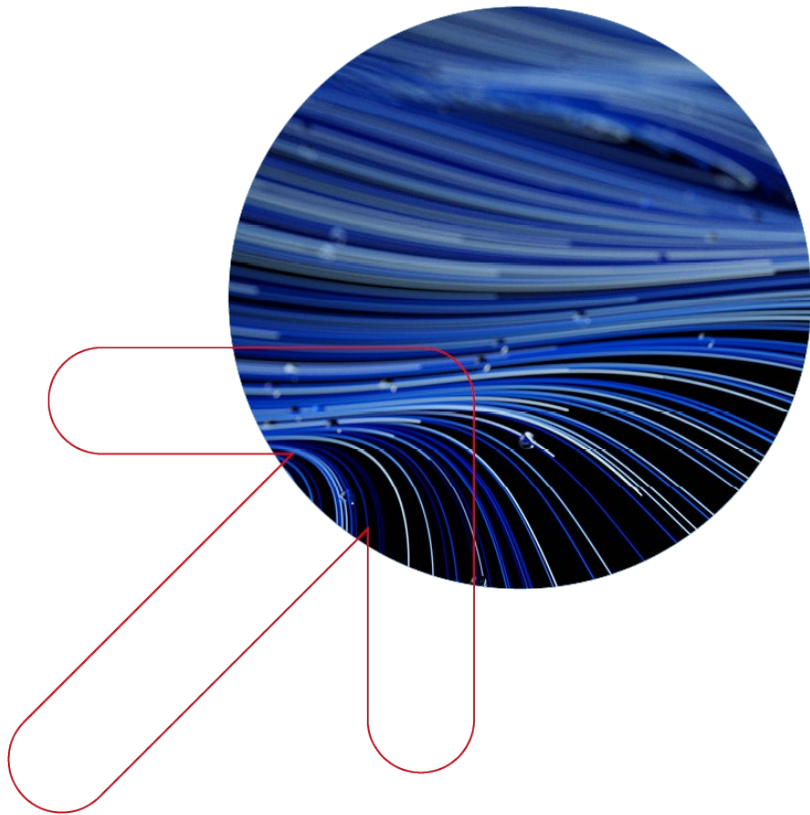




Nutzererfahrungen zu Mobilfunk in abgeschlossenen Umgebungen: Analyse der Indoor- bzw. InCar-/InTrain-Versorgungsauflagen

Autoren:

Matthias Wissner

Lars Niedick

Bernd Sörries

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 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

Abbildungen	III
Tabellen	III
Zusammenfassung	IV
1 Einleitung	1
2 Ziel der Studie und wesentliche Fragestellungen	2
3 Nachfrage nach Mobilfunkleistungen und Ansätze zur Bestimmung der Indoor-Mobilfunkqualität	3
3.1 Nachfrage nach Mobilfunkleistungen	3
3.2 Ansätze zur Bestimmung der Indoor-Mobilfunkqualität	5
3.3 Ansätze zur Bestimmung der Mobilfunkqualität InCar und InTrain	9
4 Internationale Erfahrungen	12
4.1 Österreich	12
4.1.1 Ausgangssituation	12
4.1.2 Gründe für Versorgungsauflagen in geschlossenen Räumen	12
4.1.3 Technische Herleitung der Versorgungsauflage	13
4.1.4 Implementierung der Versorgungsauflage	13
4.1.5 Operationelle Überprüfung sowie Herausforderungen und Probleme	14
4.1.6 Auswirkungen der Indoor-Versorgungsauflage	17
4.1.7 Versorgungsauflagen für Verkehrswege	18
4.2 Großbritannien	19
4.2.1 Ausgangssituation	19
4.2.2 Gründe für Versorgungsauflagen in geschlossenen Räumen	19
4.2.3 Technische Herleitung der Versorgungsauflage	20
4.2.4 Implementierung der Versorgungsauflage	22
4.2.5 Operationelle Überprüfung sowie Herausforderungen und Probleme	22
4.2.6 Auswirkungen der Indoor-Versorgungsauflage	24
4.2.7 Versorgungsauflagen für Verkehrswege	26
4.3 Rumänien	26
4.3.1 Ausgangssituation	26

4.3.2	Gründe für Versorgungsauflagen in geschlossenen Räumen	27
4.3.3	Technische Herleitung der Versorgungsauflage	27
4.3.4	Implementierung der Versorgungsauflage	28
4.3.5	Operationelle Überprüfung sowie Herausforderungen und Probleme	30
4.3.6	Auswirkungen der Indoor-Versorgungsauflage	32
4.3.7	Versorgungsauflagen für Verkehrswege	32
4.4	Frankreich	33
4.4.1	Ausgangssituation	33
4.4.2	Maßnahmen zur verbesserten Indoor-Versorgung	33
4.4.3	Messungen und Transparenz über die Mobilfunkversorgung	34
4.4.4	Versorgungsauflagen für Verkehrswege und Bahnstrecken	35
4.4.5	Auswirkungen der Maßnahmen des New Deal Mobile	37
4.5	Länderüberblick	38
5	Fazit und Ausblick	39
	Literatur	42

Abbildungen

Abbildung 3-1:	Probleme mit dem Mobilfunk in Deutschland	5
Abbildung 3-2:	Empfangsqualität für verschiedene Fahrzeugtypen	10
Abbildung 4-1:	Beispiel für versorgte und nicht versorgte Zellen	16
Abbildung 4-2:	Indoor-Versorgungsprognose durch den Mobile Coverage Checker	25

Tabellen

Tabelle 3-1:	Bandbreitenbedarf je mobiler Anwendung	4
Tabelle 4-1:	Notwendige Mindestbandbreiten indoor im 800-MHz-Band	14
Tabelle 4-2:	Stichtage zur Erfüllung der Indoor-Versorgungsaufgabe	15
Tabelle 4-3:	Grenzwerte für das Signal-Störungs-Rausch-Verhältnis (SINR)	23
Tabelle 4-4:	Parameter zur SINR-Berechnung für HSDPA und LTE	24
Tabelle 4-5:	Versorgungsaufgabe zur Straßenabdeckung je Mobilfunknetzbetreiber	26
Tabelle 4-6:	Versorgungsaufgaben mit Indoor-Bezug in Rumänien	29
Tabelle 4-7:	Messungen der Mobilfunkversorgung in Rumänien	30
Tabelle 4-8:	Erkenntnisse aus dem Ländervergleich für Indoor-/InCar-/InTrain-Versorgungsaufgaben	38
Tabelle 5-1:	Vor- und Nachteile von Indoor-Versorgungsaufgaben	39

