

Energieeffizienz von Mobilfunknetzen – die Bedeutung von Nutzungsverhalten und transferierten Datenvolumina

Autoren:
Gonzalo Zuloaga
Dr. Thomas Plückebaum
Dr. Gabriele Kulenkampff
Martin Ockenfels

Impressum

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

Vertretungs- und zeichnungsberechtigte Personen

Geschäftsführung	Dr. Cara Schwarz-Schilling (Vorsitzende der Geschäftsführung, Direktorin)
	Alex Kalevi Dieke (Kaufmännischer Geschäftsführer)
Prokuristen	Prof. Dr. Bernd Sörries
	Dr. Christian Wernick
	Dr. Lukas Wiewiorra
Vorsitzender des Aufsichtsrates	Dr. Thomas Solbach
Handelsregister	Amtsgericht Siegburg, HRB 7225
Steuer-Nr.	222/5751/0722
Umsatzsteueridentifikations-Nr.	DE 123 383 795
Stand: Januar 2025	
ISSN 1865-8997	

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

Weitere Diskussionsbeiträge finden Sie hier:
<https://www.wik.org/veroeffentlichungen/diskussionsbeitraege>

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

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	II
Tabellenverzeichnis	III
Abkürzungsverzeichnis	IV
Zusammenfassung	V
Summary	VI
1 Hintergrund und Motivation	1
2 Gegenstand der Studie	3
2.1 Fokus und Eingrenzung der Studie	3
2.2 Ziele und Forschungsfragen	4
3 Energieeffizienz in Mobilfunknetzen	5
3.1 Einordnung der Energieeffizienz in Mobilfunknetzen	5
3.2 Definition von Energieeffizienz	7
3.3 Methodik zur Erhebung von Messgrößen für die Berechnung von Energieeffizienz	9
3.4 Entwicklung und Vergleich der Energieeffizienz im Mobilfunk	11
3.4.1 Bestandaufnahme und internationaler Vergleich	11
3.4.2 Differenzierung nach Mobilfunktechnologie	12
3.4.3 Entwicklung der Energieeffizienz im Zeitverlauf	13
3.5 Beispiele aus der Praxis deutscher Netzbetreiber	17
4 Technische Einflussfaktoren auf die Energieeffizienz im Mobilfunknetz	20
4.1 Überblick über die relevanten technischen Zusammenhänge	20
4.2 Netzdimensionierung und Bestimmung der Kapazität eines Antennenstandort	22
4.3 Technische Komponenten: Leistungsmerkmale und Energieverbrauch	23
4.3.1 Bandbreite und Frequenzbereich	23
4.3.2 Mobilfunktechnologie und spektrale Effizienz	25
4.3.3 Mehrantennentechnik (MIMO)	27
4.3.4 Kühlung, Netzteile und weitere unterstützende Systeme	29
4.4 Netzauslastung und Energieverbrauch	30
4.4.1 Nutzungsverhalten und Datenvolumen	30

4.4.2 Netzauslastung und Betriebsmodi	32
4.4.3 Energiemanagement	35
4.5 Reichweite und Energieverbrauch	37
4.5.1 Sendeleistung, Signaldämpfung und Wellenlänge	37
4.5.2 Standortdichte und Zellverdichtung	39
4.6 Sharing	40
5 Vergleich mit dem Festnetz	43
5.1 Energieeffizienz	43
5.2 Quality of Service	46
6 Zusammenfassung	48
Literaturverzeichnis	50

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Anteil des Energieverbrauchs nach Netzsegment bei Mobilfunknetzbetreibern weltweit 2025 (in %)	3
Abbildung 3-1: Entwicklung der Bedeutung von Energieeffizienz für Mobilfunknetzbetreiber (2021–2024)	5
Abbildung 3-2: Entwicklung des gesamten Bruttostromverbrauchs (in Terawattstunden) in Deutschland seit 1990	6
Abbildung 3-3: Entwicklung des übertragenen Datenvolumens in deutschen Mobilfunknetzen (in Millionen Gigabyte)	7
Abbildung 3-4: Energieintensität der Datenübertragung ausgewählter Netzbetreiber, 2019 – 2023 (in Megawattstunden pro Petabyte, Index 2019 = 100)	14
Abbildung 3-5: Entwicklung der Energieeffizienz übertragener mobiler Daten (kWh/ GB in Finnland in den Jahren 2010 – 2017)	15
Abbildung 3-6: Energieeffizienz in Deutschland: Prognose 2019–2030 für verschiedene Szenarien	16
Abbildung 4-1: Vereinfachte Darstellung der Interdependenzen zentraler Einflussfaktoren im RAN	21
Abbildung 4-2: Darstellung von Frequenzblöcken im Frequenzbereich 2,1 GHz	23
Abbildung 4-3: Energieverbrauchsstruktur einer Mobilfunkbasisstation (in %)	25

Abbildung 4-4:	Exemplarische Darstellung von MIMO Antennenmodulen	28
Abbildung 4-5:	Massives MIMO mit Beamforming	29
Abbildung 4-6:	Exemplarische Darstellung von Tageslastprofilen an vier typischen Standortarten	31
Abbildung 4-7:	Exemplarische Darstellung „Always-on“-Signale in Mobilfunknetzen nach Mobilfunkgeneration	33
Abbildung 4-8:	5G-Basisstation: Betriebsmodi	35
Abbildung 4-9:	Automatisierungsgrad der Netzwerkprozesse bei 5G-Mobilfunknetzbetreibern (2018–2025)	36
Abbildung 4-10:	Reichweite und Gebäudepenetration von 5G nach Frequenzband (700 MHz, 1,8 GHz und 3,5 GHz)	38

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3-1:	Energieeffizienzkennzahlen für das RAN im Jahr 2024	11
Tabelle 4-1:	Durchschnittliche spektrale Effizienz nach Mobilfunkgeneration	26
Tabelle 5-1:	Elektrische Leistungsaufnahme (in Watt) nach Übertragungstechnologien und Netzkomponenten	44

Abkürzungsverzeichnis

5G NR	5G New Radio
CR	Corporate Responsibility
CSRD	Corporate Sustainability Reporting Directive
EMBB	Enhanced Mobile Broadband
ESG	Environmental, Social and Governance
FTTH	Fibre-to-the-home
GPRS	General Packet Radio Service (2G)
GRI	Global Reporting Initiative
GSMA	Global System for Mobile Communications
LTE	Long Term Evolution (4G)
LTE-A	Long Term Evolution Advanced
MIMO	Multiple-Input-Multiple-Output
MPoP	Metropolitan Point of Presence
MVNO	Mobile Virtual Network Operator
O&M	Operations & maintenance
PS	Packet-Switched
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
RAN	Radio Access Network
SM	Sleep modus
TCP	Transport Control Protocol
Te2e	Ende-zu-Ende-Latenz des User Plane
TRX	Transceiver
TX/s	Transmissionsimpulse pro Sekunde
UMTS	Universal Mobile Telecommunication System (3G)
UP	User Plane
URLLC	Ultra-Reliable Low Latency Communication
VDSL	Very High Speed Digital Subscriber Line
VPN	Virtual Private Network
Wi-Fi	Wireless Local Area Network, auch als Wireless-Fidelity bezeichnet

Zusammenfassung

Mobilfunknetze müssen sich immer wieder veränderten Nutzungsbedürfnissen anpassen, da sie mit knappen Frequenzressourcen arbeiten. Im Vordergrund steht dabei primär das ständig steigende Datenvolumen, dann aber auch die sich ändernden Qualitätsanforderungen, insbesondere in Bezug auf Signallaufzeiten und Zuverlässigkeit der Übertragung. Diese werden wesentlich in den Funkzugangsnetzen (RAN) bestimmt, die ca. 50 % des Energieverbrauchs der Mobilfunknetze benötigen. Daher konzentriert sich diese Studie auf dieses Netzsegment.

Die Anpassung der Mobilfunknetze erfolgt einerseits durch den Einsatz neuer Funkschnittstellen, neuer und leistungsfähigerer Codierungsverfahren, neuer Antennentechniken und zusätzlicher neuer Frequenzbänder in höheren Frequenzlagen. Höhere Frequenzlagen (Trägerfrequenzen) haben jedoch andere, i.d.R. beschränktere Ausbreitungscharakteristika bzgl. Reichweite, Störungsempfindlichkeit und Umgehung/Penetration von Sichtbehinderungen, wie z. B. Geländestrukturen, Bäume oder Gebäude.

Die neuen Technologien und die neuen Frequenzressourcen bieten erhebliche Bandbreitenverbesserungen und übertragen den Verkehr effizienter. Sie bieten durch die neuen Codierungen und Antennentechniken deutlich mehr Kapazität zur Datenübertragung, aber natürlich haben sie auch einen anderen Energiebedarf. Ein Kernproblem in Mobilfunknetzen ist die Grundlast im RAN, d.h. die permanente Sende- und Empfangsbereitschaft, wegen der das RAN in Niederlastzeiten nicht vollständig abgeschaltet werden kann. Hier gab es mit der 5G Funkschnittstelle deutliche Fortschritte.

Die Studie beschreibt auf der Basis von Erfahrungen aus der Modellierung des Energieverbrauches in bestehenden Mobilfunknetzen die Zusammenhänge von Nutzerbedarfsveränderungen und Energieverbrauch, unter Einbeziehung neuer, energieeffizienterer Technologien und neuer Frequenzen, bis hin zur Wirkung von Funkzellverdichtungen. Dabei wird gezeigt, dass das Datenvolumen nur ein eingeschränkt geeigneter Proxy für die Prognose des Energieverbrauchs von Funkzugangsnetzen ist. Im Ergebnis bleibt die Perspektive, dass der Energieverbrauch der Mobilfunknetze angesichts der stark wachsenden Nachfrage und trotz einer deutlichen Steigerung der Energieeffizienz der Netztechnologien, sichtbar ansteigen wird. Dem kann weiterhin begegnet werden, indem ergänzend zu den Mobilfunknetzen, insbesondere in Gebäuden, das Zusammenspiel von Smartphones durch Mobile-Offloading über Wi-Fi in Glasfaserfestnetze weiter ausgebaut wird und so die Mobilfunknetze entlastet werden.

Summary

Mobile telecommunication networks must be adapted to changing user demand in a frequent manner, because they rely on scarce frequency resources. In the fore is the permanently increasing data volume per user, but next comes the increasing quality demand, especially regarding the latency and reliability of the transmission. All will be dominantly determined by the Radio Access Networks (RAN). The RAN consumes approximately 50 % of the power consumption of the mobile networks. Thus, this study concentrates on this important network segment.

The adaption on the increasing demand will be taken care off by introducing new radio interfaces with new and more powerful coding methods, new antenna techniques, additional frequency blocks in higher frequency spaces. Higher frequency spaces (bearer frequencies) have different typically more restricted emission characteristics regarding reach, noise susceptibility and surrounding/ penetration of walls, line of sight interruptions, by landscape/ surface, trees/ forests or buildings.

The new technologies and frequency resources offer significant bandwidth improvements and transmit traffic more efficiently. By new coding and new antenna techniques they offer significantly higher data transmission capacity. But of course, they have a different power consumption demand. A mobile radio network's core problem is the basic power demand for being always on to send or receive transmissions, thus the RAN cannot be switched off completely. 5G new radio improves this situation by allowing to switch-off frequency blocks completely, if at least some blocks remain ready to operate for sensing and activating on demand.

Based on experience on modelling energy demand in existing mobile networks the study describes the interdependencies of changing user demand and power demand, taking into account new and more energy efficient technologies and new frequency blocks up to radio cell densification. This shows that data volume is only a limited proxy for forecasting the energy consumption of wireless access networks. As a result, the view remains that the total power consumption of mobile networks will increase significantly due to strong demand, which exceeds the substantial increase in the energy efficiency of telecommunications network elements. One can counteract these effects by improving the in-home/indoor interaction of smartphones and Wi-Fi access points for mobile off-loading, thus relaxing the mobile network load.

1 Hintergrund und Motivation

Die effiziente Nutzung von Ressourcen – insbesondere von Energie – hat für die ökologische Nachhaltigkeit in den letzten Jahren an Bedeutung gewonnen. So verfolgt die EU mit der Energy Efficiency Directive (Richtlinie (EU) 2023/1791)¹ sektorübergreifende Zielvorgaben zur Senkung des Endenergieverbrauchs, einschließlich der Verpflichtung, Effizienzmaßnahmen nach dem Grundsatz „Energieeffizienz zuerst“ („*energy efficiency first*“) in allen relevanten politischen und investiven Entscheidungen systematisch zu berücksichtigen. Die Richtlinie sieht unter anderem vor, den Energieverbrauch bis 2030 um 11,7 Prozent gegenüber 2020 zu reduzieren und jährliche Mindesteinsparquoten verbindlich zu erfüllen. Damit bildet sie den energiepolitischen Rahmen, in dem auch die Energieeffizienz digitaler Infrastrukturen – einschließlich des Mobilfunks – einzuordnen ist.

Im Mobilfunksektor gewinnt diese Perspektive an Bedeutung, da der Energiebedarf der Mobilfunknetze trotz technischer Effizienzsteigerungen kontinuierlich steigt. Haupttreiber ist die stark zunehmende Mobilfunknetznutzung, die auch an einem stark wachsenden mobilen Datenvolumen festgemacht werden kann. Zwar macht der Mobilfunksektor in Deutschland derzeit nur etwa 1 % des gesamten Stromverbrauchs aus – rund 4 bis 5 TWh² von insgesamt 521 TWh im Jahr 2023³ – doch steigt sein relativer Anteil im Zuge der fortschreitenden Digitalisierung und der zunehmenden Verkehrslast kontinuierlich an.

Die Ausgangslage der vorliegenden Untersuchung knüpft an ein zuvor veröffentlichtes WIK-Working Paper an (*Nachhaltigkeit: Fest- und Mobilnetze über unterschiedliche regionale Strukturen im Vergleich*, 2024),⁴ das den Energieverbrauch von Festnetz- und Mobilfunknetzen vergleichend analysiert hat. Eine zentrale Einschränkung dieser Untersuchung bestand jedoch darin, dass der Energieverbrauch des Mobilfunknetzes ausschließlich auf Grundlage der seinerzeit aktuellen Frequenzblocknutzungsdaten und der damit verbundenen Netzkapazität ermittelt wurde. Der vorgelagerte Zusammenhang – also die Frage, wie das Nutzungsverhalten der Endnutzer und das daraus resultierende Datenvolumen den Energieverbrauch des Mobilfunknetzes beeinflussen – blieb unberücksichtigt.

¹ Europäisches Parlament & Rat der Europäischen Union. (2023). Richtlinie (EU) 2023/1791 über Energieeffizienz. Amtsblatt der Europäischen Union L 231, 20. September 2023. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ%3AJOL_2023_231_R_0001&qid=1695186598766.

² Stobbe et al. (2023). Umweltbezogene Technikfolgenabschätzung Mobilfunk in Deutschland: Final Report, 26/2023 (Projekt UTAMO). <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/umweltbezogene-technikfolgenabschaetzung-mobilfunk>. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_26-2023_umweltbezogene_technikfolgenabschaetzung_mobilfunk_in_deutschland.pdf.

³ Umweltbundesamt (2025). Stromverbrauch. 25.04.2025. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/stromverbrauch#entwicklung-des-stromverbrauchs>.

⁴ Zuloaga, G., Plückebaum, T., Kulenkampff, G., & Wissner, M. (2024). Nachhaltigkeit: Fest- und Mobilnetze über unterschiedliche regionale Strukturen im Vergleich (WIK Working Paper Nr. 10). WIK – Wissenschaftliches Institut für Infrastruktur und Kommunikationsdienste. <https://www.wik.org/veroeffentlichungen/veroeffentlichung/wik-working-paper-nr-10-nachhaltigkeit-fest-und-mobilnetze ueber-unterschiedliche-regionale-strukturen-im-vergleich>.

Die vorliegende Studie setzt genau an dieser Stelle an. Sie verfolgt das Ziel, den Zusammenhang zwischen Nutzungsverhalten und dem Energieverbrauch systematisch zu analysieren und sachgerecht bewerten zu können.

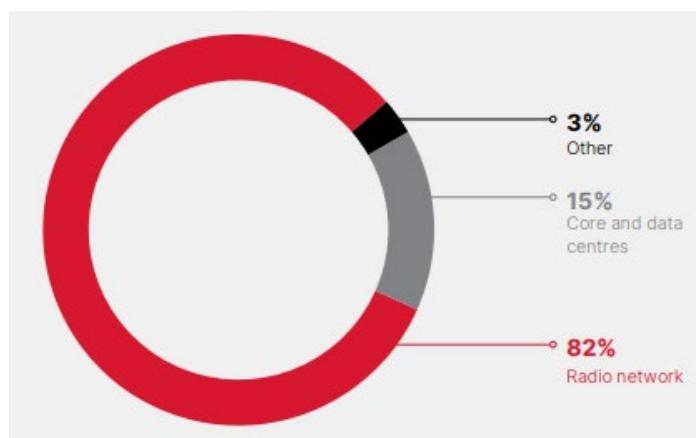
2 Gegenstand der Studie

2.1 Fokus und Eingrenzung der Studie

Das Funkzugangsnetz (*Radio Access Network*, RAN) bildet die Schnittstelle zwischen mobilen Endgeräten und dem Kernnetz und umfasst insbesondere die Basisstationen, die für die Bereitstellung von Funkressourcen und die Signalverarbeitung verantwortlich sind.

Internationale Erhebungen unter Mobilfunknetzbetreibern verdeutlichen die energetische Relevanz vom RAN. Nach Daten der *Global System for Mobile Communications* (GSMA) entfielen im Jahr 2021 durchschnittlich 73 %⁵ des gesamten Energieverbrauchs der teilnehmenden Betreiber auf das Funkzugangsnetz. Dieser Anteil stieg in den Folgejahren weiter an und lag 2023 bei 87 %⁶; für 2025 wird ein Wert von etwa 82 %⁷ erwartet. Damit wird deutlich, dass das RAN weltweit den dominierenden Energieverbrauchsanteil bei Mobilfunknetzbetreibern darstellt.

Abbildung 2-1: Anteil des Energieverbrauchs nach Netzsegment bei Mobilfunknetzbetreibern weltweit 2025 (in %)



Quelle: GSMA (2025). The Mobile Economy 2025. <https://www.gsma.com/solutions-and-impact/connectivity-for-good/mobile-economy/wp-content/uploads/2025/04/030325-The-Mobile-Economy-2025.pdf>.

Auch nationale Analysen bestätigen diese Einordnung. Für Deutschland zeigt eine Untersuchung des Fraunhofer-Instituts (2023), dass rund 80 % des gesamten Energieverbrauchs der Mobilfunknetze auf das Funkzugangsnetz, insbesondere auf die

⁵ GSMA Intelligence (Jun. 2021). Going green: benchmarking the energy efficiency of mobile. <https://www.gsmaintelligence.com/research/research-file-download?file=300621-Going-Green-efficiency-mobile.pdf&id=60621137>.

⁶ GSMA Intelligence (Feb. 2023). Going green: benchmarking the energy efficiency of mobile networks (second edition). <https://www.gsmaintelligence.com/research/research-file-download?id=74384072&file=280223-Going-Green-Second-Edition.pdf>.

⁷ GSMA (2025). The Mobile Economy 2025. <https://www.gsma.com/solutions-and-impact/connectivity-for-good/mobile-economy/wp-content/uploads/2025/04/030325-The-Mobile-Economy-2025.pdf>.

Basisstationen, entfallen. Die verbleibenden etwa 20 % verteilen sich auf Backhaul-Infrastruktur, Kernnetzfunktionen und Netzsteuerung.⁸

Schwerpunkt dieser Studie ist daher die Analyse der Energieeffizienz des RAN.

2.2 Ziele und Forschungsfragen

Ziel dieser Studie ist es, wie die Netzinanspruchnahme durch die Endkunden und das von ihnen genutzte Datenvolumen den Energieverbrauch des Mobilfunknetzes (RAN) beeinflussen und wie sich dies in den Kontext der Energieeffizienz einordnen lässt. Es soll ein vertieftes Verständnis der Wirkungsmechanismen, Messgrößen und Wechselwirkungen entwickelt und eine qualitative Bewertung von Energieeffizienz im Mobilfunk abgeleitet werden.

Die Studie basiert auf einer Literaturrecherche, die wissenschaftliche Publikationen, technische Studien, Branchenberichte sowie nationale und internationale Analysen einbezieht. Ziel dieser Recherche ist es, die Energieeffizienz von Mobilfunknetzen umfassend zu beschreiben, technische Einflussfaktoren konsistent darzustellen und qualitative Erkenntnisse darüber zu gewinnen, in welchem Umfang der Energieverbrauch des RAN mit der wachsenden Nachfrage nach Mobilfunkdiensten skaliert und welche strukturellen oder technologischen Faktoren diese Skalierung bestimmen.

Aus diesen Zielen ergeben sich mehrere Fragen, die die Analyse systematisch leiten. Der erste Teil der Studie (Kapitel 3) entwickelt die Grundlage für eine deskriptive Analyse der Energieeffizienz im Mobilfunk. Hierbei ist zu klären, wie Energieeffizienz im Kontext des Funkzugangsnetzes definiert wird (Abschnitt 3.2), nach welchen methodischen Ansätzen sie gemessen wird (Abschnitt 3.3) und wie sich die entsprechenden Kennzahlen im Zeitverlauf entwickelt haben (Abschnitt 3.4).

Der zweite Teil (Kapitel 4) widmet sich der Aufarbeitung der technischen Zusammenhänge auf Basis des vorhandenen Forschungsstandes. Das betrifft die technischen Faktoren, die das RAN maßgeblich beeinflussen, etwa im Hinblick auf Netzarchitekturen, Funktechnologien oder Betriebsstrategien. Zudem ist zu analysieren, welche Wechselwirkungen und möglichen Zielkonflikte zwischen Energieeffizienz, Netzkapazität und Netzqualität bestehen und wie diese bei der Bewertung oder Weiterentwicklung von Mobilfunknetzen berücksichtigt werden müssen.

