

Nachhaltigkeit als Parameter einer ganzheitlichen und voraus- schauenden Frequenzregulierung

Autoren:
Dr. Bernd Sörries
Dajan Baischew
Dr. Lorenz Nett
Dr. Marcus Stronzik

Impressum

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

Vertretungs- und zeichnungsberechtigte Personen

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

Stand: Juli 2023
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 durchgeführten Forschungsprojekten. Mit der Herausgabe dieser Reihe bezweckt das WIK, über seine Tätigkeit zu informieren, Diskussionsanstöße zu geben, aber auch Anregungen von außen zu empfangen. Kritik und Kommentare sind deshalb jederzeit willkommen. Die in den verschiedenen Beiträgen zum Ausdruck kommenden Ansichten geben ausschließlich die Meinung der jeweiligen Autoren wieder.

WIK behält sich alle Rechte vor. Ohne ausdrückliche schriftliche Genehmigung des WIK ist es auch nicht gestattet, das Werk oder Teile daraus in irgendeiner Form (Fotokopie, Mikrofilm oder einem anderen Verfahren) zu vervielfältigen oder unter Verwendung elektronischer Systeme zu verarbeiten oder zu verbreiten.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	III
Summary	IV
1 Einleitung	1
2 Nachhaltigkeit und Resilienz als Parameter der Frequenzregulierung	3
2.1 Nachhaltigkeit der Frequenzregulierung	3
2.1.1 Hintergrund	3
2.1.2 Mobilfunk, Frequenzen und Nachhaltigkeit	4
2.1.3 Aspekte der Frequenzregulierung und Nachhaltigkeit	7
2.2 Resilienz der Frequenzregulierung	12
2.2.1 Resilienz als Anforderung an Funknetzinfrastrukturen	12
2.2.2 Implikationen der Resilienz auf die Errichtung der Funknetze und die Frequenzregulierung	13
2.3 Klassische Ziele der Frequenzregulierung, Nachhaltigkeit und Resilienz im Spannungsfeld der Frequenzregulierung	14
3 Exemplarische modelltheoretische Berechnungen zur Auslastung von Mobilfunknetzen bei symmetrischen Infrastrukturen in der Fläche	18
3.1 Modellbeschreibung – Mobilfunkkapazität	18
3.2 Modellbeschreibung – Mobilfunknutzung	20
3.3 Szenario-Rechnungen zur Ermittlung der ausgelasteten Kapazität pro Mobilfunknetzbetreiber	21
3.3.1 Beispielhafte Berechnung der Netzauslastung eines Mobilfunknetzbetreiber in einem ruralen Raster	22
3.3.2 Ergebnisse der Rasterauslastung von weniger als 30 % für Szenario 1 und Szenario 2	25
3.3.3 Ergebnisse der Rasterauslastung von mehr als 50 % für Szenario 1 und Szenario 2	27
3.3.4 Mehr Leerkapazität durch symmetrische Frequenznutzung bei asymmetrischen Marktanteilen?	29
3.3.5 Schlussfolgerungen aus den Modellberechnungen	30
4 Fazit und Ausblick	31
5 Anhang	32
Literaturverzeichnis	34

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1	Schematische Darstellung des Green Deal	4
Abbildung 2-2:	Überschlägige Beiträge zu THG-Emissionen innerhalb des IKT-Sektors	5
Abbildung 2-3:	Stromverbrauch im Mobilfunk (Mix aus verschiedenen Mobilfunktechnologien)	6
Abbildung 2-4:	Elemente der Frequenzregulierung	8
Abbildung 3-1:	Kategorisierung der Rasterzellen nach Einwohnerdichte der Raster in Hessen zur Bestimmung der Mobilfunkkapazität	19
Abbildung 3-2:	Kategorisierung der Rasterzellen nach Einwohnerdichte der Gemeinden in Hessen zur Bestimmung der Marktanteile	22
Abbildung 3-3:	Methodisches Vorgehen zur Bestimmung der %ualen Rasterauslastung eines Mobilfunknetzbetreibers am Beispiel eines ruralen Rasters (angebotene Kapazität beträgt 7,2 Mbit/s)	24
Abbildung 3-4:	Modellergebnisse Auslastungsgrade einzelner Netzbetreiber pro Rasterzelle (Szenario 1 und Szenario 2)	25

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Mobilfunknutzung in den Mobilfunknetzen (im Jahr 2022)	17
Tabelle 3-1:	Rasterklassifizierung, eingesetzte Frequenzbänder, durchschnittliche Kapazität zur Busy Hour	20
Tabelle 3-2:	Rasterauslastung weniger als 30 %	26
Tabelle 3-3:	Rasterauslastung weniger als 30 % – Sensitivitätsrechnung: Es gibt nur einen Mobilfunknetzbetreiber bei gleichbleibender Kapazität	27
Tabelle 3-4:	Rasterauslastung mehr als 50 %	28
Tabelle 3-5:	Rasterauslastung mehr als 50 % – Sensitivitätsrechnung: Es gibt nur einen Mobilfunknetzbetreiber dessen eingesetztes Frequenzportfolio unverändert ist	29
Tabelle 3-6:	Implikationen von asymmetrischen Marktanteilen auf unversorgte Raster	30
Tabelle 5-1:	Herleitung der durchschnittlichen Kapazität je 1-mal-1-Kilometer-Raster pro Mobilfunknetzbetreiber	32

Zusammenfassung

In dieser Studie nehmen wir neben den klassischen Zielen der Frequenzregulierung, wie z. B. der Schaffung wettbewerblicher Marktstrukturen, auch die Aspekte der Nachhaltigkeit und Resilienz in den Blick. So hat z. B. die Ausgestaltung von Versorgungsaufgaben für Mobilfunknetzbetreiber im Kontext der Frequenzvergabe einen Einfluss auf die Nachhaltigkeit. Insbesondere kann es zwischen der Nachhaltigkeit und der Schaffung eines Infrastrukturwettbewerbs potenziell zu Zielkonflikten kommen.

Im Rahmen einer modelltheoretischen Betrachtung auf Basis der den etablierten Mobilfunknetzbetreibern zugeteilten Frequenzen und von Mobilfunk-Nutzungsdaten wurde dieser Zielkonflikt exemplarisch für das Bundesland Hessen näher analysiert. Neben der stationären Nutzung (z. B. durch Haushalte) wurden auch mobile Nutzungsarten (z. B. durch den Verkehr) berücksichtigt. Hinsichtlich des Zieles der Nachhaltigkeit lag der Fokus auf der ökologischen Dimension. Als Indikator zur Abbildung der ökologischen Nachhaltigkeit wird die Auslastung der auf Basis des Modellansatzes identifizierten Auslastungen der Funknetze herangezogen. Der Modellansatz ist GIS-basiert und ermöglicht daher eine detaillierte Untersuchung der Gegebenheiten in der Fläche. Unterschiedliche Szenarien beleuchten zudem den Zusammenhang zwischen den bestehenden symmetrischen Versorgungsaufgaben für Mobilfunknetzbetreiber und einer asymmetrischen Verteilung der Marktanteile in der Fläche.

Die exemplarischen Berechnungen liefern Anhaltspunkte für die folgenden Thesen:

- Die derzeit bestehenden symmetrischen Versorgungsaufgaben wirken sich in den betrachteten Szenarien nicht wesentlich negativ auf die ökologische Nachhaltigkeit (gemessen an der Auslastung der bereitgestellten Kapazität) aus.
- Die Vermutung, dass ländliche Regionen bei der Kapazitätsauslastung bzw. bei der Verfügbarkeit pro Nutzer schlechter abschneiden als städtische Regionen, trifft nach den Szenario-Rechnungen nicht in vollem Umfang zu.
- Allerdings können weitergehende symmetrische Versorgungsaufgaben, die auf eine Erhöhung von Übertragungskapazitäten insbesondere in ländlichen Regionen abzielen, aus Sicht der ökologischen Nachhaltigkeit durchaus als problematisch angesehen werden. Es werden signifikante Übertragungskapazitäten durch parallele Infrastrukturen insbesondere in ländlichen Gebieten mit nur wenigen Nutzern und einer geringen Nachfrage geschaffen. Mit der Errichtung von unabhängigen parallelen Infrastrukturen geht ein hoher Ressourcenverbrauch einher. Hinzu kommen aus Nachhaltigkeitssicht die Auswirkungen auf Flächenverbrauch, Materialeinsatz etc. durch die notwendige Nachverdichtung, wenn keine zusätzlichen Flächenfrequenzen genutzt werden können. Insbesondere stellt sich zudem die Frage, ob in diesen dünn besiedelten Gebieten ein Infrastrukturwettbewerb aus volkswirtschaftlicher Sicht essentiell ist.

Die vorliegende Studie ist ein erster Aufschlag zur detaillierten Analyse des Zusammenhanges zwischen wirtschaftlichen, frequenztechnischen und wettbewerbsrechtlichen Aspekten der Frequenzregulierung und der ökologischen Nachhaltigkeit. Der Modellansatz ist offen gestaltet und kann flexibel an weitere Fragestellungen in diesem Kontext angepasst werden (z. B. durch die Nutzung einer verbesserten Datenlage, Ausdehnung auf Gesamtdeutschland etc.).

Summary

In this study, in addition to the traditional objectives of spectrum regulation, such as the creation of competitive market structures, we also look at the aspects of sustainability and resilience. For example, the design of coverage obligations for mobile network operators in the context of spectrum allocation may have an impact on sustainability. In particular, conflicts of interest can potentially arise between sustainability and the creation of infrastructure competition.

As part of a model-based analysis, which uses information of the frequencies allocated to the established mobile network operators and mobile network usage data, this conflict of objectives was analyzed in more detail for the federal state of Hesse as an example. In addition to stationary use (e.g. by households), mobile types of use (e.g. by transport) were also taken into account. With regard to the goal of sustainability, the focus was on the ecological dimension. The utilization of the mobile network capacity identified on the basis of the approach is used as an indicator to map ecological sustainability. The modelling approach is GIS-based and therefore enables a detailed area-related analysis. Different scenarios also shed light on the relationship between the existing symmetrical coverage obligations for mobile network operators and an asymmetrical distribution of market shares in the area.

The approach provides evidence for the following hypotheses:

- The currently existing symmetrical coverage obligations do not have a significant negative impact on environmental sustainability (measured by the utilisation of the capacity provided) in the scenarios considered.
- The assumption that rural regions perform worse than urban regions in terms of capacity utilization or availability per user does not fully apply according to the scenario calculations.
- However, further-reaching symmetrical coverage requirements designed to increase transmission capacities, particularly in rural regions, can certainly be considered problematic from the perspective of environmental sustainability. Significant transmission capacities are created by parallel infrastructures, particularly in rural areas with few users and low demand. The construction of independent parallel infrastructures involves a high consumption of resources. From a sustainability perspective, there is also the impact on land consumption, use of materials, etc. due to the necessary redensification if no additional land frequencies can be utilised. In particular, the question arises as to whether infrastructure competition is essential from an economic perspective in these sparsely populated areas.

This study is a first attempt to analyze in detail the relationship between economic, technical frequency and competition law aspects of frequency regulation and environmental sustainability. The modelling approach is designed to be open and can be flexibly adapted to other issues in this context (e.g. by using improved data, extension to the whole of Germany, etc.).

1 Einleitung

Informations- und Kommunikationstechnologien können einerseits mit ihren Anwendungen dazu beitragen, die ökologische Nachhaltigkeit von Wertschöpfungsprozessen zu verbessern. Andererseits verursachen sie selbst für das Klima negative Emissionen und tragen zum Material- und Flächenverbrauch bei.¹ Dem öffentlichen Mobilfunk kommt insbesondere durch die steigende Nachfrage nach Datenübertragungen eine besondere Bedeutung in beiden Bereichen zu: Innovative Anwendungen zur Verbesserung von ökologischer Nachhaltigkeit und sowohl direkte als auch indirekte negative Effekte auf das Klima. Während bei drahtgebundenen Telekommunikationsnetzen mit einer zunehmenden Verfügbarkeit und Nutzung von Glasfasernetzen beispielsweise der Stromverbrauch im Vergleich zu heute zurückgehen kann, ist es eine offene Frage, ob der Stromverbrauch in den Mobilfunknetzen trotz Wachstumsraten des Datenverkehrs von über 30 % pro Jahr weiterhin fast konstant bleiben wird. Jedenfalls versuchen Mobilfunknetzbetreiber, Hersteller und Wissenschaftler, jede neue Funktechnologie noch energieeffizienter zu gestalten, um ökologische Nachhaltigkeitsziele zu erreichen.²

Während es bei der ökologischen Nachhaltigkeit darum geht, Ressourcen zu schonen, soll mit einer verbesserten Resilienz von Netzinfrastrukturen die Stabilität und Verfügbarkeit dieser Netze bei Störungen und Krisen verbessert werden. Redundante, ggf. noch stärker infrastrukturell abgesicherte Netze können Instrumente sein, die Resilienz zu erhöhen. Damit können beide Ziele bei ihrer Umsetzung in Konflikt zueinander stehen.

Ökologische Nachhaltigkeit und Resilienz sind weder auf europäischer noch auf nationaler Ebene in den für die Frequenzregulierung relevanten Gesetzestexten explizit verankert. Leitgedanken der Frequenzregulierung sind die effiziente Frequenznutzung und die Wahrung der Interessen der Nutzer. Wirtschaftliche, frequenztechnische und wettbewerbsrechtliche Parameter prägen deshalb maßgeblich die Ausgestaltung der Frequenzregulierung. Soweit Nachhaltigkeit und Resilienz als weitere Parameter bei der Ausgestaltung der Frequenzregulierung hinzukommen, wird der Abwägungsprozess komplexer und kann Zielkonflikte beinhalten.

Der Diskussionsbeitrag adressiert die Frage, wie ökologische Nachhaltigkeit und Resilienz Eingang in die Frequenzregulierung finden können. Dazu wird herausgearbeitet, welche Aspekte der Frequenzregulierung angesprochen sind, wenn Nachhaltigkeit und Resilienz im Rahmen der Frequenzregulierung verstärkt Berücksichtigung finden sollen. Daneben werden wir auf Basis einer quantitativen Analyse einen ausgewählten Aspekt der Nachhaltigkeit betrachten: das Angebot und die Nachfrage nach Mobilfunkdiensten und die Wirkung von symmetrischen Frequenznutzungen bzw. des Infrastrukturwettbewerbs.

Der vorliegende Diskussionsbeitrag widmet sich somit dem Themenfeld der Umsetzung von Nachhaltigkeit und Resilienz in der Frequenzregulierung und gliedert sich in zwei inhaltliche Teile. In *Teil I* werden Nachhaltigkeit und Resilienz als Parameter der Frequenzregulierung diskutiert. Zunächst fokussieren wir auf die Nachhaltigkeit der Frequenzregulierung. Ausgehend von der allgemeinen Relevanz der ökologischen Nachhaltigkeit wird die Bedeutung der Nachhaltigkeit im Mobilfunk in ihren verschiedenen Facetten dargestellt. Es folgt eine Darstellung des rechtlichen und institutionellen Rahmens der deutschen und internationalen Frequenzregulierung. Im

¹ Grünwald und Caviezel (2022), S. 45.