Zusammenfassung

Mit fortschreitender Digitalisierung findet ein erheblicher Teil der drahtlosen Sprachkommunikation und Datennutzung nicht mehr im Außenraum, sondern in Innenbereichen wie Gebäuden und Fahrzeugen (z. B. Zügen, Kfz) statt. Eine Neuausrichtung der regulatorischen Vorgaben hin zu einer verbesserten Indoor-Versorgung erscheint daher sowohl aus nutzerorientierter als gesellschaftlicher Perspektive diskutabel. Eine solche Diskussion hat in einigen europäischen Ländern, in denen zumeist Versorgungsdefizite festgestellt wurden, bereits stattgefunden. In der Folge wurden teilweise Indoor-Auflagen eingeführt. Die Analyse von vier europäischen Ländern (Österreich, Großbritannien, Rumänien und Frankreich) in diesem Diskussionsbeitrag zeigt Unterschiede und Gemeinsamkeiten, aber auch Schwierigkeiten bei der Implementierung und Überwachung von Indoor-Auflagen auf. So haben Österreich und Großbritannien nur einmalig auf Indoor-Auflagen zurückgegriffen. Die Motivation war in beiden Fällen in erster Linie die Versorgung bestimmter Gebiete mit unzureichender Breitbandversorgung, um eine umfassende Teilhabe der Bürger an der digitalen Transformation zu ermöglichen. In Rumänien werden Indoor-Auflagen seit 2012 als Mittel in Frequenzauktionen genutzt, um bestimmte Regionen besser zu versorgen oder die Qualität in Verkehrsmitteln zu verbessern. Frankreich schreibt dagegen bestimmte Maßnahmen in Innenräumen vor, die teilweise auf Kundenwunsch durchgeführt werden müssen.

Eine wesentliche Herausforderung bei der Festlegung von Indoor-Auflagen ist die Anwendung von Dämpfungsfaktoren für Gebäude oder Transportmittel. Der Ländervergleich zeigt, dass diese technischen Parameter im Vorfeld von den Regulierungsbehörden in Abstimmung mit den Netzbetreibern festgelegt werden. Zudem sind die technischen Qualitätsparameter zu definieren, die mit unterschiedlichen Prüfmethoden und Nutzungssituationen validiert werden müssen. Sofern Regulierungsbehörden Indoor-Auflagen machen, sind zur Operationalisierung derselben belastbare, standardisierte Mess- und Prüfverfahren notwendig, um die Mobilfunkversorgung innerhalb von Gebäuden objektiv zu erfassen und damit vergleichbar zu machen.

Indoor-Versorgungsaufgaben stehen in einem Spannungsverhältnis von (unterschiedlichen) Nutzerperspektiven und der Möglichkeit, die Umsetzung der Auflagen transparent zu überprüfen. Zudem können Vorgaben zur Indoor-Versorgung, die mit Zugangsansprüchen einhergehen, die Qualität der Mobilfunkversorgung verbessern, ohne dass dabei ex-ante explizite Versorgungsvorgaben in den Frequenzuteilungen notwendig waren. Ebenfalls zeigt die Analyse, dass einzelne Regulierungsbehörden anstreben, verstärkt Informationen für Endkunden über die Indoor-Versorgung bereitzustellen. Abschließend ist noch zu erwähnen, dass öffentlich verfügbaren Informationen über die Indoor-Versorgung auch einen Beitrag zum Infrastrukturwettbewerb leisten können.

Summary

With ongoing digitalization, a substantial share of mobile communication and data usage no longer takes place outdoors but in indoor environments such as buildings and vehicles (e.g., trains, motor vehicles). A reorientation of regulatory requirements toward indoor coverage therefore appears debatable from user-oriented and societal perspectives alike. Such a discussion has already taken place in several European countries, where coverage gaps were mostly identified. As a result, some countries introduced indoor coverage obligations. The analysis of four European countries (Austria, the United Kingdom, Romania, and France) in this discussion paper highlights differences and commonalities, as well as challenges in implementing and monitoring indoor obligations. Austria and the United Kingdom have resorted to indoor obligations only once; in both cases, the primary motivation was to provide certain areas with inadequate broadband coverage to enable citizens to fully participate in the digital transformation. In Romania, indoor obligations have been used since 2012 as a tool in spectrum auctions to improve coverage in specific regions or enhance quality in means of transport. France, by contrast, prescribes certain measures for indoor environments, some of which must be carried out upon customer request.

A key challenge in countries with indoor obligations is the application of attenuation factors for buildings or means of transport. The cross-country comparison shows that these technical parameters are determined in advance by the regulatory authorities in coordination with the network operators. In addition, the technical quality parameters must be defined and validated through various testing methods and usage scenarios. Whenever regulatory authorities impose indoor coverage obligations, robust and standardized measurement and verification procedures are required to operationalize them, enabling an objective and comparable assessment of mobile network coverage inside buildings.

Indoor coverage obligations exist in a tension between (differing) user perspectives and the need to ensure transparent verification of compliance. Moreover, indoor coverage requirements linked to access obligations can enhance the quality of mobile network coverage without the need for explicit ex-ante coverage targets in spectrum assignments. The analysis also shows that some regulatory authorities aim to provide more information to end users about indoor coverage. Finally, publicly available information on indoor coverage can also contribute to infrastructure-based competition.

1 Einleitung

Die Vergaben von Frequenznutzungsrechten für den drahtlosen Internetzugang werden von den zuständigen Regulierungsbehörden sehr häufig genutzt, um über Versorgungsaufgaben die Mobilfunkqualität in den jeweiligen Ländern zu verbessern. Die Versorgungsaufgaben definieren dabei in der Regel bestimmte Übertragungsgeschwindigkeiten (z.B. im Antennensektor) im Downlink, die über Outdoor-Messungen seitens der Regulierungsbehörden überprüft werden. Diese regulatorische Praxis weicht insoweit von den Nutzungssituationen der Nutzer ab, als dass Mobilfunkdienste ganz überwiegend innerhalb von Gebäuden, in Zügen oder anderen Verkehrsmitteln genutzt werden. Somit kann es vorkommen, dass sich durch neue Versorgungsaufgaben die Übertragungskapazität in einem Antennensektor erhöht, ohne dabei maßgeblich die Nutzererfahrung in Gebäuden oder Verkehrsmitteln zu verändern.¹ Gerade wenn Nutzer mit der angebotenen Mobilfunkqualität (Indoor) unzufrieden sind, erhält die Diskussion über die Neuausrichtung von Versorgungsaufgaben, die auf konkrete Nutzungssituationen abstellen, neue Impulse. So wird beispielsweise in Deutschland diskutiert, die entsprechenden Versorgungsaufgaben ggf. neu auszurichten.²

Eine solche Diskussion findet sich in unterschiedlicher Ausprägung auch in anderen europäischen Ländern. In der Regel bieten Frequenzvergabeverfahren die Option, nutzerorientierte Vorgaben zu machen. Es besteht aber auch die Möglichkeit, entsprechende Vorgaben bei Fusionskontrollverfahren zu diskutieren und festzulegen.³

Vor dem Hintergrund der Nutzung drahtloser Telekommunikationsdienste stellt sich die Frage, inwiefern die gegenwärtige Fokussierung auf Outdoor-Kennzahlen adäquat ist, um die Versorgungsrealität abzubilden. Eine Berücksichtigung der Indoor-Versorgung bei der Ausgestaltung von (neuen) Versorgungsaufgaben könnte dazu beitragen, die Diskrepanz zwischen formalen Versorgungsversprechen und der erlebten Netzqualität zu verringern.