Abschließend zieht der dritte Teil (Kapitel 5) einen kurzen Vergleich zum Festnetz. Hierbei wird der Frage nachgegangen, in welchen Punkten sich die Energieeffizienz des Funkzugangsnetzes von der Energieeffizienz leitungsgebundener Festnetzinfrastrukturen unterscheidet. Diese Forschungsfragen strukturieren die Untersuchung und bilden die Grundlage für die anschließende Analyse der Energieeffizienz im Mobilfunk.

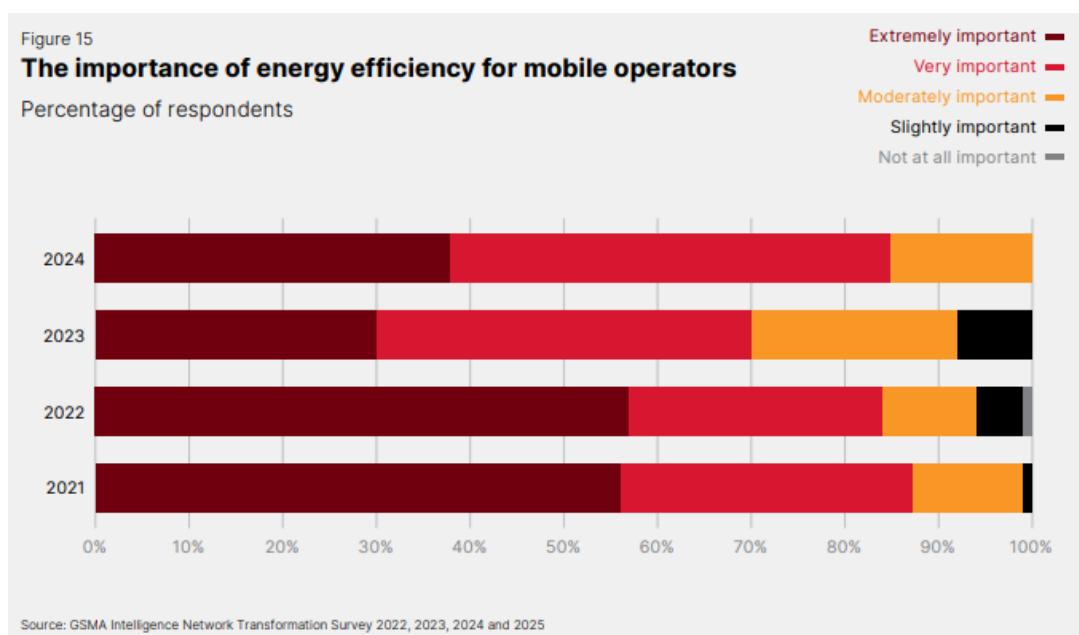
⁸ Stobbe et al. (2023).

3 Energieeffizienz in Mobilfunknetzen

3.1 Einordnung der Energieeffizienz in Mobilfunknetzen

Energieeffizienz gewinnt im Mobilfunk sowohl aus betriebswirtschaftlicher als auch aus gesamtwirtschaftlicher Perspektive zunehmend an Bedeutung. Aus Sicht der Netzbetreiber entfällt ein erheblicher Anteil der laufenden Betriebskosten auf den Energieverbrauch; Schätzungen zufolge liegt dieser Anteil typischerweise bei rund 20 Prozent. Der Energiebedarf eines Mobilfunknetzes hängt im Allgemeinen maßgeblich von der geografischen Abdeckung, der Zahl und Leistungsfähigkeit der Standorte sowie der Einführung neuer Dienste ab. Da alle diese Einflussgrößen im Zuge der fortschreitenden Digitalisierung weiter zunehmen, kommt der Energieeffizienz eine wachsende wettbewerbliche Relevanz für Mobilfunknetze der nächsten Generation zu.⁹

Abbildung 3-1: Entwicklung der Bedeutung von Energieeffizienz für Mobilfunknetzbetreiber (2021–2024)



Quelle: GSMA (2025). The Mobile Economy 2025. <https://www.gsma.com/solutions-and-impact/connectivity-for-good/mobile-economy/wp-content/uploads/2025/04/030325-The-Mobile-Economy-2025.pdf>.

Auch aus gesamtwirtschaftlicher Sicht spielt Energieeffizienz im Mobilfunk eine zunehmende Rolle. Der jährliche Stromverbrauch der Mobilfunknetze, insbesondere des Funkzugangsnetzes (RAN), beträgt nach aktuellen Schätzungen etwa 4 bis 5 TWh.¹⁰ Dies entspricht einem Anteil von knapp einem Prozent am gesamten deutschen Stromverbrauch, der 2023 bei 521 TWh lag.¹¹ Prognosen gehen jedoch davon aus, dass der

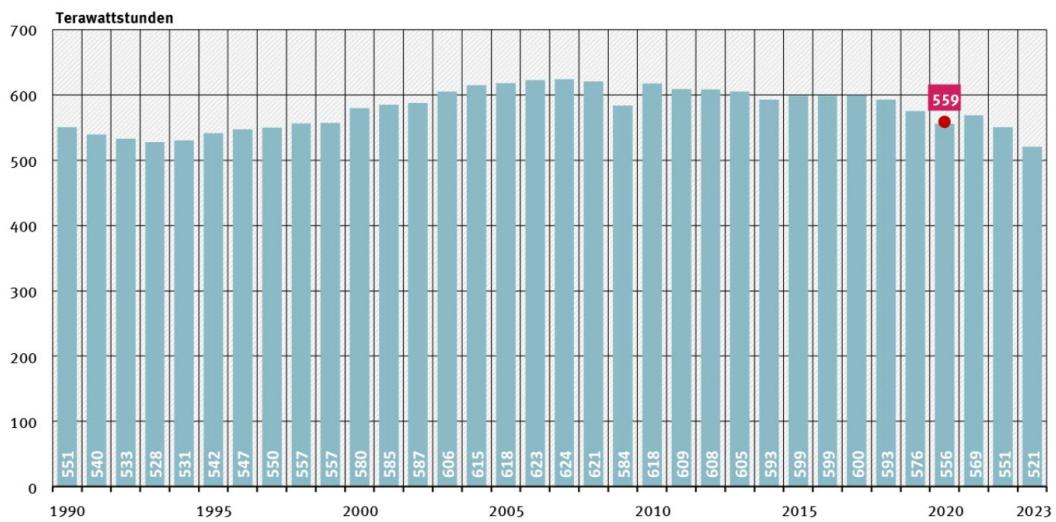
⁹ GSMA (2025).

¹⁰ Stobbe et al. (2023).

¹¹ Umweltbundesamt (2025).

Strombedarf des RAN bis 2030 auf rund 7,5 TWh ansteigen wird, was vor allem auf das erwartete, stark wachsende mobile Datenvolumen zurückgeführt wird.¹² Während der gesamte Stromverbrauch Deutschlands seit den 1990er Jahren weitgehend stabil zwischen 520 und 650 TWh schwankt,¹³ nimmt daher der Anteil des Mobilfunks an diesem Gesamtverbrauch kontinuierlich zu.

Abbildung 3-2: Entwicklung des gesamten Bruttostromverbrauchs (in Terawattstunden) in Deutschland seit 1990

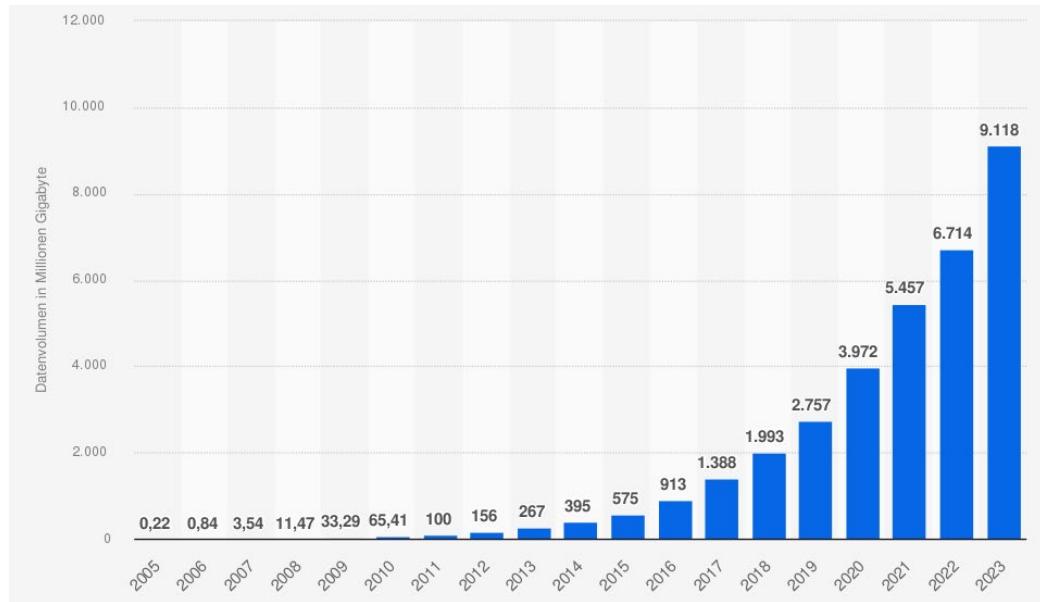


Quelle: Umweltbundesamt (2025). Stromverbrauch. 25.04.2025. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/stromverbrauch#entwicklung-des-stromverbrauchs>.

¹² Stobbe et al. (2023).

¹³ Umweltbundesamt (2025).

Abbildung 3-3: Entwicklung des übertragenen Datenvolumens in deutschen Mobilfunknetzen (in Millionen Gigabyte)



Quelle: Bundesnetzagentur. (16. Mai, 2024). Entwicklung des übertragenen Datenvolumens im Mobilfunk in Deutschland von 2005 bis 2023 (in Millionen Gigabyte) [Graph]. In Statista. Zugriff am 7. Oktober 2024, von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/172798/umfrage/datenvolumen-im-deutschen-mobilfunkmarkt-seit-2005/>.

Vor diesem Hintergrund ist zu erwarten, dass Effizienzmaßnahmen im Mobilfunk für den Pro-Kopf-Energieverbrauch im digitalen Sektor merklich sind.

3.2 Definition von Energieeffizienz

Wenn von Energieeffizienz gesprochen wird, ist es notwendig zu definieren, was darunter verstanden wird. Hierzu wurden internationale Standards für die Definition und Messung von Energieeffizienz im Mobilfunk, die eine einheitliche Methodik schaffen, entwickelt. Zu den bedeutenden Standards zählen ETSI ES 203 228 und ITU-T L.1331.

ETSI ES 203 228 gibt die Messgrößen, Messumgebungen und Berechnungsverfahren für die Bewertung der Energieeffizienz operativer Mobilfunknetze vor.¹⁴ Der Standard definiert unter anderem, wie Energieverbrauch, Datenvolumen und Abdeckungsparameter zu erfassen sind und auf welche Netzsegmente sich die Berechnungen beziehen.

¹⁴ ETSI ES 203 228 V1.3.1 (Okt. 2020). Assessment of mobile network energy efficiency. https://www.etsi.org/deliver/etsi_es/203200_203299/203228/01.03.01_60/es_203228v010301p.pdf.

Eine funktional nahezu identische Referenz stellt ITU-T L.1331 dar, die ebenfalls eine einheitliche Vorgehensweise für die Ermittlung der Energieeffizienz in Mobilfunknetzen einschließlich der Skalierung von Messungen auf größere Netzbereiche beschreibt.¹⁵

Diese Standards benennen drei grundlegende Formen der Energieeffizienz in Mobilfunknetzen:

- datenbezogene Energieeffizienz (*Data Energy Efficiency*),
- flächenbezogene Energieeffizienz (*Coverage Energy Efficiency*),
- Qualitäts- bzw. Latenz-orientierte Effizienzindikator.

Die datenbezogene Energieeffizienz (*Data Energy Efficiency*) ist das Verhältnis zwischen gesamtem Datenvolumen, das von sämtlichen Netzkomponenten übertragen wird, zum Energieverbrauch, gemessen im selben Zeitraum (mind. wöchentlich). Sie wird definiert als^{16,17}

$$\text{Data } EE_{\text{mobile}} = \frac{\text{Datenvolumen (bit)}_{\text{mobile}}}{\text{Energieverbrauch (J)}_{\text{mobile}}}$$

Die flächenbezogene Energieeffizienz (*Coverage Energy Efficiency*) beschreibt das Verhältnis zwischen der vom untersuchten Mobilfunknetz abgedeckten Fläche und dem Energieverbrauch, gemessen über ein Jahr. Sie wird angegeben als

$$\text{Coverage } EE_{\text{mobile}} = \frac{\text{abgedeckte Fläche (m}^2\text{)}_{\text{mobile}}}{\text{Energieverbrauch (J)}_{\text{mobile}}}$$

Der Qualitäts- bzw. Latenz-orientierte Effizienzindikator der ITU beschreibt, in welchem Verhältnis Energieverbrauch zu dienstspezifischer Performance, etwa Latenz, steht. Der Standard verweist auf die Notwendigkeit, Energieverbrauch und *Quality-of-Service*-Parameter gemeinsam zu evaluieren.

$$\text{Latency } EE_{\text{mobile}} = \frac{1}{\text{Latenz (ms)}_{\text{mobile}} * \text{Energie (J)}_{\text{mobile}}}$$

¹⁵ ITU-T L.1331 (Jan. 2022). Assessment of mobile network energy efficiency. <https://www.itu.int/rec/T-REC-L.1331>.

¹⁶ Das Datenvolumen wird in Bit gemessen (8 bit = 1 byte). Der Energieverbrauch ist in Joule angegeben, wobei 1 J der bei einer Leistung von 1 Watt innerhalb einer Sekunde umgesetzten Energie entspricht (J = W·s). Die Kennzahl beschreibt somit die übertragenen Bit pro eingesetzter Energieeinheit.

¹⁷ ETSI ES 203 228 V1.3.1 (Okt. 2020). Assessment of mobile network energy efficiency. https://www.etsi.org/deliver/etsi_es/203200_203299/203228/01.03.01_60/es_203228v010301p.pdf.

3.3 Methodik zur Erhebung von Messgrößen für die Berechnung von Energieeffizienz

Für die Ermittlung der drei obenstehenden Indikatoren müssen mehrere Größen quantifiziert werden:

- Energieverbrauch
- Datenvolumen
- Abdeckungsfläche
- Latenz

Datenvolumen, Abdeckungsfläche und Latenz bringen die Leistungsfähigkeit des Mobilfunknetzes zum Ausdruck, welche mit der Definition von Messgrößen in Relation zum Energieverbrauch gesetzt werden. Damit Kennziffern zur Energieeffizienz von verschiedenen Netzbetreibern oder Ländern miteinander verglichen werden können, finden Richtlinien zur Bestimmung dieser Größe, wie sie in den Standards von ETSI ES 203 228 und ITU-T L.1331 angegeben sind, Anwendung.

Die Ermittlung des **Energieverbrauchs** eines Mobilfunknetzes umfasst sämtliche technischen Einrichtungen,¹⁸ die an den Standorten des jeweiligen Netzbetreibers betrieben werden. Im Fall einer gemeinsam genutzten Infrastruktur ist der Energieverbrauch des Mobilfunknetzes der gemeinsam genutzten Standorte den beteiligten Mobilfunknetzbetreibern zuzurechnen (ggf. proportionales Verhältnis). Der resultierende Energiebedarf ist damit stets betriebsspezifisch und reflektiert die konkrete Netzarchitektur und Standortausstattung. Befinden sich an einem Standort Basisstationen verschiedener Funkzugangstechnologien, ist der Energieverbrauch jeder Technologie getrennt zu erfassen, um eine technologiespezifische Zuordnung und Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

Das zugehörige **Datenvolumen** wird für paketvermittelten Verkehr (Packet-Switched, PS) als die Gesamtmenge des Datenvolumens definiert, das im betrachteten Mobilfunknetz zu den Endnutzern übertragen oder von diesen empfangen wird (Up- und Download Daten). Steuer-, Signalisierungs- oder Backhaul-Überwachungsdaten werden nicht einbezogen. Das Datenvolumen ist aggregiert für jede im Mobilfunknetz vorhandene Funkzugangstechnologie zu messen und soll auf Zählern (*network counters for data*) basieren, die aus den O&M-Systemen (*operations & maintenance*) der Hersteller abgeleitet werden.

Die **Abdeckungsfläche** des betrachteten Mobilfunknetzes bedarf ebenfalls einer einheitlichen Definition, um die Energieeffizienz vergleichend beurteilen zu können. Die

¹⁸ Basisstationen (Funkmodule und Basebandmodule), Standortinfrastruktur (Gleichrichter, Energiespeicher, Kühl- und Lüftungssysteme, Turm- und Sicherheitsbeleuchtung, etc.), sowie Backhaul-Anbindung, Steuerknoten, zentrale Cloud-Infrastruktur.

Quantifizierung kann anhand unterschiedlicher Messgrößen erfolgen, die jeweils spezifische Aspekte der räumlichen Bereitstellung von Mobilfunkdiensten abbilden:

- Geografische Abdeckung – wird häufig durch die in den Lizenzvereinbarungen festgelegte geografische Abdeckungsfläche definiert (z. B. muss mehr als 90 % der Landesfläche und/oder 98 % der Bevölkerung abgedeckt sein).
- Geplante Abdeckungsfläche – bezeichnet die Fläche, die gemäß der Netzplanung abgedeckt werden soll (oft als „*Best-Server-Gebiet*“ bezeichnet). Sie basiert auf der Sendeleistung der Basisstationen, den Ausbreitungsbedingungen im betreffenden Gebiet, den zulässigen Ausfallkriterien sowie den zugrunde gelegten Planungsmodellen und ist daher nur eingeschränkt vergleichbar.
- Abdeckungsqualität – ist ein Maß zur Abschätzung des tatsächlich abgedeckten Anteils der geplanten Gesamtfläche. Sie wird häufig aus Abdeckungskarten (z. B. SINR) abgeleitet, die Bereiche lokalisieren, in denen die Signalqualität (z. B. durch Drive-Tests oder Crowdsourced-Daten) über einem bestimmten Mindestwert liegt, oder über den Prozentsatz der Nutzer bzw. Sitzungen mit fehlender Netzabdeckung.

Die Abdeckung hängt einerseits von den topographischen Gegebenheiten ab, zum anderen von den funkechnischen Eigenschaften des Mobilfunknetzes (insbesondere von der Höhe der verwendeten Frequenzen) und kann höchst unterschiedlich ausfallen. Bei der Bewertung der Energieeffizienz sollten daher für die Abdeckung vergleichbar strukturierte Regionen in Betracht gezogen werden.

Latenz. Im Rahmen der Bewertung der Energieeffizienz von Mobilfunknetzen kann die Latenz¹⁹ eine zusätzliche und relevante Bezugsgröße darstellen, insbesondere in Anwendungsbereichen, in denen ultra-zuverlässige und echtzeitnahe Kommunikation (*Ultra-Reliable Low Latency Communication, URLLC*) vorherrscht. In diesen Fällen ist die reine daten- oder flächenbezogene Effizienzbetrachtung nicht ausreichend, da die Leistungsfähigkeit des Netzes wesentlich durch die zeitliche Verzögerung der Datenübertragung bestimmt wird. Die Latenz wird in Millisekunden gemessen und bezieht sich im vorliegenden Kontext ausschließlich auf die Verzögerungsebene des *User Plane* (UP). Diese Fokussierung folgt der Definition der Ende-zu-Ende-Latenz gemäß ITU-R M.2410, da die Nutzerpfad-Latenz für die anwendungsbezogene Leistungsfähigkeit des untersuchten Netzes maßgeblich ist.

Für die Beurteilung der Energieeffizienz im Festnetz spielt der abdeckungsbezogene Aspekt des Mobilfunks keine Rolle. Für einen Vergleich zum Festnetz verweisen wir im Übrigen auf Kapitel 5.

¹⁹ Die Ende-zu-Ende-Latenz des User Plane (Te2e) ergibt sich aus der Summe der Verzögerungszeiten aller beteiligten Netzsegmente.

3.4 Entwicklung und Vergleich der Energieeffizienz im Mobilfunk

3.4.1 Bestandaufnahme und internationaler Vergleich

Die Energieeffizienz des Funkzugangsnetzes (*Radio Access Network*, RAN) variiert weltweit erheblich, was sowohl auf technologische und geographische Unterschiede als auch auf strukturelle Rahmenbedingungen der jeweiligen Mobilfunkmärkte zurückzuführen ist. Im Jahr 2024 lag die von GSMA ermittelte globale durchschnittliche Energieeffizienz bei rund 0,12 kWh pro übertragenem Gigabyte (GB).²⁰ Dieser Durchschnittswert verdeckt jedoch eine ausgeprägte Heterogenität zwischen den Netzbetreibern und Weltregionen. Für das Jahr 2023 wurden Spannweiten zwischen 26 und 490 MWh pro Petabyte (PB) – entsprechend 0,026 bis 0,49 kWh/ GB – berichtet. Diese Unterschiede spiegeln unter anderem stark divergierende geografische Versorgungsanforderungen, Nutzerzahlen sowie technologische Ausstattungsgrade wider, die in Regionen wie Europa, Afrika, Asien oder Amerika erheblich variieren.

Für Deutschland zeigen aktuelle Studien deutlich günstigere Energieeffizienzkennzahlen, wobei auch hier methodische Einschränkungen bei der Vergleichbarkeit zu berücksichtigen sind. Das WIK-Working Paper (2024) berechnet für das Jahr 2024 eine Energieeffizienz von 0,0004205 kWh/ GB. Diese Kennzahl basiert auf einem ermittelten Energieverbrauch von etwa 4,03 MWh²¹ für das RAN und einem gemeldeten mobilen Datenvolumen von 9.592 Mio. GB.²² Ergänzende Projektionen von Stobbe et al. (2023) schätzen für das Jahr 2026 eine Energieeffizienz zwischen 0,00029 und 0,00042 kWh/ GB (entspricht 0,29 bis 0,42 kWh/ TB).²³

Die nachstehende Tabelle fasst aktuelle Energieeffizienzkennzahlen für Deutschland im internationalen Vergleich zusammen:

Tabelle 3-1: Energieeffizienzkennzahlen für das RAN im Jahr 2024

	Weltweit	Deutschland
Durchschnitt [kWh/ GB]	0,12	0,00042
Spanne [kWh/ GB]	0,026 bis 0,49	./.