² Siehe dazu auch Sörries et al. (2023), S. 83.

daraufliegenden Kapitel steht die nachhaltigkeitsorientierte Ausrichtung der Frequenzregulierung im Vordergrund. Hier werden mögliche Maßnahmen vorgestellt, wie Nachhaltigkeitsaspekte in frequenzregulatorische Entscheidungen einfließen können.

Anschließend wird die Bedeutung der Resilienz für die Frequenzregulierung erörtert – mit zwei Schwerpunkten: Resilienz als Anforderung an Funknetzinfrastrukturen und Implikationen der Resilienz für den Aufbau von Funknetzen und die Frequenzregulierung. Schließlich werden die klassischen Ziele der Frequenzregulierung im Spannungsfeld mit Nachhaltigkeit und Resilienz in der Frequenzregulierung diskutiert.

Teil II beinhaltet eine Modellierung von Angebot und Nachfrage im öffentlichen Mobilfunk am Beispiel des Bundeslands Hessen. Es wird geprüft, wie ein symmetrischer Frequenz-einsatz aus ökologischer Perspektive zu bewerten ist. Ziel ist es, Einflussmöglichkeiten der Frequenzregulierung im Zusammenhang mit der ökologischen Nachhaltigkeit aufzuzeigen.

Teil I: Die Bedeutung von Nachhaltigkeit und Resilienz für die Frequenzregulierung

Im folgenden Kapitel werden die Themenfelder dargestellt, die sich für die Frequenzregulierung unter Berücksichtigung von ökologischer Nachhaltigkeit und Resilienz ergeben.

2 Nachhaltigkeit und Resilienz als Parameter der Frequenzregulierung

2.1 Nachhaltigkeit der Frequenzregulierung

2.1.1 Hintergrund

Die zunehmende Erderwärmung, damit eingehende Umweltkatastrophen³ wie extreme Hitze, Trockenheit⁴ und Dürre⁵, Starkregen⁶, Stürme etc. als auch das Bewusstsein über die Begrenztheit der Ressourcen bei einer zunehmenden Erdbevölkerung haben dazu geführt, dass ökologische Nachhaltigkeit eine bedeutende Zielsetzung bei politischen Entscheidungen und wirtschaftlichem Handeln geworden ist. 2015 formulierten die Vereinten Nationen 17 Ziele (englisch Sustainable Development Goals, SDGs) zur Sicherung einer nachhaltigen Entwicklung auf ökonomischer, sozialer und ökologischer Ebene.⁷ Das darauf aufbauende Übereinkommen von Paris ist das erste rechtsverbindliche Abkommen der Nationalstaaten mit dem Ziel, die Erderwärmung auf deutlich unter 2°C gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen.⁸

Auf europäischer Ebene manifestiert unter anderem der Green Deal (2019)⁹ die Absicht der Europäischen Union, den Übergang zu einer modernen, ressourceneffizienten und wettbewerbsfähigen Wirtschaft zu vollziehen. Im Fokus der Nachhaltigkeit steht derzeit insbesondere die Reduzierung der Erderwärmung durch eine Verringerung der Treibhausgasemissionen, insbesondere der CO₂-Emissionen. So sollen bis zum Jahr 2050 netto keine Treibhausgase mehr ausgestoßen werden. Ebenso ist der Ressourcenverbrauch bei wirtschaftlichen, privaten oder staatlichen

3 Siehe [Klimawandel aktuell 2023 - Ursachen und Folgen, Prognose - Globale Erderwärmung CO₂-Emissionen - Klimaschutz Maßnahmen - Was tun gegen den Klimawandel? - LpB BW \(lpb-bw.de\)](#), zuletzt abgerufen am 07.12.2023.

4 Siehe [Dürre in Spanien: Mit aller Macht gegen das Verdursten | ZEIT ONLINE](#), zuletzt abgerufen am 07.12.2023.

5 Siehe [Extremwetter durch Klimawandel: Mehr Hitzewellen, Starkregen und Stürme | Klima | Umwelt | Wissen | ARD alpha](#), zuletzt abgerufen am 07.12.2023.

6 Siehe [Ahrtal unter Wasser - Chronik einer Katastrophe - wdr.de; Italien erlebt die schlimmste Flut seit 100 Jahren – Bilder der Zerstörung | STERN.de](#) Italien erlebt die schlimmste Flut seit 100 Jahren – Bilder der Zerstörung | STERN.de, zuletzt abgerufen am 07.12.2023.

7 Siehe [THE 17 GOALS | Sustainable Development \(un.org\)](#), zuletzt abgerufen am 10.12.2023.

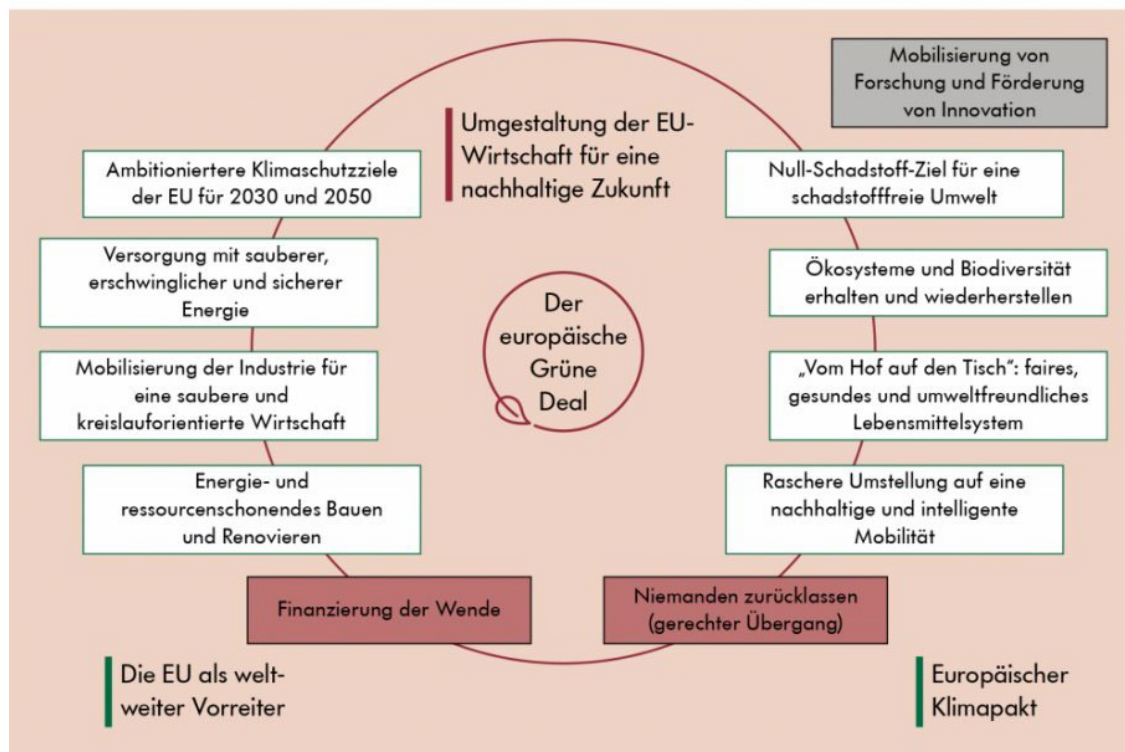
8 Siehe [Übereinkommen von Paris \(bmu.de\)](#), zuletzt abgerufen am 10.12.2023.

9 Verfügbar [EUR-Lex - 52019DC0640 - EN - EUR-Lex \(europa.eu\)](#), zuletzt abgerufen am 07.12.2023. Erstmals wurden im Pariser Abkommen Pariser Abkommen (2016) von der EU und ihren Mitgliedstaaten eine Übereinkunft zur Senkung der Erderwärmung im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter auf "deutlich unter" zwei Grad Celsius zu begrenzen mit Anstrengungen für eine Beschränkung auf 1,5 Grad Celsius. [The Paris Agreement | UNFCCC](#), zuletzt abgerufen am 07.12.2023. Gleichzeitig wurde ein Aktionsplan zur Reduzierung der Erderwärmung verabschiedet.)

Aktivitäten von besonderer Bedeutung.¹⁰ Die Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) sollen bis 2030 um mindestens 55 % reduziert werden (Fit-for-55).¹¹

Das Thema der THG-Minderung ist dabei nur eines der im Green Deal adressierten Themen (siehe folgende Abbildung).¹²

Abbildung 2-1 Schematische Darstellung des Green Deal



Quelle: Europäische Kommission, Der europäische Grüne Deal, Brüssel, S. 4.

2.1.2 Mobilfunk, Frequenzen und Nachhaltigkeit

Den Kommunikationsnetzen sowie weiteren Infrastrukturen, die notwendig sind, um Anwendungen wie Streaming oder das Webbrowsing zu realisieren, kommt durch ihren eigenen Energie- und Ressourcenverbrauch sowie ihre Bedeutung für neue Anwendungen eine besondere Rolle bei der Erreichung von Umwelt- und Klimazielen zu. Der Informations- und Kommunikationstechnik werden heute ungefähr 3 % der globalen CO₂-Emissionen zugerechnet.¹³ Durch eine

¹⁰ IKT steht sinngemäß für alle Einrichtungen, die unter Menschen die Übertragung oder den Austausch von Informationen in digitalisierter Form und auf elektronischem Wege ermöglichen. . [IKT-Branche - Statistisches Bundesamt \(destatis.de\)](#), zuletzt abgerufen am 07.12.2023.

¹¹ Siehe [Fit for 55 - The EU's plan for a green transition - Consilium \(europa.eu\)](#), zuletzt abgerufen am 10.12.2023.

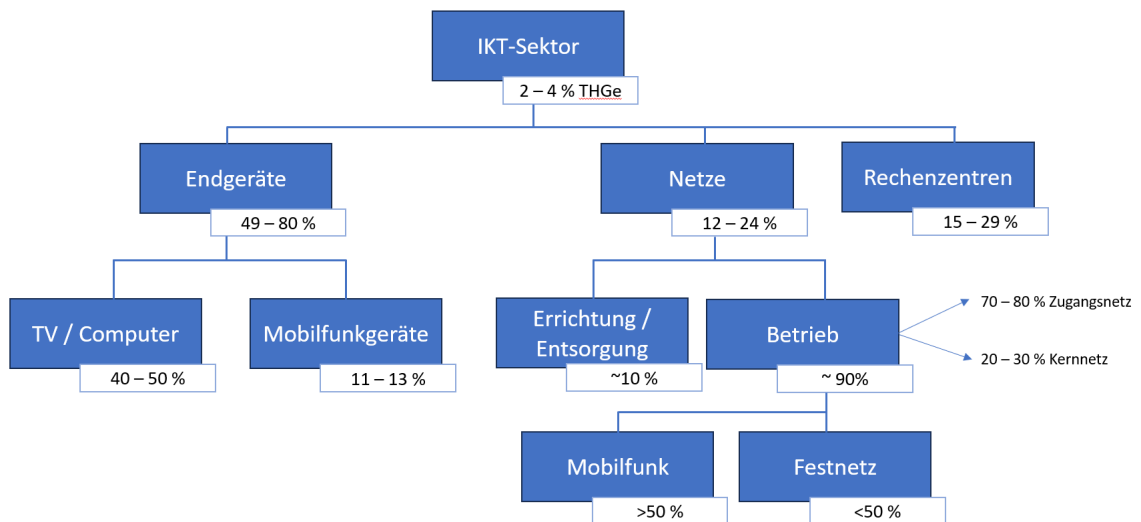
¹² Siehe [Europäischer Grüner Deal \(europa.eu\)](#), zuletzt abgerufen am 10.12.2023.

¹³ Freitag et al. (2021), The real climate and transformative impact of ICT: A critique of estimates, trends, and regulations. In Patterns (Bd. 2, Nummer 9). Cell Press.

gegenüber heute noch intensivere Nutzung der über Kommunikationsnetze ermöglichten Anwendungen und Dienste könnte dieser Anteil bis zum Jahr 2040 auf 14 % ansteigen.¹⁴

Den Mobilfunknetzen werden hierbei größere Emissionen als drahtgebundenen Netzinfrastrukturen zugeordnet. Abbildung 2-2 gibt einen Überblick über die Anteile der verschiedenen Bereiche an den gesamten THG-Emissionen.

Abbildung 2-2: Überschlägige Beiträge zu THG-Emissionen innerhalb des IKT-Sektors



Quelle: Eigene Abbildung nach Freitag et al. (2022), Grünwald/Caviezel (2022) und Godlovitch et al. (2021).¹⁵

Die Abbildung basiert auf der Berücksichtigung verschiedener Quellen. In der Literatur gibt es eine relativ große Bandbreite an quantitativen Daten über THG-Emissionen. Präzise Messungen gibt es nicht.¹⁶

Während bei drahtgebundenen Netzen durch den Einsatz von Glasfaseranschlüssen bis zu den Wohnungen der Stromverbrauch trotz steigendem Datenverkehr im Vergleich zu heute sinken kann, weil Glasfasernetze bis in die Wohnungen gegenüber Kupfernetzen und HFC-Netzen einen geringeren Stromverbrauch haben, ist das für den Mobilfunk aus heutiger Sicht noch eine offene Frage, die von Experten sehr unterschiedlich beantwortet wird.¹⁷

¹⁴ Basierend auf dem Niveau von 2016. Vgl. Belkhir und Elmeligi (2018), S. 458.

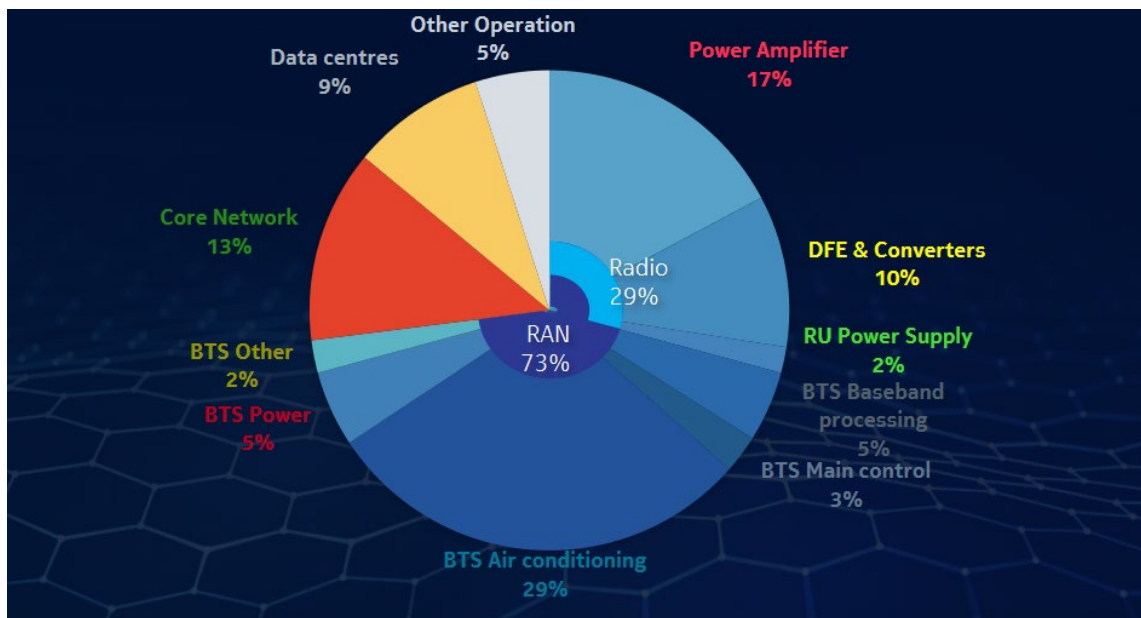
¹⁵ Anmerkung zur Interpretation der Abbildung: Die Prozentwerte beziehen sich auf unterschiedliche Größen. Der IKT-Sektor ist für 2–4 % aller THG-Emissionen verantwortlich. Innerhalb des Sektors entfallen die angegebenen Prozentwerte auf Endgeräte, Netze oder Rechenzentren und ergeben zusammen 100 %. Bei den Endgeräten entfallen die größten Anteile auf TV/Computer und Mobilfunkgeräte, die restlichen Endgeräte sind nicht aufgeführt.