Allerdings sind mit der Integration von Indoor-Quantifizierungen in regulatorische Vorgaben auch erhebliche Herausforderungen verbunden. Zum einen erweist sich die Erfassung der Versorgungssituation innerhalb unterschiedlicher Gebäudetypen als komplex. Die bauliche Heterogenität, etwa hinsichtlich verwendeter Materialien, Fensterkonfigurationen oder Gebäudetiefen, führt zu stark variierenden Empfangsbedingungen. Eine standardisierte und zugleich praxisnahe Methodik zur Indoor-Erfassung ist bislang nicht flächendeckend etabliert. Zum anderen stellt sich die Frage nach der rechtlichen und organisatorischen Zuständigkeit: Während Mobilfunknetzbetreiber primär für die

¹ Diese Nutzungssituation ist nicht ungewöhnlich und gilt z. B. auch für den Empfang des Rundfunksignals über DVB-T2 (vgl. Goldmedia (2021), S. 9.

² BNetzA (2022), S. 20.

³ So z. B. beim Zusammenschluss von Vodafone und CK Hutchison in Großbritannien, die als Auflage eine Verbesserung ihres Netzwerkes enthält, vgl. https://assets.publishing.service.gov.uk/media/683d54cee2008d4b92c80e1f/joint_statement_from_the_CMA_and_Ofcom.pdf, zuletzt abgerufen am 22.10.2025.

Signalbereitstellung verantwortlich sind, liegt die bauliche und technische Ausstattung von Innenräumen weitgehend außerhalb ihres Einflussbereichs (z. B. Fenster in Gebäuden, Zügen, Autos etc.).

Die Erhebung von Versorgungsdaten innerhalb privater oder sensibler öffentlicher Räume bedarf besonderer rechtlicher Absicherung und organisatorischer Sensibilität. Hinzu kommen Kostenfragen, da die Umsetzung flächendeckender Indoor-Messungen mit einem erheblichen zusätzlichen Aufwand einhergehen würde – sowohl für die Mobilfunknetzbetreiber als auch für die Regulierungsbehörden.

2 Ziel der Studie und wesentliche Fragestellungen

Dieser Diskussionsbeitrag analysiert vor dem Hintergrund der Erfahrungen in Österreich, Großbritannien, Rumänien und Frankreich, welche Gesichtspunkte bei der Einführung von Indoor-Versorgungsaufgaben eine wesentliche Rolle spielen können. Dabei stehen Fragen der Motivation für die Einführung und praktische Erfahrungen im Mittelpunkt.

Einleitend wird in Abschnitt 3 zunächst auf die heutige Nachfrage nach Mobilfunkleistungen und -kapazitäten eingegangen. Zudem werden Ansätze zur Bestimmung der Mobilfunkqualität Indoor, InCar sowie InTrain diskutiert.

In Abschnitt 4, dem Hauptteil der Studie, soll beantwortet werden, wie und warum Versorgungsaufgaben im Mobilfunk, insbesondere mit Blick auf geschlossene Räume, in den ausgewählten Ländern konzipiert, umgesetzt und bewertet wurden. Dabei stehen sowohl technische als auch regulatorische Aspekte im Mittelpunkt. Von besonderem Interesse ist zunächst die grundsätzliche Zielsetzung der Einführung solcher Aufgaben: Welche Intentionen verfolgten Regulierungsbehörden mit der Festlegung von Versorgungsanforderungen für Innenräume und inwiefern unterscheiden sich diese Aufgaben in ihrer Wirkung und Ausgestaltung von klassischen Outdoor-Vorgaben? Ein weiterer zentraler Aspekt betrifft die Frage, ob die Umsetzung nur einmal erfolgte oder ob Indoor-Versorgungsaufgaben im Rahmen späterer Frequenzvergabeprozesse erneut implementiert wurden. Vor diesem Hintergrund wird auch reflektiert, wie die Einführung der Indoor-Vorgaben aus heutiger Sicht bewertet wird, sowohl hinsichtlich ihrer praktischen Umsetzung als auch in Bezug auf ihren regulatorischen Wirkungsgrad. Der Abschnitt untersucht ebenfalls die technischen und methodischen Grundlagen, auf denen die Anforderungen an die Indoor-Versorgung definiert wurden, einschließlich der zugrunde liegenden Modelle, Parameter und Annahmen. Zudem wird analysiert, inwieweit die Aufgaben in Abstimmung mit den Netzbetreibern entwickelt wurden. Schließlich wird betrachtet, wie die Umsetzung der Aufgaben überprüft wurde, welche Nachweisverfahren und Messmethoden zum Einsatz kamen und welche Rolle die Annahmen zur Gebäudedämmung dabei spielten.

Abschnitt 5 zieht ein Fazit aus den gewonnenen Erkenntnissen und zeigt mögliche Handlungsoptionen für Deutschland auf.

3 Nachfrage nach Mobilfunkleistungen und Ansätze zur Bestimmung der Indoor-Mobilfunkqualität

Bevor auf konkrete Ausgestaltungen in den einzelnen Ländern eingegangen wird, werden in diesem Abschnitt zunächst die Nachfrage nach Mobilfunkleistungen sowie konkrete Ansätze zur Messung der Indoor-Versorgungsqualität und im Speziellen in Autos und Zügen beleuchtet. Diese dient als entsprechender Rahmen für die Länderanalysen.