Quelle: GSMA (2025). The Mobile Economy 2025. <https://www.gsma.com/solutions-and-impact/connectivity-for-good/mobile-economy/wp-content/uploads/2025/04/030325-The-Mobile-Economy-2025.pdf> und Zuloaga, G., Plückebaum, T., Kulenkampff, G., & Wissner, M. (2024). Nachhaltigkeit: Fest- und Mobilnetze über unterschiedliche regionale Strukturen im Vergleich (WIK Working Paper Nr. 10). WIK – Wissenschaftliches Institut für Infrastruktur und Kommunikationsdienste. <https://www.wik.org/veroeffentlichungen/veroeffentlichung/wik-working-paper-nr-10-nachhaltigkeit-fest-und-mobilnetze-ueber-unterschiedliche-regionale-strukturen-im-vergleich>

²⁰ GSMA (2025).

²¹ Zuloaga et al. (2024).

²² BNetzA (2024). Jahresbericht Telekommunikation. <https://data.bundesnetzagentur.de/Bundesnetzagentur/SharedDocs/Mediathek/Jahresberichte/JB2024TK.pdf>.

²³ Stobbe et al. (2023).

Der für Deutschland ausgewiesene Wert liegt deutlich unter dem im internationalen Vergleich beobachteten Energieverbrauch pro übertragenem Gigabyte, was auf eine im Durchschnitt hohe Energieeffizienz der deutschen Mobilfunknetze hinweist. Gleichwohl ist eine direkte Gegenüberstellung nur eingeschränkt möglich, da sich die Studien hinsichtlich Erhebungsmethodik, Abgrenzung des betrachteten Netzsegments und zu grunde gelegten Datenquellen unterscheiden können.

3.4.2 Differenzierung nach Mobilfunktechnologie

Die Energieeffizienz von Mobilfunknetzen unterscheidet sich zwischen den eingesetzten Technologien deutlich. Daten des Öko-Instituts (2020) für das Jahr 2019 zeigen erhebliche Effizienzunterschiede zwischen 2G-, 3G- und 4G-Netzen. Während für 2G (GPRS) ein spezifischer Energieverbrauch von rund 17 kWh pro übertragenem Gigabyte ermittelt wurde, liegt dieser Wert bei 3G (UMTS) bereits bei etwa 1 kWh/ GB. Die Einführung von 4G (LTE) führte zu einem weiteren deutlichen Effizienzsprung, der den spezifischen Energieverbrauch auf etwa 0,2 kWh/ GB reduzierte. Im Vergleich dazu weist das leitungsgebundene Mobilfunk-Kernnetz auf Glasfaserbasis mit rund 0,052 kWh/ GB einen noch deutlich geringeren Energiebedarf auf.²⁴

Diese Unterschiede spiegeln die technologische Weiterentwicklung zwischen den Mobilfunkgenerationen wider. Jeder Generationswechsel – von 2G über 3G und 4G bis hin zu 5G – bringt Verbesserungen in Protokollen, Modulationseffizienz, Antennentechnologien etc. mit sich, die zu einer Reduzierung des Energieverbrauchs pro Dateneinheit führen.²⁵ Das Öko-Institut und Fraunhofer-Institut IZM (2021)²⁶ weist zudem darauf hin, dass die elektrische Leistungsaufnahme einzelner Netzkomponenten im Anschluss- und Zugangsnetz technologisch bedingt stark variiert. Bereits bei identischen Einsatzszenarien unterscheiden sich die im Anschluss- und Zugangsnetz eingesetzten Komponenten wie *Network Units* und *Network Terminals* je nach Technologie in ihrer elektrischen Leistungsaufnahme.

Insgesamt verdeutlichen die vorliegenden Befunde, dass technologischer Fortschritt ein zentraler Treiber für Energieeffizienzgewinne im Mobilfunk ist und dass Effizienzkennzahlen vor dem Hintergrund der eingesetzten Technologien zu interpretieren sind.

²⁴ Gröger, J. (2020). Digitaler CO₂-Fußabdruck - Datensammlung zur Abschätzung von Herstellungsaufwand, Energieverbrauch und Nutzung digitaler Endgeräte und Dienste. Öko-Institut e. V. <https://www.oeko.de/publikation/digitaler-co2-fussabdruck/>.

²⁵ Das Öko-Institut (2020) stellt fest, dass die beobachteten Effizienzgewinne rechnerisch auf gestiegenen technologiebedingte Kapazitäten zurückzuführen sind, wodurch der Energieverbrauch pro übertragener Einheit sinkt, nicht jedoch der absolute Energieverbrauch insgesamt.

²⁶ Gröger, J., Liu, R., Stobbe, L., Druschke, J., & Richter, N. (2021). Green Cloud Computing: Lebenszyklusbasierte Datenerhebung zu Umweltwirkungen des Cloud Computing (Abschlussbericht). Umweltbundesamt. S. 101. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-06-17_texte_94-2021_green-cloud-computing.pdf.

3.4.3 Entwicklung der Energieeffizienz im Zeitverlauf

Die Energieeffizienz mobiler Netze hat sich allgemein über die Zeit deutlich verbessert. Die nachfolgenden Ausführungen unterscheiden dabei zwischen globalen Durchschnittskennzahlen, langjährigen regionenspezifischen Analysen sowie nationalen Projektionen für Deutschland.

Globale Kennzahlen.

Die Energieeffizienz mobiler Netze hat sich in den vergangenen Jahren weltweit deutlich verbessert, wobei sowohl langfristige Trends als auch aktuelle Kennzahlen eine kontinuierliche Reduktion des spezifischen Energieverbrauchs pro übertragenem Gigabyte belegen.

Für den Zeitraum 2020 bis 2024 weisen verschiedene GSMA-Berichte auf einen signifikanten Effizienzgewinn hin, wobei jedoch unterschiedliche Datengrundlagen²⁷ der jeweiligen Erhebungsjahre berücksichtigt werden müssen. Im Jahr 2020 lag der globale Durchschnittswert bei etwa 0,24 kWh/ GB²⁸, reduzierte sich 2021 auf rund 0,13 kWh/ GB²⁹ und erreichte 2024 einen Wert von etwa 0,12 kWh/ GB.³⁰

Die GSMA zeigt zudem auf Basis eines Indexvergleichs (2019 = 100), dass die Energieintensität der mobilen Datenübertragung auf Basis ausgewählter Mobilfunknetzbetreiber in unterschiedlichen Weltregionen zwischen 2019 und 2023 deutlich zurückgegangen ist.

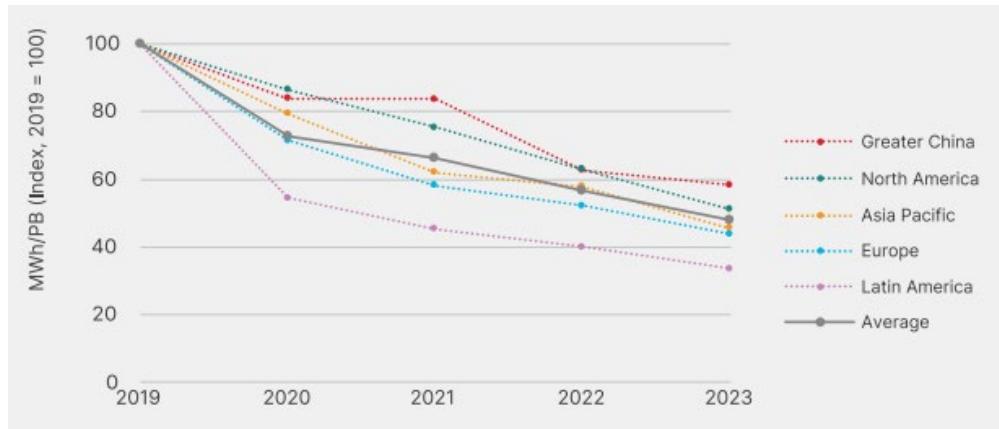
²⁷ Während in GSMA (2021) Netzbetreiber in Deutschland in die Analyse einbezogen werden, ist dies in GSMA (2023) nicht der Fall.

²⁸ GSMA Intelligence (Jun. 2021).

²⁹ GSMA Intelligence (Feb. 2023).

³⁰ GSMA (2025).

Abbildung 3-4: Energieintensität der Datenübertragung ausgewählter Netzbetreiber, 2019 – 2023 (in Megawattstunden pro Petabyte, Index 2019 = 100)



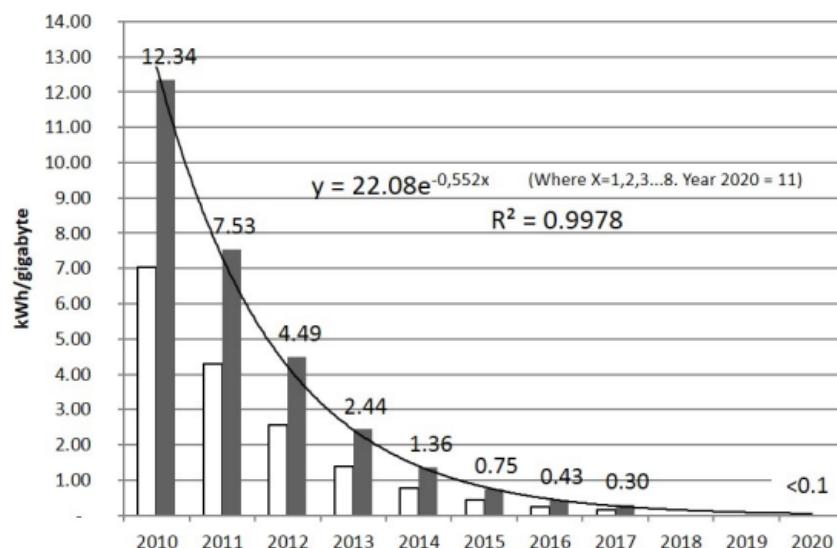
Quelle: GSMA (Jun. 2025). Mobile Net Zero 2025. State of the Industry on Climate Action. https://www.gsma.com/solutions-and-impact/connectivity-for-good/external-affairs/wp-content/uploads/2025/07/The_GSMA-Mobile-Net-Zero-2025-State-of-the-Industry-on-Climate-Action.pdf.

Die obenstehende Abbildung verdeutlicht, dass die regionübergreifenden Effizienzzuwächse zwar unterschiedlich stark ausfallen, der globale Durchschnitt jedoch eine Reduktion von etwa 50 % gegenüber 2019 erreicht hat.

Ausgewählte regionale Analyse und langfristige Entwicklung.

Auch Untersuchungen für Zeiträume vor 2020 bestätigen die langfristige Tendenz eines deutlich sinkenden Energieverbrauchs pro übertragenem Gigabyte. Eine Analyse zur Entwicklung der Energieeffizienz des finnischen Mobilfunknetzes zwischen 2010 und 2017 zeigt eine ausgeprägte Reduktion: In diesem Zeitraum sank der spezifische Energieverbrauch des finnischen RAN von über 12 kWh/ GB auf unter 1 kWh/ GB. Die Schätzung des jährlichen Stromverbrauchs basierte auf öffentlich zugänglichen Angaben aus den Jahres- und Nachhaltigkeitsberichten der finnischen Mobilfunknetzbetreiber.

Abbildung 3-5: Entwicklung der Energieeffizienz übertragener mobiler Daten (kWh/ GB in Finnland in den Jahren 2010 – 2017)



Quelle: Pihkola et al. (2018). Evaluating the Energy Consumption of Mobile Data Transfer—From Technology Development to Consumer Behaviour and Life Cycle Thinking. *Sustainability* 2018, 10(7), 2494. <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/7/2494>. Graue Balken stehen für den geschätzten Energieverbrauch im RAN, weiße Balken für den Verbrauch der Basisstationen.

Die obenstehende Abbildung zeigt diesen Rückgang als exponentielle Abnahmekurve, deren Regressionsmodell eine weitere Effizienzsteigerung prognostiziert und für das Jahr 2020 rechnerische Werte unterhalb von 0,1 kWh/ GB nahelegt.

Zusammengenommen verdeutlichen sowohl die aktuellen globalen Kennzahlen als auch die langfristige Zeitreihe eine konsistente strukturelle Entwicklung hin zu zunehmend energieeffizienteren Mobilfunknetzen. Die Entwicklung der Energieeffizienz – verstanden als Verhältnis zwischen übertragenem Datenvolumen und Energieverbrauch – zeigt auf Basis des finnischen Beispiels, dass der Energiebedarf deutlich weniger stark zunimmt als das übertragene Datenvolumen.³¹ Die über mehrere Jahre beobachteten Effizienzgewinne sind Ausdruck verschiedener technischer und betrieblich-struktureller Einflussfaktoren, die im technischen Teil der Studie (Kapitel 4) vertieft analysiert werden.

Diese langfristige Tendenz legt nahe, dass technologische Weiterentwicklungen, Netzausbauentscheidungen und betriebliche Optimierungen strukturelle Effizienzgewinne ermöglichen, die den rasanten Anstieg des Datenverkehrs nicht proportional im Energieverbrauch widerspiegeln. An diese Beobachtung knüpft die folgende Projektion an, indem sie aufzeigt, wie sich diese Trends in den kommenden Jahren fortsetzen könnten und

³¹ Dies wird exemplarisch durch die finnische Zeitreihe illustriert: In der zweiten Hälfte des Jahres 2017 stieg das Datenvolumen im Vergleich zum Vorjahr um etwa 40 %, während der Energieverbrauch nicht proportional zunahm (Pihkola et al., 2018. Evaluating the Energy Consumption of Mobile Data Transfer—From Technology Development to Consumer Behaviour and Life Cycle Thinking. *Sustainability* 2018, 10(7), 2494. <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/7/2494>).

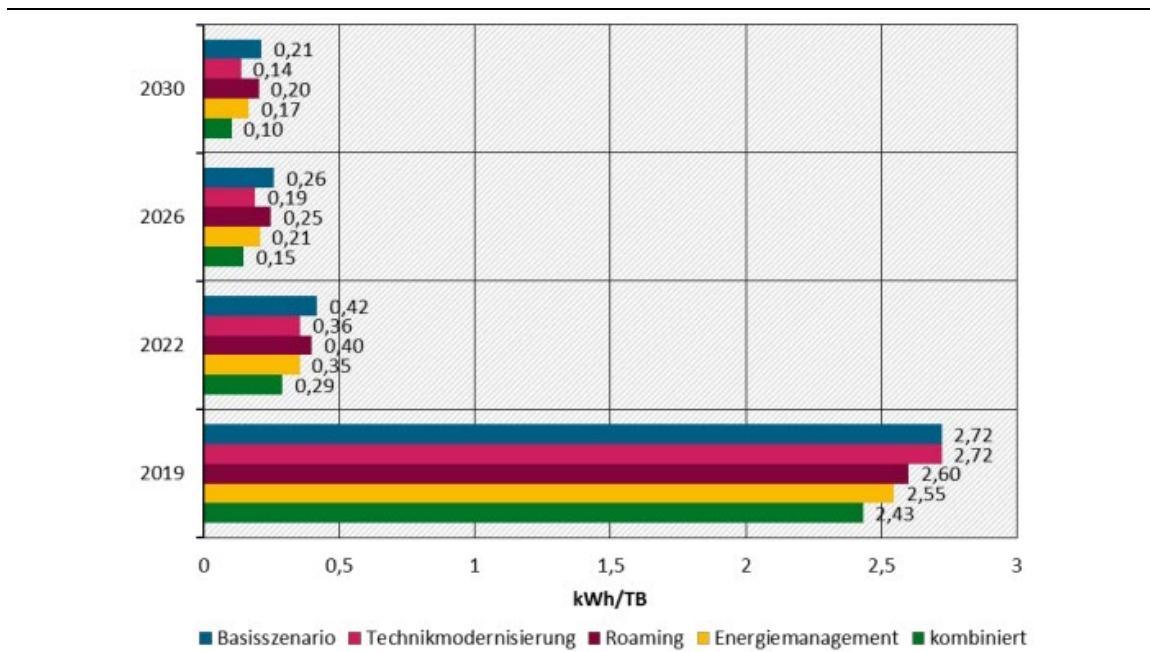
welche Effizienzpfade für den deutschen Mobilfunksektor bis 2030 erwartet werden können.

Nationale Projektionen für Deutschland.

Für Deutschland zeigen Projektionen des Fraunhofer-Instituts für Zuverlässigkeit und Mikrointegration (IZM), dass sich die Energieeffizienz des Mobilfunknetzes bis 2030 substantiell verbessern dürfte. Ausgehend von den Referenzwerten des Jahres 2019 erwarten Stobbe et al. (2023), dass der absolute Energieverbrauch der Mobilfunknetze bis 2030 zwar um den Faktor 3,5 ansteigt, gleichzeitig jedoch die übertragbare Netzkapazität um den Faktor 45 zunimmt. Damit würde sich das Verhältnis aus Energieverbrauch und übertragenem Datenvolumen – also die Energieeffizienz – in diesem Zeitraum rechnerisch nahezu um den Faktor 14 verbessern.³²

Die zugrunde liegenden spezifischen Energiekennzahlen verdeutlichen diese Entwicklung. Für das Jahr 2019 wird der spezifische Energieverbrauch im Bereich des RAN auf etwa 0,00243 bis 0,00272 kWh/ GB geschätzt. Für das Jahr 2030 prognostiziert die Studie Werte zwischen 0,00010 und 0,00021 kWh/ GB. Damit liegen die künftigen Kennzahlen um eine Größenordnung unter den Ausgangswerten des Jahres 2019.³³

Abbildung 3-6: Energieeffizienz in Deutschland: Prognose 2019–2030 für verschiedene Szenarien



Quelle: Stobbe et al. (2023). Umweltbezogene Technikfolgenabschätzung Mobilfunk in Deutschland: Final Report, 26/2023 (Projekt UTAMO).
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_26-2023_umweltbezogene_technikfolgenabschaetzung_mobilfunk_in_deutschland.pdf.

³² Stobbe et al. (2023).

³³ Stobbe et al. (2023).

Die in der Abbildung 3-6 dargestellten Szenarien – Basisszenario, Technikmodernisierung, Roaming-Optimierung, Energiemanagement und ein kombiniertes Szenario – verdeutlichen, dass unterschiedliche Maßnahmenpfade zu variierenden Energieintensitäten führen können. Während das Ausgangsjahr 2019 durch spezifische Energieverbräuche von etwa 2,43 bis 2,72 kWh/ TB (entspricht 0,00243–0,00272 kWh/ GB) gekennzeichnet ist, zeigen die Projektionen für 2022, 2026 und 2030 in allen Szenarien eine abnehmende Energieintensität. Besonders im kombinierten Szenario – das mehrere Effizienzhebel gleichzeitig berücksichtigt – ergibt sich bis 2030 ein spezifischer Energieverbrauch von rund 0,10 kWh/ TB (0,00010 kWh/ GB), während selbst konservativere Szenarien Werte von etwa 0,17 bis 0,21 kWh/ TB prognostizieren.³⁴

Insgesamt deuten die verfügbaren Projektionen darauf hin, dass der in der Studie erwartete Anstieg des mobilen Datenverkehrs in Deutschland bis 2030 sich nicht proportional zum geschätzten Energieverbrauch darstellt, sondern dass technologische Weiterentwicklungen und Netzaufbaumaßnahmen zu einer deutlichen Effizienzsteigerung führen, die den wachsenden Energiebedarf zumindest teilweise kompensiert. Festzuhalten bleibt aus ökonomischer und ökologischer Sicht aber auch, dass der Energiebedarf des Mobilfunknetzes trotz aller Innovationen steigen wird.

3.5 Beispiele aus der Praxis deutscher Netzbetreiber

Die von deutschen Mobilfunknetzbetreibern veröffentlichten Energieeffizienzkennzahlen bieten erste Orientierungspunkte zur energetischen Leistungsfähigkeit der jeweiligen Netzinfrastrukturen, lassen jedoch in der Regel **keine spezifische Betrachtung von Mobilfunknetzen** zu, da die Angaben unternehmensbezogen sind und keine Differenzierung in Mobilfunk und Festnetz zulassen.

Die Deutsche Telekom weist ihre Energiekennzahlen im Corporate-Responsability-Bericht gemäß den Vorgaben des Standards GRI 302-3³⁵ aus, der Bestandteil der *Global Reporting Initiative* ist. Dieser Standard definiert Energieintensität als Verhältnis aus absolutem Energieverbrauch und einer organisationsspezifischen Bezugsgröße. Dieses Vorgehen steht methodisch nicht im Widerspruch zu den Energieeffizienzstandards von ETSI oder ITU, erfordert jedoch keine differenzierte Aufschlüsselung nach Ländern oder Tätigkeitsbereichen; eine solche Differenzierung wird lediglich empfohlen. Die Deutsche Telekom veröffentlicht sowohl gruppenweite als auch länderspezifische Werte. Für Deutschland lag die Energieintensität im Jahr 2024 bei rund 23 kWh pro übertragenem Terabyte,³⁶ entsprechend etwa 0,023 kWh pro Gigabyte. Eine gesonderte Ausweisung

³⁴ Stobbe et al. (2023).

³⁵ Global Sustainability Standards Board (GSSB) (2016). GRI 302: Energy 2016. <https://www.globalreporting.org/publications/documents/english/gri-302-energy-2016/>.

³⁶ Telekom (2024). CR-Bericht. ESG KPI „Energy Intensity“, Kennzahlen je Landesgesellschaft. https://www.cr-bericht.telekom.com/2024/kennzahlen-tool/national_company/532cb555-7fe4-4d63-8c5a-cf20e590aee5/456addc8-6156-4b88-bf10-084fe521f54c/table.

für Festnetz- und Mobilfunkanteile ist jedoch nicht Bestandteil der veröffentlichten Berichte.