¹⁶ BEREC (2022), S.8.

¹⁷ Siehe Sörries et al. (2023).

In den öffentlichen Mobilfunknetzen hat das Funkzugangsnetz (Radio Access Network, RAN) den höchsten Anteil am gesamten Stromverbrauch der Netzinfrastruktur.¹⁸

Abbildung 2-3: Stromverbrauch im Mobilfunk (Mix aus verschiedenen Mobilfunktechnologien)¹⁹



Quelle: NGNM.

Der im direkten Zusammenhang mit dem Aussenden von Funksignalen stehende Stromverbrauch beträgt 29 %.

Welche Parameter wirken somit wesentlich auf den Stromverbrauch des RAN ein?

Dies ist zum einen die Anzahl der in einem Funknetz betriebenen Basisstationen.²⁰ Die Anzahl der Basisstationen hängt von der Umsetzung von Versorgungsaufgaben, der nachgefragten Übertragungskapazität und der wettbewerblichen Positionierung des Mobilfunknetzbetreibers ab. Darüber hinaus beeinflusst die Lage der Frequenzen, die für den drahtlosen Netzzugang eingesetzt werden können, die Anzahl der Basisstationen.²¹ Stehen beispielsweise zusätzliche Flächenfrequenzen unterhalb von 1 GHz zur Verfügung, kann theoretisch aufgrund der physikalischen Eigenschaften der Frequenzen eine Erhöhung der Übertragungskapazität ohne zusätzliche Standorte und damit Mobilfunkkomponenten realisiert werden. Sofern jedoch zur Erhöhung von Übertragungskapazitäten nur Frequenzen oberhalb von 1 GHz genutzt werden können, die über geringere Reichweiten verfügen, kommt es gerade in ländlichen Regionen zu einer Verdichtung von Sendeanlagen, was aus einer ökologischen Sicht die schlechtere Alternative ist.

¹⁸ Grünwald und Caviezel (2022), S. 67.

¹⁹ Siehe <https://www.ngnm.org/publications/green-future-networks-network-energy-efficiency.html>, zuletzt abgerufen am 13.12.2023.

²⁰ Stobbe et al. (2023), S.77.

²¹ Stobbe et al. (2023), S.144.

2.1.3 Aspekte der Frequenzregulierung und Nachhaltigkeit

Das Ziel der Verbesserung der ökologischen Nachhaltigkeit von Kommunikationsnetzen und -anwendungen ist weder im europäischen noch im nationalen Rechtsrahmen für die betroffenen Märkte explizit verankert. Nachhaltigkeit wird beispielsweise in der Richtlinie (EU) 2018/1972²² nur indirekt durch die Ermöglichung der gemeinsamen Nutzung von Infrastrukturen, die Koordination von Bauarbeiten und die Frequenzverwaltung angesprochen. Auch die bisherige Kostensenkungsrichtlinie²³ adressierte das Thema Nachhaltigkeit nur mittelbar (Förderung eines effizienten Netzausbaus verringert die Umweltbelastung, ökologische Nachhaltigkeit wird nicht direkt angesprochen). In den Leitlinien für staatliche Klima-, Umweltschutz- und Energiebeihilfen 2022²⁴ wird ökologische Nachhaltigkeit adressiert.

Dennoch gewinnt das Thema Nachhaltigkeit auch im regulatorischen Kontext bzw. in entsprechenden Gremien an Bedeutung. Nachhaltigkeit ist beispielsweise auf europäischer Ebene sowohl in das Arbeitsprogramm von BEREC als auch der Radio Spectrum Policy Group (RSPG) aufgenommen wurden.²⁵ Im Fokus der RSPG steht die Frequenzregulierung, die den Rahmen für die Frequenznutzung von Funkinfrastrukturen vorgibt. Mögliche Auswirkungen der Nachhaltigkeit auf die Frequenzregulierung werden im folgenden Kapitel dargestellt.

2.1.3.1 Der rechtliche und institutionelle Rahmen der Ausgestaltung der Frequenzregulierung

Grundlegendes Ziel der Frequenzregulierung ist die nachfrage- und bedarfsgerechte Bereitstellung der Ressource Frequenz. Dabei steht nicht nur die aktuelle Frequenznutzung im Vordergrund, sondern auch die zukünftige Technologie- und Marktentwicklung.²⁶ Nur so kann sichergestellt werden, dass die Frequenzregulierung schnellstmöglich auf eine veränderte Marktnachfrage und andere geänderte Rahmenbedingungen reagieren kann. Dabei sind neben den Interessen der Nutzer und der Ermöglichung innovativer Technologien insbesondere die Sicherstellung einer effizienten und störungsfreien Frequenznutzung sowie die Gewährleistung eines chancengleichen und funktionsfähigen Wettbewerbs zu berücksichtigen. Insoweit fließen in regulatorische Entscheidungen ökonomische, frequenztechnische und wettbewerbliche Aspekte ein.

In diesem Zusammenhang ist auch von Relevanz, dass das zur Verfügung stehende Frequenzspektrum eine begrenzte Ressource darstellt. Neben den Marktaspekten sind auch die Interessen des Betriebs-, Wissenschafts-, Militär- und Sicherheitsfunks im Rahmen der Frequenzregulierung

²² Siehe [Richtlinie \(EU\) 2018/1972 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 11. Dezember 2018 über den europäischen Kodex für die elektronische Kommunikation \(Neufassung\)Text von Bedeutung für den EWR. \(europa.eu\)](#), zuletzt abgerufen am 07.12.2023.

²³ Siehe [Richtlinie 2014/61/EU des Europäischen Parlaments und des Ra... - EUR-Lex \(europa.eu\)](#) zuletzt abgerufen am 07.12.2023.

²⁴ Siehe [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52022XC0218\(03\)&from=EN](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52022XC0218(03)&from=EN), zuletzt abgerufen am 10.12.2024.

²⁵ Siehe [BEREC Report on Sustainability: Assessing BEREC's contribution to limiting the impact of the digital sector on the environment \(europa.eu\)](#), zuletzt abgerufen am 10.12.2024. Als Grundlage für den BEREC-Report wurde eine Studie von WIK/Ramboll (2021) verfasst: WIK Consult Report (europa.eu), zuletzt abgerufen am 07.12.2023.

²⁶ Siehe hierzu [Strategiepapier final ohne Änderungen es_MB.PDF \(bundesnetzagentur.de\)](#) sowie [Flexibilisierung der Frequenzregulierung: WIK - Wissenschaftliches Institut für Infrastruktur und Kommunikationsdienste GmbH](#), sowie [Flexibilisierung der Frequenzregulierung: WIK - Wissenschaftliches Institut für Infrastruktur und Kommunikationsdienste GmbH](#), zuletzt abgerufen am 07.12.2023.

zu berücksichtigen. Mit der zunehmenden Globalisierung der Märkte weltweit und den Zielen der Europäischen Union für einen gemeinsamen EU-Binnenmarkt wird auch die internationale Harmonisierung des Frequenzspektrums und damit die Berücksichtigung internationaler Planungen und Vorgaben in der nationalen Frequenzregulierung immer wichtiger. Die Harmonisierung von Frequenzbereichen kann insbesondere durch die Realisierung von Skalen- und Verbundeffekten auch zur Energie- und Ressourceneffizienz beitragen.

Die gesetzliche Grundlage für die Frequenzregulierung auf nationaler Ebene ist das Telekommunikationsgesetz (TKG) (2021)²⁷ und hier insbesondere die Paragraphen §§87 – 107 TKG.

Auf nationaler Ebene sind in diesem Zusammenhang der Frequenzplan²⁸ und die Frequenzzuteilungen von besonderer Bedeutung. Der Frequenzplan (§ 90 TKG) legt unter Berücksichtigung der Regulierungsziele für die Frequenzbereiche die grundsätzlich möglichen Frequenznutzungen sowie die damit verbundenen Nutzungsbedingungen nach Maßgabe der Frequenzverordnung und der international zu beachtenden Vorgaben fest. Nach dem TKG ist für jede Frequenznutzung eine entsprechende Frequenzzuteilung erforderlich. Diese kann in Form einer Allgemeinzuteilung oder einer Einzelzuteilung erfolgen. Mit der Frequenzzuteilung werden gegebenenfalls weiter konkretisierte Frequenznutzungsbedingungen auferlegt. Die so festgelegten Frequenzzuteilungen müssen eine effiziente und störungsfreie Nutzung gewährleisten und den Wettbewerb berücksichtigen. Häufig werden Frequenzen nur befristet zugeteilt, um die Möglichkeit einer Umwidmung (Refarming) und anderweitigen Frequenzzuteilung in der Zukunft zu ermöglichen.

Abbildung 2-4: Elemente der Frequenzregulierung



Quelle: Bundesnetzagentur.

Die europäische Koordinierung der nationalen Frequenznutzungskonzepte und -planungen erfolgt seit langem im Rahmen der CEPT,²⁹ die ihren Mitgliedern einerseits größtmögliche Freiheitsgrade und Gestaltungsmöglichkeiten einräumt, andererseits aber bei ihren Lösungen das

²⁷ Siehe [TKG - Telekommunikationsgesetz \(gesetze-im-internet.de\)](https://www.gesetze-im-internet.de/tkg_2021/), zuletzt abgerufen am 10.12.2023.

²⁸ Siehe [Bundesnetzagentur - Grundlagen - Frequenzplan](https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2021/07/frequenzplan.html), zuletzt abgerufen am 10.12.2023.

²⁹ Siehe [CEPT](https://www.cept.org/), zuletzt abgerufen am 10.12.2023.

notwendige Maß an europaweiter Harmonisierung anstrebt. Weitere Gremien mit Einfluss auf die Frequenzregulierung sind die RSPG³⁰ und die Europäische Kommission. Themen, die globale Vereinbarungen erfordern, werden zunächst auf europäischer Ebene in der CEPT abgestimmt und dann gemeinsam in die ITU³¹ eingebracht. Dort findet auf internationaler Ebene in regelmäßigen Abständen von ca. 4 Jahren die World Radio Conference statt, auf der Vereinbarungen über die Nutzungsmöglichkeiten von Frequenzen in bestimmten Regionen der Welt getroffen werden.³²

Auf der WRC, die im Dezember 2023 stattfand,³³ waren aus Sicht dieser Studie zwei Fragen von besonderer Bedeutung:

- Wie werden künftig Frequenzen im UHF-Band genutzt?
- Wie werden Frequenzen bei 6 GHz künftig genutzt?

Von der Beantwortung beider Fragen kann abhängen, wie (Anzahl an zusätzlichen Standorten) künftig die nachgefragten Übertragungskapazitäten in den Mobilfunknetzen realisiert werden.

2.1.3.2 Einbettung des Aspekts der Nachhaltigkeit in frequenzregulatorische Entscheidungen

Wie bereits erwähnt, ist Nachhaltigkeit bisher kein explizites Ziel der Ausrichtung der Regulierung elektronischer Kommunikationsdienste und damit auch nicht im Rahmen der Frequenzregulierung. Artikel 1(3)(b) EKEK sowie der entsprechende Erwägungsgrund sehen jedoch die Möglichkeit vor, Maßnahmen im *Interesse der Allgemeinheit* in der Europäischen Union zu ergreifen. Die RSPG ist der Auffassung, dass frequenzregulierende Entscheidungen im Sinne der Verbesserung der Nachhaltigkeit im Interesse der Allgemeinheit liegen und daher rechtlich gedeckt sind.³⁴

Folgt man dieser Einschätzung, so hat die Frequenzregulierung die Möglichkeit, durch verschiedene Maßnahmen die Nachhaltigkeit der Funknetzinfrastrukturen zu beeinflussen und zu verbessern. Dies beginnt mit der Zuweisung von Frequenzbereichen für bestimmte Dienste auf ITU-Ebene und anschließend im nationalen Frequenznutzungsplan. Bei diesen Entscheidungen könnte die Nachhaltigkeit zunehmend an Bedeutung gewinnen.

Ein weiterer Aspekt, der Frequenzregulierung und Nachhaltigkeit verbindet, ist der folgende:

Der Einsatz von modernsten Funktechnologien, die sich durch einen geringeren Energie- und Ressourcenverbrauch auszeichnen und damit die Umwelt weniger belasten, könnte über die Frequenzregulierung unterstützt werden: Wenn Funktechnologien in der Lage sind, die gleiche Art von Diensten oder sogar ein breiteres Spektrum von Diensten energieeffizienter bereitzustellen, stellt sich die Frage, ob die Frequenzpolitik darauf hinwirken sollte, dass nur die aus Nachhaltigkeitsaspekten überlegene Funktechnologie zum Einsatz kommt. Sollte sich z. B. herausstellen, dass veraltete eingesetzte Technologien (z. B. 2G, Tetra) aus Gründen der Nachhaltigkeit weniger tragbar sind und gleichzeitig aus Sicht der Anwender durch andere Funknetze Alternativen für ihre

³⁰ Siehe [RSPG](#), zuletzt abgerufen am 10.12.2023.

³¹ Siehe [ITU](#), zuletzt abgerufen am 10.12.2023.

³² In 2023 fand die letzte WRC statt. Siehe hierzu <https://www.itu.int/wrc-23/>, zuletzt abgerufen am 11.12.2023.

³³ Siehe <https://www.itu.int/wrc-23/>, zuletzt abgerufen am 15.12.2023.

³⁴ Siehe RSPG (2021), S. 21 ff.

Anwendungen bestehen, wäre zu überlegen, ob im Frequenzplan entsprechende Änderungen von Frequenzwidmungen vorgenommen werden (nach einer Übergangszeit), so dass mittelfristig Legacy-Netze abgeschaltet werden, wodurch auch Frequenzen für neue, energieeffizientere Technologien zur Verfügung stehen könnten.³⁵ Dies setzt voraus, dass die Technologieneutralität im Rahmen der Frequenzzuteilung aus Nachhaltigkeitsgründen nicht mehr umfassend gewahrt wird, so dass ineffiziente Funktechnologien weniger zum Einsatz kommen.