3.1 Nachfrage nach Mobilfunkleistungen

Die wachsende Abhängigkeit von mobilen Anwendungen und vernetzten Geräten führt zu einem stetigen Anstieg der Nutzernachfrage nach leistungsfähigem Mobilfunk, insbesondere in Innenräumen. Vor diesem Hintergrund gewinnt die Analyse der Nutzernachfrage als Grundlage für fundierte Indoor-Auflagen im Mobilfunkausbau zunehmend an Bedeutung. Allgemein wird angenommen, dass ca. 80 % des gesamten mobilen Datenverkehrs stationär erfolgt.⁴ Eine Analyse von Ericsson (2021) zeigt, dass in Städten 65 % des Datenverkehrs im Mobilfunk in Innenräumen stattfindet. In dicht besiedelten Gebieten (*Dense Urban*) sinkt dieser Anteil jedoch auf etwa 37 %, da dort ein erheblicher Teil des Datenverkehrs über WLAN-Netze (Off-Loading) abgewickelt wird.⁵

Um die Perspektive der Nutzenden besser zu beleuchten, ist die tatsächlich benötigte Bandbreite für verschiedene mobile Dienste ausschlaggebend. Diese reicht von niedrigen Bandbreiten von 0,1 Mbit/s für IP-basierte Telefonate oder 0,5 Mbit/s für Musik-Streaming bis zu 25 Mbit/s für Cloud-Gaming (vgl. Tabelle 3-1).⁶

⁴ Ericsson (2021), BEREC & RSPG (2017, S. 5).

⁵ Ericsson (2021).

⁶ RTR (2025).

Tabelle 3-1: Bandbreitenbedarf je mobiler Anwendung

Dienst (Anwendung)	Benötigte Bandbreite (Mbit/s)	Details
AR/VR-Anwendungen (5G) (Apple Vision Pro, Meta Quest)	500+	Ruckelfrei in höchster Auflösung
Video-Streaming (YouTube, Netflix)	5–25	HD bis 4K-Streaming
Cloud-Gaming (Xbox Cloud Gaming, Amazon Luna)	15–25	HR-Ready bis Full HD
Videokonferenzen/-anrufe (Zoom, Teams, WhatsApp)	2–5	Klare Ton- und Bildqualität
Anrufe/Voice-over-IP (WhatsApp)	0,1	Klare Tonqualität
Social-Media (Instagram, Facebook)	5	Schnelles Laden von Videos/Bildern
Navigation (Google Maps)	1	Dynamisches Kartenladen
Musik-Streaming (Spotify, Apple Music)	0,5	Hohe Audioqualität

Quelle: WIK angelehnt an RTR (2025) und Check24 (2025).

Um die tatsächliche Nachfrage nach datenintensiven Anwendungen wie Video-Streaming, Social Media und Musik-Streaming zu verdeutlichen, liefert die ARD/ZDF-Medienstudie 2024 detaillierte Einblicke in das Mediennutzungsverhalten der Bevölkerung. Im Jahr 2024 betrug die durchschnittliche tägliche Bewegtbildnutzungsdauer 194 Minuten. Davon entfielen 17 % auf Videos bzw. Livestreams bei Streamingdiensten (z. B. Netflix) und 7 % auf Videos und Stories in Social Media. Besonders ausgeprägt ist der Trend zur Nutzung datenintensiver Dienste bei den 14- bis 29-Jährigen. In dieser Altersgruppe entfielen bereits 30% der Bewegtbildnutzungsdauer auf Streamingdienste und 18% auf Social Media und YouTube. Damit verschiebt sich der Schwerpunkt der Videonutzung zugunsten mobiler und internetbasierter Angebote. Auch die Audionutzung über Datendienste steigt kontinuierlich. 41 % der Bevölkerung nutzten mindestens einmal pro Woche Musik-Streamingdienste, 27 % hörten Musik über YouTube und 21 % griffen auf Podcasts zu. Die Tagesreichweite für Musik-Streaming lag bei 21 %, für Podcasts bei 9 %. Insgesamt nutzten 94 % der Bevölkerung mindestens einmal pro Woche Audioangebote, wobei die Nutzung von Online-Audioangeboten vor allem bei den Jüngeren besonders hoch war.⁷

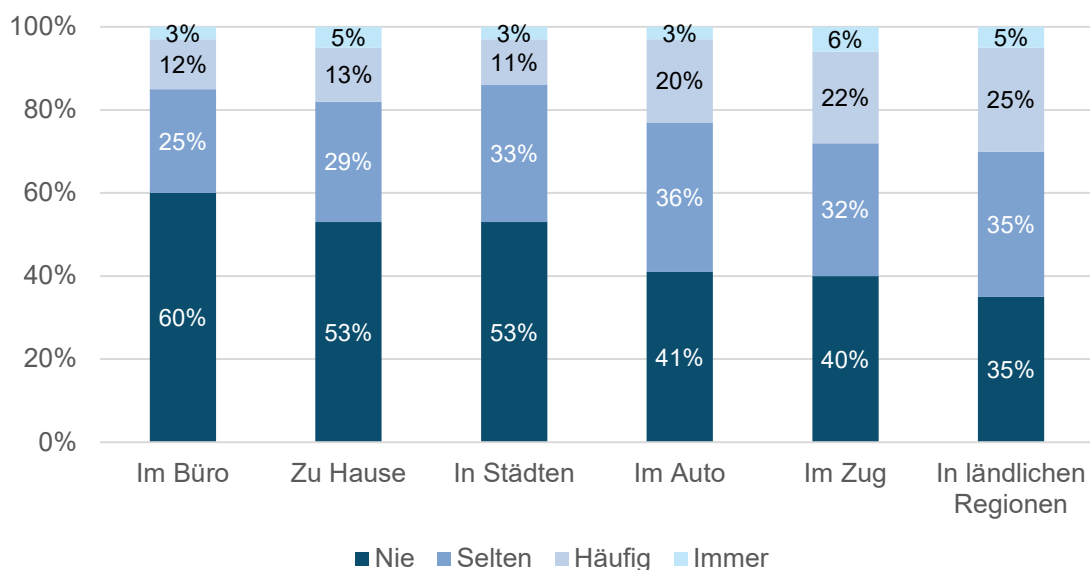
Die ARD/ZDF-Medienstudie 2024 bestätigt damit den anhaltenden Trend hin zu datenintensiven Anwendungen, die maßgeblich für den steigenden Bandbreitenbedarf in

⁷ ARD/ZDF-Forschungskommission (2024).

Innenräumen verantwortlich sind, insbesondere bei den unter 30-Jährigen.⁸ Die intensive Nutzung von Video-Streaming und sozialen Medien, vor allem durch jüngere Nutzende, erhöht die Nachfrage nach mobilen Datenkapazitäten. Besonders wichtig ist die mobile Datennutzung in Situationen ohne WLAN-Zugang, etwa in öffentlichen Verkehrsmitteln.

Vor allem Autos und Züge sind Bereiche, in denen die Mobilfunkqualität von den Nutzenden in Deutschland am seltensten als völlig fehlerfrei empfunden wird (vgl. Abbildung 3-1).

Abbildung 3-1: Probleme mit dem Mobilfunk in Deutschland



Quelle: Deloitte (2025).