Auch Vodafone weist in seinem *Environmental, Social and Governance* (ESG) Addendum Energieverbräuche für Festnetz und Mobilfunk getrennt aus, stellt diese jedoch ausschließlich in konsolidierter Form für die Vodafone Group dar. Nationale Energiekennzahlen für Deutschland werden nicht separat veröffentlicht.³⁷

Telefónica Germany wiederum berichtet für Deutschland einen aggregierten Energieverbrauch von etwa 0,07 kWh pro Gigabyte für das Jahr 2024, weist jedoch ausdrücklich darauf hin, dass das zugrunde liegende Datenvolumen sowohl mobilen als auch festnetzgebundenen Datenverkehr umfasst.³⁸

Aufgrund dieser fehlenden Segmentierung erlauben die vorliegenden Betreiberangaben keine spezifischen Rückschlüsse auf die Energieeffizienz des deutschen Funkzugangsnetzes (RAN). Vor diesem Hintergrund gewinnt die Frage an Bedeutung, ob technische Standards eine belastbare Vergleichbarkeit ermöglichen können. Die von der Bundesnetzagentur beauftragte Studie des Öko-Instituts zur Vergleichbarkeit von Nachhaltigkeitsstandards im Telekommunikationssektor kommt zu dem Ergebnis, dass insbesondere ETSI EN 303 472 und ETSI ES 203 228 (siehe Abschnitt 3.2) aufgrund klar definierter Messprozesse und transparenter Datenerfassungsrichtlinien eine hohe Ergebnisvergleichbarkeit aufweisen. Allerdings zeigt die Untersuchung zugleich, dass keiner der insgesamt 15 berücksichtigten energierelevanten Standards im regulatorischen Rahmen der EU-Taxonomie oder der CSRD explizit genannt wird. Zudem liegen bislang keine belastbaren Nachweise für eine praktische Anwendung dieser Standards in Deutschland vor.³⁹

Aufgrund dieser fehlenden Segmentierung erlauben die vorliegenden Betreiberangaben keine spezifischen Rückschlüsse auf die Energieeffizienz des deutschen Funkzugangsnetzes (RAN).

Gleichzeitig lassen sich den Nachhaltigkeitsberichten und Pressemitteilungen der Netzbetreiber verschiedene Maßnahmen entnehmen, mit denen die Energieeffizienz der Mobilfunknetze verbessert werden soll.

- Bei der Deutschen Telekom stehen der Rückbau älterer Mobilfunkgenerationen sowie die Modernisierung der technischen Infrastruktur im Vordergrund. Die geplante Abschaltung des 2G-Netzes bis Mitte 2028 soll nach Unternehmens-

³⁷ Vodafone Group (2025). ESG reports. <https://www.vodafone.com/about-vodafone/reporting-centre/esg-reports>.

³⁸ Telefónica Germany (2024). Corporate Responsibility Report 2023: O2 Telefónica improves energy efficiency in the network. Press Release Telefónica Germany. 28.03.2024.

³⁹ Öko-Institut Consult GmbH (2025). Forschungsvorhaben „Vergleichbarkeit von Nachhaltigkeitsstandards für Telekommunikationsinfrastruktur (TKI). https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/Digitales/Nachhaltigkeit/Standardstudie/_DL/Standardstudie_DE.pdf?__blob=publicationFile&v=2.

angaben zu einer Reduktion des Energieverbrauchs um rund 10 Prozent gegenüber 2020 beitragen.⁴⁰ Darüber hinaus investiert das Unternehmen in energieautonome Standorte, optimierte Kühlsysteme sowie in intelligente Energiesparmechanismen, darunter dynamische Schlafmodi und Start-Stopp-Techniken.⁴¹

- Vodafone konzentriert sich insbesondere auf Effizienzsteigerungen im Zusammenhang mit 5G-Netzinfrastrukturen. Hierzu gehört die Einführung von Technologien zur Bündelung verschiedener Frequenzbereiche, die laut Unternehmensangaben Energieeinsparungen von bis zu 40 Prozent ermöglichen.⁴² Zusätzlich kommen dynamische Energiesparmodi zum Einsatz, die bei geringer Auslastung einzelner Standorte automatisch aktiviert werden und den Stromverbrauch senken.⁴³
- Telefónica Germany setzt ebenfalls auf den Ausbau von 5G, das nach eigenen Angaben bis zu 90 Prozent weniger Energie pro übertragenem Byte benötigt als frühere Mobilfunkgenerationen.⁴⁴ Ergänzend erprobt und implementiert Telefónica KI-gestützte Instrumente zur Kapazitätsplanung und zur dynamischen Anpassung des Netzbetriebs an variierende Nachfrageprofile. Diese Maßnahmen führten unter anderem zu Einsparungen von etwa 10 Prozent, etwa durch das zeitweise Abschalten einzelner Frequenzen während der Nachtstunden.

Zusammenfassend zeigt die Praxis deutscher Netzbetreiber, dass technologische Weiterentwicklungen, intelligente Betriebsstrategien und der Einsatz datenbasierter Steuerungsverfahren zentrale Ansatzpunkte zur Verbesserung der Energieeffizienz im Mobilfunk darstellen. Die derzeit veröffentlichten Energiekennzahlen erlauben jedoch aufgrund fehlender Segmentierung keine direkte Bewertung der Effizienz speziell im deutschen RAN.

⁴⁰ [Telekom \(2022\)](#). Nachhaltigkeitstag: Telekom senkt Energieverbrauch bis 2024 um mindestens zehn Prozent. Medieninformation. 12.10.2022.

⁴¹ [Telekom \(2021\)](#). Nachhaltige und energieeffiziente Standortplanung im Mobilfunk. 28.09.2021

⁴² [Vodafone \(2023\)](#). Vodafone bringt neue Stromspar-Technologie erstmals ins deutsche Mobilfunk-Netz. Newsroom. 23.11.2023.

⁴³ [Vodafone \(2022\)](#). Vodafone startet dynamischen Energiespar-Modus im Mobilfunk. Newsroom. 16.10.2022.

⁴⁴ [Telefónica Germany \(2024\)](#).

4 Technische Einflussfaktoren auf die Energieeffizienz im Mobilfunknetz

4.1 Überblick über die relevanten technischen Zusammenhänge

Der Energieverbrauch eines Mobilfunkstandorts resultiert nicht aus einem einzelnen technischen Faktor, sondern aus dem Zusammenspiel mehrerer miteinander verknüpfter Einflussgrößen. Wesentlich ist zunächst zwischen drei grundlegenden Mechanismen der **Energieentstehung** zu unterscheiden.

- Erstens fällt eine **Grundlast** an, die unvermeidbar entsteht, weil aktive Hardware- und Kühlsysteme auch bei geringer oder fehlender Datenübertragung betrieben werden müssen.
- Zweitens kommen **lastabhängige** Anteile hinzu, die mit steigender Auslastung des Funksystems zunehmen; sie entstehen unter anderem durch intensivere Signalverarbeitung, höhere erforderliche Sendeleistungen oder zusätzliche aktivierte Hardwarekomponenten.
- Drittens entstehen **verlust- und umwandlungsbedingte** Effekte entlang der gesamten Stromversorgungskette,⁴⁵ da nicht sämtliche elektrische Energie in Funksignale umgesetzt werden kann (Wirkungsgrad).

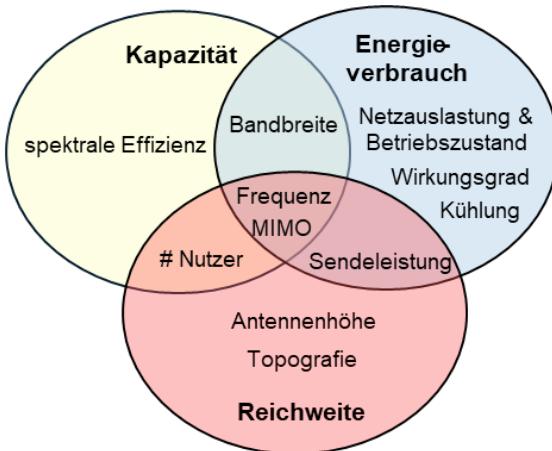
Die nachfolgenden Faktoren bestimmen gemeinsam nicht nur den Energieverbrauch eines Funkstandorts, sondern auch, in welchem Leistungszustand dieser arbeitet.

- (1) technisch festgelegte Eigenschaften eines Standorts (**verfügbare Kapazität**),
- (2) die räumliche Versorgungsaufgabe (**Reichweite**).
- (3) tatsächliche Belastung durch die Nutzer (**nachgefragte Kapazität**)

Damit ergibt sich der Energieverbrauch eines Standorts aus der Frage, wie viel Versorgung (Kapazität und Reichweite) bereitgestellt wird und mit welchem Nutzungsprofil diese Kapazitäten in Anspruch genommen werden. Die nachstehende Abbildung 4-1 stellt diese Bestimmungsfaktoren und deren Interdependenzen systematisch ein.

⁴⁵ Beispielsweise bei den Gleichrichtern und analog/ digital und digital/ analog Wandlern.

Abbildung 4-1: Vereinfachte Darstellung der Interdependenzen zentraler Einflussfaktoren im RAN



Quelle: Eigene Darstellung

(1) Verfügbare Kapazität – Energieverbrauch

Die Netzkapazität eines Mobilfunkstandorts beschreibt die Menge an Daten, die während eines bestimmten Zeitraums gleichzeitig verarbeitet werden kann. Sie wird wesentlich durch mehrere technische Rahmenbedingungen bestimmt: die verfügbare Bandbreite, den genutzten Frequenzbereich und die spektrale Effizienz der eingesetzten Funktechnologie. Ein Teil des Energieverbrauchs entsteht unabhängig von der Datennutzung allein dadurch, dass Kapazität vorgehalten wird. Die vorgehaltene Kapazität definiert somit den energetischen Ausgangsrahmen, innerhalb dessen die eigentliche Datenübertragung stattfindet.

(2) Reichweite – Energieverbrauch

Die räumliche Versorgungsaufgabe – also die Reichweite eines Standorts – entfaltet einen eigenständigen Einfluss auf den Energieverbrauch. Größere Versorgungsflächen, wie sie typischerweise in dünn besiedelten Regionen anzutreffen sind, erfordern stärkere oder weiter reichende Funksignale und damit höhere Sendeleistungen. Dabei besteht ein positiver Zusammenhang zwischen Reichweite und Energieverbrauch.

(3) Nachgefragte Kapazität – Energieverbrauch

Das tatsächlich nachgefragte Datenvolumen bestimmt, in welchem Betriebszustand sich ein Mobilfunkstandort befindet. Je mehr Nutzer aktiv sind, je länger Anwendungen genutzt werden und je datenintensiver diese Anwendungen sind (etwa Streaming, Cloud-Dienste oder interaktive Dienste), desto stärker steigt die Auslastung. Mit zunehmender Auslastung steigen sowohl die für Signalverarbeitung und Funkübertragung erforderlichen Aktivleistungen als auch der energiebezogene Aufwand der unterstützenden Infrastrukturkomponenten, insbesondere der Kühlsysteme.

Wechselwirkungen

Einzelne Faktoren wirken dabei in entgegengesetzte Richtungen: Niedrigere Frequenzen verbessern zwar die Reichweite, stellen aber geringere Kapazitäten zur Verfügung. Reichweite und Kapazität stehen somit in einem wechselseitigen Verhältnis.

Im Weiteren werden diese Zusammenhänge einzeln vertieft, indem sowohl kapazitätsbedingte Effekte als auch nutzungsabhängige Lastzustände und der Einfluss der räumlichen Versorgungsaufgabe auf den Energieverbrauch herausgearbeitet werden.

4.2 Netzdimensionierung und Bestimmung der Kapazität eines Antennenstandort

Zur Dimensionierung der an einem Antennenstandort vorzuhaltenden Kapazität analysieren Netzbetreiber, welche Zieldatenrate jedem Nutzer innerhalb der abzudeckenden Fläche während der typischen Spitzenlast („Busy-Hour“) bereitgestellt werden soll.

- (1) Flächenabdeckung und Anzahl der Nutzer
- (2) Zieldatenrate pro Nutzer in der Busy-Hour

Flächenabdeckung und Anzahl der Nutzer: Die Kapazitätsdimensionierung eines Antennenstandorts hat die räumliche Abdeckung und die Versorgung der in diesem geografischen Bereich (Funkzelle) potentiell befindlichen Nutzer zum Gegenstand. Die Besiedlungsdichte und auch die Größe der Versorgungsfläche haben einen Einfluss auf die bereitzustellende Kapazität. Damit definiert die Kombination aus Flächenausdehnung und Nutzeranzahl die Grundanforderung, auf deren Basis die verfügbare Kapazität dimensioniert werden muss.

Zieldatenrate pro Nutzer in der Busy-Hour: Die erwartete Spitzenlast in der Hauptverkehrsstunde bestimmt das am Antennenstandort vorzuhaltende Kapazitätsniveau. Dieses kann statistisch anhand der Nutzerzahl und der durchschnittlichen Datenrate pro Nutzer in der Busy Hour beschrieben werden. Die Datenrate gibt an, wie viel Datenvolumen pro Zeiteinheit bereitgestellt wird, damit typische Anwendungen ohne Qualitätsverlust nutzbar sind. Ob es sich dabei um einfache Webanfragen oder datenintensive Anwendungen wie Video-Streaming oder Cloud-Dienste handelt, beeinflusst die Kapazitätsanforderung unmittelbar.

4.3 Technische Komponenten: Leistungsmerkmale und Energieverbrauch

Nachdem die erforderliche Kapazität eines Antennenstandorts auf Basis der genannten Kriterien ermittelt wurde, lässt sich deren technische Umsetzung durch drei zentrale Parameter konkret bestimmen:

- (1) die insgesamt verfügbare **Bandbreite** und der zugeordnete **Frequenzbereich**,
- (2) die eingesetzte **Mobilfunktechnologie** und deren **spektrale Effizienz** sowie
- (3) die verwendete **Mehrantennentechnik (MIMO)**.

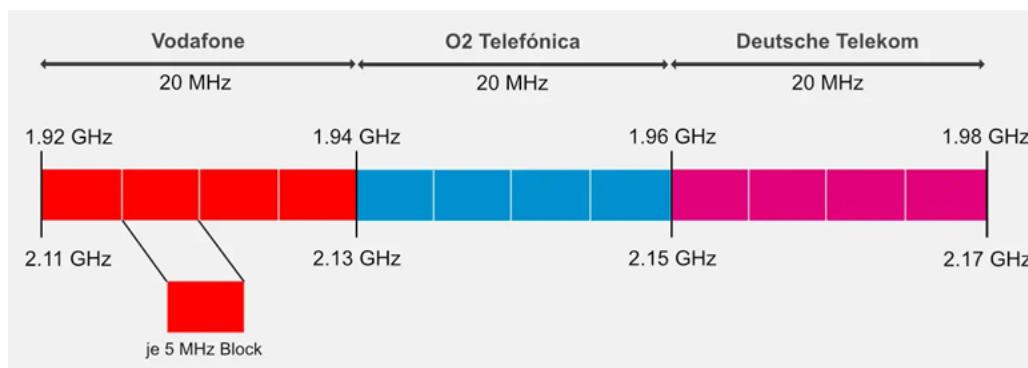
Diese Einflussfaktoren werden in den folgenden Abschnitten im Detail untersucht.

4.3.1 Bandbreite und Frequenzbereich

Die Bandbreite beschreibt im Mobilfunkkontext jenen Bereich des elektromagnetischen Spektrums, der als Übertragungskanal für Funksignale genutzt wird. Sie wird in Megahertz (MHz) angegeben und entspricht der Breite eines Frequenzbands, das für die Datenübertragung zur Verfügung steht. Die verfügbare Bandbreite beeinflusst die Kapazität eines Antennenstandorts und somit, wie viele Daten pro Zeiteinheit übermittelt werden können.

Das Spektrum wird in Form von Frequenzblöcken den Netzbetreibern zur Verfügung gestellt. Dabei handelt es sich um definierte, diskrete Teilbereiche eines Frequenzbands, häufig in Einheiten von beispielsweise 5 MHz. Einem Netzbetreiber wird eine bestimmte Anzahl solcher Frequenzblöcke exklusiv zugeteilt. Folgende Abbildung illustriert die Anordnung von Frequenzblöcken im Bereich um 2,1 GHz.

Abbildung 4-2: Darstellung von Frequenzblöcken im Frequenzbereich 2,1 GHz



Quelle: 5G-Anbieter. 5G Frequenzen Welche Frequenzen & Bänder nutzt das 5G-Netz? <https://www.5g-anbieter.info/technik/5g-frequenzen.html>.

Die Summe aller einem Standort zugeordneten Frequenzblöcke wird als Gesamtbandbreite bezeichnet. Die Verfügbarkeit dieser Blöcke hängt von der nationalen Frequenzvergabepolitik ab, die festlegt, welche Frequenzbereiche für Mobilfunknutzung bereitstehen und wie sie zwischen den Betreibern aufgeteilt werden.^{46, 47} Die eigentliche Datenübertragung erfolgt entlang sogenannter Trägerfrequenzen.⁴⁸

Die technische Umsetzung erfolgt über sogenannte Transceiver (TRX). Sie übernehmen im Funkmodul die Umwandlung digitaler Signale in analoge Funksignale und deren Verstärkung zur Aussendung.

Mit der Anzahl eingesetzter Trägerfrequenzen steigt auch die Zahl aktiver Transceiver.⁴⁹ Kapazitätssteigerungen durch zusätzliche Bandbreite sind deshalb regelmäßig mit steigendem Energiebedarf verbunden, da jeder weitere Transceiver Energie für Signalverarbeitung, Signalerzeugung und Verstärkung benötigt.

Hinzu kommt, dass die energetische Belastung von der Breite und Lage der verwendeten Trägerfrequenzen im Frequenzspektrum abhängt, da höhere Frequenzbereiche typischerweise stärkere Verstärkungsleistungen benötigen und damit energetisch anspruchsvoller sein können.

Der Energieverbrauch eines Standorts wird somit durch die Anzahl der eingesetzten Transceiver (TRX) und die Frequenzbereiche, in denen diese operieren, beeinflusst.

Die Transceiver (TRX) repräsentieren die Netzkomponente mit dem höchsten Anteil am Gesamtenergiebedarf eines Mobilfunkstandorts (typischer Anteil von rund 40 %).⁵⁰ Dies wird in der nachfolgenden Abbildung dargestellt („radio processing 40 %“).

⁴⁶ Stobbe et al. (2023). Die Zuteilung der Frequenzblöcke auf die Betreiber erfolgt in Deutschland üblicherweise über Versteigerungen.

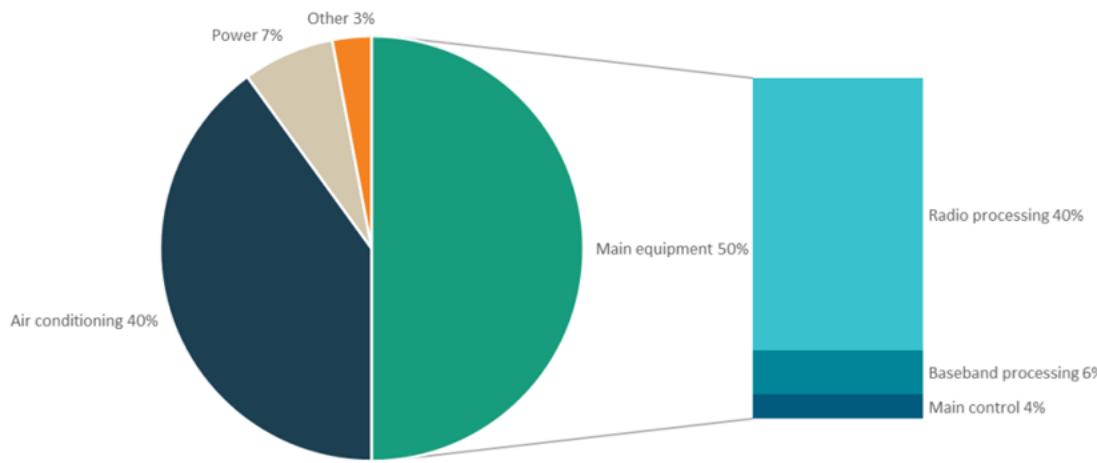
⁴⁷ Nett, L. und Sörries, B. (2022). Flexibilisierung der Frequenzregulierung und des Frequenzplans. WIK Diskussionsbeitrag Nr. 488. <https://www.wik.org/veroeffentlichungen/veroeffentlichung/nr-488-flexibilisierung-der-frequenzregulierung-und-des-frequenzplans>.

⁴⁸ Eine Trägerfrequenz ist ein konkreter Punkt im Spektrum, an dem die Informationsübertragung verankert ist (z. B. 2,1 GHz). Auf dieser Grundlage ergibt sich die nutzbare Gesamtbandbreite eines Antennenstandorts aus der Summe aller zugewiesenen Frequenzblöcke über mehrere Trägerfrequenzen hinweg.

⁴⁹ Für jede eingesetzte Trägerfrequenz ist in der Regel mindestens ein TRX aktiv.

⁵⁰ Fraunhofer (2023). White Paper 6G Energy Efficiency and Sustainability) / NGMN (2024). Green Future Networks. Network Energy Efficiency. <https://www.iis.fraunhofer.de/en/ff/lv/iot-system/tech/sustainable-ict.html>.

Abbildung 4-3: Energieverbrauchsstruktur einer Mobilfunkbasisstation (in %)



Quelle: Fraunhofer (2023). White Paper 6G Energy Efficiency and Sustainability) / NGMN (2024). Green Future Networks. Network Energy Efficiency. <https://www.iis.fraunhofer.de/en/ff/lv/iot-system/tech/sustainable-ict.html>.

Der Energiebedarf im Funkmodul resultiert dabei nicht nur aus der Signalerzeugung, sondern maßgeblich aus der Leistungsverstärkung, deren Wirkungsgrad vom Frequenzbereich und der eingesetzten Sendeleistung.