Das Thema Nachhaltigkeit könnte auch bei der Ausgestaltung von Frequenznutzungsaufgaben adressiert werden. Im Bereich des öffentlichen Mobilfunks stellt sich insbesondere im Vorfeld von Frequenzvergabeverfahren die Frage, wie Versorgungsaufgaben in Zukunft ausgestaltet sein sollen. Aus Sicht der ökologischen Nachhaltigkeit wären dann unter anderem folgende Fragen zu stellen:

- Sind aus Nachhaltigkeitsgründen symmetrische Versorgungsaufgaben für alle Mobilfunknetzbetreiber geboten?
- Inwieweit ist die Aufrechterhaltung von drei oder vier weitgehend unabhängigen Funknetzinfrastrukturen nahezu flächendeckend in Deutschland unter Nachhaltigkeitsgesichtspunkten zu bewerten?
- Sollten umfangreiche Frequenzportfolios unterhalb von 1 GHz nur wenigen Mobilfunknetzbetreibern zugeteilt werden, um eine angemessene Versorgung mit Mobilfunkdiensten insbesondere in nicht urbanen Regionen mit einem verbesserten ökologischen Fußabdruck zu gewährleisten?
- Kann durch eine frequenzregulatorische Verpflichtung zur gemeinsamen Nutzung von Netzinfrastrukturen die Nachhaltigkeit des Mobilfunks deutlich verbessert werden?

2.1.3.3 Schaffung einer Informationsgrundlage für mögliche frequenzregulatorische Maßnahmen und Initiativen zur Implementierung einer nachhaltigen Frequenzregulierung³⁶

Im Vorfeld der sich daraus möglicherweise ergebenden frequenzregulierenden Maßnahmen stellen sich die beiden folgenden grundlegenden Fragen, die auch in einem veröffentlichten Bericht der RSPG (2021)³⁷ über die Rolle der Frequenzpolitik bei der Bekämpfung des Klimawandels angesprochen werden:³⁸

- Was sind relevante Aspekte in der Frequenzregulierung, die einen Einfluss auf den Klimawandel und die Nachhaltigkeit haben?
- Wie kann die Frequenzregulierung einen positiven Beitrag zum Klimaschutz und zur Nachhaltigkeit leisten?

Um die erste Frage beantworten zu können, ist es notwendig, eine detaillierte Informationsbasis über die Nachhaltigkeit von Funknetzinfrastrukturen zu schaffen. Dabei sind zunächst die direkten

³⁵ Das 3G-Netz in Deutschland wurde von allen Mobilfunknetzbetreibern abgeschaltet. [3G-Netze werden abgeschaltet – Achtung bei älteren Handys und Verträgen | Verbraucherzentrale.de](#), zuletzt abgerufen am 07.12.2023.

³⁶ Siehe hierzu auch RSPG Opinion (2021): [Draft RSPG Opinion on Climate Change.pdf \(europa.eu\)](#), zuletzt abgerufen am 07.12.2023.

³⁷ Die RSPG ist das Beratergremium der EU-Kommission in frequenzpolitischen Fragen.

³⁸ Siehe [RSPG21-026final RSPG Report on Climate Change.pdf \(europa.eu\)](#), zuletzt abgerufen am 07.12.2023.

Nachhaltigkeitseigenschaften der jeweiligen Funknetze zu ermitteln, d. h. welche Auswirkungen haben die jeweiligen Funknetze auf den Treibhauseffekt und welchen Ressourcenverbrauch haben sie? Darüber hinaus sind die indirekten Nachhaltigkeitseffekte der jeweiligen bestehenden bzw. möglichen Funknetzinfrastrukturen durch die Nutzung von Diensten in anderen Sektoren bzw. den Ressourcenverbrauch zu ermitteln.³⁹

Dies adressiert den gesamten Lebenszyklus der Funknetzinfrastruktur, beginnend mit dem Aufbau, dem Betrieb und schlussendlich der Entsorgung der Funknetzinfrastruktur sowie der verwendeten Endgeräte wie Tablets und Smartphones im Falle des öffentlichen Mobilfunks. Zu erfassende Parameter sind hier der Energieverbrauch, die Treibhausgaswirkung, insbesondere der CO₂-Ausstoß, aber auch der Ressourceneinsatz und die Recyclingfähigkeit, wenn Nachhaltigkeit umfassend und nicht nur auf die Klimaerwärmung reduziert betrachtet werden soll. Ebenso sollte der Nutzungsgrad betrachtet werden.

Mit Blick auf den öffentlichen Mobilfunk wären hier z. B. Fragen der Nachhaltigkeit von (bestehenden und neu entstehenden) Mobilfunknetzinfrastrukturen in Abhängigkeit von den genutzten Frequenzen (exklusiv oder gemeinsam genutzt), dem genutzten Mobilfunkstandard (4G, 5G), und der tatsächlichen Nutzung der Funknetzinfrastrukturen zu adressieren. Im Hinblick auf die Entwicklung von 5G sollte insbesondere untersucht werden, welche Auswirkungen RAN-Sharing⁴⁰, Network-Slicing⁴¹, Massive MIMO⁴², die Nutzbarkeit von Frequenzbändern in Endgeräten etc. auf die Nachhaltigkeit des Betriebs und der Nutzung von Mobilfunknetzinfrastrukturen haben. Ziel der Informationssammlung wäre es, ein umfassendes Bild der aktuellen und zukünftig zu erwartenden Mobilfunknetzinfrastrukturen zu erhalten und Indikatoren zu identifizieren, wie die Nachhaltigkeit des Mobilfunksektors ggf. durch frequenzregulatorische Maßnahmen verbessert werden könnte. In diesem Zusammenhang wäre es interessant, im Detail zu erfahren, inwieweit die gemeinsame Nutzung von Netzen (passives und aktives Network-Sharing) zur Reduktion von CO₂-Emissionen beiträgt.

Im Vorfeld der Informations- bzw. Datenerhebung bedarf es jedoch einer klaren Vereinbarung über die Methode zur Messung der Nachhaltigkeit (nicht nur in Bezug auf die CO₂-Emissionen, sondern auch in Bezug auf den Ressourcenverbrauch in der gesamten Lebenszykluskette der Funkdienste) und über die Art und Weise der Datenerhebung zur Messung der Nachhaltigkeit.⁴³ Mit Blick auf die Mobilfunknetzbetreiber wäre hier eine Kooperation erforderlich, bei der die

³⁹ Um eine derartige Informationsgrundlage zu erhalten, hat die RSPG zunächst einen Fragebogen an die Mitgliedstaaten und Stakeholder verschickt, in dem Methoden der Kalkulation und der tatsächlichen Messung des Energieverbrauchs von Funknetzen (Als Referenz für eine mögliche Kalkulation der Energieeffizienz wurde auf den ETSI-Standard ES 203 228 1.3.1. (Kapitel 5) verwiesen.) zur Bereitstellung von elektronischen Kommunikationsdiensten zu erfassen (siehe https://radio-spectrum-policy-group.ec.europa.eu/system/files/2023-02/RSPG23-014final-sub-group-Climate_Change_Questionnaire-2023_0.pdf, zuletzt abgerufen am 10.12.2023.

⁴⁰ Siehe [Thesenpaper Infrastruktur2010_v7_17.08.2010.doc \(bundesnetzagentur.de\)](#), S. 3., zuletzt abgerufen am 07.12.2023.

⁴¹ Siehe [Einfach erklärt - Network Slicing | Deutsche Telekom](#), zuletzt abgerufen am 07.12.2023.

⁴² Siehe [Massive MIMO and Beamforming in 5G - 5G Networks \(5g-networks.net\)](#), zuletzt abgerufen am 07.12.2023.

⁴³ Zur Vertiefung der Thematik Transparenz über ökologische Aspekte von IKT und der Berichterstattungspflicht der Unternehmen zur Nachhaltigkeit gemäß der CSRD-Richtlinie (verfügbar unter: <https://www.csr-in-deutschland.de/DE/CSR-Allgemein/CSR-Politik/CSR-in-der-EU/Corporate-Sustainability-Reporting-Directive/corporate-sustainability-reporting-directive-art.html>), zuletzt abgerufen am 18.12.2023), die am 5. Januar 2023 in Kraft getreten ist, siehe Sörries et al (2023a), S. 95ff.

notwendigen Informationen von deren Seite zur Verfügung gestellt werden. Die RSPG (2021) sieht hier eine Dokumentationspflicht der Mobilfunknetzbetreiber hinsichtlich der Emissionen ihrer Netze und der von ihnen ergriffenen Maßnahmen zur Umsetzung der Umweltziele der Europäischen Kommission als notwendig an.

2.1.3.4 Eruierung von veralteten Funktechnologien, die durch effizientere ersetzt werden können

Veraltete Funktechnologien, die im Vergleich zu neueren Funktechnologien weniger energieeffizient sind und ggf. nur noch wenig genutzt werden, könnten Anlass dafür sein, Frequenzwidmungen im Frequenzplan zu überprüfen, sofern alternative Nutzungen möglich sind. Die Frequenzregulierung kann durch Nichtverlängerung von Frequenznutzungsrechten, durch Änderung der Frequenznutzungsbedingungen oder durch Erhöhung der Frequenznutzungsentgelte darauf hinwirken, dass veraltete, nicht nachhaltige Funktechnologien perspektivisch nicht mehr genutzt werden.

2.2 Resilienz der Frequenzregulierung

2.2.1 Resilienz als Anforderung an Funknetzinfrastrukturen

Die Resilienz von Funknetzinfrastrukturen bezieht sich auf die Fähigkeit von Funknetzen, Störungen oder Ausfälle zu bewältigen und ihren Betrieb aufrechtzuerhalten. Da drahtlose Funknetze anfällig für verschiedene Arten von Störungen sein können, wie z. B. Funkstörungen, Hardwarefehler, Umweltbedingungen oder sogar vorsätzliche Angriffe, ist es wichtig, dass diese Infrastrukturen robust und widerstandsfähig sind. Verschiedene Maßnahmen können ergriffen werden, um die Resilienz von Funknetzinfrastrukturen zu verbessern:

1. *Redundanz*: Durch den Einsatz redundanter Komponenten kann das Netzwerk auch bei Ausfällen oder Defekten eines Teils des Systems weiterhin funktionieren.
2. *Lastverteilung*: Eine effiziente Lastverteilung ermöglicht es, den Datenverkehr gleichmäßig auf verschiedene Teile des Netzwerks zu verteilen, um Überlastungen zu vermeiden und Ausfälle zu minimieren.
3. *Notfallplanung*: Ein gut ausgearbeiteter Notfallplan hilft, auf Störungen schnell zu reagieren und die Netzwerke rasch wiederherzustellen.
4. *Sicherheitsmaßnahmen*: Robuste Sicherheitsprotokolle schützen das Funknetzwerk vor böswilligen Angriffen und unbefugtem Zugriff.
5. *Monitoring und Wartung*: Kontinuierliches Überwachen und regelmäßige Wartung tragen dazu bei, potenzielle Probleme frühzeitig zu erkennen und zu beheben.

Solche Maßnahmen können die Belastbarkeit von Funknetzinfrastrukturen erhöhen, um sicherzustellen, dass sie auch unter schwierigen Bedingungen zuverlässig und effizient funktionieren.

Mit dem Stichwort *hohe Resilienz einer Funknetzinfrastruktur* wurden in der Vergangenheit in Deutschland primär die besonderen Anforderungen an die Ausgestaltung der (gehärteten) BOS-Funknetzinfrastruktur assoziiert.⁴⁴ Naturkatastrophen und Bedrohungsszenarien in Form von

⁴⁴ Siehe [OV-Planungsvorgaben_Version 1_5.pdf \(niedersachsen.de\)](#), zuletzt abgerufen am 07.12.2023.

Cyber-Angriffen, Sabotage, Krieg etc. haben das Bewusstsein für die Resilienz von Funknetzinfrastrukturen allgemein geschärft. In dem Maße, in dem Funknetze in Zukunft auch für andere Dienste und ein herausragendes volkswirtschaftliches Anliegen – wie z. B. die Steuerung der Stromversorgung, die Aufrechterhaltung von Smart Farming, die Steuerung der Verkehrsinfrastruktur – einen zunehmend kritischen Nutzungscharakter haben werden, wird das Thema Resilienz auch für andere Funknetzinfrastrukturen an Bedeutung gewinnen. Das gesamte gesellschaftliche Leben in Bezug auf öffentliche Mobilfunknetze, Wirtschaftsprozesse, Gesundheitswesen, Energieversorgung ist bzw. wird zukünftig auf funktionierende Funknetzinfrastrukturen angewiesen sein.

Der Bedeutung der Telekommunikationsnetze, insbesondere auch der Funknetze, Rechnung tragend, hat die Bundesnetzagentur kürzlich ein Strategiepapier zur Resilienz der Telekommunikationsnetze veröffentlicht.⁴⁵ Ziel der Resilienz ist demnach die Sicherstellung der Stabilität und Verfügbarkeit von Telekommunikationsnetzen und Telekommunikationsdiensten bei Störfällen und Krisen außergewöhnlichen Ausmaßes. Solche Vorfälle können nach Einschätzung der BNetzA Störungen der Energieversorgung, Naturkatastrophen, außergewöhnliche klimatische Bedingungen, wirtschaftliche Schwierigkeiten, Unruhen, Ausfall zentraler Internet-Infrastrukturen, Pandemien, mutwillige Zerstörungen, Manipulationen, Sabotage, kriegerische Auseinandersetzungen, Anschläge und Spionage, elektromagnetische Impulse (nuklear und nicht nuklear) und Cyber-Angriffe, die über das normale Maß hinausgehen, sein.

2.2.2 Implikationen der Resilienz auf die Errichtung der Funknetze und die Frequenzregulierung

Seitens der Bundesnetzagentur wurden sowohl technische als auch organisatorische Maßnahmen zur Stärkung der Resilienz von Funknetzinfrastrukturen identifiziert, die hier aufgeführt sind. Detaillierte Erörterungen hierzu finden sich im Strategiepapier der BNetzA zur Resilienz.⁴⁶

Technische Maßnahmen

- Betrachtung erneuerbarer Energien zur Krisenvorsorge
- Prüfung alternativer Standort-Anbindungen
- Verbesserte Georedundanz
- Objektschutz verstärken (physische Resilienz)
- Erweiterung von Systemen zur Angriffserkennung und -abwehr
- Notstrom für Telekommunikationsnetze und Basisdienste in Krisenfällen
- Ausweitung von Backup-Lösungen

Organisatorische Maßnahmen

- Gemeinsames Lagezentrum von Netzbetreibern und Behörden
- Optimierung der Zusammenarbeit durch Übungen

⁴⁵ Siehe [Resilienz der Telekommunikationsnetze \(bundesnetzagentur.de\)](https://www.bundesnetzagentur.de), zuletzt abgerufen am 07.12.2023.

⁴⁶ Siehe [Resilienz der Telekommunikationsnetze \(bundesnetzagentur.de\)](https://www.bundesnetzagentur.de), zuletzt abgerufen am 07.12.2023.

