, da Telekommunikationsnetze einerseits technische Systeme sind und deren Betreiber andererseits Unternehmen sind, die unter jeweils gegebenen Randbedingungen wirtschaftlich arbeiten müssen.

Zunächst werden deshalb die Kenngrößen im Rahmen einer Recherche ermittelt und beschafft, die als Indikatoren für technische bzw. wirtschaftliche Leistungsfähigkeit dienen können. Anschließend werden die Energieeffizienzmetriken unter Einbeziehung der bereits ermittelten jährlichen Energiebedarfsgrößen bestimmt, analysiert und diskutiert.

4.2 Kennzahlen mit Bezug zur technischen Leistungsfähigkeit

Als Indikator für die technische Leistungsfähigkeit von modernen Telekommunikationsnetzen kann unter anderem das in einem Betrachtungszeitraum durch das Netz bewältigte Datenvolumen V herangezogen werden.

Wird die im Betrachtungszeitraum genutzte Energie E zum Datenvolumen V ins Verhältnis gesetzt, so erhält man die (technische) *Energieintensität* (z. B. [14])

$$I_T = \frac{E}{V} . \quad (3)$$

Für die Berechnung der Energieintensität kann als Energie im Zähler die Gesamtenergie verwendet werden oder auch die elektrische Energie – in diesem Fall soll die Bezeichnung *elektrische Energieintensität* zur Unterscheidung verwendet werden. Diese technische Energieintensität weist bei der Definition nach (3) die Dimension Energie / Datenvolumen auf, d. h. sie kann beispielsweise in der Einheit Joule / Byte (bzw. Joule / bit) angegeben werden. Im Zusammenhang mit Telekommunikationsnetzen und deren technischer Ausrüstung sind die Einheiten kWh / TB oder kWh / GB bzw. GWh / PB gebräuchlich (z. B. [14], [20], [21]).

Es sei angemerkt, dass die Bezeichnungen für die technischen Energieeffizienzkenngößen nicht immer einheitlich verwendet werden: So wird eine Größe, die die aufgewendete Energie auf das bewältigte Datenvolumen bezieht, gelegentlich als *Energieeffizienz* bezeichnet und die dazu reziproke Größe als *Energieintensität* (s. z. B. [15]). Hier soll der Begriff *Energieintensität* in dem in (3) definierten Sinn verwendet werden, da dies auch der Handhabung z. B. in der Nachhaltigkeitsberichterstattung entspricht (s. z. B. [20], [21]). Die nicht einheitliche Verwendung von Begrifflichkeiten und die Vielzahl der Metriken in diesem Zusammenhang mag der Tatsache geschuldet sein, dass gerade im technischen Umfeld die Notwendigkeit der Nachhaltigkeitsbewertung in den vergangenen ca. zwei Jahrzehnten sehr dynamisch an Bedeutung gewonnen hat und daher Kenngrößen zur Einschätzung der Energieeffizienz oftmals situationsbedingt und ingenieurmäßig-pragmatisch eingeführt und verwendet worden sind.

4.3 Kennzahlen mit Bezug zur wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit

Als Indikator für die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit von Unternehmen und damit auch von Telekommunikationsnetzbetreibern kann unter anderem der in einem Betrachtungszeitraum, z. B. ein Jahr, erzielte Umsatz U herangezogen werden [47].

Wird die im Betrachtungszeitraum genutzte Energie E zum Umsatz U ins Verhältnis gesetzt, so erhält man die (wirtschaftliche) *Energieintensität* (z. B. [14])

$$I_W = \frac{E}{U} . \quad (4)$$

Für die Berechnung der Energieintensität kann als Energie im Zähler wieder die Gesamtenergie verwendet werden oder auch die elektrische Energie – in diesem Fall soll auch hier die Bezeichnung elektrische Energieintensität zur Unterscheidung verwendet werden.

Diese wirtschaftliche Energieintensität weist bei der Definition nach (4) die Dimension Energie / Währung auf, d. h. sie kann beispielsweise in der Einheit Joule / Euro angegeben werden. In der vorliegenden Untersuchung wird die Einheit kWh / Tausend Euro verwendet – dies ist äquivalent zur Einheit Wh / Euro oder zur Einheit Tausend MWh / Mrd. Euro. Eine alternative Bezeichnung ist der Begriff *Monetary Power Efficiency Indicator (MPEI)* [20].

Die wirtschaftliche Energieintensität eines Unternehmens bzw. eines Betriebes ist auch eine betriebswirtschaftliche Kennzahl: Sie wird oft auch als Verhältnis der Energiekosten zu den Umsatzerlösen angegeben und ist dann eine dimensionslose Finanzkennzahl [47]. Für die Berechnung der wirtschaftlichen Energieintensität in dieser Form wären Angaben zu den jährlichen Energiekosten notwendig, die von vielen Faktoren abhängen und vor allem nicht öffentlich zugänglich sind. Deshalb wurde die Definition nach (4) gewählt und verwendet.

4.4 Ermittlung der Daten zur Leistungsfähigkeit

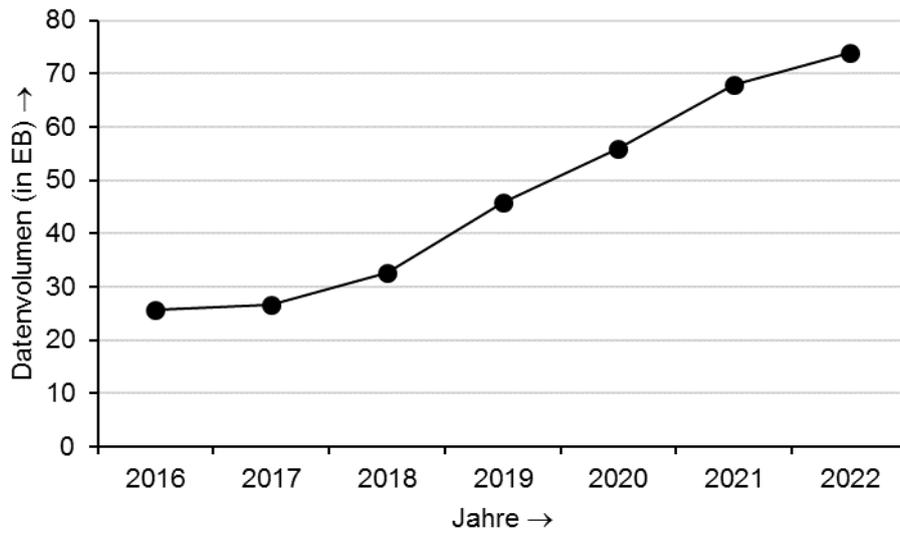
4.4.1 Einleitung

Die Daten zur technischen und wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit werden aus den Geschäfts- und Nachhaltigkeitsberichten der Netzbetreiber sowie aus aggregierten Daten entnommen, die beispielsweise von der Bundesnetzagentur [29] oder Statista [31] über den Telekommunikationsmarkt in Deutschland zur Verfügung gestellt werden.

4.4.2 Deutsche Telekom

Als Kenngröße für die technische Leistungsfähigkeit des Telekommunikationsnetzes wurde das jährliche IP-Datenvolumen im deutschen Telekom-Netz herangezogen. Dies ist für die Jahre 2016 bis 2022 in den entsprechenden CR-Berichten des Unternehmens ausgewiesen [20] und in **Error! Reference source not found.** dargestellt.

Bild 16: Jährliches IP-Datenvolumen im Netz der Deutschen Telekom in Deutschland



Das Datenvolumen steigt im Betrachtungszeitraum deutlich: In dem vergleichsweise kurzen Zeitraum von sechs Jahren hat sich das Datenvolumen im Netz der Deutschen Telekom in Deutschland etwa verdreifacht.

Als Kenngröße für die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit wird der jährliche Umsatz verwendet. Dieser kann für die Jahre 2009 bis 2022 [37] entnommen werden; die Daten dieser Quelle basieren auf der Geschäftsberichterstattung [23].

Bild 17: Jährlicher Umsatz der Deutschen Telekom in Deutschland

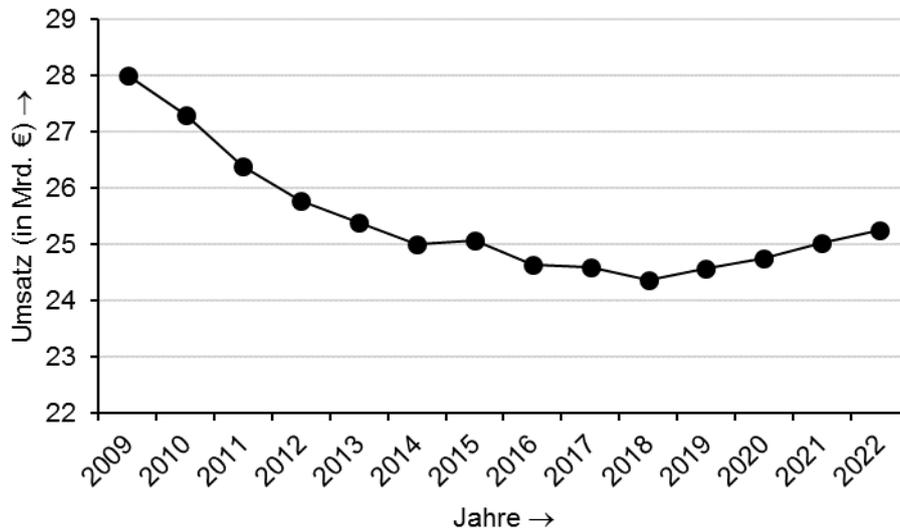
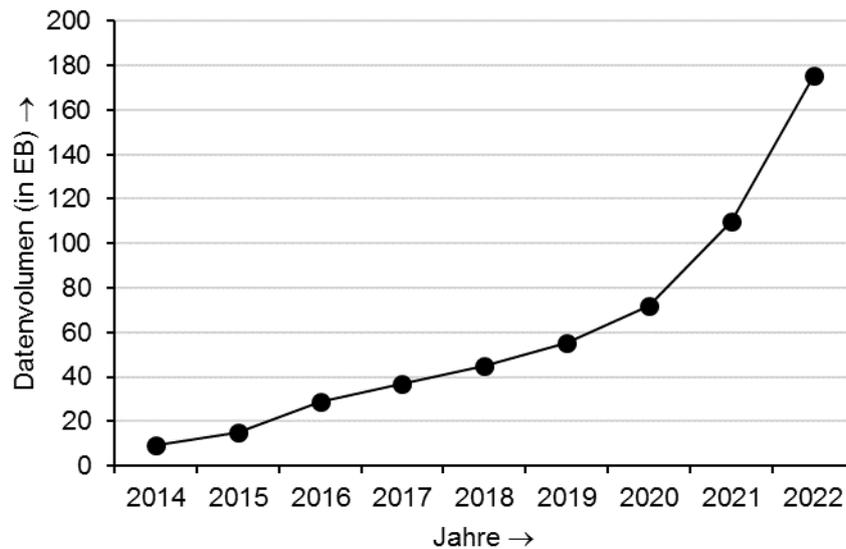


Bild 17 zeigt den Jahresumsatz der Deutschen Telekom in Deutschland: Er fällt von 2009 bis 2018 und steigt danach bis 2022 leicht an.