- Der Wirkungsgrad der Leistungsverstärker im Transceiver, also das Verhältnis zwischen abgegebener und aufgenommener Leistung, nimmt mit steigender Trägerfrequenz deutlich ab. Dies ist insbesondere in Frequenzbereichen oberhalb von etwa 3 GHz ausgeprägt. Hier verschlechtert sich das Signal-Rausch-Verhältnis, was zu Signalverlusten im Übertragungskanal führt. Um diese Signalverluste auszugleichen, müssen zusätzliche Filter, Verstärkerstufen und Signalprozessoren eingesetzt werden, die wiederum den Energiebedarf des TRX erhöhen. Für diese Frequenzbereiche gilt daher, dass pro übertragener Dateneinheit ein höherer Energieeinsatz erforderlich wird.⁵¹
- Der Leistungsverstärker selbst verfügt über einen optimalen Arbeitspunkt, der durch eine definierte Sendeleistung gekennzeichnet ist. Wird von diesem Arbeitspunkt abgewichen, sinkt die Effizienz, sodass pro ausgegebener Sendeleistung mehr Energie benötigt wird.⁵²

4.3.2 Mobilfunktechnologie und spektrale Effizienz

Die spektrale Effizienz beschreibt das Verhältnis zwischen der erzielten Datenübertragungsrate, gemessen in Bit pro Sekunde (bps), und der dafür genutzten Bandbreite des Funksignals, angegeben in Hertz (Hz). Sie gibt somit an, wie effektiv ein Mobilfunksystem

⁵¹ Stobbe et al. (2023).

⁵² Stobbe et al. (2023).

die begrenzt verfügbare Funkbandbreite zur Datenübertragung nutzt. Eine höhere spektrale Effizienz bedeutet, dass pro genutzter Frequenzeinheit mehr Daten übertragen werden können, d. h., verfügbare Frequenzblöcke effizienter genutzt werden können.

Die spektrale Effizienz wird technisch durch verschiedene Verfahren der Signalverarbeitung bestimmt. Von zentraler Bedeutung sind das verwendete Modulationsverfahren, etwa *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM), welches die Anzahl der pro Symbol übertragbaren Bits festlegt, sowie die eingesetzte Codierung, die die Robustheit der Übertragung und den Anteil der Nutzdaten definiert. Beide Größen bestimmen gemeinsam, wie effizient und störungsarm Daten innerhalb eines gegebenen Frequenzbandes transportiert werden können. Somit ist die spektrale Effizienz eine übergeordnete Messgröße, die die Wirkung vieler unterschiedlicher Maßnahmen beschreibt.

Neue Mobilfunkgenerationen gehen mit verbesserten Signalverarbeitungsverfahren und damit auch höherer spektraler Effizienz einher. Technologischer Fortschritt kann somit Netzkapazitäten erweitern, ohne dass der Energieverbrauch proportional zunimmt, da die Effizienzsteigerung primär auf verbesserten Signalverarbeitungsmethoden und nicht auf einem Ausbau des Spektrums oder der Trägerfrequenzen beruht. Ein Mehrbedarf an Energie, bedingt durch die Verbesserung in der Signalverarbeitung (z. B. durch leistungsfähigere, rechenintensivere Codierungsverfahren), steht dabei in keinem Verhältnis zum Mehrbedarf durch höhere Übertragungsvolumina im Frequenzbereich.

Info-Box: Spektrale Effizienz der Mobilfunkgenerationen und Quantifizierung

Diese Signalverarbeitungsverfahren unterscheiden sich zwischen den Mobilfunkgenerationen und haben sich mit zunehmendem Entwicklungsstand erheblich weiterentwickelt. Die daraus resultierenden Unterschiede lassen sich entlang der Mobilfunkgenerationen beobachten. Die folgende Tabelle stellt die durchschnittliche spektrale Effizienz in Abhängigkeit von der jeweiligen Mobilfunkgeneration dar.

Tabelle 4-1: Durchschnittliche spektrale Effizienz nach Mobilfunkgeneration

Mobilfunkgeneration	Spektrale Effizienz [bit/s/Hz]
2G	k.A.
3G (UMTS)	0,1 bis 0,8
4G (LTE-A)	1,2 bis 3,7
5G NR – rural	1,6 bis 3,3
5G NR – urban	5,4 bis 9,0

Quelle: ETSI TR 103 541 V1.1.1 (2018-05). Environmental Engineering (EE); Best practice to assess energy performance of future Radio Access Network (RAN) deployment. https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/103500_103599/103541/01.01.01_60/tr_103541v010101p.pdf.

Die tabellarisch dargestellten Werte zeigen die von der ETSI ermittelten Durchschnittswerte der spektralen Effizienz verschiedener Mobilfunkgenerationen. Für 2G liegen keine quantifizierbaren Werte vor, da dieses System überwiegend für Sprach-, nicht jedoch für breitbandige

Datenübertragung konzipiert war. Bereits die Einführung von 3G (UMTS) führte zu messbaren Effizienzgewinnen im Bereich von 0,1 bis 0,8 bps/ Hz, wenngleich auf einem vergleichsweise niedrigen Niveau. Mit 4G (LTE-Advanced) stieg die spektrale Effizienz deutlich auf Werte zwischen 1,2 und 3,7 bps/ Hz, wodurch höhere Datenraten bei gleicher Bandbreite möglich wurden. 5G-Systeme weisen nochmals höhere spektrale Effizienzen auf, die jedoch kontextabhängig sind: In ländlichen Konfigurationen werden Werte zwischen 1,6 und 3,3 bps/ Hz erreicht, während urbane Konfigurationen eine wesentlich höhere Spanne von 5,4 bis 9,0 bps/ Hz aufweisen.⁵³

Allerdings wird dieses technische Potenzial in der Praxis dadurch relativiert, dass neue Mobilfunkgenerationen typischerweise in höheren Frequenzbändern eingesetzt werden.⁵⁴ Damit hängt die energiebezogene Bewertung der spektralen Effizienz nicht allein von der eingesetzten Technologie ab, sondern ebenso vom Frequenzbereich, in dem sie angewendet wird.

4.3.3 Mehrantennentechnik (MIMO)

Auch andere technologische Innovationen können dazu beitragen, verfügbare Ressourcen effizienter auszunutzen und damit die nutzbare Kapazität verfügbarer Frequenzblöcke an einem Mobilfunkstandort besser zu nutzen. Während 2G- bis 4G-Systeme überwiegend auf *Frequency Division Multiplexing* basierten, erlaubt 5G erstmals eine flexible, zeitlich variable Nutzung des Frequenzspektrums. Diese Flexibilisierung schafft insbesondere Anwendungspotenzial für Mehrantennensysteme (MIMO).⁵⁵

Bei MIMO-Konfigurationen werden mehrere Sende- und Empfangsantennen parallel betrieben, wodurch sich die Anzahl simultan übertragbarer Datenströme erhöht.

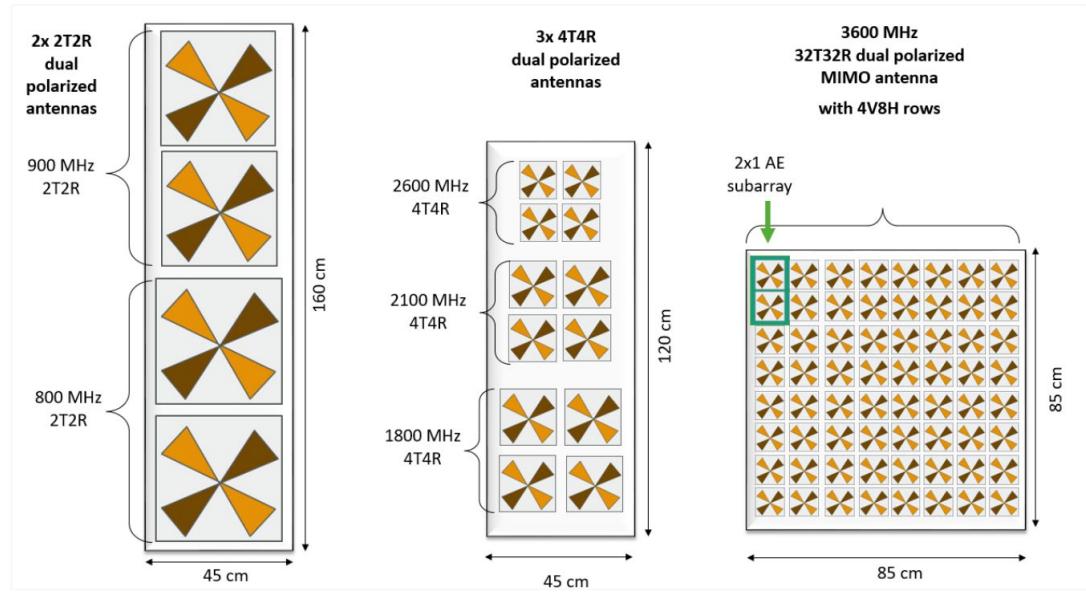
Die Antennenanlage wird üblicherweise durch die Anzahl der Sende- und Empfangsantennen gekennzeichnet (z. B. 2T2R mit zwei Sende- (*T: Transmit*) und zwei Empfangsantennen (*R: Receive*), 4T4R als klassische LTE-Konfiguration, 8T8R für leistungsfähigere LTE- oder 5G-Systeme und 32T32R oder mehr im Bereich aktiver 5G-Massive-MIMO-Systeme). Mit steigender Antennenanzahl lassen sich mehr räumlich getrennte Kanäle erzeugen, wodurch die spektrale Effizienz und die absolute Kapazität des Standorts signifikant erhöht werden können.

⁵³ ETSI TR 103 541 V1.1.1 (2018-05). Environmental Engineering (EE); Best practice to assess energy performance of future Radio Access Network (RAN) deployment. https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/103500_103599/103541/01.01.01_60/tr_103541v010101p.pdf.

⁵⁴ 5G new Radio kann in allen lizenzierten Frequenzbereichen eingesetzt werden, nur sind die niedrigen Frequenzbereiche i.d.R. durch alte Funktechniken belegt.

⁵⁵ Stobbe et al. (2023).

Abbildung 4-4: Exemplarische Darstellung von MIMO Antennenmodulen

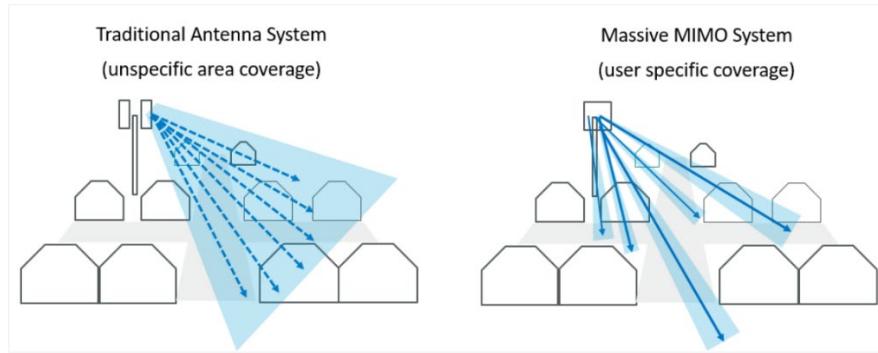


Quelle: Stobbe et al. (2023). Umweltbezogene Technikfolgenabschätzung Mobilfunk in Deutschland: Final Report, 26/2023 (Projekt UTAMO). https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_26-2023_umweltbezogene_technikfolgenabschaetzung_mobilfunk_in_deutschland.pdf.

Diese Erweiterung der Antennenkonfiguration hat jedoch direkte technische Implikationen. Die erzeugten zusätzlichen Kanäle erfordern mehr Transceiver (TRX), wodurch die Signalverarbeitungskomplexität zunimmt und zusätzliche Energie eingesetzt werden muss.

Zudem ergibt sich ein energetischer Vorteil daraus, dass Multiantennensysteme eine präzisere räumliche Bündelung der Funksignale ermöglichen, *Beamforming* genannt. Durch diese räumliche Fokussierung kann die erforderliche Sendeleistung je Datenstrom gesenkt werden, was den Energiebedarf in Relation zur erzielten Kapazitätssteigerung reduziert. Beim *Beamforming* werden die aktiven Antennen so kombiniert und synchronisiert, dass gerichtete Funkwellen entstehen. Dies führt zu einer effizienteren räumlichen Ausbreitung mit geringeren Dämpfungsverlusten. *Beamforming* unterstützt damit die spektrale Effizienz insbesondere von Massive-MIMO-Systemen und reduziert zugleich den Sendeleistungsverlust. Der Einsatzbereich von *Beamforming* richtet sich auf die gezielte Versorgung einzelner Kunden im Abdeckungsgebiet, aber auch auf die Versorgung quasistationärer Kunden als Ersatz für eine Festverbindung (*Fixed Wireless Access*, FWA).

Abbildung 4-5: Massives MIMO mit Beamforming



Quelle: Stobbe et al. (2023). Umweltbezogene Technikfolgenabschätzung Mobilfunk in Deutschland: Final Report, 26/2023 (Projekt UTAMO). https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_26-2023_umweltbezogene_technikfolgenabschaetzung_mobilfunk_in_deutschland.pdf.

4.3.4 Kühlung, Netzteile und weitere unterstützende Systeme

Neben den bisher dargestellten Faktoren beeinflussen eine Reihe weiterer technischer Größen den Energieverbrauch von Mobilfunkstandorten. Dazu gehören insbesondere die folgenden Aspekte.

Ein relevanter Verbrauchsposten ergibt sich aus der **Gerätekühlung**. Basisstationen verfügen in der Regel über temperaturgeregelte Lüfter, deren Drehzahl sich an den operativen Betriebszustand anpasst. Mit steigender Auslastung erhöht sich die thermische Verlustleistung der Signalverarbeitung und der Leistungsverstärker, was eine verstärkte Kühlung erforderlich macht. Auch die Außentemperaturen haben, bezogen auf die erforderliche Kühlleistung, einen erheblichen Einfluss. Der Energiebedarf der Lüftungssysteme steht jedoch nicht in linearer Relation zur Last, sondern steigt überproportional, sobald die Auslastung etwa 50 Prozent der Maximallast überschreitet.⁵⁶ Zudem führt eine hohe thermische Belastung langfristig zu einer Verringerung der Komponenteneffizienz und kann die Lebensdauer der Hardware reduzieren, wodurch indirekt zusätzlicher Ressourcenbedarf entsteht.

Ein weiterer Einflussfaktor sind **elektrische Wandlungsverluste**, die bei der Umwandlung von Wechselstrom in die von elektronischen Komponenten benötigten Gleichspannungsebenen auftreten. Diese Verluste sind technisch unvermeidbar, können aber durch moderne Netzteile, effiziente Gleichrichter und optimierte DC-Wandler reduziert werden. Für diese Komponenten existieren regulatorische Vorgaben, beispielsweise in der EU-Ökodesign-Richtlinie. Mit der Richtlinie der Europäischen Kommission (EU) 2019/424“ (OJ L 74, 2019, S. 46–66)⁵⁷ wurden verbindliche Effizienzzielwerte für externe Netzteile und

⁵⁶ Stobbe et al. (2023).

⁵⁷ Europäische Kommission. (2019). Verordnung (EU) 2019/424 der Kommission vom 19. März 2019 zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich der Festlegung von Ökodesign-Anforderungen an Netzteile. Amtsblatt der Europäischen Union, L

verwandte Energieumwandlungssysteme festgelegt. Diese Vorgaben wirken als Mindeststandard und beeinflussen sowohl die Beschaffungsentscheidungen als auch die technologische Entwicklung entsprechender Hardwarekomponenten.

Schließlich spielt die **Leistungssteigerung und Energieeffizienz heutiger Hardwaretechnologien** eine entscheidende Rolle. Fortschritte in der Leistungsverstärkertechnologie, in Signalprozessorarchitekturen sowie in Materialien und Wärmemanagementsystemen tragen dazu bei, dass die Energieeffizienz neuer Netzkomponenten gegenüber älteren Generationen spürbar verbessert wird. Moderne Architekturen erreichen bei gleicher Ausgangsleistung deutlich geringere Energieverluste.

4.4 Netzauslastung und Energieverbrauch

Unter Netzauslastung wird der zeitliche Verlauf der tatsächlich genutzten Übertragungskapazität eines Antennenstandorts im Verhältnis zur bereitgestellten Kapazität verstanden. Sie ergibt sich aus dem aggregierten Datenvolumen, das Nutzer zu einer bestimmten Zeit im Mobilfunknetz übertragen, und spiegelt damit die reale Beanspruchung der Infrastruktur wider. Für die energetische Bewertung von Mobilfunknetzen ist relevant, in welchem Maße die im Tagesverlauf schwankende Netzauslastung und die Höhe der Lastspitzen den Energiebedarf beeinflussen.

Im vorhergehenden Kapitel wurde gezeigt, dass die Dimensionierung der Netzkapazität eines Antennenstandorts maßgeblich durch die Lastspitzen (*Busy-hour*) geprägt ist, wobei auch Kapazitätsreserven für Spitzenzeiten bereitgestellt werden müssen. Im Fokus dieses Abschnitts steht die Frage, welche Implikationen diese Auslastungsmuster für den Energieverbrauch haben. Dazu wird zunächst anhand von verschiedenen Tageslastprofilen der Zusammenhang von Nutzungsverhalten und transferierten Datenvolumina dargestellt (Abschnitt 4.4.1). Daran schließt sich die Analyse des Energieverbrauchs in Abhängigkeit von Netzauslastung und Betriebsmodi an (Abschnitt 4.4.2). Abschließen erfolgt eine Darstellung zum Energiemanagement (Abschnitt 4.4.3).

4.4.1 Nutzungsverhalten und Datenvolumen

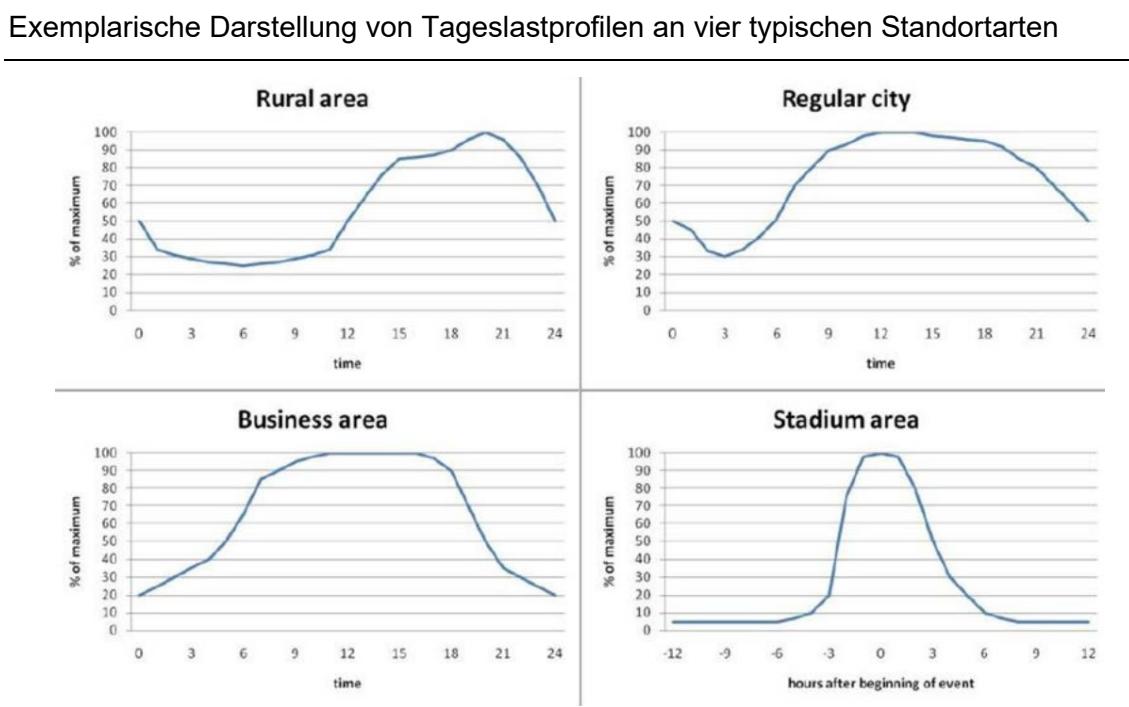
Unter Nutzungsverhalten wird das zeitliche und räumliche Muster verstanden, mit dem Nutzer mobile Daten nachfragen, also wann, wie häufig, wie lang und mit welcher Intensität Dienste genutzt werden. Dieses Verhalten bestimmt das über den Tagesverlauf anfallende Datenvolumen und damit die Belastung des Netzes.

Je nach Ausprägung des Nutzungsverhaltens ergeben sich charakteristische Verlaufsmuster der Netzauslastung, die in vereinfachter Form als Tageslastprofile dargestellt werden können. Aufgrund begrenzter empirischer Datenverfügbarkeit haben Stobbe et al.

74, 46–66. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=uriserv:OJ.L_.2019.074.01.0046.01.DEU.

(2023) eine abstrahierte Charakterisierung dreier typischer Nutzungsmuster entwickelt: Das Low-Load-Profil umfasst rund sechs Stunden pro Tag mit geringer Netzauslastung (vorwiegend in den Nachtstunden), das Medium-Load-Profil etwa zehn Stunden pro Tag und das High-Load-Profil etwa acht Stunden. Diese Einteilung bietet ein praktikables Rahmenmodell, ist jedoch nicht universell übertragbar, da die tatsächliche Auslastung erheblich vom lokalen Nutzungsverhalten geprägt wird. Regionale Unterschiede werden exemplarisch im folgenden Abbildungsvergleich verdeutlicht.

Abbildung 4-6: Exemplarische Darstellung von Tageslastprofilen an vier typischen Standortarten



Quelle: Stobbe et al. (2023). Umweltbezogene Technikfolgenabschätzung Mobilfunk in Deutschland: Final Report, 26/2023 (Projekt UTAMO). https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_26-2023_umweltbezogene_technikfolgenabschaetzung_mobilfunk_in_deutschland.pdf

Wie in Abbildung 4-6 dargestellt kann die räumliche Heterogenität im Nutzungsverhalten zu sehr unterschiedlichen Tageslastprofilen führen: in ländlichen Regionen zeigt das Tagesprofil typischerweise eine geringe Grundlast, gefolgt von einem moderaten Anstieg am Nachmittag, der erst am frühen Abend einen *Peak* erreicht. Städte hingegen weisen bereits ab dem Vormittag eine kontinuierlich ansteigende Nutzung bis in den frühen Abend auf. Noch ausgeprägter differenzieren sich Standorte mit spezifischem Nutzungs-kontext, etwa Geschäftsviertel, die über die typischen Bürozeiten ein Plateau in der Auslastung zeigen, oder großflächige Veranstaltungsorte, bei denen zum Ereignisbeginn kurzfristig Extremwerte auftreten und anschließend wieder rasch abfallen. Diese Muster spiegeln nicht nur Einwohnerdichte und Mobilitätsverhalten wider, sondern auch

kulturelle Nutzungsunterschiede, Tagesrhythmen und die funktionale Charakterisierung von Räumen.