- Sicherstellung der Kommunikation zwischen den Akteuren in der Krise
- Priorisierung der Energieversorgung im Knappheitsfall
- Schwachstellenanalyse im Bereich Netzzusammenschaltung und Netzzugang
- Schulung von Mitarbeitenden, Best Practice

Im Rahmen der Frequenzregulierung kann die Stärkung der Resilienz von Funknetzen durch Frequenznutzungsauflagen umgesetzt werden. Ziel wäre es, Funknetzinfrastrukturen so zu gestalten, dass Rückfallebenen und Vorkehrungen für Eventualitäten vorhanden sind. Beispielsweise ist für den Bereich des öffentlichen Mobilfunks denkbar, dass ausgewählte Sendemasten und Basisstationen über einen festzulegenden Zeitraum mit unterbrechungsfreier Stromversorgung und entsprechender Notstromtechnik betrieben werden müssen.⁴⁷ Denkbar wäre auch, die gemeinsame Nutzung von Standorten einzuschränken und durch entsprechende Kooperationen der Netzbetreiber Back-up-Lösungen zu schaffen. Im Ereignisfall des Ausfalls bestimmter Sendestandorte stünden dann alternative Kommunikationsmöglichkeiten zur Verfügung.

Der Aufbau und die Anforderungen an ein BOS-Netz⁴⁸ sowie der Aufbau und die Anforderungen an das 450-MHz-Funknetz⁴⁹ geben Hinweise, welche Faktoren für den Aufbau resilienter Funknetze relevant sind.

2.3 Klassische Ziele der Frequenzregulierung, Nachhaltigkeit und Resilienz im Spannungsfeld der Frequenzregulierung

Die klassischen Ziele der Frequenzregulierung, wie sie in den §§ 2 und 87 TKG festgelegt sind, stehen nicht immer im Einklang mit den Maßnahmen, die angedacht sind, um Nachhaltigkeit und Resilienz zu verbessern. Auch Maßnahmen zur Umsetzung von Resilienz können aus Gründen der Nachhaltigkeit eher kritisch sein.

Resilienzmaßnahmen zur Erhöhung der Ausfallsicherheit von Funknetzinfrastrukturen, z. B. durch eine Batteriepufferung von Sendeanlagen, sind tendenziell mit höheren Investitionen und damit einem höheren Ressourcen- und Energieverbrauch verbunden. Dies ist aus einer rein statischen Nachhaltigkeitsperspektive eher abzulehnen.

Rahmenbedingungen, die Netzkooperationen zur Einsparung von Ressourcen und einer Reduzierung des Energieverbrauchs anreizen, können einen Beitrag zur Nachhaltigkeit leisten. Kooperationen können von der gemeinsamen Nutzung von Grundstücken, Versorgungsleitungen, Masten etc. über RAN-Sharing bis hin zur gemeinsamen Nutzung von Frequenzressourcen reichen. Es ist jedoch darauf zu achten, dass durch derartige Kooperationsformen die Effizienz der Frequenznutzung nicht beeinträchtigt wird, d. h. es darf nicht zu einer Verschlechterung der Gesamtversorgung (Fläche, Datenraten) kommen. Darüber hinaus sind wettbewerbliche Belange,

⁴⁷ Die Bundesnetzagentur erwägt derartige Vorgaben bei der anstehenden Vergabe von Mobilfunkfrequenzen, siehe BNetzA (2023): Rahmenbedingungen künftiger Frequenzzuteilungen bei der Bereitstellung von Frequenzen in den Bereichen 800 MHz (oder 90 MHz), 1.800 MHz und 2.600 MHz für den Ausbau digitaler Infrastrukturen.

⁴⁸ Siehe https://www.bdbos.bund.de/DE/Aufgaben/DigitalfunkBOS/DigitalfunkBOSimUeberblick/digitalfunkbosimueberblick_node.html, zuletzt abgerufen am 10.12.2023.

⁴⁹ Siehe [Versorger-Allianz 450 und 450connect schließen Funkdienste-Rahmenvertrag, Stadtwerke Bonn GmbH, Pressemitteilung - lifePR](#), zuletzt abgerufen am 07.12.2023.

insbesondere im Hinblick auf eine Verringerung des Infrastrukturwettbewerbs, gegenüber der Verbesserung der Nachhaltigkeit abzuwägen. Generell erhöhen zusätzliche Parameter wie Nachhaltigkeit und Resilienz in der Frequenzregulierung die Komplexität von Entscheidungsprozessen, da potenzielle Zielkonflikte z. B. durch die Priorisierung von Parametern oder Zielen gelöst werden müssen.

Teil II: Infrastrukturwettbewerb und Nachhaltigkeit im Spannungsfeld der Frequenzregulierung am Beispiel des öffentlichen Mobilfunks

Der Infrastrukturwettbewerb im deutschen Mobilfunkmarkt wird von drei bundesweit verfügbaren Mobilfunknetzen geprägt. Die aufgrund der symmetrischen Versorgungsaufgaben vorhandene Versorgung erfasst mindestens 98 % der Haushalte in jedem Bundesland mit einer Übertragungsrate von mindestens 100 Mbit/s im Downlink im Antennensektor. In dünn besiedelten Gebieten einiger Bundesländer werden aktuell nur ca. 90 % der Haushalte versorgt.⁵⁰

Der Infrastrukturwettbewerb in Verbindung mit Versorgungsaufgaben führt somit in Deutschland fast flächendeckend zu drei parallelen Netzinfrastrukturen, während es im Festnetz in vielen ländlichen Gemeinden heute nur eine drahtgebundene Netzinfrastuktur gibt. Der Infrastrukturwettbewerb kann somit im Konflikt zur ökologischen Nachhaltigkeit stehen, sofern die Nachfrage nach Datendiensten nicht selbst zu mehreren parallelen Netzinfrastrukturen führt. Im Weiteren verwenden wir die Auslastung als Indikator für die ökologische Nachhaltigkeit. Je größer die Auslastung der jeweiligen Netzinfrastuktur ist, desto nachhaltiger sind mehrere Netzinfrastrukturen, die aus volkswirtschaftlichen Gründen jeweils eine Mindestversorgung anbieten.⁵¹

Des Weiteren zeigen Expertengespräche, dass die Marktanteile der etablierten Mobilfunknetzbetreiber in den unterschiedlichen Regionen (urban, suburban und ländlich) sehr unterschiedlich sind. Öffentlich verfügbare Angaben zu regionalen Marktanteilen gibt es nicht. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass symmetrische Frequenznutzungen der etablierten Mobilfunknetzbetreiber aufgrund von symmetrischen Versorgungsaufgaben nicht zu symmetrischen Marktanteilen in den unterschiedlichen Regionen in Deutschland geführt haben.⁵²

Die folgenden modelltheoretischen Beispielrechnungen gehen nun der Frage nach, wie aus einer ökologischen Sicht eine symmetrische Frequenznutzung bei asymmetrischen Marktanteilen einzustufen ist. Führen symmetrische Frequenzausstattungen zu einem aus ökologischer Sicht schlechteren Ergebnis als asymmetrische Frequenznutzungen, die hinsichtlich der angebotenen Kapazität primär auf die Nachfrage der jeweiligen Kunden abstellen?

Die Modellberechnungen abstrahieren vom deutschen Mobilfunkmarkt und seinen Mobilfunknetzbetreibern, weil insbesondere die Anzahl von Mobilfunkstandorten der drei etablierten Anbieter, deren Anzahl und geographische Lage maßgeblich die Versorgung bestimmen, nicht betrachtet

⁵⁰ Vgl. BNetzA, Konsultation zur künftigen Nutzung der auslaufenden Mobilfunkfrequenzen, 2023, https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2023/20230913_Mobilfunk.html, zuletzt abgerufen am 10.12.2023.

⁵¹ Wenn die Auslastung gering ist, bedeutet dies, dass ein hoher Ressourceneinsatz für die Errichtung dreier paralleler unabhängiger Funknetzinfrastrukturen vorliegt, der in einem Missverhältnis zur tatsächlichen Nutzung steht. In diesem Fall stellt sich die Frage, ob es nicht sinnvoll ist, die bestehende Nachfrage durch eine geringere Anzahl an Funknetzinfrastrukturen mit einem geringeren Ressourceneinsatz zu bedienen. Je größer und flächendeckender die Unterauslastung der Netze ist, desto eher könnte aus rein ökologischer Sicht eine Netzinfrastuktur (in ländlichen Regionen) die Nachfrage bündeln.

⁵² Ein Grund dafür liegt in der unterschiedlichen Frequenzausstattung der Mobilfunknetzbetreiber. So verfügten Viag Interkom (später Telefónica) und E-Plus zunächst nur über Kapazitätsspektrum, während die Deutsche Telekom und Mannesmann Mobilfunk (später Vodafone) bereits mit Markteintritt über Flächenspektrum verfügten. Um ein vergleichbares Angebot von Telekommunikationsdiensten in ländlichen Regionen anbieten zu können, hätten Telefónica und E-Plus ca. 3mal mehr Basisstationen als ihre Wettbewerber errichten müssen. Vgl. dazu Stumpf et al. (2005).

werden. Der Grund dafür liegt darin, dass es dazu keine georeferenzierten, öffentlichen Daten gibt. Die Orte von Mobilfunksendeanlagen und die am Standort eingesetzten Frequenzen werden von den Mobilfunknetzbetreibern als Betriebs- und Geschäftsgeheimnisse eingestuft. Des Weiteren wird im Modell nicht die durchaus unterschiedliche Nutzung in den drei Mobilfunknetzen abgebildet. Die nachfolgende Tabelle zeigt, dass es hier unter den etablierten Mobilfunknetzbetreibern durchaus Unterschiede gibt, die sich auch auf die Auslastung der Funkzellen niederschlagen.

Tabelle 2-1: Mobilfunknutzung in den Mobilfunknetzen (im Jahr 2022)

	Vodafone	Telefónica	Telekom
Anzahl der Kunden	31.292.000	44.287.750	53.939.750
Mobiler Datenverkehr (in GB)	1.852.088.000	3.490.568.000	2.400.000.000
Durchschnittlich genutztes Datenvolumen pro Kunde und Monat (GB)	4,93	6,57	3,71

Quelle: WIK.⁵³

⁵³ Die Angaben stammen aus Geschäftsberichten der Mobilfunknetzbetreiber für das Jahr 2022. Die Daten für die Deutsche Telekom wurden aus den folgenden Quellen abgeleitet: <https://www.verivox.de/handy/nachrichten/mobilfunk-2022-datenverbrauch-in-handynetzen-steigt-um-ueber-30-prozent-1119993/>, https://www.chip.de/news/Videostreaming-und-Co.-Mobiler-Datenverbrauch-stieg-2022-in-Deutschland-deutlich_184589936.html, zuletzt abgerufen am 14.12.2023.

3 Exemplarische modelltheoretische Berechnungen zur Auslastung von Mobilfunknetzen bei symmetrischen Infrastrukturen in der Fläche

Nachfolgend präsentieren wir eine kurze Beschreibung der Modellannahmen und der Vorgehensweise zur exemplarischen Bestimmung der Netzauslastung der Mobilfunknetzbetreiber. Die modelltheoretische Betrachtung erfolgt geografisch in Bezug auf das Bundesland Hessen.⁵⁴ Dabei wird das Bundesland in ca. 21.000 1-mal-1-Kilometer-Raster unterteilt. Für jedes Raster wird Mobilfunkkapazität auf Seiten der Mobilfunknetzbetreiber und eine Mobilfunknachfrage auf Seiten der Kunden modelliert. Das Verhältnis zwischen Angebot und Nachfrage stellt dann die Auslastung dar, die wir als Indikator für die ökologische Nachhaltigkeit verwenden.

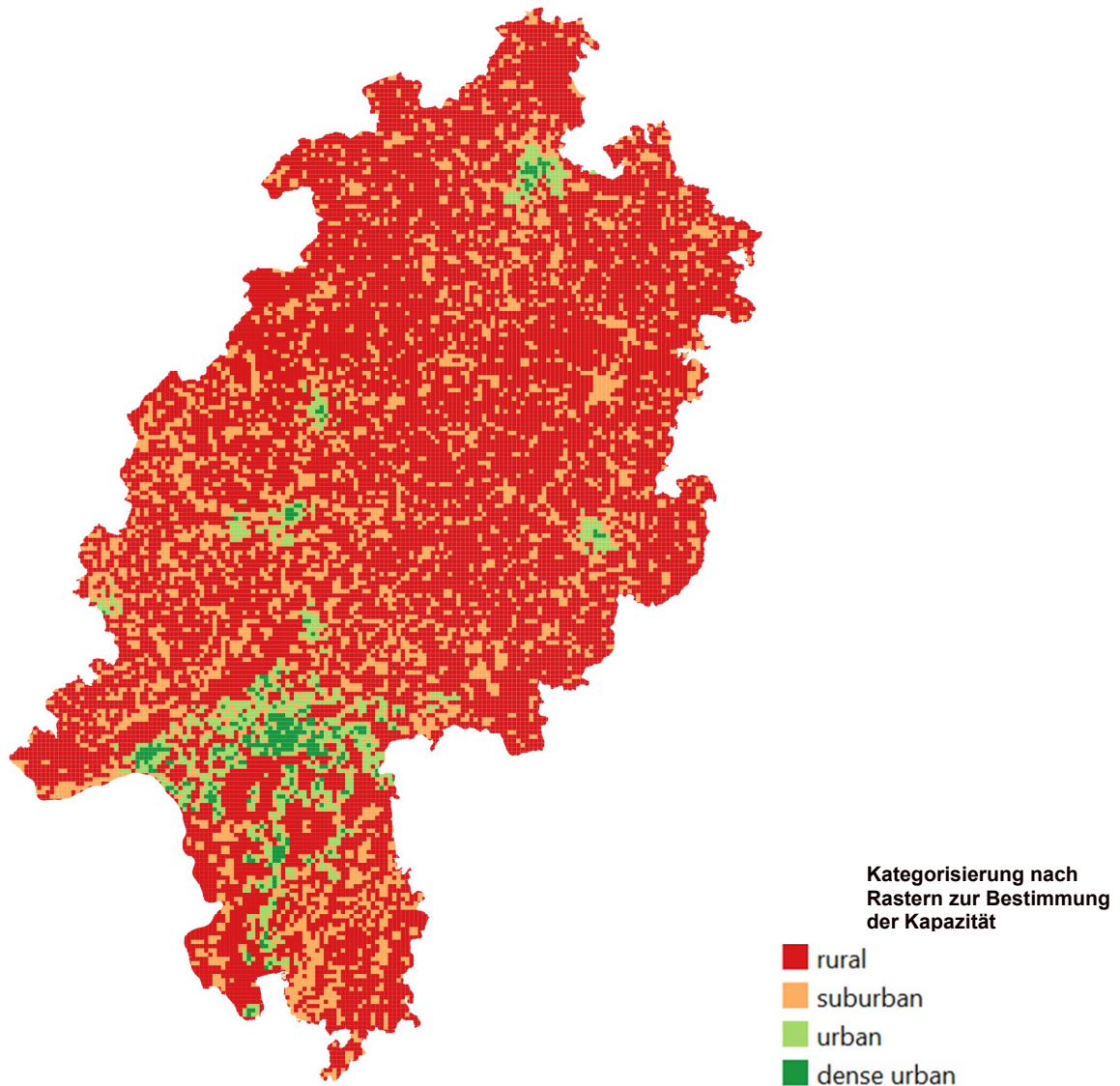
3.1 Modellbeschreibung – Mobilfunkkapazität

Jedes der Raster wird in rural, suburban, urban und dense urban in Abhängigkeit von der Einwohnerdichte unterteilt⁵⁵ (siehe hierzu Tabelle 3-1). Die räumliche Verteilung dieser Raster wird in Abbildung 3-1 dargestellt.