4.4.3 Vodafone

Als Kenngröße für die technische Leistungsfähigkeit des Telekommunikationsnetzes soll wieder das jährliche Datenvolumen im deutschen Vodafone-Netz herangezogen werden. Eine Angabe für das Vodafone-Gesamtnetz ließ sich nicht ermitteln. Über eine Grafik und weitere Angaben in [43] über das jährliche Datenvolumen im Festnetz konnten die in Bild 18 dargestellten Ergebnisse näherungsweise bestimmt werden.

Bild 18: Jährliches, durch Vodafone angegebenes, Datenvolumen im Festnetz



Nach Vergleich der Größenordnungen mit den für Deutschland insgesamt in [29] berichteten Datenvolumina, scheint es sich dabei jedoch eher um Werte für das deutsche Gesamt-(Fest-) Netz zu handeln, als um das Datenvolumen im deutschen Vodafone-Netz.

Dem allgemeinen Trend folgend, ist ein deutliches Wachstum des Datenvolumens im deutschen Vodafone-Festnetz zu beobachten. Die in Bild 18 dargestellten Werte erscheinen im Licht des in [29] erfassten Gesamtdatenvolumens in deutschen Telekommunikationsnetzen als vergleichsweise hoch, eventuell zu hoch: Hier ist eine Prüfung auf Konsistenz der Daten notwendig und eine Klärung, wie hoch das Datenvolumen im Vodafone-Netz in Deutschland ist.

Als Kenngröße für die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit soll wieder der jährliche Umsatz verwendet werden. Dieser kann für die Jahre 2009 bis 2022 [37] entnommen werden; die Daten dieser Quelle basieren auf der Geschäftsberichterstattung des Unternehmens.

Bild 19: Jährlicher Umsatz von Vodafone in Deutschland

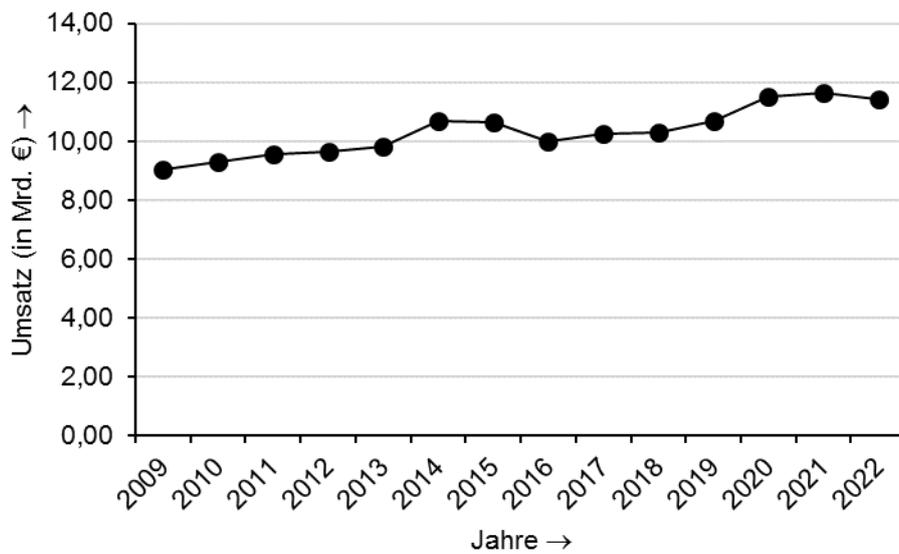


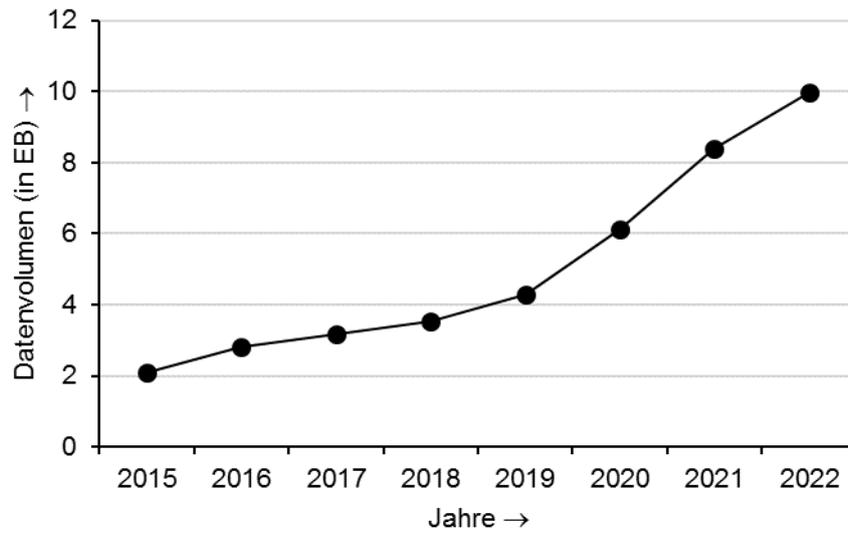
Bild 19 zeigt den Jahresumsatz von Vodafone in Deutschland: Er steigt von 2009 bis 2014, fällt bis 2016 etwas ab und steigt danach bis 2021 leicht an – bevor für 2022 ein leichter Rückgang zu verzeichnen ist.

4.4.4 Telefónica

Das jährliche Datenvolumen im deutschen Telefónica-Netz als Indikator für dessen technische Leistungsfähigkeit konnte aus öffentlich zugänglichen Quellen nicht ermittelt werden. Es ist in Nachhaltigkeitsberichten jedoch die Energieintensität als Verhältnis von jährlichem Gesamtenergiebedarf zum Datenvolumen für die Jahre 2015–2022 angegeben: Bei Kenntnis des jährlichen Gesamtenergiebedarfs (Bild 10) lässt sich mit (3) daher das jährliche Datenvolumen berechnen: Das Ergebnis ist in Bild 20 dargestellt.

Es ist im zu Grunde liegenden Zeitraum ein steigendes Datenvolumen erkennbar. Die absoluten Werte sind – verglichen mit **Error! Reference source not found.** und Bild 18 – relativ niedrig. Hier wären weitere Untersuchungen zum jährlich verarbeiteten und transportierten Datenvolumen notwendig, da – wie beschrieben – für Telefónica Deutschland die Werte nur indirekt aus summarischen Angaben bestimmt werden konnten.

Bild 20: Jährliches IP-Datenvolumen im Netz von Telefónica Deutschland



Als Kenngröße für die wirtschaftliche Leistungsfähigkeit wird, wie zuvor, der jährliche Umsatz verwendet. Dieser kann für die Jahre 2009 bis 2022 [37] entnommen werden; die Daten dieser Quelle basieren auf der Geschäftsberichterstattung [23].

Bild 21: Jährlicher Umsatz von Telefónica Deutschland

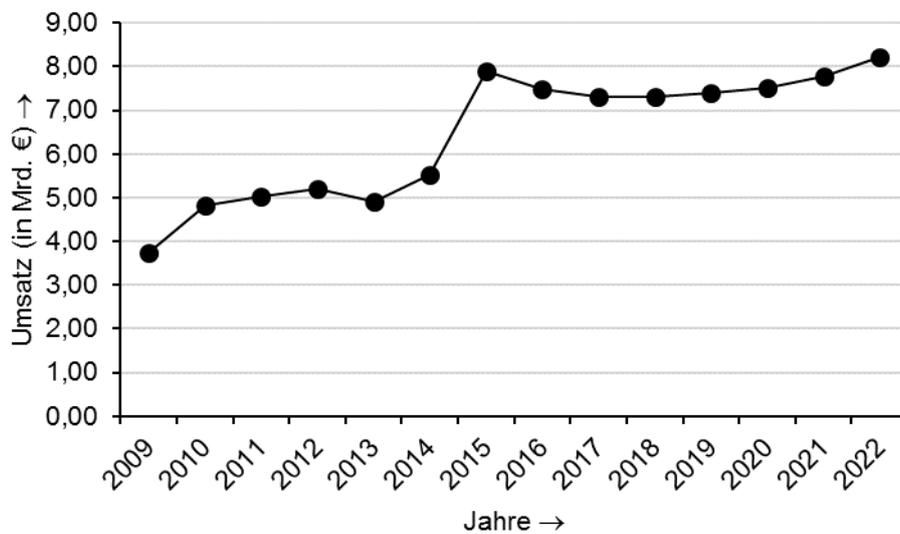


Bild 21 zeigt den Jahresumsatz von Telefónica Deutschland: Er steigt zunächst in den Jahren 2009 bis 2013 und macht dann 2014/15 einen größeren Sprung, bevor es von dort aus einen leichten Rückgang bis 2018 und danach einen Anstieg bis 2022 zu verzeichnen gibt.