18 % der Befragten berichten bei der Nutzung von Mobilfunk zu Hause über häufige oder dauerhafte Probleme. Im Auto sind es 23 % der Befragten und in der Bahn sogar 28 %.⁹

3.2 Ansätze zur Bestimmung der Indoor-Mobilfunkqualität

Mobilfunknetze sind für die Abdeckung von Innenräumen auf Basisstationen im Freien (Makrozellen) angewiesen. Das bedeutet, dass sich die Funksignale in Gebäuden ausbreiten müssen, die unterschiedliche bauliche Merkmale aufweisen können, z. B. unterschiedliche Baumaterialien und Isolierungen. Um die Abdeckung in Innenräumen zu verbessern, können niedrigere Frequenzen verwendet werden.¹⁰ Höhere Frequenzen sind ungeeigneter für die Innenraumabdeckung, da sie anfälliger für Absorption sind.¹¹

⁸ ARD/ZDF-Forschungskommission (2024).

⁹ Deloitte (2025).

¹⁰ Ofcom (2022).

¹¹ Ericsson (2021).

Durch Sanierungsmaßnahmen und neue Standards bei Neubauten verbessert sich die Energieeffizienz von Gebäuden. Dadurch sind die Eintrittsverluste in Gebäude höher, was die Abdeckung von Innenräumen erschwert. Um dem entgegenzuwirken, können kleine Zellen wie Mikro-, Piko- oder Femtozellen sowohl außerhalb als auch innerhalb von Gebäuden eingesetzt werden, um die bestehenden Mobilfunkmasten zu ergänzen.¹²

In Deutschland wird Mobilfunk weitgehend komplementär zum Festnetz genutzt. Mobilfunk stellt mobile Konnektivität bereit. WiFi hingegen ist für die Vernetzung von Geräten in Innenräumen energieeffizienter und kostengünstiger. Beide Technologien werden weiterhin nachgefragt bleiben.¹³

(Zukünftige) Nutzung von WiFi als Alternative zur Indoor-Mobilfunk-Nutzung

In Deutschland zeigte eine Untersuchung des finnischen Messunternehmens Netradar bereits 2018, dass im Durchschnitt rund 87 % des Smartphone-Datenverkehrs über WLAN übertragen werden, in den Morgenstunden sogar über 90 %.¹⁴ Neuere, explizit auf Deutschland bezogene Studien mit genauen Prozentzahlen liegen bislang nicht vor.

Auch neuere länderspezifische Studien fehlen, doch internationale Analysen verdeutlichen die Richtung: Laut Tefficient bleiben Festnetz und WLAN auch 2024 die dominierenden Übertragungswege, während der direkte Mobilfunkverkehr zwar wächst, im Verhältnis aber klein bleibt.¹⁵ Die Untersuchung betont, dass selbst dann, wenn Haushalte über einen 5G-Router mit dem Internet verbunden sind, die Endgeräte fast immer über WLAN auf diesen zugreifen.

Diese Zusammenhänge sollten beachtet werden, wenn über die Implementierung von Indoor-Versorgungsaufgaben für Mobilfunknutzer nachgedacht wird.

Zur Bestimmung der Mobilfunkversorgung in geschlossenen Räumen existieren verschiedene Ansätze, die im Folgenden überblicksartig skizziert werden.

Für konkrete Einzelfälle bieten kommerzielle Anbieter Vor-Ort-Messungen an, um die Mobilfunkqualität in einzelnen Gebäuden konkret zu bestimmen.¹⁶ Somit geht der Impuls von der Nutzerseite aus. Dieses Vorgehen wird allerdings in erster Linie durch Unternehmen oder öffentliche Einrichtungen gewählt, um für betriebliche Zwecke eine adäquate Mobilfunkversorgung zu gewährleisten.

¹² Kroon, Godlovitch & Plückebaum (2023).

¹³ Kroon, Godlovitch & Plückebaum (2023).

¹⁴ <https://wifinowglobal.com/news-and-blog/germany-wi-fi-carries-87-of-smartphone-traffic>, zuletzt abgerufen am 19.08.2025.

¹⁵ <https://tefficient.com/are-fixed-and-wi-fi-actually-losing-ground-to-mobile>, zuletzt abgerufen am 19.08.2025

¹⁶ Vgl. z. B. <https://www.langreiter.de/mobilfunk-inhouseversorgung>, zuletzt abgerufen am 04.06.2025 oder <https://www.b-schmitt.de/funktechnik/mobilfunk/>, zuletzt abgerufen am 04.06.2025.

Auch in der Wissenschaft werden Untersuchungen zur Qualität von Mobilfunksignalen durchgeführt. Polak et al. (2024) analysieren z. B. die 4G-/5G-Signalabdeckung in einem Industriegebäude und zeigen, dass bauliche Gegebenheiten wie Metallgehäuse oder abgeschirmte Räume die Signalqualität erheblich beeinflussen. Konkrete Dämpfungswerte werden zwar nicht direkt ausgewiesen, doch die gemessenen KPIs (insbesondere RSRP und SINR¹⁷) weisen standortabhängige Unterschiede von bis zu 20 dB auf, was auf erhebliche Dämpfungsverluste im Gebäude schließen lässt. Besonders kritisch ist dies in Bereichen wie einer Metallzelle, wo durch die starke Abschirmung schlechtere Empfangswerte verzeichnet wurden.¹⁸

Empirische Indoor-Dämpfungsmodelle beschreiben den Signalverlust in Gebäuden anhand gemessener Durchschnittswerte für typische Umgebungen und Frequenzen. So beschreibt beispielsweise die ITU-R-Empfehlung P.1238-9¹⁹ ein standardisiertes Modell zur Berechnung des Pfadverlusts bei der Ausbreitung von Funksignalen in Innenräumen. Die zentrale Formel lautet: $L_{total} = L(d_0) + N \log_{10} \left(\frac{d}{d_0} \right) + L_f(n)$. Bei dem Modell wird der Gesamtpfadverlust L_{total} berechnet, der die Dämpfung eines Funksignals im Gebäude beschreibt. Dieser setzt sich aus mehreren Komponenten zusammen. Der Distanzverlustkoeffizient (N) bestimmt, wie stark das Signal mit zunehmender Entfernung abnimmt. Die Frequenz (f), angegeben in Megahertz, geht logarithmisch in die Berechnung ein, da höhere Frequenzen stärkere Verluste verursachen. Der Abstand (d) bezeichnet die Entfernung in Metern zwischen Basisstation und Endgerät; das Modell ist nur für Abstände größer als ein Meter gültig. Als Grundlage dient der Referenzabstand (d_0), der üblicherweise 1 m beträgt. Der Pfadverlust am Referenzabstand ($L(d_0)$) wird dabei unter der Annahme von Freiraumausbreitung berechnet und ergibt sich zu $L(d_0) = 20 \log_{10} f - 28$, wobei f in MHz eingesetzt wird. Zusätzlich wird der Fußboden-Durchdringungsverlustfaktor (L_f) berücksichtigt, der die zusätzliche Dämpfung beschreibt, wenn das Signal durch Stockwerke hindurch muss. Dieser Faktor hängt von der Anzahl der Stockwerke (n) zwischen Basisstation und Endgerät ab. Die Parameter N und $L_f(n)$ beruhen auf empirischen Messdaten, die in umfangreichen Messkampagnen in verschiedenen Gebäudetypen (z. B. Wohnungen, Büros, Geschäftsräume) und Frequenzbereichen bis 100 GHz erhoben wurden. Ziel dieser Messungen war es, typische Mittelwerte für unterschiedliche Indoor-Umgebungen zu gewinnen, die eine verlässliche Abdeckungsvorhersage ohne eigene Vor-Ort-Messung ermöglichen.