Typischerweise führen Alltagsroutinen zu ausgeprägten Lastspitzen in Zeiten, wenn soziale Medien, Streaming und Kommunikation verstärkt genutzt werden, während in den späten Nachtstunden Lastsenken auftreten. Diese Nachfragevolatilität hat unmittelbaren Einfluss auf die Dimensionierung von Mobilfunkstandorten, da insbesondere die *Busy-hour* als kritischer Referenzpunkt die benötigte Gesamtkapazität vorgibt. Für ausgeprägte Spitzennachfragen müssen Netzbetreiber Kapazitätsreserven dauerhaft bereitstellen, um Qualitätsanforderungen wie niedrige Latenz und ausreichende Datenrate zu garantieren, auch wenn diese Kapazitäten während eines Großteils der Zeit ungenutzt bleiben (vgl. dazu auch Abschnitt 4.4.2.).

Das Datenvolumen eines Tages ist das insgesamt über den Tag übertragende Datenvolumen – in den Grafiken dargestellt durch das Integral unter der Kurve. Das zur Hauptverkehrsstunde (*busy hour*) übertragene Datenvolumen bestimmt die benötigte Kapazität, die das Netz bereitstellen muss. Sie bestimmt damit die Dimensionierung der Antennenstandorte. Zu anderen Zeiten liegt ein Teil der Kapazität brach.

4.4.2 Netzauslastung und Betriebsmodi

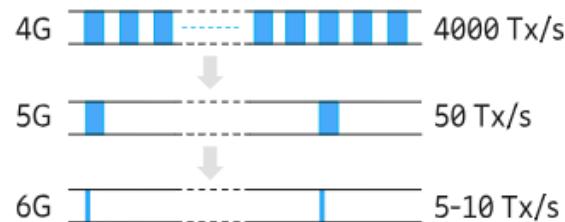
Im Grundsatz hat eine Mobilfunkzelle einen Grundverbrauch zur Aufrechterhaltung des Mobilfunknetzes, eine Empfangsbereitschaft für das Einloggen von Teilnehmern und um den Teilnehmern zu signalisieren, dass es eine Funkzelle gibt und diese (sende-) vor allem aber auch empfangsbreit ist. Hinzu kommt der verkehrsabhängige Sendebetrieb. Die räumlich-zeitliche Varianz der Netzauslastung hat unmittelbare Implikationen für den Energieverbrauch von Mobilfunknetzen, da der Auslastungszustand einer Basisstation einen Lageparameter für die Höhe des Energieverbrauchs darstellt.

Während dann bei hoher Last mehr Leistung für Verstärker, Signalverarbeitung und Kühlung bereitgestellt und damit mehr Energie verbraucht wird, sinkt der Energieverbrauch bei abnehmender Last nicht proportional, da wesentliche Systemfunktionen unabhängig von der Nutzlast aufrechterhalten werden müssen.

In Zeiten niedriger Netzauslastung bleibt die Netztechnik dauerhaft aktiv, um Steuer-, Synchronisations- und Erreichbarkeitssignale auszusenden, selbst wenn kein Datenverkehr übertragen wird. Dieser Grundenergieverbrauch ist weitgehend lastunabhängig und erklärt, warum der Energiebedarf eines Standorts bei geringer Netzauslastung nicht flexibel bis auf nahe Null reduziert werden kann. Die Möglichkeit, den Energieverbrauch dynamisch an das aktuelle Datenvolumen anzupassen („Lastadaptivität“), ist daher strukturell begrenzt, sodass in Zeiten geringer Netzauslastung lastunabhängige Energieverluste entstehen. Dieses Problem variiert jedoch je eingesetzter Mobilfunktechnologie.

Untersuchungen zeigen, dass in herkömmlichen Mobilfunknetzen (4G und älter) lediglich etwa 15 bis 20 Prozent des Gesamtstromverbrauchs tatsächlich der Übertragung von Nutzdaten zuzurechnen sind.⁵⁸ Unterschiede zwischen den Mobilfunkgenerationen ergeben sich insbesondere aus der Signalisierungsdichte (TX/s = Transmissionsimpulse pro Sekunde), also der Anzahl an Synchronisations- und Steuerimpulsen, die in festen Intervallen ausgesendet werden, um Zellen sichtbar und Endgeräte synchron zu halten – auch dann, wenn keine Daten übertragen werden oder sogenannte „Always-on“-Signale. Diese grundlegenden Unterschiede hinsichtlich der Häufigkeit der erforderlichen Signalisierungsdichte (TX/s = Transmissionsimpulsen pro Sekunde) sind in Abbildung 4-7 dargestellt.

Abbildung 4-7: Exemplarische Darstellung „Always-on“-Signale in Mobilfunknetzen nach Mobilfunkgeneration



Quelle: Ericsson (2024). Energy performance of 6G Radio Access Networks: A once in a decade opportunity. <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/white-papers/energy-performance-of-6g-ran>.

In Abbildung 4-7 illustrieren die blauen Blöcke die Signalisierungsdichte für die verschiedenen Mobilfunktechnologien. In 4G liegen diese Signalaussendungen typischerweise bei ungefähr 4.000 Transmissionsimpulsen pro Sekunde. 5G reduziert diese Rate auf etwa 50 Transmissionsimpulse pro Sekunde („lean design“), und für 6G (voraussichtlich kommerziell ab 2030)⁵⁹ werden weitere Reduktionen auf etwa 5–10 Transmissionsimpulse pro Sekunde erwartet. Dies illustriert den technologiebezogenen Effizienzgewinn, zeigt jedoch zugleich, dass auch zukünftig bei 6G noch eine Grundlast verbleibt.

Neuere Mobilfunktechnologien (ab 5G) eröffnen erstmals die Möglichkeit, Komponenten einer Basisstation während inaktiver Phasen (keine Sende- oder Empfangsaktivität) selektiv abzuschalten, anstatt diese dauerhaft im aktiven Zustand zu betreiben. Um diese Flexibilisierung zu ermöglichen, werden mehrere Schlafstufen (*Sleep Modes*) definiert, die sich sowohl hinsichtlich der Abschaltungstiefe als auch der Reaktionszeit unterscheiden. Grundsätzlich gilt: Je tiefer der Schlafmodus, desto mehr Komponenten werden deaktiviert und desto größer ist die potenzielle Energieeinsparung. Gleichzeitig verlängert

⁵⁸ Chochliouros et al. (2021). Energy Efficiency Concerns and Trends in Future 5G Network Infrastructures. <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/17/5392>.

⁵⁹ Telekom (2025). 6G NeXT-Projekt: Erfolgreicher Abschluss nach 3 Jahren 6G-Forschung. Medieninformation. 24.09.2025.

sich jedoch die Aufwachzeit, sodass ein Zielkonflikt zwischen Energieeffizienz und Reaktionsschnelligkeit entsteht.

In 5G New Radio (NR) wird das vollständige Ausschöpfen von *Deep-Sleep*-Potenzialen durch periodisch zu übertragende Systeminformationen begrenzt, die einen vollständig abgeschalteten Zustand verhindern.⁶⁰

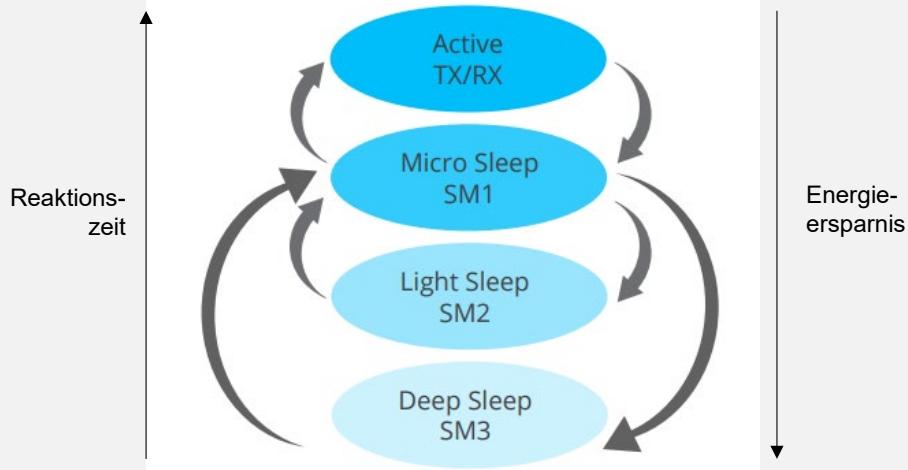
Die erzielbare Energieeinsparung hängt somit sowohl vom gewählten Schlafmodus als auch vom realen Verkehrsmuster ab.⁶¹ Bei geringen Verkehrslasten können tiefere Schlafzustände über längere Zeiträume genutzt werden, wodurch substantielle Energieeinsparungen erreichbar sind. Diese Potenziale gehen jedoch mit einer höheren Reaktionszeit beim Verbindungsaufbau einher, weshalb die Betriebsmodi so gewählt werden müssen, dass die Servicequalität und Reaktionsfähigkeit des Netzes nicht beeinträchtigt werden.

Info-Box – Betriebsmodi von 5G-Basisstationen

5G-Basisstationen können verschiedene Betriebsmodi unterstützen, die es erlauben den Energieverbrauch an das Niveau der Kapazitätsnutzung anzupassen. Die Abbildung 4-8 zeigt dies exemplarisch. Während im aktiven Modus (*Active TX/RX*) der volle Funktionsumfang bereitsteht, ermöglicht der *Micro-Sleep-Modus* (SM1) eine kurzfristige Reduktion des Energieverbrauchs mit Abschaltungszeiten von unter 1 Millisekunde. Der *Light-Sleep-Modus* (SM2) erlaubt eine zusätzliche Abschaltung nicht unmittelbar benötigter Komponenten für etwa 5 bis 10 Millisekunden). Der *Deep-Sleep-Modus* (SM3) bietet höhere Einsparpotenziale durch weitreichende Deaktivierung von Funktionsblöcken und sieht Abschaltungszeiten zwischen 50 bis 100 Millisekunden vor.⁶²

-
- ⁶⁰ NGMN (2024). Green Future Networks: A Roadmap to Energy Efficient Mobile Networks und Mavenir. https://www.ngmn.org/wp-content/uploads/GFN_Energy_Efficiency_Roadmap_V1.0.pdf.
- ⁶¹ Eine Basisstation im Idle-Modus weist etwa 50 bis 60 Prozent ihres maximalen Energieverbrauchs auf (Kim et al., 2023. An Energy-Efficient Multi-Level Sleep Strategy for Periodic Uplink Transmission in Industrial Private 5G Networks. <https://PMC10674620/#:~:text=Even%20when%20the%20base%20station,15%2C16%2C17%5D>).
- ⁶² Mavenir und Intel (2023). A Holistic Study of Power Consumption and Energy Savings Strategies for Open vRAN Systems. <https://builders.intel.com/docs/networkbuilders/a-holistic-study-of-power-consumption-and-energy-savings-strategies-for-open-vran-systems-1676628842.pdf>.

Abbildung 4-8: 5G-Basisstation: Betriebsmodi



Quelle: NGMN (2024). Green Future Networks: A Roadmap to Energy Efficient Mobile Networks und Mavenir. https://www.ngmn.org/wp-content/uploads/GFN_Energy_Efficiency_Roadmap_V1.0.pdf.

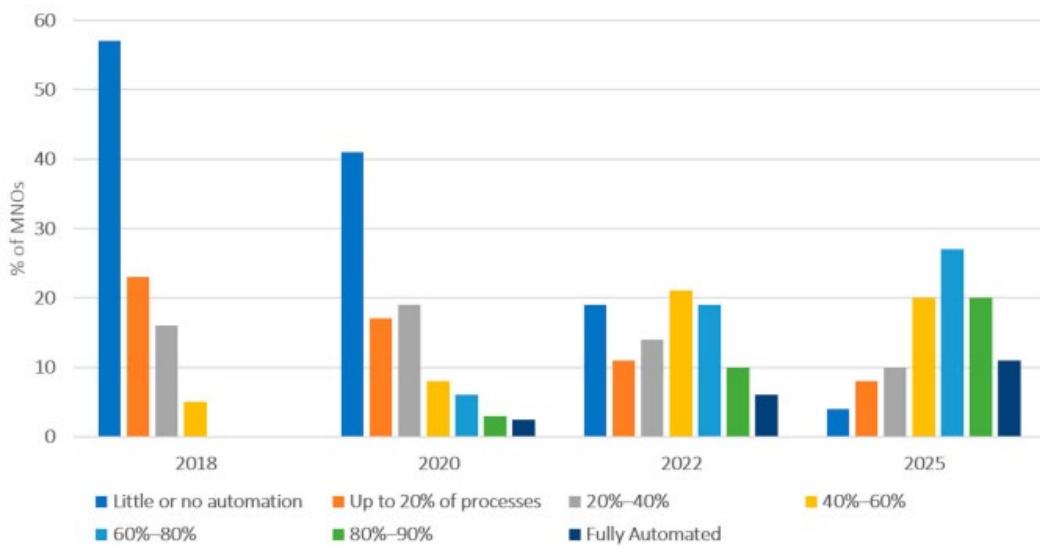
4.4.3 Energiemanagement

Mit der zunehmenden Komplexität und Dynamik von 5G-Netzarchitekturen rückt der Einsatz von KI-Technologien in den Mittelpunkt eines effizienten Energiemanagements.⁶³ Diese können Verkehrsmuster analysieren, Standortcharakteristika berücksichtigen und zeitabhängige Szenarien modellieren. Auf dieser Grundlage lassen sich Schwellenwerte für Energiesparmodi automatisiert anpassen sowie Überwachungsparameter und Energieverbrauch in Echtzeit steuern. KI kann zudem Entscheidungen darüber treffen, wann einzelne Netzkomponenten abgeschaltet oder in tiefere Schlafmodi versetzt werden können.⁶⁴

⁶³ ITU-T (2023). Smart energy saving of 5G base stations: Based on AI and other emerging technologies to forecast and optimize the management of 5G wireless network energy consumption. Technical Report ITU-T FG-AI4EE D.WG3-02. <https://www.itu.int/en/ITU-T/focusgroups/ai4ee/Documents/T-FG-AI4EE-2021-D.WG3.02-PDF-E.pdf>.

⁶⁴ Chochliouros et al. (2021).

Abbildung 4-9: Automatisierungsgrad der Netzwerkprozesse bei 5G-Mobilfunknetzbetreibern (2018–2025)



Quelle: Chochliouros et al. (2021). Energy Efficiency Concerns and Trends in Future 5G Network Infrastructures. <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/17/5392>.

Abbildung 4-9 verdeutlicht den graduellen Anstieg des Automatisierungsgrades von Netzwerkprozessen bei 5G-Mobilfunknetzbetreibern im Zeitraum 2018 bis 2025. Im Jahr 2018 dominierte der niedrige Automatisierungsgrad, und mehr als 50 Prozent der Netzbetreiber verfügten über wenig oder keine Automatisierung („*little or no automation*“). Bereits im Jahr 2020 zeigte sich ein deutlicher Übergang hin zu teilautomatisierten Prozessen. Der Trend verstärkt sich bis 2025, wo ein signifikanter Anteil der Netzbetreiber angibt, mindestens 60 bis 80 Prozent der Prozesse automatisiert zu haben. Diese Entwicklung unterstreicht die zunehmende Relevanz automatisierter Steuerungslogiken zur Bewältigung von Effizienzanforderungen.

Automatisierte Prozesse und KI-basierte Entscheidungsmechanismen können somit die Lastadaptivität von Mobilfunkstationen erhöhen, indem sie szenario-, standort- und zeitgerechte Energiemodi identifizieren. Dadurch steigt die Energieeffizienz des Netzes. Allerdings bleibt die Voraussetzung hierfür eine sorgfältige Konfiguration der Automatisierungsalgorithmen. Entsprechend ist ein ausgewogenes Zusammenspiel von intelligenter Netzüberwachung, lastabhängiger Betriebsmodussteuerung und Qualitätsparametern erforderlich.

4.5 Reichweite und Energieverbrauch

4.5.1 Sendeleistung, Signaldämpfung und Wellenlänge

Über welche Distanz ein Mobilfunksignal in ausreichender Qualität empfangen werden kann, wird maßgeblich durch die folgenden physikalischen Größen bestimmt: Sendeleistung, Dämpfung und die Wellenlänge des Signals. Diese Parameter wirken wechselseitig auf die Ausbreitungseigenschaften und bestimmen damit, ob und in welcher Entfernung eine Funkübertragung gewährleistet werden kann.

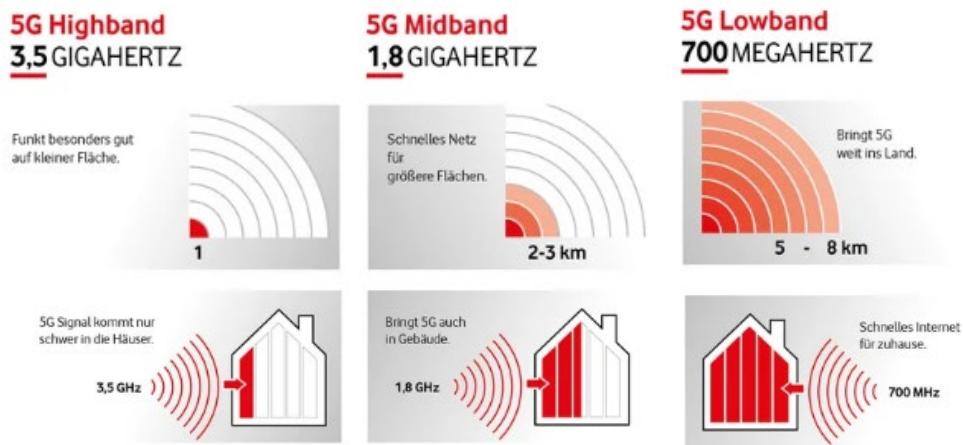
Sendeleistung ist die elektrische Leistung, mit der ein Signal abgestrahlt wird. Eine höhere Sendeleistung kann größere Reichweiten überbrücken, führt jedoch zu einem erhöhten Anstieg des Energieverbrauchs, da Leistungsverstärker, Signalverarbeitung und Kühlung intensiver beansprucht werden. Die Sendeleistung kann jedoch nicht beliebig erhöht werden. Sie ist regulatorisch durch Grenzwerte begrenzt, um die elektromagnetische Verträglichkeit am Standort sicherzustellen.⁶⁵

Dämpfung beschreibt den Verlust von Signalstärke während der Ausbreitung. Sie nimmt mit der Distanz zu und wird durch Hindernisse wie Gebäude, Vegetation oder Geländeformen sowie durch atmosphärische Effekte (Regen, Nebel, Schnee) verstärkt. Je stärker die Dämpfung, desto kürzer die Reichweite, sofern die Sendeleistung konstant bleibt.

Die **Wellenlänge** ist der räumliche Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Punkten gleicher Schwingungsphase einer Welle. Sie ist invers proportional zur Frequenz. Signale mit großer Wellenlänge (niedrige Frequenz, z. B. 700 MHz) weisen generell geringere Dämpfung auf und können größere Distanzen überwinden; sie dringen besser in Gebäude ein und sind weniger störanfällig. Signale mit kleiner Wellenlänge (hohe Frequenz, z. B. 3,5 GHz) erfahren deutlich stärkere Dämpfung und besitzen geringere Reichweiten. Die Ausbreitungseigenschaften der Wellenlänge bilden damit den physikalischen Ursprung der beobachteten Unterschiede zwischen Frequenzbändern: höhere Frequenz bedeutet nicht nur geringere Reichweite, sondern auch stärkere Abhängigkeit von Hindernissen und Sichtbedingungen.

⁶⁵ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. (n.d.). Strahlenschutz beim Mobilfunk: Überblick. Abgerufen am 12. Dezember 2025, von <https://www.bundesumweltministerium.de/themen/strahlenschutz/nichtionisierende-strahlung/strahlenschutz-beim-mobilfunk/ueberblick-strahlenschutz-beim-mobilfunk>.

Abbildung 4-10: Reichweite und Gebäudepenetration von 5G nach Frequenzband (700 MHz, 1,8 GHz und 3,5 GHz)



Quelle: 5G-Anbieter. 5G Frequenzen Welche Frequenzen & Bänder nutzt das 5G-Netz? <https://www.5g-anbieter.info/technik/5g-frequenzen.html>.

Die Abbildung 4-10 zeigt diesen Zusammenhang anhand dreier typischer 5G-Frequenzbereiche (700 MHz, 1,8 GHz, 3,5 GHz). *Lowband*-Signale (700 MHz, lange Wellenlänge) erreichen Reichweiten von rund 5 bis 8 km und dringen gut in Gebäude ein. *Midband*-Signale (1,8 GHz) erreichen etwa 2 bis 3 km. *Highband*-Signale (3,5 GHz, kurze Wellenlänge) weisen Reichweiten im Bereich von etwa 1 km auf und dringen nur schwach in Gebäude ein.⁶⁶ Diese Eigenschaften wirken sich strukturell auf die Netzgestaltung aus.

Vor diesem Hintergrund ergibt sich der grundlegende Zusammenhang: Je stärker die Signaldämpfung (z. B. aufgrund hoher Frequenzen oder Hindernisse), desto höher muss die Sendeleistung sein, um eine bestimmte Reichweite zu gewährleisten. Umgekehrt gilt, dass bei kurzen Distanzen geringere Sendeleistung ausreicht und damit Energie eingespart werden kann.

Aus energetischer Sicht erfordern größere Reichweiten höhere Sendeleistung, und höhere Sendeleistung erhöht den Energieverbrauch. Kleine Funkzellen hingegen erlauben geringere Sendeleistung und vermindern den Energiebedarf pro Standort, erfordern jedoch eine größere Anzahl an Standorten.