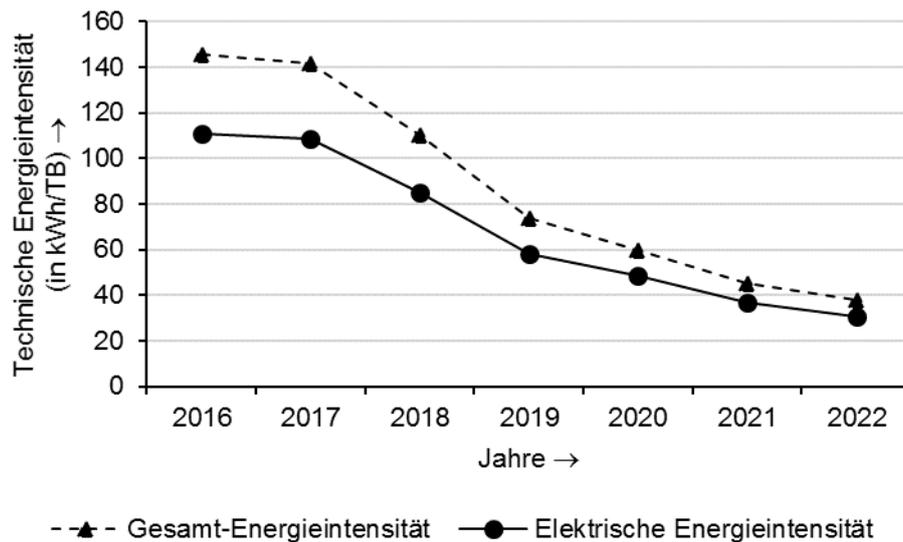
Der Sprung in den Jahren 2014/15 ist wieder auf den Zusammenschluss mit E-Plus zurückzuführen, wobei – ähnlich wie beim Energiebedarf – beim Wert für 2014 auf Grund des Datums der Fusion (01.10.2014) nur das letzte Quartal des Jahres eingegangen ist und daher der Anstieg 2014 im Umsatz noch moderat ausfällt und erst im darauffolgenden Jahr 2015 vollständig sichtbar wird.

4.5 Ergebnisse zu den Kennzahlen

4.5.1 Deutsche Telekom

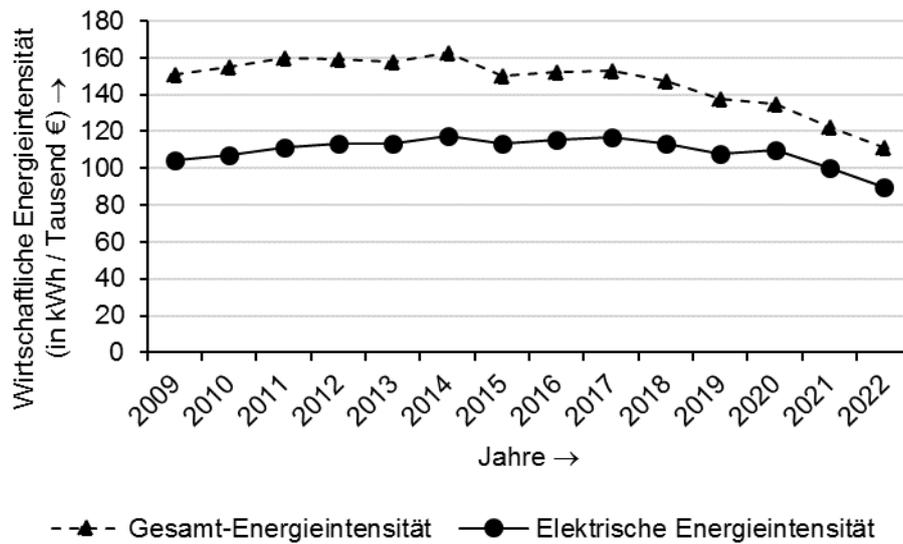
Bild 22 zeigt die technische Energieintensität des Netzes der Deutschen Telekom in Deutschland für den Zeitraum von 2016 bis 2022 für zwei Fälle: Im ersten Fall, der einfach als *Energieintensität* bezeichnet wurde, wurde der jährliche *Gesamtenergiebedarf* verwendet und auf das jährliche Datenvolumen bezogen, im zweiten Fall wurde nur die *elektrische Energie* eines Jahres ins Verhältnis zum (selben) Datenvolumen dieses Jahres gesetzt – und als *elektrische Energieintensität* bezeichnet. Es ist erkennbar, dass sich die Energieintensitäten im betrachteten Zeitraum verringern und damit verbessern: Diese Verbesserung der Energieintensität wird zu einem Teil durch den abnehmenden Bedarf an Energie (bzw. nur elektrischer Energie) verursacht, zu einem größeren Teil jedoch durch den deutlicheren Anstieg des jährlich bewältigten Datenvolumens im Beobachtungszeitraum.

Bild 22: Technische Energieintensität für das Netz der Deutschen Telekom in Deutschland



In Bild 23 ist die wirtschaftliche Energieintensität der Deutschen Telekom in Deutschland für den Zeitraum von 2009 bis 2022 dargestellt – wieder für die erwähnten Fälle mit Gesamtenergie und elektrischer Energie: Die Energieintensität mit Bezug zur Gesamtenergie steigt zunächst an, bleibt dann zwischen 2011 und 2014, fällt dann etwas auf ein Plateau für die Jahre 2015 bis 2017/18 und danach und verbessert sich damit. Die elektrische Energieintensität steigt leicht bis 2014, bleibt dann bis 2018 nahezu konstant und fällt anschließend und erbringt damit Verbesserungen.

Bild 23: Wirtschaftliche Energieintensität der Deutschen Telekom in Deutschland



Da die verwendeten Zahlen für Gesamt- und Elektroenergiebedarf in Bild 22 und Bild 23 identisch sind, ist das veränderte Verhalten dieser wirtschaftlichen Kenngröße gegenüber ihrem technischen Pendant (Bild 22) vor allem dem gegenüber dem (steigenden) Datenvolumen (s. **Error! Reference source not found.** und Bild 17) veränderten jährlichen Jahresumsatz zuzuschreiben: Erst in den Jahren ab 2018 steigt der Jahresumsatz und bewirkt damit eine sichtbar fallende wirtschaftliche Energieintensität. Zuvor ist allenfalls bei der Gesamt-Energieintensität abschnittsweise eine fallende Tendenz erkennbar.

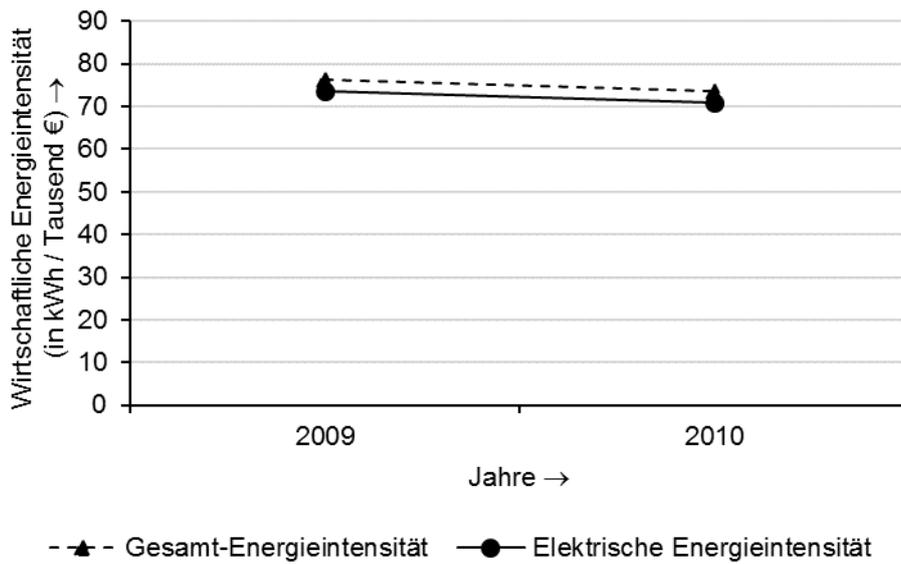
4.5.2 Vodafone

Für die technische und wirtschaftliche Energieintensität können nur für die Jahre Ergebnisse bestimmt und angegeben werden, für die jeweils beide Größen vorliegen (Energiebedarf und Datenvolumen bzw. Umsatz).

Daher kann für die technische Energieintensität von Vodafone in Deutschland kein Ergebnis z. B. in Form einer Grafik angegeben werden.

Die wirtschaftliche Energieintensität ist in Bild 24 für die Jahre dargestellt, für die sowohl Energiebedarf als auch Umsatz ermittelt werden konnten. Die Größenordnung liegt etwas unterhalb der in Bild 23 dargestellten Ergebnisse. Es ist eine fallende Tendenz erkennbar, die jedoch auf Grund der wenigen Datenpunkte wenig aussagekräftig ist.

Bild 24: Wirtschaftliche Energieintensität von Vodafone in Deutschland



4.5.3 Telefónica

In Bild 25 ist die technische Energieintensität des Netzes von Telefónica Deutschland dargestellt, wobei wieder einmal der Gesamtenergiebedarf und einmal der elektrische Energiebedarf zu Grunde liegt. Sie sinkt im betrachteten Zeitraum jeweils signifikant: Dies ist auf das steigende Datenvolumen bei – vergleichsweise – nicht stark veränderlichen Energiebedarfen zurückzuführen. Die absoluten Werte liegen in der Größenordnung der in Bild 22 dargestellten Ergebnisse.