⁵⁴ Die Fokussierung auf Hessen ist darin begründet, dass wir hier über detaillierte Daten in Bezug auf die Nutzung in den jeweiligen Rastern verfügen.

⁵⁵ Die Einteilung der ca. 21.000 1-mal-1-Kilometer-Raster orientiert sich an der Eurostat-Klassifizierung. Abweichend davon wurde hier noch eine Unterscheidung der urbanen Gebiete in urban und dense urban vorgenommen. Neben der Einwohnerdichte des 1-mal-1-Kilometer-Rasters wird außerdem die Kategorisierung der Gemeinde, in der das Raster liegt betrachtet. Somit sind zusätzlich urbane Raster nur auf urbane Gemeinden beschränkt. Die Gemeindekategorisierung erfolgt strikt nach der Eurostat-Klassifizierung (weniger als 100 EW/km², zwischen 100 und 500 EW/km² und über 500 EW/km² in Bezug zur gesamten Gemeinde).

Abbildung 3-1: Kategorisierung der Rasterzellen nach Einwohnerdichte der Raster in Hessen zur Bestimmung der Mobilfunkkapazität



Quelle: WIK; Kartenmaterial © GeoBasis-DE / BKG (2023) Lizenz: dl-de/by-2-0.

Je nach Gebietskategorie wird unterstellt, dass jeder der Mobilfunknetzbetreiber einen bestimmten Umfang an zugeteilten Frequenzen in den Rastern einsetzt. Weiße oder graue Flecken bestehen somit im Modell nicht. Die Modellierung von weißen und grauen Flecken bedingt mindestens Informationen über die Mobilfunkstandorte und die eingesetzten Frequenzen. Der Umfang an eingesetzten Frequenzen in den jeweiligen Frequenzlagen ist bei allen Mobilfunknetzbetreibern gleich. In ländlichen Gebieten gehen wir beispielsweise davon aus, dass nutzbare Frequenzen in den Frequenzlagen 700 und 800 MHz eingesetzt werden.

Damit wird in jedem Raster von jedem Mobilfunknetzbetreiber eine spezifische, durchschnittliche Mobilfunkkapazität angenommen. Die durchschnittliche Mobilfunkkapazität ist für alle

Mobilfunknetzbetreiber gleich. Ebenso wird angenommen, dass in jedem Raster das gleiche Frequenzportfolio von den einzelnen Mobilfunknetzbetreibern genutzt wird.⁵⁶

Die Kategorisierung der Raster wie in Abbildung 3-1 dargestellt, die im jeweiligen Rastertyp genutzten Frequenzbänder und die angenommen, durchschnittlichen Kapazität im jeweiligen Raster pro Mobilfunknetzbetreiber sind in der folgenden Tabelle präsentiert. Eine ausführliche Herleitung der Kapazität erfolgt im Anhang.

Tabelle 3-1: Rasterklassifizierung, eingesetzte Frequenzbänder, durchschnittliche Kapazität zur Busy Hour

Rastereinteilung Kapazitäten	Einwohnerdichte des Rasters	Eingesetzte Frequenzbänder pro MNB	Kapazität pro MNB
Rurale Raster	< 100 EW/km ²	700 + 800 MHz-Bänder	7,2 Mbit/s
Suburbane Raster	100 ≤ EW/km ² < 500	700 + 800 MHz-Bänder +1800 + 2100 MHz-Bänder	85,9 Mbit/s
Urbane Raster	500 ≤ EW/km ² < 3760	700 + 800 MHz-Bänder +1800 + 2100 MHz-Bänder	85,9 Mbit/s
Dense urbane Raster	≥ 3760 EW/km ² (entspricht ca. 30% der Einwohner in Hessen)	700 + 800 MHz-Bänder +1800 + 2100 MHz-Bänder +3,6 GHz-Bänder	1.489,7 Mbit/s

Quelle: WIK.

3.2 Modellbeschreibung – Mobilfunknutzung

In jeder Rasterzelle gibt es eine bestimmte Anzahl von Mobilfunknutzern. Die Berechnungsgrundlage sind zum einen die dort ansässigen Einwohner und, sofern Beherbergungsbetriebe (z. B. Hotels) im Raster vorhanden sind, die Auslastung der vorhandenen Betten. Zum anderen gibt es Verkehrswege (Straße und Schiene) bzw. touristische Hotspots, entlang derer sich die potenziellen Nutzer bewegen. Daraus ergibt sich eine spezifische Anzahl von Nutzern in einem Raster. Es wird davon ausgegangen, dass jeder Nutzer im Durchschnitt über 1,24 SIM-Karten verfügt.⁵⁷

Für die durchschnittliche Datennutzung pro Nutzer in der Spitzenstunde (Busy Hour) wurde ein Wert von 0,06693 Mbit/s (66,93 Mbit/s pro 1.000 Nutzer) ermittelt.⁵⁸

⁵⁶ Eine Gleichverteilung der Frequenzen und damit verbunden Kapazitäten wird angenommen, da der tatsächliche Einsatz der Frequenzen, d. h. wo welche Frequenzbänder mit welchen Kapazitäten von welchem Netzbetreiber eingesetzt werden, nicht öffentlich zugänglich ist.

⁵⁷ Siehe Bundesnetzagentur (2022): Jahresbericht Telekommunikation, S. 21. Die Gesamtzahl der SIM-Karten in Deutschland lag laut Bericht im Jahr 2022 bei 104,4 Mio. Die Anzahl der SIM-Karten in Deutschland wurde durch die Bevölkerung geteilt, sodass ein Nutzer über ca. 1,24 SIM-Karten verfügt.

⁵⁸ Vgl. Bundesnetzagentur (2022): Jahresbericht Telekommunikation, S. 23. Demnach beträgt das Datenvolumen pro SIM-Karte und Monat 5,4 Gigabyte (GB) im Jahr 2022. 5,4 GB entsprechen 43.200 Megabit (Mbit) pro Monat und SIM-Karte. 43.200 Mbit geteilt durch ca. 30,4 Tage pro Monat und multipliziert mit 1,24 SIM-Karten pro Nutzer entspricht einer Mobilfunknachfrage von 1721,11 Mbit/Tag/Nutzer).

Durch die Multiplikation der Anzahl der Nutzer mit der durchschnittlichen Datennutzung ergibt sich die aggregierte Kapazitätsnachfrage pro Sekunde in jedem Raster.

3.3 Szenario-Rechnungen zur Ermittlung der ausgelasteten Kapazität pro Mobilfunknetzbetreiber

Um die Nutzung der jeweiligen Mobilfunknetzbetreiber in jedem Raster zu bestimmen wurden die Berechnungen für zwei Szenarien vorgenommen.

Szenario 1: Gleichverteilung in allen Rastern

Die Marktanteile der Mobilfunknetzbetreiber sind in jeder Raster- und Gemeindekategorie gleich. Jeder der Teilnehmer hat somit $\frac{1}{3}$ der Nutzer in seinem Mobilfunknetz (gleiche Verteilung der räumlichen Marktanteile).

Szenario 2: Ein Mobilfunkanbieter A mit dem Fokus auf dicht besiedelte Gebiete (städtischer Anbieter)

Es wird angenommen, dass ein Mobilfunknetzbetreiber A einen Marktanteil von 50 % in den städtischen (urbanen) Gemeinden hat und die beiden anderen Netzbetreiber (B+C) jeweils einen Marktanteil von 25 % in den urbanen Gemeinden haben.

Weiterhin wird unterstellt, dass der Gesamtmarktanteil der drei Netzbetreiber insgesamt über ganz Hessen jeweils $\frac{1}{3}$ beträgt.

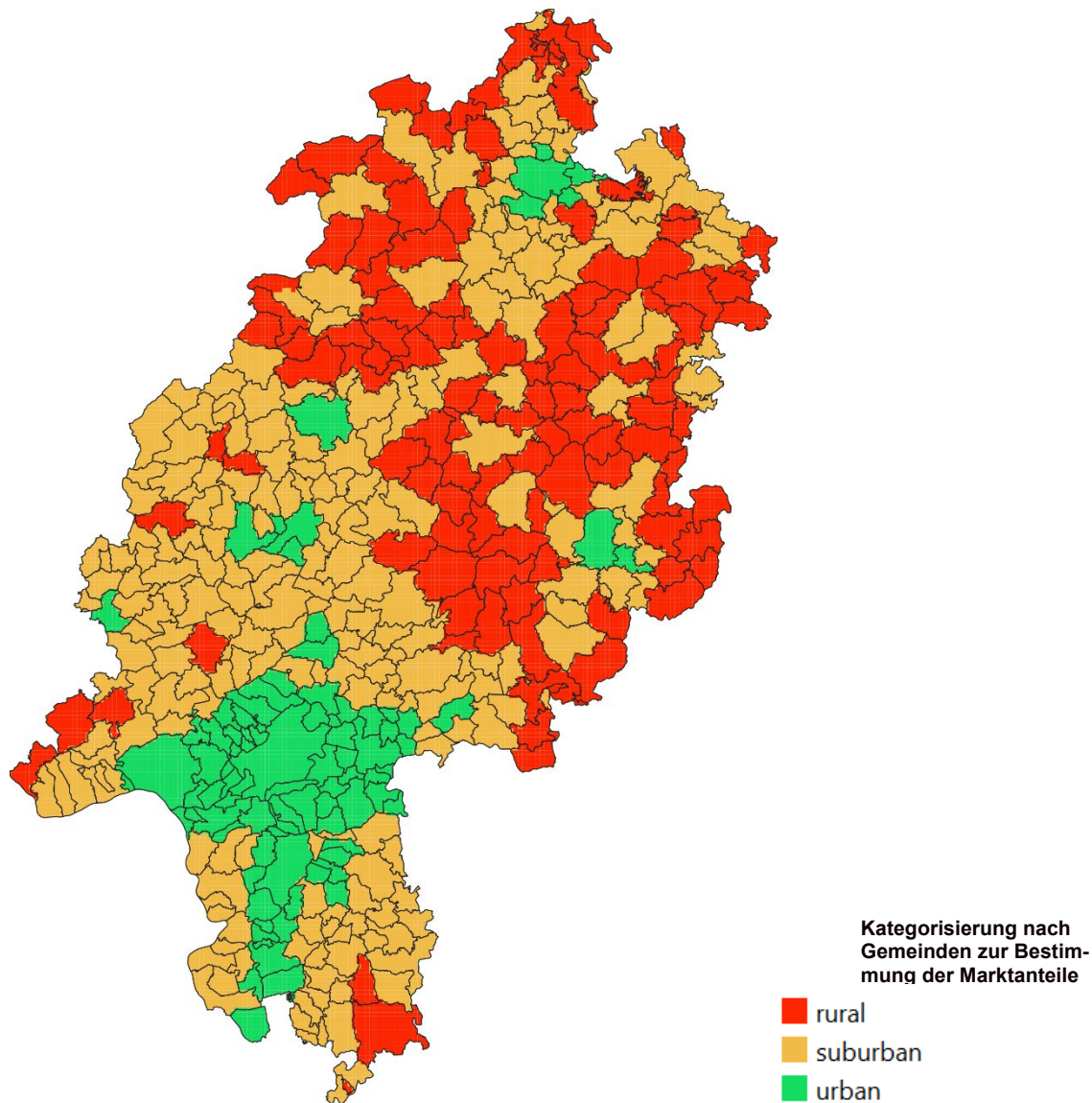
Daraus ergibt sich dann als Residuum des Gesamtmarktanteils für den städtischen Netzbetreiber A ein Marktanteil von 10,7 % in halbstädtischen (suburbanen) und ländlichen (ruralen) Gemeinden. Der Marktanteil der beiden anderen Mobilfunknetzbetreiber beträgt demzufolge jeweils 44,6 % in suburbanen und ruralen Gemeinden.

Die Gemeindekategorisierung erfolgt nach der Eurostat-Klassifizierung: Weniger als 100 EW/km² entspricht ruralen Gemeinden, zwischen 100 und 500 EW/km² entspricht suburbanen Gemeinden und über 500 EW/km² entspricht urbanen Gemeinden, jeweils in Bezug zur gesamten Einwohnerzahl der Gemeinden und der Gemeindefläche.

Die Festlegung des Marktanteils nach Gemeindekategorie und nicht nach der Rasterkategorie wird vorgenommen, um vor allem die Nutzung auf Verkehrswegen den passenden Netzbetreiber zuzuordnen.

Darüber hinaus wird angenommen, dass innerhalb der Busy Hour 14 Prozent der Tageskapazität genutzt wird. Somit ergibt sich ein Wert von 0,067 Mbit pro Sekunde (Mbit/s) pro Nutzer innerhalb der Busy Hour.

Abbildung 3-2: Kategorisierung der Rasterzellen nach Einwohnerdichte der Gemeinden in Hessen zur Bestimmung der Marktanteile



Quelle: WIK; Kartenmaterial © GeoBasis-DE / BKG (2023) Lizenz: dl-de/by-2-0.

3.3.1 Beispielhafte Berechnung der Netzauslastung eines Mobilfunknetzbetreibers in einem ruralen Raster

Die folgende Abbildung zeigt beispielhaft die Ermittlung der %ualen Kapazitätsauslastung eines Mobilfunknetzbetreibers in einem ländlichen Raster (Kapazität in der Busy Hour 7,2 Mbit/s). In diesem Beispiel wird angenommen, dass es 100 Nutzer mit einer Datennachfrage von 0,067 Mbit/s pro Nutzer in der Busy Hour gibt. Dieser Wert stellt jedoch nur den Mittelwert der Datennutzung innerhalb einer Stunde dar. Sollten alle Nutzer innerhalb eines Raster gleichzeitig einen datenintensiven Dienst nachfragen (Busy Second), wäre die Spitzenlast sehr viel höher. Eine Dimensionierung der Netze nach einer Busy Second oder Busy Minute ist jedoch nicht realistisch, da die Leerkapazität im Vergleich zu einem statistisch unwahrscheinlichen oder seltenen Szenario

zu lange zu hoch wäre, um wirtschaftlich sinnvoll zu sein. Für die Modellierung wurde dennoch ein zusätzlicher Faktor herangezogen, der zwar weder die Spitzenlast einer Busy Second oder Minute abbilden soll, aber dennoch eine höhere Dimensionierung als die mittleren Stundenlast (der Busy Hour) erlaubt. Ein gängiger Wert scheint hierbei zu sein, dass Mobilfunkzellen im Mittel nicht über eine Auslastung von 70 % kommen sollten. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass die Nachfrage um $1 \div 0,7$ erhöht wird, um eine realistische mittlere Spitzenlast bestimmen zu können. Dies entspricht einem Faktor von ca. 1,43, der als Aufschlag auf die Datenfrage angerechnet wird.