⁶⁶ WiFi 6 und in naher Zukunft WiFi 7 könnten das Problem der schlechten Gebäudepenetration bei den hohen Mobilfunkfrequenzen beheben (Plückebaum, T., Sörries, B.; Wissner, M.; Elbanna, A.; Strube Martins, S., Godlovitch, I. (2021). Green WiFi, Study on behalf of Facebook, Bad Honnef, March 2021, https://www.wik.org/fileadmin/Studien/2021/Green_WiFi.pdf; und Kroon, P., Godlovitch, I., Plückebaum, T. (2023). Sustainability Benefits of 6 GHz Spectrum Policy, study for Wi-Fi Alliance, Bad Honnef, Austin-Texas, August 2023, <https://www.wi-fi.org/file/sustainability-benefits-of-6-ghz-spectrum-policy>).

4.5.2 Standorddichte und Zellverdichtung

Eine Optimierung des Energieverbrauchs im Mobilfunknetz ergibt sich nicht allein aus der Betrachtung einzelner Antennenstandorte. Zwar kann durch geringere Reichweiten und entsprechend reduzierter Sendeleistungen der Energiebedarf pro Standort (und Giga-byte) gesenkt werden, dies ist jedoch nur ein Handlungsparameter; wenn eine vollständige Abdeckung der Fläche nicht notwendig ist. Sofern eine Flächenabdeckung erforderlich ist, kann innerhalb vorgegebener Grenzen eine rationale Entscheidung über die Anzahl und Lage der Antennenstandorte getroffen werden. Die Gesamtenergieeffizienz hängt daher nicht nur vom Verbrauch einzelner Funkzellen ab, sondern auch von der Standorddichte, also der Anzahl von Standorten pro Flächeneinheit.

Unter Zellverdichtung versteht man im Mobilfunk die Erhöhung der Anzahl von Funkzellen in einem bestimmten Gebiet, um damit die verfügbare Kapazität zu steigern. Entsprechend wird das Gebiet mit mehr, aber dafür räumlich dichter angeordneten Antennenstandorten versorgt.⁶⁷

Zellverdichtung löst zwei entgegengesetzte Effekte aus:

- Zum einen kann die erforderliche Sendeleistung je Standort für die niedrigen Frequenzen durch kürzere Übertragungsdistanzen sinken, was den Energieverbrauch pro Zelle reduziert.
- Zum anderen steigt der Gesamtenergiebedarf, da eine größere Anzahl an Standorten betrieben und im Mindestumfang aktiviert gehalten werden muss.

Der energetische Nettoeffekt der Zellverdichtung hängt dann vom Lastniveau ab. In Gebieten mit hoher Verkehrslast – beispielsweise urbanen Räumen – kann Zellverdichtung die verfügbare Kapazität deutlich steigern, sodass Datenverkehr effizienter verarbeitet wird. Da mehrere kleinere Funkzellen parallele Lasten aufnehmen, verteilt sich der Datenverkehr auf mehr Standorte. Im Ergebnis kann der Energieverbrauch pro übertragenem Byte sinken, obwohl der Gesamtenergieverbrauch der Infrastruktur ähnlich bleiben könnte bzw. durch die zusätzliche Anzahl von Standorten unterproportional zunimmt. Damit kann Zellverdichtung unter Kapazitätsengpässen unter bestimmten Bedingungen zu einer energetischen Verbesserung beitragen.

Hierbei ist anzumerken, dass Zellverdichtung nicht allein aufgrund rein energieökonomischer Erwägungen erfolgt, sondern zuvorderst aus netzfunktionalen Gründen. Insbesondere neue 5G-Dienste, die ausschließlich in hochfrequenten Spektren verfügbar sind (beispielsweise eMBB oder uLLRC), erfordern dichte Funkzellstrukturen, um Leistungsanforderungen wie niedrige Latenz oder hohe Datenraten abzudecken. Zellverdichtung

⁶⁷ In der Regel bleiben die niedrigen Frequenzen in Betrieb. Sie decken auch Lücken zwischen zellverdichten Standorten mit hohen Frequenzen ab - ein Mischbetrieb. Nicht alle neuen Standorte werden mit den niedrigen Frequenzen ausgerüstet.

erfüllt damit neben energetischen Aspekten auch kapazitäts- und qualitätsbezogene Anforderungen.

Damit lässt sich festhalten, dass die Energieeffizienz von Zellverdichtungsmaßnahmen nicht isoliert zu bewerten ist, sondern vom Verhältnis zwischen Nachfrage, Auslastung und Anzahl aktiver Standorte abhängt. Eine genau Bestimmung des energetischen Nettoeffekts erfordert daher eine quantitative Analyse, die sowohl Standortcharakteristika als auch Verkehrsmuster berücksichtigt. Wesentlich ist auch, dass Zellverdichtung einen erheblichen Aufwand für die Standortauswahl, die Funknetzplanung und den Aufbau neuer Masten und deren Anbindung (per Glasfaser) bedeutet und daher in einen Gesamtbusiness Case einzubetten ist, in dem der Energieverbrauch nur ein Aspekt unter vielen ist.

4.6 Sharing

Neben technologischen Verbesserungen auf Komponentenebene eröffnet der architektonische Aufbau von Mobilfunknetzen zusätzlichen Handlungsspielraum für Energieeffizienz. Effizienzsteigerungen können auch dadurch erzielt werden, dass mehrere Betreiber Netzelemente gemeinsam nutzen, statt parallele, redundante Infrastruktur bereitzuhalten. Diese Form der Ressourceteilung wird als *Sharing* bezeichnet und wirkt nicht nur auf die Optimierung einer einzelnen Basisstation, sondern auf die Systemarchitektur des gesamten Netzes.

Die gemeinsame Nutzung bewirkt in der Regel ökonomische und ggf. auch ökologische Effizienzen bzw. Einsparungen. *Sharing* findet dort seine regulatorischen Grenzen, wo die Unabhängigkeit wettbewerblicher Dienstangebote in Frage gestellt werden.

Sharing im Mobilfunk hat bereits eine längere Tradition. Zum einen ist es weit verbreitet im Bereich der gemeinsamen Nutzung passiver Infrastrukturen, vornehmlich der Antennenstandorte und Masten, auch können die Antennen gemeinsam genutzt werden oder auch die Frequenzbereiche, in der am weitesten integrierten Form reden wir auch vom nationalen *Roaming*, ggf. auch nur gebietsweise, wie es in der Vergangenheit bei der Einführung neuer Netze oder Funktechnologien und Frequenzbereiche vorgekommen ist.⁶⁸

Von den vielen unterschiedlichen Formen und Zwischenstufen des *Mobile Sharing* betrachten wir nachfolgend nur die Grundformen

- Infrastruktur-Sharing von Masten und deren Anbindung
- *Network Slicing*
- Nationales *Roaming*
- Mobile Virtuelle Netzwerk Betreiber (Wiederverkäufer) (MVNO)

⁶⁸ Neumann, K.H., Plückebaum, T., Strube Martins, S. (2016). Network Sharing im Mobilfunk und Festnetz-Mobilfunk-Konvergenz in der Schweiz, Bad Honnef, Biel, 29. August 2016, <https://www.comcom.admin.ch/comcom/de/home/themen/mobilfunknetz/network-sharing.html>.

Die Ergebnisse der in dieser Studie vorgenommenen Überlegungen lassen sich auch auf die spezifischen Aspekte des *Sharing* extrapoliieren. *Sharing* führt zu einer besseren, höheren Auslastung des teilenden Netzes, das damit energetisch i.d.R. in einem energieefizienteren Arbeitspunkt arbeitet.

Beim Infrastruktursharing der Masten, ggf. auch von deren Anbindung in entlegenen Gebieten, eines Edge-Cloud Centers und der Stromversorgung geht es im Wesentlichen um die gemeinsame Nutzung passiver Infrastrukturen, von Gräben, Leerrohren, Masten und Trafostationen. Diese Infrastrukturen fallen im Allgemeinen etwas größer aus als für einen einzelnen Betreiber, aber es ergeben sich wesentliche ökonomische Skaleneffekte bei der Errichtung, aber auch ökologische Skaleneffekte im Vergleich mit dem dreifachen Bau dieser Infrastrukturen an unterschiedlichen Standorten. Im Anbetracht der Tatsache, dass die Mobilfunknetze heute bereits weitgehend errichtet sind, kommt dieser *Sharing*-Ansatz heute insbesondere bei Überlegungen zur Standortverdichtung mit kleineren Zellen im Bereich 5G/6G und Frequenzen > 3 GHz in Betracht.⁶⁹ Energetische Einsparungen ergeben sich bei dieser Form des *Sharing* lediglich aus der Errichtung und Anbindung der Standorte, jedoch nicht aus dem Betrieb des RAN.

Beim *Network Slicing*, beim *Roaming* und bei der *Zusammenarbeit mit MVNO* geht es immer um die gemeinsame Nutzung eines gesamten Mobilfunknetzes einschließlich dessen RAN und seines Frequenzbereiches, der im Fall von Roaming erweitert werden kann durch Frequenzblöcke des roamenden kooperierenden Netzbetreibers.⁷⁰ In den anderen beiden Fällen, *Network Slicing* und *MVNO*, steht nur der Frequenzbereich des gastgebenden Netzes zur Verfügung. Spezifisch beim *Network Slicing*, bei dem die Netz-Scheiben als Virtuelle Private Netze (VPN) von den anderen Verkehren im Netz getrennt sind, können zusätzliche, steuernde, technische Komponenten zum Einsatz kommen (Stichwort KI), die zusätzliche Kosten, aber insbesondere auch Energieverbräuche mit sich bringen können. Hierzu liegen bisher aber keine genaueren Erkenntnisse vor, auch sind derartige Komponenten bisher nicht im EU Code of Conduct berücksichtigt.

Letztlich handelt es sich bei diesen Fällen des *Sharing* um eine intensivere Nutzung der Frequenzbereiche. Dies führt zu einer besseren Auslastung nicht nur des Kernnetzes, sondern auch des Funkzugangsnetzes (RAN). Diese Auswirkungen sind in den vorhergehenden Abschnitten dieses Kapitels detaillierter beschrieben (Abschnitt 4.3 und 4.3.4).

Während die Mobilfunktechniken bis 4G im Grundsatz für eine Grundversorgung in allen zu nutzenden Frequenzblöcken sorgen müssen (nicht benötigte Frequenzblöcke sind dann aber auch nicht an den Antennenstandorten vorgesehen), sind die Frequenzblöcke

⁶⁹ Vgl. auch: Zoz, K., Plückebaum, T., Sörries, B., Elbanna, A. (2022). Abschätzung des Bedarfs an 5 G Mobilfunkstandorten für den Frequenzbereich von 3,6 GHz zur Füllung von Lücken zwischen den bestehenden Mobilfunkstandorten, WIK-Kurzstudie, Bad Honnef, Dezember 2022, https://www.wik.org/uploads/media/WIK_Kurzstudie_3-6GHz-Standortbedarf.pdf.

⁷⁰ Schäfer, S., Elbanna, A., Neu, W., Plückebaum, T. (2020). Mögliche Einsparungspotenziale beim Ausbau von 5G durch Infrastructure Sharing, WIK Diskussionsbeitrag Nr. 472, Bad Honnef, Dezember 2020, https://www.wik.org/uploads/media/WIK_Diskussionsbeitrag_Nr_472.pdf.

bei 5G New Radio dynamisch zuschaltbar und damit stärker variabel im Energiebedarf. D.h. *Network-Sharing* in Form der gemeinsamen Nutzung eines Mobilfunknetzes hat neben den ökonomischen Effekten auch einen nicht zu vernachlässigenden, aber von der konkreten Kooperationsform im Einzelfall abhängigen, ökologischen Effekt.

5 Vergleich mit dem Festnetz

Mobilfunknetze bestehen aus einem glasfasergestützten Kern- und Aggregationsnetz, das auch im Backhaul ganz überwiegend Glasfasern verwendet. In Einzelfällen wird hier auch Richtfunk eingesetzt. Ab dem Antennenstandort beginnt das Zugangsnetz per Funk (RAN).

Festnetze und Mobilfunknetze gleichen sich in ihren Kern- und Aggregationsnetzstrukturen bis hinunter zu den Antennenstandorten bzw. MPoP grundsätzlich, wenngleich in den Mobilfunknetzen ergänzend typische Mobilfunk-spezifische Aufgaben erledigt werden. Der Unterschied liegt wesentlich im Zugangsnetz. Entweder werden energieintensive Funkübertragungsverfahren verwendet, oder es erfolgt der Informationsaustausch im Festnetz über Kupferdoppeladern, auf Koaxialkabelsegmenten oder auf Glasfasern. Hierbei gehört der Glasfaser erklärtermaßen die Zukunft.

5.1 Energieeffizienz

Die Kapazität des Zugangsnetzes stellt häufig einen Engpass dar. Umso relevanter aus umweltpolitischer Sicht ist dessen Energieeffizienz, d.h. welche Energie muss aufgebracht werden, um ein bestimmtes Datenvolumen – eine bestimmte Informationsmenge – übertragen zu können? Oder: welche Leistung braucht man, um ein bestimmtes Datenvolumen je Stunde übertragen zu können? Diese Frage haben Öko-Institut und Fraunhofer-Institut IZM (2021) im Auftrag des Umweltbundesamts in Form einer Datenflussanalyse untersuchen lassen (Tabelle 5-1).

Tabelle 5-1: Elektrische Leistungsaufnahme (in Watt) nach Übertragungstechnologien und Netzkomponenten

	Einheit	Übertragungstechnologie				
		VDSL	FTTH	UMTS	LTE	5G
Network Unit	[W]	1,232	0,172	14,575	6,013	2,332
Network Terminal	[W]	0,216	0,089	11,000	2,933	0,440
Broadband Network Gateway	[W]	0,033	0,033	0,033	0,033	0,033
Aggregation Switch	[W]	0,020	0,020	0,020	0,020	0,020
Core Router	[W]	0,023	0,023	0,023	0,023	0,023
Inline Amplifier	[W]	0,011	0,011	0,011	0,011	0,011
Datacenter Broadband Network Gateway	[W]	0,004	0,004	0,004	0,004	0,004
Datacenter - Aggregation Switch	[W]	0,013	0,013	0,013	0,013	0,013
Datacenter - Top Of Rack Switch	[W]	0,087	0,087	0,087	0,087	0,087
Gesamt	[W]	1,640	0,452	25,767	9,138	2,964

Quelle: Gröger, J., Liu, R., Stobbe, L., Druschke, J., & Richter, N. (2021). Green Cloud Computing: Lebenszyklusbasierte Datenerhebung zu Umweltwirkungen des Cloud Computing (Abschlussbericht). Umweltbundesamt.

Dabei geht es um den Datenstrom vom Endkunden ins Netz und über die Kernnetzebene zu einem dort angeschlossenen Cloud-Rechenzentrum. Unterschiede ergeben sich demnach nur in den Zugangsnetzen, in der Tabelle 5-1 durch einen schwarzen Rahmen gekennzeichnet. Die Ergebnisse dieser Studie verdeutlichen, dass die energiebezogenen Unterschiede zwischen den betrachteten Übertragungstechnologien primär auf die Komponenten im Zugangsnetz zurückzuführen sind. Hierbei sind die *Network Unit* und das *Network Terminal* relevant, da diese Geräte unmittelbar an der funk- oder leitungsgebundenen Übergabeschnittstelle zum Endnutzer positioniert sind und ihre elektrische Leistungsaufnahme stark von der eingesetzten Technologie abhängt.

Für die *Network Unit* (Netzabschlussgeräte, z. B. Kundenmodems) zeigen sich erhebliche Differenzen: Während im Festnetz VDSL und FTTH jeweils eine sehr geringe Leistungsaufnahme von 1,232 W bzw. 0,172 W aufweisen, steigen die Werte in Mobilfunktechnologien deutlich an. Das veraltete UMTS (3G)⁷¹ benötigte mit 14,575 W eine um Größenordnungen höhere Leistung, gefolgt von LTE (4G) mit 6,013 W und 5G mit 2,332 W. Auch beim *Network Terminal* (Geräte in der Vermittlungsstelle des Anbieters) treten vergleichbare Muster auf: Die Festnetztechnologien FTTH und VDSL liegen mit 0,089 W bzw. 0,216 W im sehr niedrigen Bereich, während UMTS mit 11,000 W und LTE

⁷¹ In Deutschland bei allen Betreibern mittlerweile abgeschaltet.

mit 2,933 W deutlich höhere Leistungsaufnahmen erfordern; 5G reduziert diesen Wert auf 0,440 W, bleibt jedoch weiterhin über den leitungsgebundenen Technologien.

Von den Mobilfunkübertragungstechniken (3G, 4G und 5G) ist 5G die leistungsfähigste Technologie, von den Festnetzen stellt FTTH die leistungsstärkste Technologie dar, wobei hier nicht nach FTTH-Topologien oder Übertragungstechnologien differenziert wird. Deutlich wird, dass FTTH bereits hier (1 GB/h als Messgröße) deutlich performanter ist.

Die Übertragung von Informationen über eine Glasfaser ist im Grundsatz erst an einem sehr hohen Ende begrenzt. Eine Wellenlänge kann nach heutigem Stand der Technik bis zu 800 Gbit/s (entspricht 100 Gbps) übertragen und unterstützt bis zu 162 Wellenlängen dieser Art (entspricht 130 Tbps in 162 parallelen Datenströmen), ohne relevante optische Verluste. Anders gesagt, wenn große Informationsmengen übertragen werden müssen, verbessert sich die Energieeffizienz der Glasfasernetze, je nach Übertragungstechnik, noch einmal signifikant, weil sie bei den hier angenommenen Übertragungsvolumen noch am untersten Rand ihrer Möglichkeiten genutzt wird.

Selbst wenn mit der Verbesserung der Mobilfunk Übertragungsverfahren durch neue Codierungen und Funkschnittstellen (6G) weitere Verbesserungen eintreten werden (wie Tabelle 5-1 vom Trend her andeutet), liegen die Möglichkeiten der Glasfasertechnik noch weit über denen der Funkübertragung. Weitere Nachfragesteigerungen nach Datenübertragungsvolumen unterstellt, ist Glasfaser die energieeffizientere und auch kapazitativ höherwertigere Lösung.

Ein Glasfaseranschluss bietet allerdings nur einen ortsfesten Anschluss. Er kann dort z. B. über WiFi in einem begrenzten Rahmen Mobilität im nahen Umfeld bieten. Die übertragbare Bandbreite hängt bei WiFi wesentlich von der Technikgeneration und den damit verbundenen Frequenzräumen ab (z. B. WiFi 6 und 7).⁷² Mobilfunk bietet hingegen eine internationale Mobilität der Terminals, auch in unwegsamem Gelände, *Coverage* vorausgesetzt.

Hat ein mobiles Endgerät große Datenvolumina zu übertragen (z. B. große Dateien oder Softwareupdates), ist deren Übertragung über eine Mobilfunkschnittstelle suboptimal, kostet *Airtime* (tarifiertes Datenvolumen) und Zeit und belastet das Mobilfunknetz stark. Ein Smartphone oder Tablet hat typischerweise auch eine WLAN-Funkschnittstelle. Über diese Schnittstelle erfolgt der Austausch derartiger Datenmengen derzeit daher sehr häufig stationär (und Akku-schonender, energie- und frequenznutzungseffizienter) über WiFi-Anschlüsse.

⁷² Plückebaum et al. (2021).
Kroon et al. (2023).

5.2 Quality of Service

Eine qualitative Veränderung tritt mit der Einführung von 5G und den beiden Dienstmerkmalen „hohe Bandbreiten (eMBB, enhanced Mobile Broadband)“ und „hohe Verfügbarkeit bei geringen Latenzen (uRLLC (ultra Reliabel and Low Latency Communications))“ ein. Um diese Dienstmerkmale zu ermöglichen, ist der Einsatz von breiten Frequenzbändern und effizienter Codierung auf hohen Frequenzbändern erforderlich, die kurzer und damit sicherer Funkstrecken bedürfen. Dies erfordert eine entsprechende Funkzellverdichtung, wie in Abschnitt 4.5.2 ausgeführt, die mit einem erhöhten Energieverbrauch einhergeht. Aufgrund der Kosten sollte eine solche Maßnahme zunächst dort erfolgen, wo die Dienste auch konkret benötigt werden.

Die Dienstequalität drückt sich durch verschiedene Eigenschaften aus. Dies sind unter anderem

- Die Diensteverfügbarkeit/ Resilience mit den Aspekten
 - Störunempfindlichkeit
 - Wetterunempfindlichkeit
 - Sabotagesicherheit
 - Abdeckungsstörungen
- Delay und Jitter
- Paketverluste
- Nachrichtensicherheit (Mithören)

Mobilfunknetze sind grundsätzlich bzgl. der o.a. Aspekte sensibler als Glasfaser-Festnetze, bedingt insbesondere durch die spezifischen Merkmale des funkgestützten RAN. Funkübertragung kann gezielt gestört oder auch abgehört und mit einigem Aufwand auch dekodiert werden. Aufwändiger Verschlüsselungsverfahren auf der Funkstrecke sind möglich, kosten aber zusätzliche elektrische Energie und gehen zu Lasten der angestrebten, kurzen Verzögerungen. Gegen Wettereinflüsse lässt sich ggf. mit einer Erhöhung der Sendeleistung anarbeiten, die zusätzliche Energie kostet. Natürlich sind Sendemas-ten sensibel gegen gezielte Angriffe von außen. Dies ließe sich allenfalls durch redundante Sendestrukturen beheben, sofern die Eingriffe nicht großflächiger vorgenommen werden. Redundante Sendestrukturen bedeuten im Ergebnis eine Verdichtung der Sendemasten und/ oder eine Erhöhung der Sendeleistung. Beides ist energierelevant. Abdeckungsstörungen entstehen durch Veränderungen in der Topographie, z. B. durch neue Gebäude oder wachsende Bäume/ Vegetation. Auch der Einsatz neuer, höherer Frequenzen führt aufgrund immanent geringerer Flächenabdeckung und Penetrationseigenschaften zu vermehrter Abschattung und geringerer Gebäudepenetration. Allen kann man mit einer neuen Funknetzplanung und Nachverdichtung begegnen, die Investitionen kostet und in der Regel einen erhöhten Energiebedarf zum Umbau und Betrieb zur Folge hat. Unterm Strich bedeutet die Behebung derartiger Nachteile Investitionen und erhöhten Energieeinsatz.