Bild 25: Technische Energieintensität für das Netz von Telefónica in Deutschland

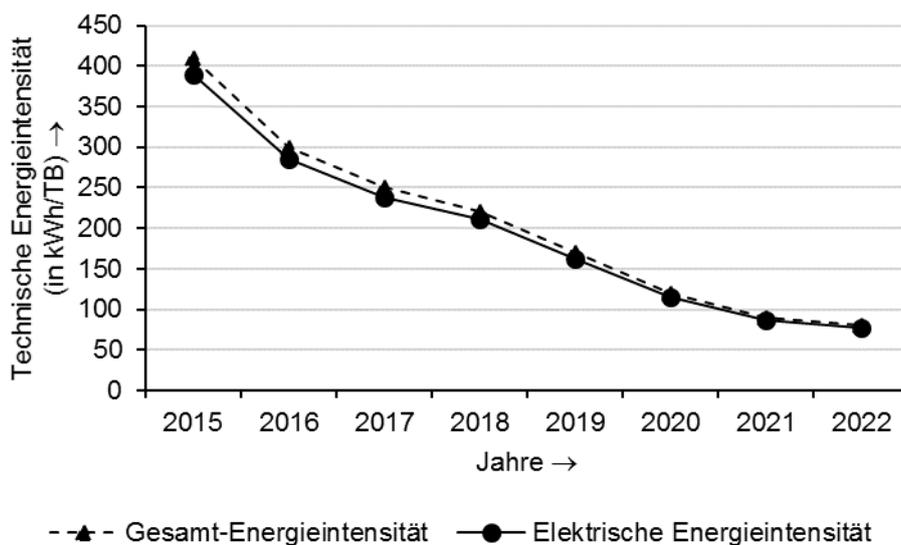
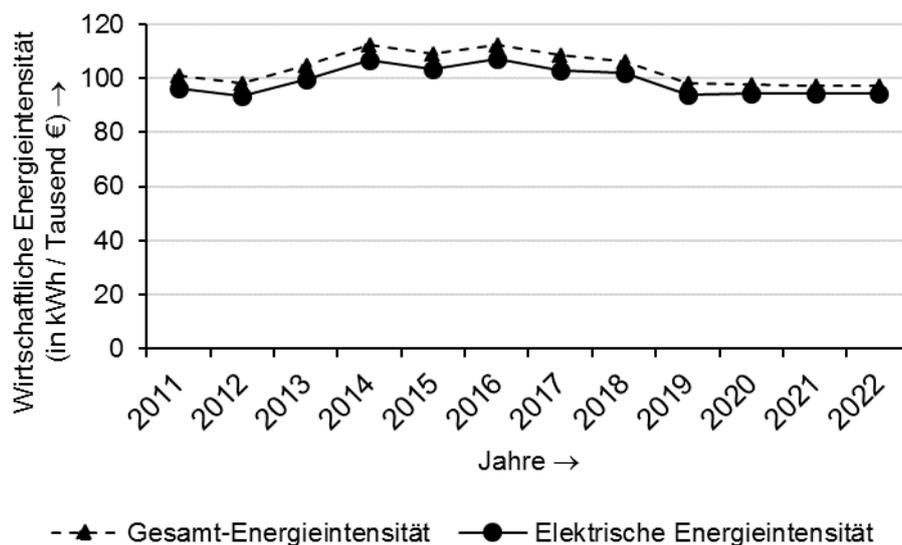


Bild 26 zeigt die wirtschaftliche Energieintensität von Telefónica Deutschland für den Zeitraum von 2011 bis 2022 (für den die benötigten Größen jährlicher Energiebedarf und Jahresumsatz vollständig vorliegen): Die wirtschaftliche Energieintensität ist relativ konstant, da die zeitlichen Verläufe des Energiebedarfs und des Jahresumsatzes im Betrachtungszeitraum von der Form her ähnliche Verläufe aufweisen.

Bei detaillierterer Betrachtung ist von 2012 bis 2014/15 ein Anstieg der wirtschaftlichen Energieintensität erkennbar, gefolgt von einer schwachen Abnahme bis 2019. Von 2019 bis 2022 bleibt dieser Indikator auf konstantem Niveau.

Der absolute Wert dieser Kenngröße liegt in einer vergleichbaren Größenordnung wie die wirtschaftliche Energieintensität der Deutschen Telekom in Bild 23. Der Unterschied zwischen Gesamt-Energieintensität und elektrischer Intensität ist bei Telefónica Deutschland kleiner.

Bild 26: Wirtschaftliche Energieintensität von Telefónica in Deutschland



4.6 Auswertung und Diskussion

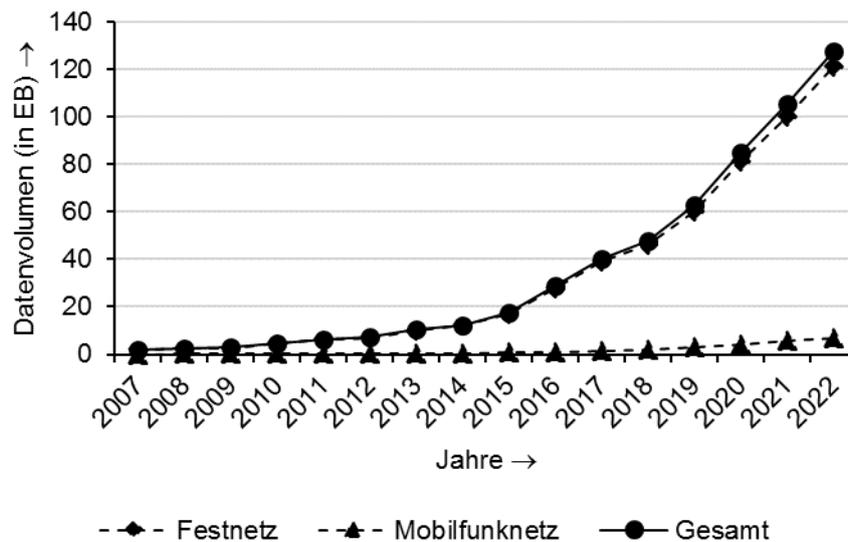
Ziel dieses Kapitels war es, Kennzahlen zu definieren und für die einzelnen Telekommunikationsnetzbetreiber zu berechnen, die den Energiebedarf zur technischen Leistungsfähigkeit des jeweiligen Netzes bzw. zur wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit des Telekommunikationsunternehmens in Beziehung setzen: Dazu wurden beispielhaft einerseits die technische Energieintensität als Verhältnis von Energiebedarf pro Jahr und jährlichem Datenvolumen und andererseits die wirtschaftliche Energieintensität als Verhältnis von Energiebedarf und Jahresumsatz herangezogen.

Die technische Energieintensität zeigt bei den Netzen, für die die notwendigen Daten vorlagen, einen mit fortschreitender Zeit abnehmenden Verlauf, der insbesondere auf das stark steigende Datenvolumen im Betrachtungszeitraum zurückzuführen ist. Die wirtschaftliche Energieintensität liegt bei allen drei Unternehmen in der gleichen Größenordnung – und ist bei der Deutschen Telekom am höchsten.

Diese wirtschaftliche Energieintensität fluktuiert bei den untersuchten Unternehmen nicht sehr stark und zeigt eine Tendenz zur Abnahme in den vergangenen wenigen Jahren, insbesondere bei der Deutschen Telekom.

In Bild 27 ist zur Einordnung der in [29] erfasste Verlauf des Datenvolumens in Fest- und Mobilfunknetzen in Deutschland dargestellt. Sowohl im Fest- als auch im Mobilfunknetz nehmen die jährlichen Datenvolumen jeweils stark mit der Zeit zu; das Datenvolumen im Festnetz ist bedeutend größer als das im Mobilfunknetz.

Bild 27: Jährliches Datenvolumen in deutschen Telekommunikationsnetzen



Auch bei der Berechnung der Kennzahlen ist deutlich geworden, dass fehlende Daten ein Hindernis bei der Erkenntnisgewinnung darstellen, die über die Auswertung der Kennzahlen geschieht. Es ist also, wie schon zuvor geschrieben, wichtig, die fehlenden Daten zu beschaffen bzw. Schätzungen dafür zu ermitteln. Als Methoden sind möglich: Der direkte Weg durch z. B. weitere Recherche und Anfrage der betreffenden Daten bei den Unternehmen, die die Telekommunikationsnetze in Deutschland betreiben. Dies ist der zunächst bevorzugte Weg. Sollten sich hierüber die Daten nicht oder nur teilweise vervollständigen lassen, könnte über statistische Verfahren, wie z. B. eine Zeitreihenanalyse versucht werden, Schätzwerte zu ermitteln.

5 Zusammenfassung und Fazit des Arbeitspakets

Im vorliegenden Arbeitspaket wurden die Energiebedarfsdaten der drei größten Telekommunikationsnetzbetreiber in Deutschland, Deutsche Telekom, Vodafone und Telefónica und damit zusammenhängende technische und wirtschaftliche Daten ermittelt und zusammengestellt. Auf diese Weise war es möglich, den zeitlichen Verlauf des jährlichen Energiebedarfs dieser Unternehmen, insoweit veröffentlicht, darzustellen und Kennzahlen zu bestimmen, die die technische bzw. wirtschaftliche Leistungsfähigkeit der Netze bzw. der dahinterstehenden Unternehmen erfassen. Dazu wurde zunächst eine

Recherche zu möglichen Kennzahlen bzw. KPIs angestellt und dann wurden die technische und wirtschaftliche Energieintensität definiert und soweit wie möglich numerisch ausgewertet und grafisch dargestellt. Um die erwähnten KPIs berechnen und darstellen zu können wurden weitere Kennzahlen, wie Anschlusszahlen und Datenvolumen in den Netzen, zusammengetragen, dargestellt und sind in die Rechnung eingeflossen. Bei der Erhebung der Daten, insbesondere des Energiebedarfs, wurde deutlich, dass diese nicht immer vollständig vorliegen. In weiteren Arbeiten wäre es hier von Interesse, die fehlenden Daten zu beschaffen, z. B. durch direkte Anfrage bei den betreffenden Unternehmen, oder über statistische Verfahren zumindest Schätzwerte zu ermitteln, sofern möglich. Dann ließe sich das bisher erhaltene Bild vervollständigen.

Die drei untersuchten Telekommunikationsnetzbetreiber decken mit ihren Netzen einen sehr großen Anteil der Fläche und der potenziellen Nutzer in Deutschland ab. Es gibt noch eine Reihe weiterer, meist regionaler oder lokaler, Netzanbieter im Fest- oder Mobilfunknetz. Diese greifen zum weitaus größten Teil auf die Netzinfrastruktur der drei betrachteten Netzbetreiber zurück, so dass deren Energiebedarf bereits größtenteils mit erfasst sein dürfte. Trotzdem wäre eine Erweiterung der Untersuchung unter Einbeziehung auch der regionalen und lokalen Anbieter von Netzdiensten von Interesse, um diese Aussage zu verifizieren und ggf. weitere Erkenntnisse zu gewinnen

Auf die beschriebene Art und Weise ist ein Blick in die Vergangenheit der Telekommunikation und insbesondere ihres Energiebedarfes möglich. Die Beschäftigung mit der Vergangenheit – also der Geschichte – ermöglicht es, die Gegenwart besser zu verstehen und den derzeitigen Zustand einordnen zu können. Eine weitere Aufgabe ist es, über das bloße Verständnis hinauszugehen und die Zukunft zu gestalten. Dabei wiederum ist es von Bedeutung, Randbedingungen für technische Entwicklungen zu erkennen und deren Auswirkungen auf die zukünftigen Ergebnisse – hier z. B. bezüglich des Energiebedarfs – möglichst im Vorhinein abschätzen zu können. Für weitere Aktivitäten in diesem Zusammenhang ist es deshalb von besonderem Interesse, eine Vorhersage der Energiebedarfe von Telekommunikationsnetze zumindest näherungsweise zu erarbeiten unter den jetzt bereits erkennbaren Randbedingungen bezüglich z. B. Entwicklung der Anschlusszahlen und des Datenvolumens und insbesondere bezüglich der Entwicklung der Technologie in den Zugangsnetzen, z. B. von DSL-Breitbandanschlüssen (DSL – Digital Subscriber Line) über Kupferkabel hin zu reinen Glasfaseranschlüssen (FTTH – Fiber to the Home) oder von HFC-Breitbandanschlüssen (HFC – Hybrid Fiber Coax) hin zu FTTH-Anschlüssen bzw. von Festnetzanschlüssen sogar hin zu mehr drahtlosen Netzzugängen. In diesem Zusammenhang ließen sich Szenarien für den Technologiewandel entwickeln und modellieren sowie darauf basierend Prognosen für die Energiebedarfsentwicklung erarbeiten.