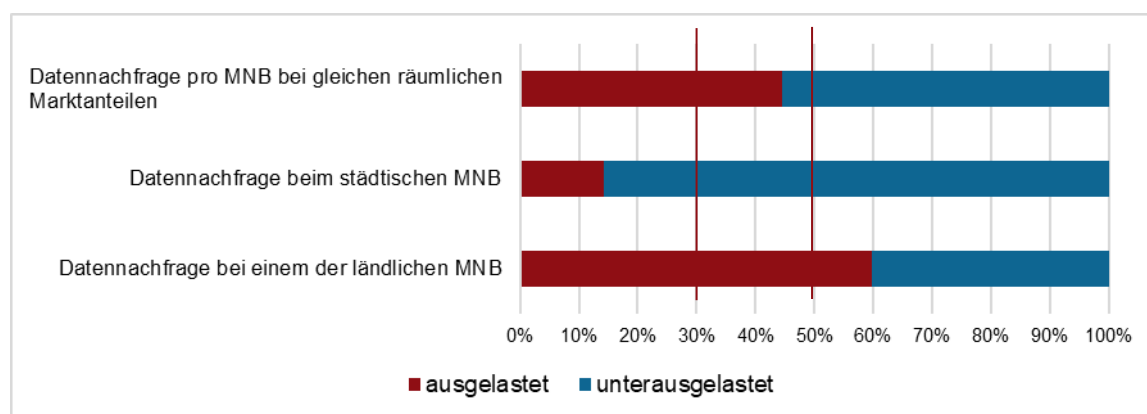
In dieser Beispielrechnung werden Szenario 1 (gleiche Verteilung der räumlichen Marktanteile) und Szenario 2 (städtischer Anbieter und ländliche Anbieter) dargestellt.

In Szenario 1 haben die einzelnen Mobilfunknetzbetreiber einen Marktanteil von $\frac{1}{3}$ der Nutzer. In diesem Fall ergibt sich eine Rasterauslastung von ca. 44,6 % ($3,2 \text{ Mbit/s} \div 7,2 \text{ Mbit/s}$).

In Szenario 2 hat der städtische Mobilfunknetzbetreiber nur einen Marktanteil von ca. 11 %, da das Raster im hier gewählten Beispiel in einer ruralen Gemeinde liegt. Die Rasterauslastung des städtischen Betreibers ist daher geringer als in Szenario 1 bei gleichen räumlichen Marktanteilen und liegt bei ca. 14,3 % (entspricht $1,0 \div 7,2$). Beide ländliche Mobilfunknetzbetreiber haben hingegen in diesem Raster einen Marktanteil von ca. 45 %. Sie versorgen also mehr Kunden in diesem Raster und haben dementsprechend eine höhere Auslastung. Im hier gewählten Beispiel haben die beiden ländlichen Netzbetreiber eine Auslastung von ca. 59 %.

Abbildung 3-3: Methodisches Vorgehen zur Bestimmung der %ualen Rasterauslastung eines Mobilfunknetzbetreibers am Beispiel eines ruralen Rasters (angebotene Kapazität beträgt 7,2 Mbit/s)

	Anzahl und Einheit	Faktor
Nutzer	100	
Datennachfrage insgesamt	6,7 Mbit/s	× 0,067 Mbit/s
Datennachfrage mit Aufschlag	9,6 Mbit/s	× 1,43
Datennachfrage pro MNB bei gleichen räumlichen Marktanteilen	3,2 Mbit/s	× 33,3% bei gleichen Marktanteilen;
Datennachfrage des städtischen MNBs	1,0 Mbit/s	× 10,7% beim städtischen Anbieter;
Datennachfrage eines ländlichen MNBs	4,3 Mbit/s	× 44,7% beim ländlichen Anbieter



Quelle: WIK

Hinweis: Die angebotene Kapazität eines ruralen Rasters beträgt für jeden Anbieter 7,16 Mbit/s, unabhängig der Marktanteile. Bei unterschiedlichen Marktanteilen innerhalb des Rasters wird eine unterschiedliche Datennachfrage angenommen. Die roten Linien zeigen unterschiedliche Auslastungsgrade, die im Weiteren als Grenzwerte betrachtet werden.

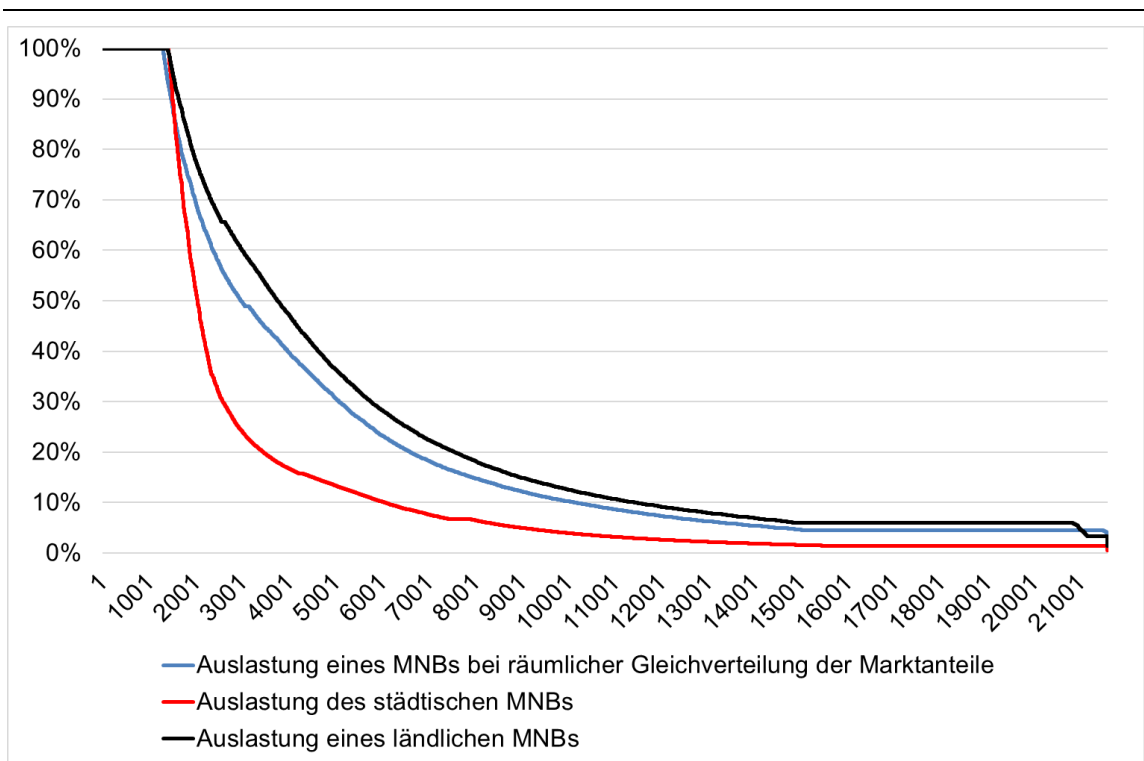
Analog dazu wird auch die Auslastung der suburbanen, urbanen und dense urbanen Raster modelliert, mit der Unterscheidung der angenommen maximalen Kapazität des Rasters und den entsprechenden räumlichen Marktanteilen der Mobilfunknetzbetreiber.

Im Folgenden werden die Ergebnisse in Bezug auf die Rasterauslastung differenziert nach den vorgestellten Szenarien 1 und 2 dargestellt, wobei in Bezug auf Szenario 2 die Darstellung unausgelasteter Raster für den städtischen Mobilfunknetzbetreiber und die beiden anderen Mobilfunknetzbetreiber erfolgt.

3.3.2 Ergebnisse der Rasterauslastung von weniger als 30 % für Szenario 1 und Szenario 2

Die Ergebnisse der Auslastung in Szenario 1 mit der räumlichen Gleichverteilung der Marktanteile und in Szenario 2 mit der Auslastung des städtischen und eines der beiden ländlichen Anbieter werden in Abbildung 3-4 dargestellt. Die Darstellung gibt jeweils die Auslastung der einzelnen Raster wider (Verhältnis zwischen der Datennachfrage und der verfügbaren Kapazität). Die Auslastung wird im Folgenden ebenfalls tabellarisch dargestellt und näher beschrieben.

Abbildung 3-4: Modellergebnisse Auslastungsgrade einzelner Netzbetreiber pro Rasterzelle (Szenario 1 und Szenario 2)



Quelle: WIK.

Hinweis: Für die Darstellung wurden die Rasterzellen gemäß der Auslastung des jeweiligen MNBs sortiert. Daher spiegeln die horizontale Achse nur die Anzahl, nicht jedoch die individuelle Zelle wider.

Tabelle 3-2, basierend auf Abbildung 3-4, zeigt, dass bei gleichen Marktanteilen der Mobilfunknetzbetreiber 76,5 % der Raster unter 30 % ausgelastet sind. Die 76,5 % Unterauslastung setzen sich aus 1,3 % der Raster Dense Urban, 0,4 % der Raster Urban, 15,9 % der Raster Suburban und 58,9 % der Raster Rural zusammen. Der Großteil der unterausgelasteten Raster liegt daher in ländlichen Regionen. Bezogen auf die Auslastung je Rasterkategorie ergeben sich die in der zweiten Spalte aufgeführten Werte. So sind 93,8 % der Dense-Urban-Raster nur zu 30 % ausgelastet. Das bedeutet, dass in 93,8 % der Dense-Urban-Raster nicht einmal 30 % der angenommene Kapazität von 1.489,7 Mbit/s erreicht werden. Sehr viel weniger Unterauslastung findet sich hingegen bei den urbanen Rastern. Hier sind gerade einmal 9,6 % der Raster zu weniger als 30 % ausgelastet. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in diesen Rastern eine relativ hohe

Mobilfunknachfrage herrscht, aber noch nicht die entsprechenden Kapazitäten ausgebaut sind (in diesen Rastern wird angenommen, dass 3,6-GHz-Träger noch nicht ausgebaut wurden, die Kapazität beträgt dort entsprechend 85,9 %). In den suburbanen und ruralen Rastern hingegen herrscht wieder ein relativ hoher Anteil an Unterauslastung (70,4 % in suburbanen und 82,3 % in ruralen Rastern unter 30 % Auslastung).

Die entsprechenden Werte der Unterauslastung der Netze bezogen auf die Einwohner sind in Spalte 4 dargestellt. Demnach sind die Netze, bezogen auf 43,6 % der Nutzer, nur zu 30 % ausgelastet. Die Analyse, bezogen auf die Anzahl der Einwohner, d. h. indirekt auf die Anzahl der betroffenen Nutzer, zeichnet somit ein etwas anderes Bild und ist bei der Übertragung auf die Anzahl der Mobilfunkzellen (nicht Rasterzellen) ein besserer Referenzwert als die Fläche (1-mal-1-Kilometer-Raster).

Betrachtet man die Vergleichswerte in Szenario 2, so fällt auf, dass in diesem Fall der städtische Mobilfunknetzbetreiber insbesondere im ländlichen Raum (rural und suburban) einen höheren Anteil an nicht ausgelasteten Gittern (insgesamt 88,1 %) aufweist. Dies ist auf den dort angenommenen geringeren Marktanteil zurückzuführen. Dagegen verbessert sich die Auslastungssituation bei den beiden anderen Mobilfunknetzbetreibern insgesamt (73,3 %).

Tabelle 3-2: Rasterauslastung weniger als 30 %

Rasterauslastung	Fläche	Fläche	Einwohner
Weniger als 30 % Auslastung	Bezug: Alle Raster	Bezug: je Rasterkategorie	Bezug: Alle Raster
Szenario 1: Gleiche Marktanteile			
Unterauslastung insgesamt	76,5 %		43,6 %
Dense urban	1,3 %	93,8 %	25,2 %
Urban	0,4 %	9,6 %	0,9 %
Suburban	15,9 %	70,4 %	16,6 %
Rural	58,9 %	82,3 %	0,8 %
Szenario 2: Städtischer MNB			
Unterauslastung insgesamt	88,1%		58,2%
Dense urban	1,2%	86,8%	22,0%
Urban	0,0%	0,7%	0,1%
Suburban	21,1%	93,8%	34,3%
Rural	65,7%	91,8%	1,9%
Szenario 2: Ländlicher MNB			
Unterauslastung insgesamt	73,3%		42,7%
Dense urban	1,4%	97,0%	27,1%
Urban	0,9 %	20,4 %	2,3 %
Suburban	14,2 %	62,9 %	12,7 %
Rural	56,9 %	79,4 %	0,6 %

Quelle: WIK

In einer Sensitivitätsrechnung wurde ermittelt, wie sich die Auslastung von weniger als 30 % darstellt, wenn nur ein Mobilfunknetzbetreiber (100 % Marktanteil) die Mobilfunkversorgung vornimmt (siehe Tabelle 3-3). In diesem Fall werden erwartungsgemäß die eingesetzten Frequenzen, welche unverändert zur Ausgangsrechnung sind, in den jeweiligen Rasterklassen besser ausgelastet.

Insgesamt sinkt der Wert von 76,5 % auf 53,0 %. In diesem Fall würde nur in Bezug auf 7,7 % der Einwohner eine Unterauslastung von unter 30 % vorliegen.

Tabelle 3-3: Rasterauslastung weniger als 30 % – Sensitivitätsrechnung: Es gibt nur einen Mobilfunknetzbetreiber bei gleichbleibender Kapazität

Rasterauslastung	Fläche	Fläche	Einwohner
Weniger als 30 % Auslastung	Bezug: Alle Raster	Bezug: je Rasterkategorie	Bezug: Alle Raster
Vorheriger Analyse: 3 MNB mit gleichen Marktanteilen			
Unterauslastung insgesamt	76,5%		43,6%
Dense urban	1,3%	93,8%	25,2%
Urban	0,4%	9,6%	0,9%
Suburban	15,9%	70,4%	16,6%
Rural	58,9%	82,3%	0,8%
1 MNB mit 100 % Marktanteil			
Unterauslastung insgesamt	53,0%		7,7%
Dense urban	0,3%	19,7%	3,9%
Urban	0,0%	0,0%	0,0%
Suburban	6,8%	30,1%	3,8%
Rural	45,9%	64,2%	0,1%

Quelle: WIK.

3.3.3 Ergebnisse der Rasterauslastung von mehr als 50 % für Szenario 1 und Szenario 2

Ein qualitativ ähnliches Bild ergibt sich, wenn man als Bezugsgröße eine Auslastung von 50 % der vorhandenen Kapazität heranzieht und dazu die Anzahl bzw. den Anteil der nicht ausgelasteten Raster an den verschiedenen Bezugsgrößen betrachtet (siehe Tabelle 3-4). Insgesamt wären in Szenario 1 13,7 % aller Raster zu mehr als 50 % ausgelastet. In Szenario 2 wären es beim städtischen Anbieter nur 9,4 %. Bei den eher ländlich orientierten Mobilfunkbetreibern sind es mit 17,4 % deutlich mehr ausgelastet Raster.