Stärker deterministische Modelle berechnen die Funkwellenausbreitung auf Grundlage physikalischer Gesetze und detaillierter Informationen zur Umgebung, etwa durch Ray-

¹⁷ RSRP (Reference Signal Received Power) misst die empfangene Signalstärke einer Mobilfunkzelle, während SINR (Signal-to-Interference-plus-Noise-Ratio) das Verhältnis von Nutzsignal zu Störsignalen und Rauschen angibt und damit die tatsächliche Signalqualität beschreibt.

¹⁸ Polak et al. (2024), S. 11.

¹⁹ ITU (2017), S. 4.

Tracing und/oder geometriebasierte Ansätze.²⁰ Sie berücksichtigen reale Gebäudeeigenschaften, was zu genaueren, ortsabhängigen Vorhersagen führt.

Im Gegensatz dazu beruhen empirische Modelle auf Messdaten und liefern pauschale Formeln für typische Szenarien, ohne konkrete räumliche Details zu erfassen. Während empirische Modelle einfach und schnell anwendbar sind, eignen sich deterministische Modelle besonders für komplexe Umgebungen wie Bürogebäude oder Industrieanlagen. Der höhere Rechenaufwand und die Notwendigkeit genauer Eingabedaten machen deterministische Modelle jedoch anspruchsvoller in der praktischen Umsetzung.

Machine-Learning-basierte Modelle sind dagegen ein neuer Ansatz. Sie können offline mit realen oder simulierten Daten trainiert werden, komplexe nichtlineare Effekte erfassen und sind sowohl standortspezifisch als auch allgemein einsetzbar, was sie besonders flexibel macht. Ein solches Modell ist beispielsweise das DRaGon-Modell der TU Dortmund.²¹ Das DRaGon-Modell ist ein neuartiger Ansatz zur Vorhersage der Empfangsqualität (RSRP) in Mobilfunknetzen auf Basis geografischer Daten. Es kombiniert klassische Pfadverlustmodelle mit Methoden des Deep Learning, um typische Schwächen rein modellbasierter Ansätze auszugleichen. Dafür werden neben numerischen Merkmalen wie Entfernung oder Gebäudeanzahl auch Bilddaten der Umgebung (z. B. aus Kartenansichten) als Eingabe genutzt. Ein neuronales Netzwerk entwickelt daraus eine Korrektur des analytischen Modells und verbessert so die Genauigkeit deutlich. Im Vergleich zu etablierten Verfahren wie Ray-Tracing oder Standardmodellen zeigt DRaGon eine geringere Vorhersageabweichung und höhere Effizienz.

In diesem Zusammenhang hat die EU-Kommission eine öffentliche Konsultation zu einer neuen Methodik zur Berechnung der Dienstqualität von 5G gestartet. Diese Methodik soll es erlauben, die theoretisch geschätzte Dienstqualität zu bewerten und eine einheitliche Grundlage für vergleichbare Datenerhebungen über Länder und Netzbetreiber hinweg zu schaffen, unabhängig vom genutzten 5G-Frequenzband.²²

Die EU-Kommission hat darin Vorschläge für die Netzabdeckungsmessung gemacht, die ein Raster von 20 x 20 Metern vorsehen, wobei sich die Empfangsantenne mittig im Feld befindet. Die Messungen sollen im Außenbereich (Outdoor) in einer Höhe von 1,5 Metern erfolgen. Hinsichtlich des Ausbreitungsmodells empfiehlt die Kommission den Einsatz eines (semi-)deterministischen Modells. Alternativ sind auch (semi-)empirische Modelle anwendbar, sofern sie dem Stand der Technik entsprechen. Grundsätzlich müssen die eingesetzten Modelle und Werkzeuge den Best-Practice-Standards der Netzplanung entsprechen und Parameter wie Urbanisierungsgrad und Umgebungsstörungen

²⁰ Vgl. z. B. Hossain et al. (2019). Ray-Tracing ist eine deterministische Methode, bei der elektromagnetische Wellen als Strahlen modelliert werden, deren Laufwege durch Reflexion, Beugung und Durchdringung in der Umgebung verfolgt und die resultierenden Pfadverluste mithilfe der geometrischen Optik berechnet werden, vgl. dazu z. B. Zhou (2017).

²¹ Geis et al. (2023).

²² <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/news/commission-seeks-feedback-draft-methodology-mapping-quality-service-5g-europe>, zuletzt abgerufen am 23.06.2025.

berücksichtigen.²³ Eine explizite Berechnung oder Erhebung von Indoor-Werten ist nicht vorgesehen. Eine gewisse Offenheit bei der Wahl der Methode bleibt somit bestehen.

Weiterhin werden häufig Ausbreitungsmodelle verwendet, um den Empfang von Kommunikationsdiensten zu simulieren. Bei diesen Ausbreitungsmodellen handelt es sich um mathematische Simulationen, die verschiedene Faktoren wie beispielsweise den Einfluss von Basisstationen berücksichtigen.