ARBEITSPAKET 2

Modellierung und Klassifikation von Netzknoten-Standorten
des Telekommunikationsnetzes

6 Zielstellung des zweiten Arbeitspakets

Im Arbeitspaket 2 soll untersucht werden, wie sich die Energiebedarfe eines Telekommunikationsnetzes auf die Netzknoten-Standorte aufteilen. Es soll auf der Grundlage von vom Auftraggeber bereitzustellenden realistischen Energiebedarfs- und ggf. weiteren Daten ein Modell entwickelt werden, das es gestattet, auf der Basis von fiktiven aber realistischen Netzknoten-Standorten eine Klassifikation im Hinblick auf den Leistungs- bzw. Energiebedarf vorzunehmen und Schlussfolgerungen für die elektrische Energieversorgung der Standorte zu ziehen.

Die Leistungen des Arbeitspakets umfassen die Modellierung von Netzknoten-Standorten im Hinblick auf ihren Energiebedarf und ggf. damit zusammenhängenden Kenngrößen (z. B. Datenverkehrslasten) und eine beispielhafte Auswertung der Ergebnisse.

7 Einleitung

Telekommunikationsnetze sollen geografische Gebiete abdecken und mit Telekommunikationsdienstleistungen versorgen können. Sie sind deshalb so organisiert, dass über das abzudeckende Gebiet verteilt Betriebsstellen (BSt) die aktive Technik beherbergen und diese untereinander durch technisch unterschiedlich ausgeprägte Verbindungen verknüpft sind. Dabei unterscheidet man verschiedene Arten der Betriebsstellen bzw. Technikstandorte: So gibt es einerseits die aus dem leitungsgebundenen Fernmeldenetz herrührenden Vermittlungsstellen (VSt), die hierarchisch unterteilt wurden in Zentral-, Haupt-, Knoten- und Orts- bzw. Teilnehmervermittlungsstellen mit den Kabelverzweigern (KVz) als Außenstandorten. Andererseits existieren die für das Mobilfunknetz typischen Basisstationen (BS) mit den Mobilfunkvermittlungsstellen, die oft in Betriebsstellen des Festnetzes mit untergebracht sind. Heutige Telekommunikationsnetze weisen zumeist Netzknoten auf, die nach Kernnetz (backbone, core network), Aggregationsnetz (aggregation network, metro network) und Zugangsnetz (access network) unterteilt sind. Auch die oben genannten Standorte des Fernmeldenetzes können in diese Kategorien eingeordnet werden. Alle diese Kategorisierungen basieren auf einer Einteilung im Hinblick auf das Telekommunikationsnetz und dessen Hierarchie.

Die Betriebsstellen des Telekommunikationsnetzes sind jedoch auch Technikstandorte, die einer Versorgung mit elektrischer Energie bedürfen. In einer anderen Sichtweise lassen sich deshalb diese Betriebsstellen-Standorte auch nach der notwendigen elektrischen Anschlussleistung einteilen. Diese basiert auf der Stellung des jeweiligen Netzknotens im Telekommunikationsnetz – insofern existieren Korrelationen zwischen beiden Sichtweisen –, es treten jedoch weitere Faktoren, wie z. B. die geografische Lage sowie betriebliche und historische Gegebenheiten hinzu.

In diesem Arbeitspaket soll der Versuch unternommen werden, die Netzknotenstandorte im Hinblick auf ihren Bedarf an elektrischer Energie bzw. elektrischer Anschlussleistung zu modellieren. Da echte Energiebedarfsdaten zu den Technikstandorten eines Telekommunikationsnetzunternehmens zum Zeitpunkt dieser Arbeiten nicht vorlagen, stützen sich die Modellierungen auf öffentlich zugängliche Daten einerseits und Annahmen andererseits, um zumindest vorläufige Ergebnisse erzielen zu können. Diese sind in einem weiteren Schritt bei Vorliegen der Energiebedarfs- und Betriebsdaten eines

Telekommunikationsnetzes zu verifizieren. Es werden zunächst globale Daten zu den Telekommunikationsnetzen ermittelt und anschließend Annahmen getroffen, um eine Möglichkeit zu schaffen, wie die Leistungs- und Energiebedarfe von Technikstandorten in Telekommunikationsnetzen modelliert werden können.

8 Anzahl und Klassifizierung der Technikstandorte

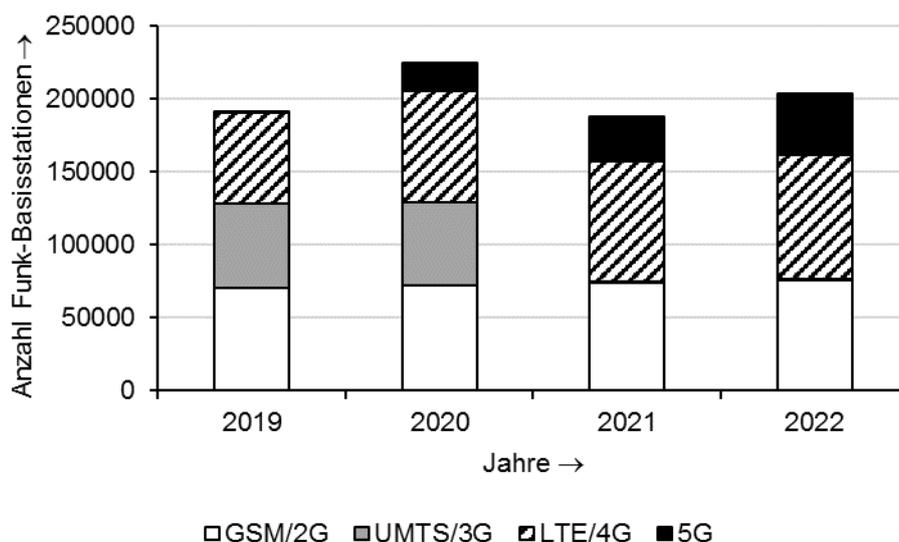
8.1 Anzahl der Technikstandorte in Telekommunikationsnetzen

Die technische Infrastruktur der Telekommunikationsnetze ist geografisch verteilt; ihre Verteilung orientiert sich im Wesentlichen an der räumlichen Verteilung und der Dichte der Bevölkerung und der Industrie. Es handelt sich um mehrere Tausend Technikstandorte in den Betriebsstellen des Festnetzes und mehrere Zehntausend Standorte des Mobilfunknetzes. Zentrale Standorte (z. B. mit vermittelnden Funktionen) von Fest- und Mobilfunknetzen befinden sich oft in gemeinsamen Betriebsstellen.

Um eine numerische Auswertung beispielhaft erarbeiten zu können, werden exemplarisch Netzdaten des Netzes der Deutschen Telekom in Deutschland herangezogen. Die Deutsche Telekom verfügt in ihrem Festnetz in Deutschland beispielsweise über 7900 Anschlussbereiche [51] und damit über ebenso viele Betriebsstellen, von denen 18 dem Kernnetz zugerechnet werden können [49], 900 dem Aggregations- bzw. Metronetz und die verbleibenden 6982 Betriebsstellen reine Zugangnetz-knoten sind, die der Anbindung der Teilnehmer dienen. Außerdem existieren in diesem Netz ca. 330000 Kabelverzweiger (KVz) [50], [52], die – ursprünglich rein passiv als Flexibilitätspunkte zur Verschaltung von Haupt- und Verzweigungskabeln im Fernmeldenetz fungierend – seit Einführung der Breitbandtechnik VDSL (Very High-Speed Digital Subscriber Line) zu einem großen Teil mit aktiver Technik bestückt wurden und als Teilnehmer-nahe aktive Technikstandorte, sogenannte Multifunktionsgehäuse (MFG), genutzt werden, die ihrerseits wiederum per optischer Übertragungstechnik an die Zugangnetz-knoten angebunden sind. Für die weiteren Betrachtungen wird angenommen, dass ungefähr die Hälfte dieser Kabelverzweiger als aktive Technikstandorte genutzt werden und somit wird eine Anzahl von 177000 aktiven KVz-Standorten bzw. MFG zu Grunde gelegt **Error! Reference source not found..**

Neben den Festnetzen existieren Mobilfunknetze, die sich historisch etwas später entwickelt haben, in der Zwischenzeit bezüglich Nutzung und Bedeutung jedoch als unverzichtbar angesehen werden können. In Bild 28 ist die Entwicklung der Gesamtzahl der Funk-Basisstationen in den Mobilfunknetzen in Deutschland dargestellt [29]. Sie lag im Jahr 2022 bei 203241. Erkennbar ist, dass die Anzahl der zur Sicherstellung der Netzabdeckung wichtigen GSM/2G-Basisstationen auf etwa gleichem Niveau verbleibt, die Anzahl der UMTS/3G-Basisstationen auf Grund der UMTS-Abschaltung sehr stark abnimmt und die Anzahl der modernen 5G-Basisstationen wächst.

Bild 28: Anzahl der Funk-Basisstationen in Deutschland



An einem Antennenstandort befinden sich zumeist technische Anlagen für verschiedene der Mobilfunkstandards. Die Anzahl der Antennenstandorte (in Deutschland Ende 2022: 88820) ist daher geringer als die oben angegebene Anzahl der Basisstationen [30]. Gemeinsam von mehreren Netzbetreibern genutzte Mobilfunk-Infrastruktur (sogenanntes *site sharing*) zählt bei der Angabe der Standorte jedoch mehrfach [30]. Ein Großteil der Mobilfunkbasisstationsstandorte ist mit 2G-Technik ausgerüstet – auf Grund der vergleichsweise großen Reichweite dieser Technik jedoch nicht alle Standorte. Nahezu alle Standorte verfügen inzwischen über 4G-Technik. Etwa die Hälfte der Antennenstandorte waren Ende 2022 mit 5G-Technik bestückt.