Tabelle 3-4: Rasterauslastung mehr als 50 %

Rasterauslastung	Fläche	Fläche	EW
Mehr als 50% Auslastung	Bezug: Alle Raster	Bezug: je Rasterkategorie	Bezug: Alle Raster
Szenario 1: Gleiche Marktanteile			
Auslastung insgesamt	13,7%		41,0%
Dense urban	0,0%	1,3%	0,5%
Urban	3,2%	70,8%	22,8%
Suburban	3,1%	13,9%	17,1%
Rural	7,4%	10,4%	0,6%
Szenario 2: Städtischer MNB			
Auslastung insgesamt	9,4%		31,0%
Dense urban	0,1%	5,9%	3,6%
Urban	3,9%	86,4%	25,3%
Suburban	0,6%	2,6%	1,8%
Rural	4,9%	6,8%	0,3%
Szenario 2: Ländlicher MNB			
Auslastung insgesamt	17,4%		42,9%
Dense urban	0,0%	1,0%	0,4%
Urban	2,4%	53,4%	19,5%
Suburban	4,9%	21,8%	21,9%
Rural	10,1%	14,1%	1,1%

Quelle: WIK:

Auch hier erhöht sich die Auslastung mit mehr als 50 % natürlich deutlich, wenn nur ein Anbieter am Markt ist (siehe Tabelle 3-5).

Tabelle 3-5: Rasterauslastung mehr als 50 % – Sensitivitätsrechnung: Es gibt nur einen Mobilfunknetzbetreiber dessen eingesetztes Frequenzportfolio unverändert ist

Rasterauslastung	Fläche	Fläche	EW
Mehr als 50 % Auslastung	Bezug: Alle Raster	Bezug: je Rasterkategorie	Bezug: Alle Raster
Vorheriger Analyse: 3 MNB mit gleichen Marktanteilen			
Auslastung insgesamt	13,7%		41,0%
Dense urban	0,0%	1,3%	0,5%
Urban	3,2%	70,8%	22,8%
Suburban	3,1%	13,9%	17,1%
Rural	7,4%	10,4%	0,6%
1 MNB mit 100 % Marktanteil			
Auslastung insgesamt	34,3%		72,6%
Dense urban	0,3%	24%	10,7%
Urban	4,5%	100%	26,7%
Suburban	10,9%	48%	33,3%
Rural	18,6%	26%	2,0%

Quelle: WIK.

3.3.4 Mehr Leerkapazität durch symmetrische Frequenznutzung bei asymmetrischen Marktanteilen?

In diesem Abschnitt wird die Frage behandelt, ob bei einer symmetrischen Frequenznutzung eine asymmetrische Verteilung der Marktanteile (Szenario 2) im Vergleich zu einer symmetrischen Verteilung der Marktanteile (Szenario 1) einen Einfluss auf die Anzahl der Rasterzellen mit Leerkapazitäten hat.

Im Szenario 2 der asymmetrischen Verteilung der Marktanteile (städtisch und ländlich orientierte Mobilfunknetzbetreiber) gibt es mehr Rasterzellen, die nicht ausgelastet sind. Die Unterschiede sind jedoch sehr gering. Der Grund liegt darin, dass die Rasterzellen im ländlichen Raum ohnehin eine sehr geringe Auslastung aufweisen und die städtischen Rasterzellen (in Ballungsräumen) eher an die Kapazitätsgrenze stoßen.

Quantitativ sind die Auswirkungen einer asymmetrischen Verteilung der Marktanteile in Szenario 2 im Vergleich zu einer symmetrischen Verteilung der Marktanteile in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 3-6: Implikationen von asymmetrischen Marktanteilen auf unversorgte Raster

	Anzahl der Rasterzellen mit weniger als 30 % Auslastung (Gesamtzahl x 3)	Anzahl der Rasterzellen mit weniger als 30 % Auslastung pro MNB
Gleichverteilung (3x)	49.506	16.502 (76,5 %)
Städtischer (1x) und ländliche (2x) Anbieter	50.638	Städtischer Anbieter: 19.000 (88,1 %) Ländlicher Anbieter: 15.819 (73,3 %)
Differenz	-1.132	

Quelle: WIK.

3.3.5 Schlussfolgerungen aus den Modellberechnungen

Die Berechnungen können wie folgt interpretiert werden:

- Die derzeit bestehenden symmetrischen Versorgungsaufgaben wirken sich bei asymmetrischen Marktanteilen im Vergleich zu einer Gleichverteilung von Marktanteilen nicht wesentlich negativ auf die ökologische Nachhaltigkeit (gemessen an der Auslastung der bereitgestellten Kapazität) aus.⁵⁹
- Die im Markt immer wieder geäußerte These, dass ländliche Regionen bei der Kapazitätsauslastung bzw. bei der Verfügbarkeit von Übertragungskapazitäten pro Nutzer schlechter abschneiden als städtische Regionen, trifft nach beiden Szenario-Rechnungen nicht in vollem Umfang zu. Sofern eine Mobilfunkversorgung gegeben ist, sind in ländlichen Regionen Übertragungskapazitäten vorhanden, die die Nachfrage deutlich überschreiten.
- Weitergehende symmetrische Versorgungsaufgaben oder das Ziel, flächendeckend 5G im 3,6-GHz-Band auszurollen, womit eine weitere Erhöhung von Übertragungskapazitäten insbesondere in ländlichen Regionen verbunden ist, sind aus Sicht der ökologischen Nachhaltigkeit als kritisch anzusehen. Es werden Übertragungskapazitäten geschaffen, denen keine oder eine sehr geringe Nachfrage gegenübersteht.

⁵⁹ In diesem Zusammenhang ist auch zu berücksichtigen, dass der bereits erfolgte Ausbau der unternehmenseigenen Mobilfunkinfrastruktur mit der tatsächlichen Frequenznutzung durch installierte Funkanlagen den Status quo darstellt. Unabhängig von der Möglichkeit wäre ein Rückbau der bestehenden Infrastruktur unter dem Gesichtspunkt der ökologischen Nachhaltigkeit fragwürdig.

4 Fazit und Ausblick

Nachhaltigkeit und Resilienz sind mit Blick auf Funknetzinfrastrukturen zunehmend bedeutsam. Diese stehen jedoch in einem potentiellen Zielkonflikt mit den klassischen Zielen der Frequenzregulierung, wie der Schaffung wettbewerblicher Marktstrukturen und einer effizienten Frequenznutzung. Ob damit auch die Komplexität der Frequenzregulierung zunimmt, hängt wesentlich von der Gewichtung der einzelnen Ziele (z. B. Förderung des Infrastrukturwettbewerbs, Verbesserung der Nachhaltigkeit, Stärkung der Resilienz) ab.

Die Ausgestaltung der Versorgungsaufgaben für Mobilfunknetzbetreiber bei der Frequenzvergabe haben Auswirkungen auf die ökologische Nachhaltigkeit. Hier zeigt sich, dass es bei der Umsetzung von Infrastrukturwettbewerb und Nachhaltigkeit zu Zielkonflikten kommen kann und wird. Während aus Sicht der Endkunden, des Wettbewerbs, der Innovation und der Resilienz mehrere flächendeckende Netzinfrastrukturen positiv zu bewerten sind, zeigen die bestehenden Überkapazitäten insbesondere in ländlichen Regionen bei den Mobilfunknetzen, dass mehrere parallele Netzinfrastrukturen, deren Aufbau mit einem hohen Ressourcenverbrauch einhergeht, nur zu einem geringen Teil ausgelastet sind. Es stellt sich daher die Frage, ob parallele Infrastrukturen in dünn besiedelten Gebieten, die aus dem Blickwinkel der Nachhaltigkeit problematisch erscheinen, aus wettbewerbspolitischer Sicht wirklich notwendig sind. Bei der anstehenden Zuteilung von Frequenznutzungsrechten für den drahtlosen Netzzugang stellt sich demnach die Frage, ob es aus regulierungsökonomischer Sicht unter Berücksichtigung des Nachhaltigkeitsaspektes geboten ist, die bereits weitgehenden symmetrischen Versorgungsverpflichtungen in dünn besiedelten ländlichen Gebieten auszuweiten bzw. zu verschärfen.

Die vorliegende Studie stellt einen ersten Aufschlag zur detaillierten Analyse des Zusammenhangs zwischen Aspekten der Frequenzregulierung und der ökologischen Nachhaltigkeit dar. Der Modellansatz ist offen gestaltet und kann flexibel an weitere Fragestellungen in diesem Kontext angepasst werden (z. B. durch Nutzung einer verbesserten Datenlage, Auswirkungen der Nichtbereitstellung von Frequenzen, Ausdehnung auf ganz Deutschland, etc.). Ebenso bleibt zu prüfen, welche Formen des (aktiven) Infrastruktursharings überhaupt mit ökologischen Vorteilen verbunden sind.

5 Anhang

Tabelle 5-1: Herleitung der durchschnittlichen Kapazität je 1-mal-1-Kilometer-Raster pro Mobilfunknetzbetreiber

Mobilfunkzelle	Bänder		Kapazität		Reichweite	
Rural						
					2	km Reichweite
	700	MHz	15	Mbit/s		
	800	MHz	15	Mbit/s		
insgesamt			30	Mbit/s	12,6	km ² Fläche je Mobilfunkzelle
			3	Sektoren	4,2	km ² Fläche je Sektor
durchschnittliche Kapazität je km²			7,2	Mbit/s	1	km²
Suburban und urban						
					1	km Reichweite
	+ Rural		30	Mbit/s		
	1800	MHz	30	Mbit/s		
	2100	MHz	30	Mbit/s		
insgesamt			90	Mbit/s	3,1	km ² Fläche je Mobilfunkzelle
			3	Sektoren	1,1	km ² Fläche je Sektor
durchschnittliche Kapazität je km²			85,9	Mbit/s	1	km²
Dense urban						
					0,5	km Reichweite
	+ Suburban und Urban		90	Mbit/s		
	3,6	GHz	300	Mbit/s		
insgesamt			390	Mbit/s	0,8	km ² Fläche je Mobilfunkzelle
			3	Sektoren	0,3	km ² Fläche je Sektor
durchschnittliche Kapazität je km²			1.489,7	Mbit/s	1	km²

Quelle: WIK

Hinweis: Werte zur Darstellung gerundet. Es wird immer mit den ungerundeten Werten gerechnet.

In den ruralen 1-mal-1-Kilometer-Rastern wird eine durchschnittliche Kapazität von 7,2 Mbit/s pro Mobilfunknetzbetreiber über die gesamte 1-km²-Fläche angenommen. Es wird angenommen, dass diese Raster von einer Mobilfunkzelle mit Frequenzen von 700 MHz und 800 MHz abgedeckt werden, die jeweils für einen der drei Sektoren eine Kapazität von 15 Mbit/s bereitstellen. Dies entspricht insgesamt 90 Mbit/s für die gesamte Mobilfunkzelle oder 30 Mbit/s für einen Sektor. Weiterhin wird angenommen, dass die entsprechende Mobilfunkzelle eine Gesamtfläche von ca. 12,6 km² hat, da die Mobilfunkzelle als kreisförmig mit einem Radius von 2 km angenommen wird. Ein Sektor umfasst dann ein Drittel der Fläche, also ca. 4,2 km². Bei einer Kapazität von 30 Mbit/s

pro Sektor und einer Sektorfläche von ca. 4,2 km² beträgt die durchschnittliche Kapazität pro 1-mal-1-Kilometer-Raster ca. 7,2 Mbit/s (pro km²) (entspricht 30 Mbit/s ÷ 4,2 km²).⁶⁰

Die Kapazität der suburbanen und urbanen Raster sowie der Dense-urban-Raster wird analog berechnet. Für die suburbanen und urbanen Raster wird angenommen, dass sie über die gleiche Ausstattung verfügen. Darüber hinaus wird angenommen, dass die Ausstattung der ruralen Raster (30 Mbit/s Kapazität) auch dort zum Einsatz kommt. Bei den Dense-urban-Rastern wird davon ausgegangen, dass dort auch die Ausstattung der ruralen, also auch der suburbanen und urbanen Raster zum Tragen kommt (90 Mbit/s Kapazität).

⁶⁰ Werte zur Darstellung gerundet. Es wird immer mit den ungerundeten Werten gerechnet.

Literaturverzeichnis

- Belkhir, L., Elmeligi, A. (2018): Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations, in: Journal of Cleaner Production, Volume 177, S. 448-463.
- BEREC (2022): BEREC Report on Sustainability: Assessing BEREC's contribution to limiting the impact of the digital sector on the environment, BEREC BoR (22) 93.
- Bundesnetzagentur (2018): Entscheidung der Präsidentenkammer der Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen vom 26. November 2018 über die Festlegungen und Regeln im Einzelnen (Vergaberegeln) und über die Festlegungen und Regelungen für die Durchführung des Verfahrens (Auktionsregeln) zur Vergabe von Frequenzen in den Bereichen 2 GHz und 3,6 GHz - Aktenzeichen: BK1-17/001 -.
- Bundesnetzagentur (2023): Resilienz der Telekommunikationsnetze, Strategiepapier, Stand: August 2022.
- Bundesnetzagentur (2023): Bedarfsaktualisierung und Rahmenbedingungen einer Übergangsentcheidung für die Bereitstellung von Frequenzen in den Bereichen 800 MHz, 1.800 MHz und 2.600 MHz für den Ausbau digitaler Infrastrukturen, Konsultationspapier.
- Bundeskartellamt (2010): Hinweise zur wettbewerbsrechtlichen Bewertung von Kooperationen beim Glasfaserausbau in Deutschland, 19. Januar 2010, Bundeskartellamt: Bonn.
- Freitag et al. (2022): The real climate and transformative impact of ICT: A critique of estimates, trends, and regulations, in: Patterns (Bd. 2, Nummer 9), Cell Press.
- Godlovitch et al. (2021): Environmental impact of electronic communications, Study for BEREC.
- Grünwald, R. Caviezel, C. (2022): Energieverbrauch der IKT-Infrastruktur, Endbericht zum TA-Projekt, Arbeitsbericht Nr. 198.
- RADIO SPECTRUM POLICY GROUP (2021): RSPG Report on the role of radio spectrum policy to help combat climate change, RSPG21-026 FINAL.
- RADIO SPECTRUM POLICY GROUP (2021): Draft RSPG Opinion on the role of radio spectrum policy to help combat climate change, RSPG21-027 FINAL.
- RICHTLINIE (EU) 2018/1972 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 11. Dezember 2018 über den europäischen Kodex für die elektronische Kommunikation (Neufassung Sörries et al. (2023)).
- Sörries et al. (2023): Metastudie zum nachhaltigen Ausbau von Gigabitnetzen, Studie für das Bundesministerium für Digitales und Verkehr.
- Stobbe et al. (2023): Umweltbezogene Technikfolgenabschätzung Mobilfunk in Deutschland, Abschlussbericht, TEXTE 26/2023. Hrsg: Umweltbundesamt.
- Stumpf et al. (2005): Der Einfluss der Frequenzausstattung auf die Wettbewerbsbedingungen im deutschen Mobilfunkmarkt. Studie für E-Plus Mobilfunk.
- WIK-Consult (2005): Flexibilisierung der Frequenzregulierung, Studie für die Bundesnetzagentur.

ISSN 1865-8997