3.3 Ansätze zur Bestimmung der Mobilfunkqualität InCar und InTrain

Die Mobilfunkversorgung entlang von Verkehrswegen ist zentral für moderne Mobilität. Sowohl im Auto (InCar) als auch in der Bahn (InTrain) erwarten Nutzer eine stabile und leistungsfähige Verbindung. Dies ist nicht nur für die Kommunikation wichtig, sondern zunehmend auch für digitale Dienste wie Navigation, Entertainment und vernetztes Fahren. Besonders entlang von Bahnstrecken und Verkehrswegen kommt es jedoch häufig zu instabilen Verbindungen. Hierzu zeigen aktuelle Auswertungen, basierend auf Messungen von Opensignal, dass sich das Nutzungserlebnis im Mobilfunk in Deutschland entlang der Autobahnen und Bahnstrecken verbessert. Nutzende haben auf Autobahnen während 31,2 % der Zeit eine aktive 5G-Verbindung, auf Bahnstrecken während 26,4 %. Beide Werte liegen über dem bundesweiten Durchschnitt von 15 %. Gleichzeitig ist die Zeit ohne Mobilfunksignal für Nutzende entlang von Verkehrswegen geringer als im nationalen Mittel: Auf Autobahnen liegt sie bei nur 0,5 % der Zeit, auf Bahnstrecken bei 0,6 %, während der bundesweite Durchschnitt bei 0,9 % liegt. Diese Werte für die Autobahnen und Verkehrswege verbesserten sich im Jahresvergleich.²⁴

Die Mobilfunknutzung in Zügen und Autos wird durch unterschiedliche Dämpfungsfaktoren beeinflusst. In einer Studie für das Department of Transport wurde für verschiedene Zugmodelle in Großbritannien eine Signalreduktion von 3 bis 28 dB ermittelt.²⁵ Eine Studie für das Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie untersuchte die Mobilfunkversorgung von Bundesstraßen und Bahnstrecken in Bayern. Dabei wurden ebenfalls Dämpfungen für Züge und Autos ermittelt. In Innenräumen von Zügen entsteht danach eine zusätzliche Dämpfung von 8 dB bei Frequenzen unter 1.500 MHz und 12 dB bei höheren Frequenzen. Bei Autos liegt die Dämpfung im Fahrzeuginnenraum bei etwa 10 dB, insbesondere auf Bundesstraßen.²⁶ Diese Werte verdeutlichen die Herausforderungen für eine stabile Mobilfunkversorgung entlang von Verkehrswegen.

In Verkehrsmitteln ist somit relevant, ob der Nutzende direkt mit seinem mobilen Endgerät Mobilfunk nutzt, oder sich über die Außenantenne (und dann z. B. per Bluetooth mit dem Endgerät) verbindet. Außenantennen spielen demzufolge eine zentrale Rolle bei der

²³ Simić (2025).

²⁴ Opensignal (2025).

²⁵ Arup Alliance (2021).

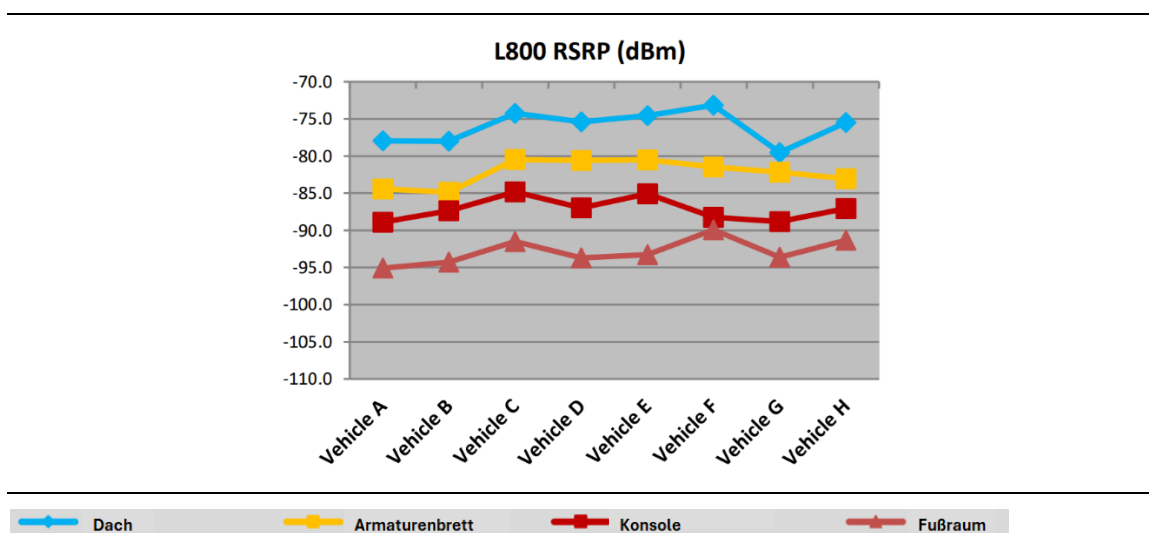
²⁶ Rhode & Schwarz (2022).

Verbesserung des Mobilfunkempfangs in Zügen und Autos. Sie verringern die Auswirkungen von Störfaktoren wie metallische Fahrzeughüllen oder isolierte Wände, die Signale dämpfen.

Weitere Einflussfaktoren auf den InCar-Mobilfunkempfang sind beispielsweise²⁷ die Lage des Endgeräts im Auto (Armaturenbrett, Fußraum etc.), die Anzahl und Art der Fenster oder die Fahrzeugmaterialien. Hier gibt es unterschiedliche technische Entwicklungen zu beobachten.

Eine Untersuchung mit realen Messungen für Ofcom im Jahre 2017 zeigte, dass für acht verschiedene Fahrzeugtypen und fünf verschiedene Frequenzen die Lage des Mobilfunkgeräts im Auto erwartungsgemäß jeweils schlechtere Empfangswerte lieferte als das mit einer Außenantenne empfangene Signal. Abbildung 3-2 zeigt dies beispielhaft für die 800 MHz-Frequenz.²⁸

Abbildung 3-2: Empfangsqualität für verschiedene Fahrzeugtypen



Quelle: LS telcom UK (2017, S. 25), eigene Übersetzung der Legende.

Einige Hersteller bieten bereits die eSim in ihren Fahrzeugen an, die über die Außenantenne InCar-Kommunikation ermöglicht. Über eine fest verbaute eSIM verbindet sich das Fahrzeug direkt mit dem Mobilfunknetz, ohne dass ein Smartphone nötig ist. Die Außenantenne ermöglicht eine stabilere Verbindung und besseren Empfang als ein im Fahrzeuginnenraum befindliches Endgerät. Funktionen wie Telefonie, Nachrichten und Internetzugang sind dadurch direkt im Fahrzeug verfügbar.²⁹

In Zügen sind für eine verbesserte Mobilfunkversorgung auch die verbauten Materialien relevant. Bei der Deutschen Bahn werden z. B. Fenster genutzt, die durchlässig für

²⁷ Vgl. LS telcom UK (2017), S. 4, S. 6.

²⁸ LS telcom UK (2017).

²⁹ <https://telematik-markt.de/telematik/5g-serienmäßig-im-bmw-ix-swisscom-sorgt-für-mobilfunk-features>, zuletzt abgerufen am 13.05 2025.