Als Annahme für die Modellierung kann auf dieser Basis die Anzahl von ca. 75000 Mobilfunk-Basisstationsstandorten für ganz Deutschland zu Grunde gelegt werden – wie dies im Projektantrag zum Hin führungsprojekt CO 2030 [48] ausgewiesen ist. Auf die Deutsche Telekom entfallen beispielsweise ca. 33000 Mobilfunkstandorte [53], [54].

Üblich ist die zusammenfassende Einteilung der Technikstandorte in folgende Kategorien:

- *Indoor*-Standorte sind die Betriebsstellen des Netzes, die in Gebäuden untergebracht sind, also die Kernnetz-, Aggregationsnetz- und Zugangsnetzstandorte.
- *Outdoor*-Standorte sind die Technikstandorte, die zur Versorgung in der Fläche, zumeist außerhalb von Gebäuden (*im Feld*) errichtet sind, hier also die Kabelverzweiger- und Mobilfunk-Basisstationsstandorte.

8.2 Klassifizierung der Technikstandorte nach elektrischer Anschlussleistung

Technikstandorte der Telekommunikationsnetze lassen sich vereinfachend in drei Klassen einteilen, wenn man die Kategorisierung bezüglich des Bedarfes an elektrischer Leistung vornimmt [48]:

- Standorte mit einem Leistungsbedarf bis etwa 10 kW
- Standorte mit einem Leistungsbedarf bis bzw. von etwa 100 kW
- Standorte mit einem Leistungsbedarf im MW-Bereich

Als numerischer Anhaltspunkt mag dienen, dass die Deutsche Telekom in Deutschland über ca. 1000 Standorte der mittleren Kategorie (Leistungsbedarf bis bzw. von ca. 100 kW) verfügt [48].

Eine detailliertere Betrachtung zeigt – entsprechend [48] – folgendes Bild: Die Einteilung bezüglich des elektrischen Energiebedarfes und damit bezüglich der elektrischen Anschlussleistung führt auf die schon erwähnte Einteilung in drei Klassen. Es sollen einige weitere Angaben zu diesen Technikstandorten im Netz der Deutschen Telekom gemacht werden:

- Etwa 25 Technikstandorte weisen eine Anschlussleistung von $P \geq 1$ MW auf. Typischerweise werden diese großen Betriebsstellen gesondert behandelt und mit Energieversorgungsanlagen ausgestattet, z. B. zur Nutzung regenerativer Energien und zur Absicherung gegen Ausfälle. Es handelt sich dabei um Standorte des Kernnetzes (IP-Backbone) und um Rechenzentren.
- Standorte, die im Festnetz weniger als 500 Teilnehmer versorgen und Mobilfunkbasisstationsstandorte weisen oftmals eine Anschlussleistung von $P < 10$ kW auf und sind vergleichsweise kleine Standorte im Hinblick auf die Anschlussleistung.
- Eine Vielzahl der Technikstandorte fällt in die Klasse von $10 \text{ kW} \leq P \leq 1 \text{ MW}$. Diese Standorte sind in der Regel dem Aggregations- (bzw. Metro-) Netz bzw. dem Zugangnetz zuzuordnen. Sie dienen nahezu flächendeckend der Versorgung der Bevölkerung und der Wirtschaft sowie von Behörden mit Telekommunikationsdiensten. Es handelt sich hierbei um mehrere Tausend Standorte im Netz der Deutschen Telekom in Deutschland.

Auf der Grundlage dieser Basisinformationen sollen nun numerische Annahmen für die Modellierung getroffen werden.

8.3 Randbedingungen für die Modellierung

Bei der Modellierung der Technikstandorte hinsichtlich der Leistung soll die elektrische Energie bzw. Leistung zu Grunde gelegt werden. Dabei ist insbesondere die elektrische Energie von Interesse, die zum Betrieb der Telekommunikationsanlagen bzw. der Netztechnik aufgewendet wird – ohne die für den Betrieb von Büros und Ladengeschäften anderweitig eingesetzte elektrische Energie. Stehen nur Angaben über die insgesamt jährlich aufgewendete elektrische Energie $E_{el\ ges}$ zur Verfügung, so ist eine Annahme zu treffen, welche Energiemenge

$$E_{el} = q \cdot E_{el\ ges} \tag{5}$$

davon für den reinen Netzbetrieb verwendet wird. Der Anteil q hängt beispielsweise davon ab, wieviel Büros und Ladengeschäfte ein Telekommunikationsnetzbetreiber unterhält – und damit auch z. B. von der Anzahl der Mitarbeiter und der Präsenz in der Fläche. Diese Randbedingungen sind für die drei betrachteten Telekommunikationsunternehmen sehr unterschiedlich und so können diese Anteile in der Realität ebenfalls schwanken.

Die für den reinen Netzbetrieb aufgewendete elektrische Energie wird in den Nachhaltigkeitsberichten der Deutschen Telekom nicht separat ausgewiesen. Indizien in diesen Berichten [20] deuten darauf hin, dass mehr als drei Viertel der elektrischen Energie im Netz der Deutschen Telekom für die direkte Versorgung der Telekommunikationsnetztechnik aufgewendet wird, d. h. $q \approx 0,8 \dots 0,9$. Die Nachhaltigkeitsberichte von Vodafone [22] und Telefónica [21] enthalten dazu detailliertere Angaben und lassen darauf schließen, dass dieser Anteil dort bei $q \approx 0,9$ bzw. $q \approx 0,95$ liegt.

9 Modell für die Leistungs- bzw. Energieaufteilung auf die Technikstandorte

9.1 Einleitung

Es soll nun ein Modell entwickelt werden, das auf der Grundlage eines beispielhaften Telekommunikationsnetzunternehmens die Anzahlen der Technikstandorte und den Leistungsbedarf in den einzelnen Standortklassen so verknüpft, dass sich der jeweilige jährliche Gesamtenergiebedarf ergibt.

Auf Grund der Datenlage wird das Netz der Deutschen Telekom gewählt, die hierfür zum Zeitpunkt der Untersuchung die meisten und detailliertesten Angaben vorlagen bzw. ermittelt werden konnten. Es wird bei der Anzahl der Standorte, soweit diese variieren, das Jahr 2022 zu Grunde gelegt, da dieses das bisher letzte Jahr ist, für das die Energiebedarfe vorliegen. Es kommt damit dem aktuellen Zustand am nächsten. In den einzelnen Standortklassen werden die Leistungsbedarfe der Einfachheit halber und mangels anderer und genauerer Daten als gleich verteilt angenommen.

9.2 Numerische Annahmen für das Technikstandorte-Modell

Die den numerischen Annahmen zu Grunde gelegten Annahmen sind in den vorangegangenen Abschnitten dargelegt und begründet worden. In Tabelle 1 sind die Daten zu den Anzahlen der Technikstandorte und der Leistungsaufnahme je Standort im Hinblick auf das Netz der Deutschen Telekom in Deutschland zusammengestellt: Die Modellierung insbesondere der Leistung basiert darauf, dass für die einzelnen Standorttypen plausible Annahmen so getroffen wurden, dass in der Summe die gesamte für die Telekommunikationsnetztechnik aufgewendete Leistung

$$P_{\text{el}} = \frac{E_{\text{el}}}{T} = \frac{q \cdot E_{\text{el ges}}}{T} \quad (6)$$

resultiert (für $E_{\text{el ges}} = 2300$ GWh als näherungsweise jährlichem elektrischen Gesamtenergiebedarf der Deutschen Telekom in Deutschland für das das Jahr 2022 und mit $q = 0,9$ und $T = 8760$ h).

Es wird damit implizit also vorausgesetzt, dass alle Technikstandorte eines Standorttyps jeweils die gleiche Leistung aufnehmen und dass diese Leistung konstant über den betrachteten Zeitabschnitt (hier: ein Jahr; entsprechend $T = 8760$ h) ist. Beide Annahmen sind der Einfachheit und Übersichtlichkeit des Modells geschuldet und bedürfen weiterer Untersuchung und ggf. Verfeinerung.

Tabelle 1: Numerische Annahmen zur Anzahl der Technikstandorte und zur Leistung je Standort

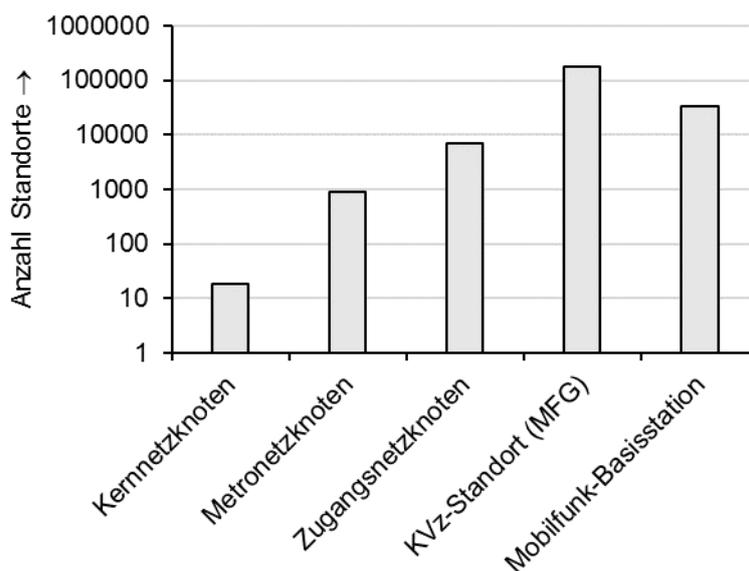
Standortkategorie	Standorttyp	Anzahl	Leistung (in kW)
Indoor-Standort	Kernnetznoten	18	1000
	Metronetznoten	900	30
	Zugangsnetznoten	6982	4
Outdoor-Standort	Multifunktionsgehäuse	177000	0,5
	Mobilfunk-Basisstation	33000	2,2

9.3 Technikstandorte-Modell und Ergebnisse zur Leistungsaufnahmen

Im Bild 29 ist die Anzahl der jeweiligen Technikstandorte in den angegebenen Kategorien entsprechend Tabelle 1 dargestellt, die der beispielhaften numerischen Modellierung zu Grunde liegen.