Man kann die Ausfallsicherheit der Produktion auch durch die Dopplung oder Mehrgeräteredundanz aller wesentlichen Netzknoten, Funktions- und Diensteserver und Systeme der Dienstebereitstellung und Netzzusammenschaltung erhöhen. Dabei führt die Bereitstellung im *Hot-Stand-By* oder auch *Load-Sharing* dazu, dass die Umschwenzeiten im Vergleich zu einem Kaltstart von Reservesystemen geringer sind (geringe Latenz, weniger Jitter) aber der Betrieb von Systemen im Halblastbereich weniger energieeffizient sein könnte (höherer Anteil am Grundbedarf), es sich also ein Trade-off von Latenz und Energiebedarf ergibt.

Je nach Nutzerverhalten senkt das Abschalten von Übertragungskanälen (z. B. Frequenzblöcke bei 5G New Radio, WiFi, Laser auf Glasfasern) im Fall von keinem oder weniger Verkehr den Energiebedarf erheblich, aber das Wiedereinschalten kann dauern und zusätzliche Latenzen und Jitter produzieren (vgl. Abschnitt 4.4.2).

Um Jitter zu vermeiden, können Buffer (Zwischenspeicher) eingesetzt werden, die jedoch die Latenz erhöhen und zusätzlichen Strom benötigen, auch hier also ein doppelter Trade-off.

Die Gefahr von Paketverlusten ist bei einer Funkübertragung deutlich höher als bei einer Übertragung im Kabel, bedingt durch äußere, elektromagnetische Einflüsse auf dem Übertragungsweg. Paketverluste aufgrund von Überläufen in den Warteschlangen der Übertragungswege sind auf den Funkstrecken bedingt durch deren geringeren Kapazitäten gleichfalls wahrscheinlicher als bei Glasfasern. Gegengesteuert werden kann durch fehlertolerante Codierung mit mehr Energie- und Zeitbedarf für alle Übertragungen oder mit einer fallbezogenen Sendewiederholung (*Retransmission*) defekter oder fehlender Pakete (TCP). Auch hier wieder ein Trade-off von Qualität und Energie.

Natürlich kann auf Funkstrecken immer leichter und unbemerkt mitgehört werden, als auf einer Glasfaserstrecke; das ist systemimmanent.

Alle diese Qualitätsbedrohungen/ Risiken/ Defizite gibt es bei einer Übertragung über Glasfasern nicht oder nur in deutlich geringerem Ausmaß. Ein Zielkonflikt zwischen QoS und Energieeffizienz tritt bei ihnen nicht auf.⁷³ Diese Überlegungen und Trade-offs lassen einen naheliegenden Schluss zu, nämlich so viel über Glasfasernetze zu übertragen, wie möglich, und Mobilfunknetze für das zu nutzen, für das sie besonders geeignet sind, nämlich mobil zu kommunizieren und ggf. als Back-up zu dienen, wenn das Festnetz ausgefallen ist (und das Mobilnetz nicht davon betroffen ist, weil die ausgefallenen Teile des Festnetzes nicht einer gemeinsamen Nutzung mit dem Mobilnetz unterliegen und dessen Betrieb gleichfalls beeinträchtigen).

⁷³ Innerhalb der Glasfassertopologien ist bzgl. QoS die PtP-Struktur der PtMP-Struktur vorzuziehen, weil das durch den Einsatz von Splittern nur geteilt nutzbare Übertragungsmedium Feeder Faser zu zusätzlichem Delay und Jitter führt.

6 Zusammenfassung

Die Mobilfunknetze haben ihren Schwerpunkt des Energieverbrauchs im Funkzugangsnetz (RAN). Leistungssteigerungen bzgl. Volumen und Qualität betreffen gleichfalls im Wesentlichen das RAN.

Kennziffern zur Energieeffizienz im Funkzugangsnetz, wie sie beispielsweise von der ITU oder ETSI definiert wurden, stellen auf den Energieverbrauch pro transportiertem Datenvolumen (kWh/GB) ab und ermöglichen eine Vergleichbarkeit. Die Bezugsgröße Datenvolumen wird in der Literatur auch als Proxy für die Schätzung des Energieverbrauchs verwendet. Studien zur Prognose des Energieverbrauchs im Kontext der wachsenden Bedeutung digitaler Dienste greifen daher auf heute verfügbare Kennziffern zur Energieeffizienz und Datenvolumina zurück, um Aussagen über die Entwicklung von Stromverbrauch und damit in Zusammenhang stehenden CO₂-Emissionen zu treffen. Da die Kapazitäten von Funkzugangsnetzen jedoch andere Skalierungseigenschaften haben als Festnetztechnologien, wurde in diesem Diskussionsbeitrag der Frage nachgegangen, welches die zentralen Bestimmungsfaktoren des Stromverbrauchs in Funkzugangsnetzen sind.

Die technischen Eigenschaften eines Standorts definieren sein grundsätzliches Effizienzpotenzial. Sie bestimmen die maximal erreichbare spektrale Effizienz sowie die energetische Effizienz der Signalverarbeitung. Eine besondere Bedeutung haben dabei die Transceiver (TRX), die als energieintensivste Netzkomponente typischerweise rund 40 % des gesamten Energiebedarfs eines Mobilfunkstandorts verbrauchen. Parameter wie verfügbare Bandbreite, genutzter Frequenzbereich, eingesetzte Mobilfunktechnologie sowie Mehrantennentechnik wirken daher vor allem über die Auslegung und den Betrieb der TRX auf die Energieeffizienz. Ein erheblicher Anteil der Leistungsaufnahme von Basisstationen fällt dabei unabhängig von der aktuellen Verkehrslast an. Die räumliche Versorgungsaufgabe des Netzes ist zudem ein prägender Einflussfaktor. Zellgröße und erforderliche Sendeleistung bestimmen den Energiebedarf pro Funkverbindung und sind bei wachsenden Kapazitätsanforderungen unter Einsatz von Zellverdichtung neu auszulegen. Der energetische Nettoeffekt einer stärkeren Zellverdichtung hängt wesentlich vom Lastniveau ab. Damit ist Energieeffizienz im Mobilfunk nicht durch isolierte Einflussfaktoren bestimmt, sondern durch deren Zusammenwirken, insbesondere in Relation zur tatsächlichen Verkehrsbelastung.

Der wachsende Datenübertragungsbedarf im Mobilfunk trifft auf neue Mobilfunktechnologien, die im Grundsatz stetige Verbesserungen hinsichtlich Kapazität und Energieverbrauch ermöglichen (neue Mobilfunkgenerationen, Codierungsverfahren oder auch Antennentechniken). Intelligente und dynamische Energiemanagementmechanismen (Schlafmodi oder auch lastabhängiges Zu-/Abschalten von Kapazitäten) – deren technische Verfügbarkeit an die eingesetzte Mobilfunkgeneration gekoppelt ist – können den Umfang des Energieverbrauchs leistungsabhängiger machen und damit reduzieren. Wie

stark diese Leistungsmerkmale tatsächlich zu einer Reduktion des Energieverbrauchs betragen können, hängt ebenfalls maßgeblich von den zukünftigen Nutzungsprofilen ab.

Der Einsatz höherer Frequenzen trägt einem steigenden Kapazitätsbedarf Rechnung. Diese benötigen jedoch eine höhere Sendeleistung im Vergleich zu niedrigen Frequenzen. Die Sendeleistung ist durch rechtliche Vorgaben begrenzt (Abstrahlbedingungen), so dass ggf. der Aufbau zusätzlicher Antennenstandorte erforderlich wird. Der damit in Verbindung stehende energetische Effekt im Sinne der Energieeffizienz hängt somit relevant von der Funkzellplanung und den eingesetzten Ressourcen ab und lässt sich nur unter Berücksichtigung von Nutzungsverhalten und Topologie-bezogenen Bestimmungsfaktoren des gesamten Versorgungsgebiets abschätzen. Die im Mobilfunk relevanten regionalen bzw. lokalen Besonderheiten, die die Signalausbreitung beeinflussen, haben hierbei einen relevanten Einfluss.

Nicht zuletzt ist der mit der Nutzung mobiler digitaler Dienste innerhalb von Gebäuden oder Malls relevant daran gekoppelt, in welchem Umfang zukünftig ein Off-loading von Mobilfunkverkehren über WiFi möglich ist und auch genutzt wird. WiFi-Zugang entlastet die Funkzugangsnetze und leistet einen positiven Beitrag zu Energieeinsparungen.

Auch wenn die neuen Technologien zunehmend in der Lage sind, den Stromverbrauch stärker an das Nutzungsverhalten zu koppeln, zeigen die vorgestellten Zusammenhänge, dass die bereitgestellte Netzkapazität und die räumlichen Versorgungsanforderungen maßgebliche Bestimmungsfaktoren sind. Insbesondere langfristige Prognosen des zukünftigen Energieverbrauchs von Mobilfunknetzen bei wachsender Nachfrage lassen sich daher nur sehr eingeschränkt auf Entwicklungen des Datenvolumens abstützen. Der aktuell beobachtete Zusammenhang von Energieverbrauch und Datenvolumen ist lediglich eine Momentaufnahme und kann die Effekte zukünftiger Kapazitäts- und räumlichen Abdeckungsanforderungen, die sich sowohl auf die Zahl der Antennenstandorte als auch ihre technische Ausstattung auswirkt, nicht berücksichtigen.

Literaturverzeichnis

5G-Anbieter (2025). 5G Frequenzen Welche Frequenzen & Bänder nutzt das 5G-Netz? <https://www.5g-anbieter.info/technik/5g-frequenzen.html>.

Bundesnetzagentur (2024). Jahresbericht Telekommunikation. <https://data.bundesnetzagentur.de/Bundesnetzagentur/SharedDocs/Mediathek/Jahresberichte/JB2024TK.pdf>.

Bundesnetzagentur (16. Mai, 2024). Entwicklung des übertragenen Datenvolumens im Mobilfunk in Deutschland von 2005 bis 2023 (in Millionen Gigabyte) [Graph]. In Statista. Zugriff am 07. Oktober 2024, von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/172798/umfrage/datenvolumen-im-deutschen-mobilfunkmarkt-seit-2005/>.

Chochliouros, I. P., Kourtis, M.-A., Spiliopoulou, A. S., Lazaridis, P., Zaharis, Z., Zarakovitis, C., & Kourtis, A. (2021). Energy efficiency concerns and trends in future 5G network infrastructures. *Energies*, 14(17), 5392. <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/17/5392>.

Ericsson (2024). Energy performance of 6G Radio Access Networks: A once in a decade opportunity. <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/white-papers/energy-performance-of-6g-ran>.

ETSI ES 203 228 V1.3.1 (Okt. 2020). Assessment of mobile network energy efficiency. https://www.etsi.org/deliver/etsi_es/203200_203299/203228/01.03.01_60/es_203228v010301p.pdf.

ETSI TR 103 541 V1.1.1 (2018-05). Environmental Engineering (EE); Best practice to assess energy performance of future Radio Access Network (RAN) deployment. https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/103500_103599/103541/01.01.01_60/tr_103541v010101p.pdf.

Europäische Kommission. (2019). Verordnung (EU) 2019/424 der Kommission vom 19. März 2019 zur Durchführung der Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich der Festlegung von Ökodesign-Anforderungen an Netzteile. Amtsblatt der Europäischen Union, L 74, 46–66. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/ALL/?uri=uriserv:OJ.L_.2019.074.01.0046.01.DEU.

Europäische Umweltagentur (2024). Energy Efficiency. 04.11.2024. <https://www.eea.europa.eu/en/topics/in-depth/energy-efficiency>.

Europäisches Parlament & Rat der Europäischen Union. (2023). Richtlinie (EU) 2023/1791 über Energieeffizienz. Amtsblatt der Europäischen Union L 231, 20. September 2023. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ%3AJOL_2023_231_R_0001&qid=1695186598766.

Fraunhofer (2023). White Paper 6G Energy Efficiency and Sustainability. <https://www.iis.fraunhofer.de/en/ff/lv/iot-system/tech/sustainable-ict.html>.

Global Sustainability Standards Board (GSSB) (2016). GRI 302: Energy 2016. <https://www.globalreporting.org/publications/documents/english/gri-302-energy-2016/>.

Gröger, J., Liu, R., Stobbe, L., Druschke, J., & Richter, N. (2021). Green Cloud Computing: Lebenszyklusbasierte Datenerhebung zu Umweltwirkungen des Cloud Computing (Abschlussbericht). Umweltbundesamt. S. 101. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2021-06-17_texte_94-2021_green-cloud-computing.pdf.

- Gröger, J. (2020). Digitaler CO₂-Fußabdruck Datensammlung zur Abschätzung von Herstellungs-aufwand, Energieverbrauch und Nutzung digitaler Endgeräte und Dienste. Öko-Institut e. V. <https://www.oeko.de/publikation/digitaler-co2-fussabdruck/>.
- GSMA (2025). The Mobile Economy 2025. <https://www.gsma.com/solutions-and-impact/connectivity-for-good/mobile-economy/wp-content/uploads/2025/04/030325-The-Mobile-Economy-2025.pdf>.
- GSMA (Jun. 2025). Mobile Net Zero 2025. State of the Industry on Climate Action. <https://www.gsma.com/solutions-and-impact/connectivity-for-good/external-affairs/wp-content/uploads/2025/07/The GSMA-Mobile-Net-Zero-2025-State-of-the-Industry-on-Climate-Action.pdf>.
- GSMA Intelligence (Feb. 2023). Going green: benchmarking the energy efficiency of mobile networks (second edition). <https://www.gsmaintelligence.com/research/research-file-download?id=74384072&file=280223-Going-Green-Second-Edition.pdf>.
- GSMA Intelligence (Jun. 2021). Going green: benchmarking the energy efficiency of mobile. <https://www.gsmaintelligence.com/research/research-file-download?file=300621-Going-Green-efficiency-mobile.pdf&id=60621137>.
- ITU-T (2023). Smart energy saving of 5G base stations: Based on AI and other emerging technologies to forecast and optimize the management of 5G wireless network energy consumption. Technical Report ITU-T FG-AI4EE D.WG3-02. <https://www.itu.int/en/ITU-T/focusgroups/ai4ee/Documents/T-FG-AI4EE-2021-D.WG3.02-PDF-E.pdf>.
- ITU-T L.1331 (Jan. 2022). Assessment of mobile network energy efficiency. <https://www.itu.int/rec/T-REC-L.1331>.
- Kim, T., Lee, S., Choi, H., Park, H.-S., & Choi, J. (2024). An energy-efficient multi-level sleep strategy for periodic uplink transmission in industrial private 5G networks. Sensors (Basel). 2023 Nov 9;23(22):9070. DOI: 10.3390/s23229070. <https://PMC10674620/#:~:text=Even%20when%20the%20base%20station,15%2C16%2C17%5D>.
- Kroon, P., Godlovitch, I., Plückebaum, T. (2023). Sustainability Benefits of 6 GHz Spectrum Policy, study for Wi-Fi Alliance, Bad Honnef, Austin-Texas, August 2023, <https://www.wi-fi.org/file/sustainability-benefits-of-6-ghz-spectrum-policy>.
- Mavenir und Intel (2023). A Holistic Study of Power Consumption and Energy Savings Strategies for Open vRAN Systems. <https://builders.intel.com/docs/networkbuilders/a-holistic-study-of-power-consumption-and-energy-savings-strategies-for-open-vran-systems-1676628842.pdf>.
- Nett, L. und Sörries, B. (2022). Flexibilisierung der Frequenzregulierung und des Frequenzplans. WIK Diskussionsbeitrag Nr 488. <https://www.wik.org/veroeffentlichungen/veroeffentlichung/nr-488-flexibilisierung-der-frequenzregulierung-und-des-frequenzplans>.
- Neumann, K.H., Plückebaum, T., Strube Martins, S. (2016). Network Sharing im Mobilfunk und Festnetz-Mobilfunk-Konvergenz in der Schweiz, Bad Honnef, Biel, 29. August 2016, <https://www.comcom.admin.ch/comcom/de/home/themen/mobilfunknetz/network-sharing.html>.

NGMN (2024). Green Future Networks: A Roadmap to Energy Efficient Mobile Networks und Ma-
venir.
https://www.ngmn.org/wp-content/uploads/GFN_Energy_Efficiency_Roadmap_V1.0.pdf.

Öko-Institut Consult GmbH (2025). Forschungsvorhaben „Vergleichbarkeit von Nachhaltigkeits-
standards für Telekommunikationsinfrastruktur (TKI). https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/Digitales/Nachhaltigkeit/Standardstudie/_DL/Standardstudie_DE.pdf?blob=publicationFile&v=2.

Pihkola, H., Hongisto, M., Apilo, O., & Lasanen, M. (2018). Evaluating the energy consumption of
mobile data transfer—from technology development to consumer behaviour and life cycle
thinking. *Sustainability*, 10(7), 2494. <https://doi.org/10.3390/su10072494..>
<https://www.mdpi.com/2071-1050/10/7/2494>.

Plückebaum, T., Sörries, B., Wissner, M., Elbanna, A., Strube Martins, S., Godlovitch, I. (2021).
Green WiFi, Study on behalf of Facebook, Bad Honnef, March 2021,
https://www.wik.org/fileadmin/Studien/2021/Green_WiFi.pdf.

Stobbe, L., Richter, N., Quaeck, M., Knüfermann, K., Druschke, J., Fahland, M., Höller, V. W.,
Wahr, N., Zedel, H., Kaiser, M., Hoffmann, S., Töpper, M., & Nissen, N. F. (2023). Um-
weltbezogene Technikfolgenabschätzung Mobilfunk in Deutschland (Projekt UTAMO)
(Texte 26/2023). Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/umweltbezogene-technikfolgenabschaetzung-mobilfunk>.

Telefónica Germany (2024). Corporate Responsibility Report 2023: O2 Telefónica improves en-
ergy efficiency in the network. Press Release Telefónica Germany. 28.03.2024.
<https://www.telefonica.de/news/press-releases-telefonica-germany/2024/03/corporate-responsibility-report-2023-o2-telefonica-improves-energy-efficiency-in-the-network.html#:~:text=With%20around%2045%20million%20mobile,to%20the%20reference%20year%202015.>

Telekom (2021). Nachhaltige und energieeffiziente Standortplanung im Mobilfunk. 28.09.2021.
<https://www.bmv.de/SharedDocs/DE/Anlage/DG/Digitales/ag-digitale-netze-mobilfunk-ii-praesentation-nachhaltige-energieeffiziente-standortplanung.pdf?blob=publicationFile>.

Telekom (2022). Nachhaltigkeitstag: Telekom senkt Energieverbrauch bis 2024 um mindestens
zehn Prozent. Medieninformation. 12.10.2022. <https://www.telekom.com/de/medien/medieninformationen/detail/nachhaltigkeitstag-telekom-senkt-energieverbrauch-1018068#:~:text=Nachhaltigkeitstag:%20Telekom%20senkt%20Energieverbrauch%20bis%202024%20um%20mindestens%20zehn%20Prozent,-Teilen&text=Die%20Deutsche%20Telekom%20wird%20ihren,in%20Deutschland%20und%20Europa%20weiter.>

Telekom (2024). CR-Bericht. ESG KPI „Energy Intensity“, Kennzahlen je Landesgesellschaft.
https://www.cr-bericht.telekom.com/2024/kennzahlen-tool/national_company/532cb555-7fe4-4d63-8c5a-cf20e590aee5/456addc8-6156-4b88-bf10-084fe521f54c/table.

Telekom (2025). 6G NeXt-Projekt: Erfolgreicher Abschluss nach 3 Jahren 6G-Forschung. Medi-
eninformation. 24.09.2025. <https://www.telekom.com/de/medien/medieninformationen/detail/6g-next-projekt-erfolgreicher-abschluss-nach-3-jahren-6g-forschung-1096720#:~:text=6G%20steht%20f%C3%BCr%20die%20sechste,Anfang%20der%202030er%20Jahre%20erfolgen.>

Telekom (2025). Deutsche Telekom at MWC 2025: AI phone, flying base stations and self-healing networks. Media Information. 03.03.2025. <https://www.telekom.com/en/media/media-information/archive/deutsche-telekom-at-mwc-2025-ai-phone-flying-base-stations-and-self-healing-networks-1088708>.

Umweltbundesamt (2025). Stromverbrauch. 25.04.2025. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/stromverbrauch#entwicklung-des-stromverbrauchs>.

Vodafone (2022). Vodafone startet dynamischen Energiespar-Modus im Mobilfunk. Newsroom. 16.10.2022. <https://newsroom.vodafone.de/vodafone-startet-dynamischen-energiespar-modus-im-mobilfunk>.

Vodafone (2023). Vodafone bringt neue Stromspar-Technologie erstmals ins deutsche Mobilfunk-Netz. Newsroom. 23.11.2023. <https://newsroom.vodafone.de/vodafone-mit-neuer-stromspar-technologie>.

Vodafone Group (2025). ESG reports. <https://www.vodafone.com/about-vodafone/reporting-centre/esg-reports>.

Zoz, K., Plückebaum, T., Sörries, B., Elbanna, A. (2022). Abschätzung des Bedarfs an 5 G Mobilfunkstandorten für den Frequenzbereich von 3,6 GHz zur Füllung von Lücken zwischen den bestehenden Mobilfunkstandorten, WIK-Kurzstudie, Bad Honnef, Dezember 2022, https://www.wik.org/uploads/media/WIK_Kurzstudie_3-6GHz-Standortbedarf.pdf.

Zuloaga, G., Plückebaum, T., Kulenkampff, G., & Wissner, M. (2024). Nachhaltigkeit: Fest- und Mobilnetze über unterschiedliche regionale Strukturen im Vergleich (WIK Working Paper Nr. 10). WIK – Wissenschaftliches Institut für Infrastruktur und Kommunikationsdienste. <https://www.wik.org/veroeffentlichungen/veroeffentlichung/wik-working-paper-nr-10-nachhaltigkeit-fest-und-mobilnetze-ueber-unterschiedliche-regionale-strukturen-im-vergleich>.

ISSN 1865-8997