Vom Kern des Netzes aus mit den wenigen Kernnetzstandorten nimmt zum Rand des Netzes, dem Zugangsnetz, hin die Anzahl der Indoor-Standorte zu. Eine vergleichsweise sehr große Anzahl von Netzknoten zur Abdeckung der Fläche ist in den Outdoor-Standorten Multifunktionsgehäuse und Mobilfunkbasisstation untergebracht.

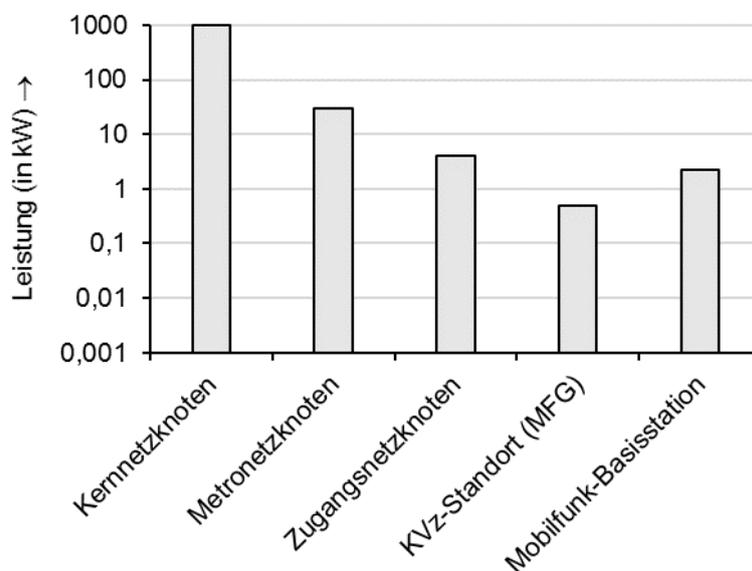
Bild 29: Anzahl der Standorte für die Kategorien der Technikstandorte



Im Bild 30 ist die Leistungsaufnahme für jeweils einen Standort je Standorttyp gezeigt, wie sie der Tabelle 1 entnommen werden kann.

Die Leistungsaufnahme je Indoor-Standort nimmt ausgehend vom Kern des Netzes zum Netzrand hin ab, verhält sich also zur Anzahl der Standorte gegenläufig. Die Outdoor-Standorte sind zumeist kleine Standorte mit daraus resultierend vergleichsweise geringer Leistungsaufnahme.

Bild 30: Leistungsbedarfe der Standorte für die Kategorien der Technikstandorte



Im Bild 31 ist die Aufteilung der Gesamtleistungsaufnahme des Telekommunikationsnetzes auf die Technikstandortkategorien dargestellt. Es zeigt sich, dass unter den gegebenen Voraussetzungen in

Summe ein deutlich größerer Teil der Gesamtleistung für die Outdoor-Standorte (Multifunktionsgehäuse des Festnetzes und Mobilfunkbasisstationen) aufzuwenden ist, als für die Indoor-Standorte (Betriebsstellen des Kern-, Metro- und Zugangsnetzes). Dies geht auf die große für die Versorgung in der Fläche notwendige Anzahl der genannten Outdoor-Standorte zurück, auch wenn sie – individuell betrachtet – jeweils eine vergleichsweise kleine Leistungsaufnahme zeigen. Es ist daher für die Wirksamkeit und den Effekt von Effizienzmaßnahmen wichtig, diese kleinen aber vielen Standorte für Effizienzsteigerungen in den Blick zu nehmen bzw. im Blick zu behalten – und dabei die größeren, aber deutlich weniger Indoor-Standorte trotzdem mit Effizienzmaßnahmen energetisch zu ertüchtigen.

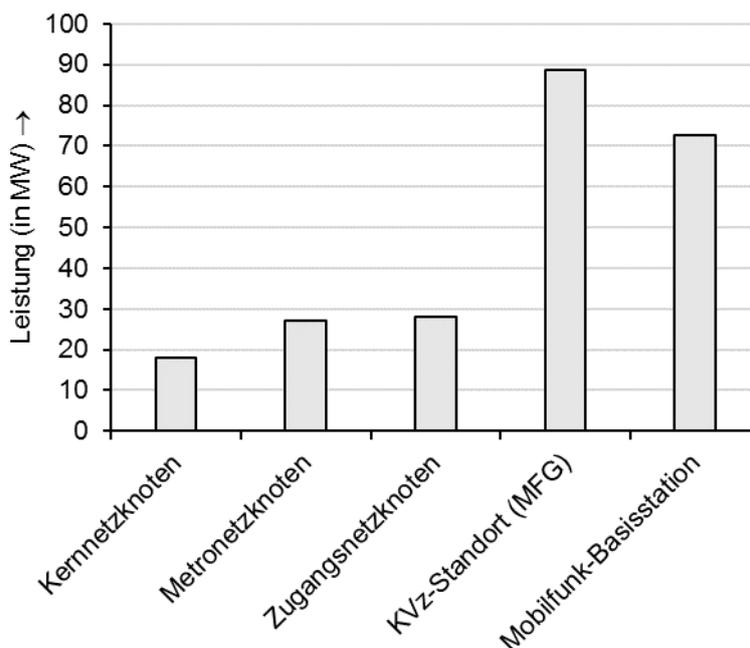


Bild 31: Aufteilung der Gesamtleistung des Telekommunikationsnetzes auf die Technikstandortkategorien

10 Zusammenfassung und Fazit des Arbeitspakets

Im vorliegenden Arbeitspaket wurde untersucht, wie sich die Energie- und Leistungsbedarfe eines Telekommunikationsnetzes auf die Netzknoten-Technikstandorte aufteilen. Es wurde ein einfaches und übersichtliches Modell angegeben, mit dem über die Einteilung der Standorte eines Telekommunikationsnetzes in Kategorien und unter der Annahme, dass innerhalb der Standortkategorien die Leistungsaufnahme je Standort konstant ist, der Gesamtleistungs- und -energiebedarf bestimmt und die Aufteilung der Gesamtleistung auf die Standortkategorien ermittelt werden kann.

Eine beispielhafte numerische Auswertung wurde auf der Grundlage der aus dem Netz der Deutschen Telekom in Deutschland bekannten Angaben durchgeführt: Es zeigt sich, dass in der Gesamtsicht insbesondere die Outdoor-Standorte (Mobilfunkbasisstationen und Multifunktionsgehäuse des Festnetzes) auf Grund ihrer Vielzahl den größten Anteil am Gesamtenergie- und -leistungsbedarf aufweisen.

Die Indoor-Standorte sind von der Anzahl weniger und obwohl sie je Standort deutlich größere Leistungsaufnahmen zeigen, ist ihr summarischer Anteil am Gesamtleistungsbedarf kleiner.

Das in diesem Arbeitspaket entwickelte Modell erlaubt Erkenntnisse zu Leistungs- und Energiebedarfen in Bezug zu Netztechnikstandorten und deren Kategorien. Es ist insofern einfach gehalten, als dass es für alle Technikstandorte eines Standorttyps bzw. einer Standortkategorie jeweils eine gleiche Leistungsaufnahme unterstellt, die auch im Jahresverlauf konstant ist. Eine Verfeinerung des Modells ist in einigen Dimensionen denkbar, um es praxisnäher zu gestalten: So könnten in zukünftigen Untersuchungen innerhalb der Standortkategorien nicht-konstante Leistungsaufnahmen modelliert werden und auch zeitabhängige Verläufe der Leistungsaufnahme von Netzstandorten, um z. B. den Effekten von Energieeffizienzmaßnahmen Rechnung tragen zu können, die auf der Anpassung der Netzkapazität an zeitlich fluktuierende Verkehrsbedarfe basieren.

QUELLEN- UND LITERATURVERZEICHNIS

- [1] LAMBERT, S.; VAN HEDDEGHEM, W.; VERECKEN, W.; LANNOO, B.; COLLE, D. ; PICKAVET; M.: Worldwide Electricity Consumption of Communication Networks. In: *Optics Express* 20 (2012), Dezember, Nr. 26, S. B513–B524
- [2] VAN HEDDEGHEM, W.; LAMBERT, S.; LANNOO, B.; COLLE, D.; PICKAVET, M.; DEMEESTER, P.; Trends in Worldwide ICT Electricity Consumption from 2007 to 2012. *Computer Communications* 50 (2014), S. 64–76.
- [3] LANGE, C.; KOSIANKOWSKI, D.; BETKER, A.; SIMON, H.; BAYER, N.; V. HUGO, D.; LEHMANN, H.; GLADISCH, A.: Energy Efficiency of Load-Adaptively Operated Telecommunication Networks (Eingeladener Beitrag). In: *Journal of Lightwave Technology (JLT)* 32 (2014), Januar/Februar, Nr. 4, S. 571–590
- [4] LANGE, C.; KOSIANKOWSKI, D.; WEIDMANN, R.; GLADISCH, A.: Energy Consumption of Telecommunication Networks and Related Improvement Options (Eingeladener Beitrag). In: *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics (JSTQE)* 17 (2011), März/April, Nr. 2, S. 285–295
- [5] STOBBE, L., HINTEMANN, R., PROSKE, M., CLAUSEN, J., ZEDEL, H., BEUCKER, S.: *Entwicklung des IKT-bedingten Strombedarfs in Deutschland*. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie, Fraunhofer IZM und Borderstep Institut, Berlin, 2015, <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/entwicklung-des-ikt-bedingten-strombedarfs-in-deutschland-abschlussbericht.pdf> – Zugriff am 01.11.2023
- [6] MALMODIN, J.; LUNDÉN, D.: *The Electricity Consumption and Operational Carbon Emissions of ICT Network Operators 2010–2015*. Kungliga Tekniska Högskolan (KTH): Stockholm, Schweden, 2018
- [7] MALMODIN, J.; LUNDÉN, D.: The Energy and Carbon Footprint of the Global ICT and E&M Sectors 2010–2015. In: *Sustainability* 10 (2018), S. 3027
- [8] LUNDÉN, D.; MALMODIN, J.; BERGMARK, P.; LÖVEHAGEN, N.: Electricity Consumption and Operational Carbon Emissions of European Telecom Network Operators. In: *Sustainability* 14 (2022), S. 2637
- [9] TUCKER, R. S.: Green Optical Communications Part I: Energy Limitations in Transport. In: *IEEE Journal of Selected Topics In Quantum Electronics* 17 (2011), März/April, Nr. 2, S. 245–260
- [10] TUCKER, R. S.: Green Optical Communications Part II: Energy Limitations in Networks. In: *IEEE Journal of Selected Topics In Quantum Electronics* 17 (2011), März/April, Nr. 2, S.

261–274

- [11] KHODAKARAMI, H.; SHIEH, W.: On the Energy Efficiency of Modulation Formats for Optical Communications. In: *IEEE Photonics Technology Letters* 25 (2013), Februar, Nr. 3, S. 275–278
- [12] UYSAL-BIYIKOGLU, E.; PRABHAKAR, B.; EL GAMAL, A.: Energy-Efficient Packet Transmission Over a Wireless Link. In: *IEEE/ACM Transactions on Networking* 10 (2002), Nr. 4, S. 487–499
- [13] PUYPE, B.; VEREECKEN, W.; COLLE, D.; PICKAVET, M.; DEMEESTER, P.: Multilayer Traffic Engineering for Energy Efficiency. In: *Photonic Network Communications* 12 (2011) Nr. 2, S. 127–140
- [14] SCHIEN, D.; PREIST, C.: Approaches to Energy Intensity of the Internet. In: *IEEE Communications Magazine* 52 (2014), November, Nr. 11, S. 130–137
- [15] HINTON, K.; JALALI, F.: A Survey of Internet Energy Efficiency Metrics. In: *5th International Conference on Smart Cities and Green ICT Systems (SMARTGREENS)*. Rom (Italien), 23.–25. April 2016, S. 243–251
- [16] LARSEN, K. K.: Telco energy consumption – a path to a greener future? In: *technoeconomyblog*. 03. Oktober 2023, <https://technoeconomyblog.com/2023/10/03/telco-energy-consumption-a-path-to-a-greener-future/> – Zugriff am 27.10.2023
- [17] Deutsche Telekom: Website des Unternehmens. <https://www.telekom.com> – Zugriff am 27.11.2023
- [18] Vodafone: Website des Unternehmens. <https://www.vodafone.com> – Zugriff am 27.11.2023
- [19] Telefónica: Website des Unternehmens. <https://www.telefonica.com/en/> – Zugriff am 27.11.2023
- [20] Deutsche Telekom: Corporate Responsibility Bericht. <https://www.cr-bericht.telekom.com> – Zugriff am 10.11.2023
- [21] Telefónica: Nachhaltigkeits-Reporting. <https://www.telefonica.de/nachhaltigkeit/reporting.html> – Zugriff am 10.11.2023
- [22] Vodafone: Sustainability Reports. <https://www.vodafone.com/about-vodafone/reporting-centre/sustainability-reports> – Zugriff am 10.11.2023
- [23] Deutsche Telekom: Geschäftsbericht. <https://bericht.telekom.com/> und <https://www.telekom.com/de/investor-relations/finanzpublikationen/downloads> –

Zugriff am 10.11.2023

- [24] Telefónica: Investor Relations. <https://www.telefonica.de/investor-relations.html> – Zugriff am 10.11.2023
- [25] Vodafone: Reports & Information. <https://investors.vodafone.com/reports-information> – Zugriff am 10.11.2023
- [26] Vodafone Deutschland: Corporate Responsibility Report – Umwelt- und Sozialbericht 2003/2004. https://www.vodafone.de/downloadarea/CSR_2004_2005.pdf – Zugriff am 24.11.2023
- [27] Vodafone Deutschland: Corporate Responsibility Report 2008/2009. https://www.vodafone.de/downloadarea/Vodafone_CR_Report_Internet_02_11_2009.pdf – Zugriff am 24.11.2023
- [28] Vodafone Deutschland: Corporate Responsibility Report 2010/2011. https://www.vodafone.de/downloadarea/VOD-NHB_2010_2011_WEB.pdf – Zugriff am 24.11.2023
- [29] Bundesnetzagentur: Telekommunikation – Marktdaten. <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/Telekommunikation/Marktdaten/start.html> – Zugriff am 10.11.2023
- [30] Bundesnetzagentur: Jahresbericht Telekommunikation 2022. https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Mediathek/Be-richte/2023/JB_TK_2022.pdf?__blob=publicationFile&v=1 – Zugriff am 08.12.2023
- [31] Statista: Statistiken zu Technik und Telekommunikation. <https://de.statista.com/> – Zugriff am 10.11.2023
- [32] Statistisches Bundesamt. Destatis. <https://www.destatis.de/> – Zugriff am 10.11.2023
- [33] RAUH, T.: Telekom – Kundenzahlen und Marktanteile der Telekom im DSLWEB Business-Report. *DSLweb*. <https://www.dslweb.de/telekom.php> – Zugriff am 27.11.2023
- [34] Wikipedia: Deutsche Telekom. *Wikipedia, die freie Enzyklopädie*. https://de.wikipedia.org/wiki/Deutsche_Telekom – Zugriff am 27.11.2023
- [35] Deutsche Telekom: Anzahl der Festnetzanschlüsse der Deutschen Telekom in Deutschland in den Jahren 2003 bis 2022. *Statista. Statista GmbH*. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/150696/umfrage/festnetzanschluesse-der-deutschen-telekom-seit-2003/> – Zugriff am 15.11.2023
- [36] Deutsche Telekom: Anzahl der Mobilfunkkunden im Netz der Deutschen Telekom in Deutschland in den Jahren 2002 bis 2022. *Statista. Statista GmbH*.

- <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/162795/umfrage/anzahl-der-mobilfunkkunden-der-deutschen-telekom-in-deutschland/> – Zugriff am 15.11.2023
- [37] Statista: Umsatz der führenden Telekommunikationsunternehmen auf dem deutschen Markt von 2008 bis 2022. *Statista. Statista GmbH.* <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/187371/umfrage/umsatz-der-fuehrenden-unternehmen-auf-dem-telekommunikationsmarkt-in-deutschland/> – Zugriff am 17.11.2023
- [38] RAUH, T.: Vodafone – Kundenzahlen und Marktanteile von Vodafone im DSLWEB Business-Report. *DSLweb.* <https://www.dslweb.de/vodafone.php> – Zugriff am 24.11.2023
- [39] Wikipedia: Vodafone Deutschland. *Wikipedia, die freie Enzyklopädie.* https://de.wikipedia.org/wiki/Vodafone_Deutschland – Zugriff am 24.11.2023
- [40] Wikipedia: Vodafone Group. *Wikipedia, die freie Enzyklopädie.* https://de.wikipedia.org/wiki/Vodafone_Group – Zugriff am 24.11.2023
- [41] Statista: Anzahl der Mobilfunkkunden von Vodafone Deutschland in den Geschäftsjahren 2008/2009 bis 2022/2023. *Statista. Statista GmbH.* <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/163966/umfrage/mobilfunkkunden-von-vodafone-in-deutschland-seit-2008/> – Zugriff am 24.11.2023
- [42] Statista: Breitbandkunden der führenden Anbieter in Deutschland von 2011 bis 2022. *Statista. Statista GmbH.* <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/202093/umfrage/anzahl-der-breitbandkunden-in-deutschland-nach-anbietern/> – Zugriff am 24.11.2023
- [43] Vodafone: Glasfaser & Kabel – Der Anschluss ans Internet der Zukunft. <https://www.vodafone.de/unternehmen/netz-kabelglasfaser.html> – Zugriff am 24.11.2023
- [44] RAUH, T.: o2 – Kundenzahlen und Marktanteile von o2 im DSLWEB Business-Report. *DSLweb.* <https://www.dslweb.de/o2.php> – Zugriff am 27.11.2023
- [45] Wikipedia: Vodafone Deutschland. *Wikipedia, die freie Enzyklopädie.* <https://de.wikipedia.org/wiki/Telef%C3%B3nica> – Zugriff am 27.11.2023
- [46] Statista: Anzahl der Mobilfunkanschlüsse im Netz von Telefonica in Deutschland von 2002 bis 2022. *Statista. Statista GmbH.* <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/321458/umfrage/anzahl-der-mobilfunkanschluesse-im-netz-von-telefonica-o2-in-deutschland/> – Zugriff am 29.11.2023
- [47] Wikipedia: Energieintensität. *Wikipedia, die freie Enzyklopädie.* <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Energieintensit%C3%A4t&oldid=236129952> – Zugriff am

17.11.2023

- [48] CO 2030: Central Office 2030 – effektive, nachhaltige und resiliente Telekommunikationsnetze im Energiesystem. Vorhabensbeschreibung des FuE-Hinführungsprojekts, 17.02.2023
- [49] BETKER, A.; GAMRATH, I.; KOSIANKOWSKI, D.; LANGE, C.; LEHMANN, H.; PFEUFFER, F.; SIMON, F.; WERNER, A: Comprehensive Topology and Traffic Model of a Nationwide Telecommunication Network. In: *Journal of Optical Communications and Networking (JOCN)* 6 (2014), November, Nr. 11, S. 1038–1047. <https://opus4.kobv.de/opus4-zib/frontdoor/deliver/index/docId/5267/file/Netzmodell.pdf> – Zugriff am 11.12.2023
- [50] NEUHETZKI, T.: Weniger als ein Drittel der Kabelverzweiger mit Vectoring versorgt. *Teltarif.de*. 06.02.2017, <https://www.teltarif.de/vectoring-ausbau-stand-kvz-anzahl/news/67340.html> – Zugriff am 11.12.2023
- [51] Wikipedia: Anschlussbereich. *Wikipedia, die freie Enzyklopädie*. <https://de.wikipedia.org/wiki/Anschlussbereich> – Zugriff am 13.12.2023
- [52] Wikipedia: Kabelverzweiger. *Wikipedia, die freie Enzyklopädie*. <https://de.wikipedia.org/wiki/Kabelverzweiger> – Zugriff am 13.12.2023
- [53] Deutsche Telekom: Capital Markets Day 2021 – Präsentation. <https://www.telekom.com/de/investor-relations/finanzpublikationen/kapitalmarkttag/kapitalmarkttag-2021> – Zugriff am 13.12.2023
- [54] Deutsche Telekom: Energie im Netz: Weniger ist mehr. Blogbeitrag, <https://www.telekom.com/de/blog/konzern/artikel/energie-im-netz-weniger-ist-mehr-1039580> – Zugriff am 14.12.2023