Mobilfunksignale sind. Dazu werden Raster in die isolierende Metallschicht der Fenster gelasert. Diese mobilfunkdurchlässigen Fenster bieten dann eine Alternative zu Repeatern, welche über Außenantennen Signale empfangen und in den Innenraum weitergeben.³⁰ Das GINT-Projekt (Gigabit Innovation Track) der Deutschen Bahn³¹ setzt technologisch besonders auf moderne Antennentechnologien, um die Empfangsqualität in Zügen drastisch zu verbessern. Kernbestandteil ist der Einsatz von MIMO-Antennen, die es ermöglichen, mehrere Datenströme gleichzeitig zu senden und zu empfangen, wodurch die verfügbare Bandbreite im Zug signifikant steigt. Diese Technik wird durch Beamforming ergänzt,³² eine intelligente Signalausrichtung, die das Mobilfunksignal gezielt auf die fahrenden Züge richtet und so Verluste minimiert. Entlang der Teststrecke in Mecklenburg-Vorpommern wurden eigens entwickelte, 15 Meter hohe Funkmasten installiert, die auf die Ausleuchtung des Schienenkorridors optimiert sind. Diese Masten nutzen das 3,6-Gigahertz-Band, das für hohe Datenraten prädestiniert ist, jedoch eine kürzere Reichweite besitzt. Dies wird durch die Platzierung der Masten in engeren Abständen kompensiert.³³ Ziel ist es, pro Zug eine stabile Versorgung mit mehreren Gigabit pro Sekunde zu gewährleisten, was einem Vielfachen der heutigen LTE-Kapazitäten entspricht. Die Kombination aus präziser Signalführung von außen und signaloffener Zugarchitektur innen soll dafür sorgen, dass Fahrgäste selbst bei hoher Geschwindigkeit durchgängig streamen und arbeiten können. Diese Architektur ist zudem zukunftsfähig: Die Masten lassen sich auch für den kommenden Bahnfunk FRMCS nutzen, der das Signal allerdings über Außenantennen empfängt.³⁴

³⁰ Deutsche Bahn (2020), siehe auch die folgende Beschreibung zum GINT-Projekt.

³¹ Das Projekt wird vom BMDV gefördert. Weitere Projektpartner sind O2 Telefónica, Ericsson und Vantage Towers.

³² Vgl. https://www.deutschebahn.com/de/presse/pressestart_zentrales_uebersicht/Arbeiten-und-Streamen-mit-Gigabit-Datenraten-im-Zug-dank-5G-Mobilfunkkorridoren-entlang-der-Gleise--12857716, zuletzt abgerufen am 16.05.2025.

³³ Vgl. <https://www.deutschland-spricht-ueber-5g.de/magazin/5g-mobilfunk-bringt-schnelles-internet-in-den-zug/>, zuletzt abgerufen am 16.05.2025.

³⁴ <https://www.golem.de/news/frmcs-neuer-bahnfunk-bringt-auch-mehr-datenrate-fuer-fahrgaeste-2405-185074.html>, zuletzt abgerufen am 16.05.2025.

4 Internationale Erfahrungen

In verschiedenen Ländern wurde der im letzten Abschnitt beschriebenen Nutzerperspektive bereits Rechnung getragen, als dass bereits Auflagen für die Indoor-Nutzung regulatorisch implementiert wurden. Beispiele aus Österreich, Großbritannien, Rumänien und Frankreich bieten entsprechende Erkenntnisse zu Indoor-Versorgungsauflagen.

4.1 Österreich

4.1.1 Ausgangssituation

Im Jahr 2013 waren drei Mobilfunknetzbetreiber in Österreich aktiv: A1 Telekom Austria AG, T-Mobile Austria GmbH, Hutchison Drei Austria GmbH.³⁵ Diese Mobilfunknetzbetreiber sind weiterhin in Österreich aktiv. Sie nutzen Mobilfunk nicht nur direkt zur Indoor-Versorgung, sondern bieten auch sogenannte Fixed-Mobile-Substitute an. Dazu gehören statische Breitbandzugänge (Cubes), die das Mobilfunknetz als Grundlage nutzen und darüber per WLAN einen stationären Zugang bereitstellen.³⁶ Diese Angebote sind relevant für Haushalte mit langsamen Festnetzanschlüssen. In diesem Zusammenhang wird von betroffenen Marktteilnehmern die hohe Marktdurchdringung dieser Cubes im Vergleich zum EU-Durchschnitt hervorgehoben. Dies spricht für eine gute Indoor-Versorgung der Haushalte mit dem Mobilfunk.

4.1.2 Gründe für Versorgungsauflagen in geschlossenen Räumen

Die Indoor-Versorgungsauflage war an die Vergabe von Frequenznutzungsrechten im Bereich des 800-MHz-Frequenzbands im Jahr 2013 gekoppelt, welche die A1 Telekom Austria AG und die T-Mobile Austria ersteigerten. Die Auflage legte fest, dass regional ausgewählte Gemeinden zu versorgen waren. A1 Telekom Austria musste insgesamt 360 Gemeinden versorgen, T-Mobile Austria 180 Gemeinden.³⁷ Die Telekom-Control-Kommission (TKK) verfolgte bei der Vergabe von Frequenznutzungsrechten 2013 das Ziel, eine Versorgung innerhalb von Gebäuden sicherzustellen und somit eine Alternative für Gemeinden zu schaffen, die nur unzureichend mit festem Breitband versorgt waren. Die Versorgungsauflage wurde daher als verpflichtende Mindestqualitätsvorgabe für den Empfang innerhalb von Gebäuden eingeführt. Mobilfunk sollte also als Ersatz für festes Breitband dienen.

Dieses Ziel wird nach Auskunft von RTR mittlerweile nicht mehr verfolgt, da der Breitbandausbau in Österreich erheblich vorangeschritten ist. Seither wurden keine neuen

³⁵ RTR (2013): RTR Telekom Monitor Jahresbericht 2013.

³⁶ A1 Telekom Austria (2025).

³⁷ TKK (2013a); TKK (2013b); Die Gemeinden wurden ausgewählt, da zum Zeitpunkt der Frequenzvergabe hier lediglich langsame Festnetzanschlüsse bereitstanden.

Indoor-Versorgungsaufgaben erlassen. Betroffene Marktteilnehmer sehen dies als Hinweis darauf, dass es keine erheblichen Probleme bei der Indoor-Versorgung mehr gibt.

4.1.3 Technische Herleitung der Versorgungsaufgabe

Nach Angaben der Regulierungsbehörde war die entscheidende Herausforderung bei der Indoor-Versorgung die Signalabschwächung durch Fenster und deren Isolierung. Als pauschale Dämpfung wurde hierfür ein Wert von 20 dB³⁸ angesetzt. Maßgeblich war, dass zur Überprüfung eine Outdoor-Messung vorgesehen war und eine zusätzliche Dämpfung simuliert werden sollte. Die Festlegung des Reduktionsfaktors wird als regulatorische Entscheidung beschrieben, die auf internen Recherchen zu Gebäudedämpfungen beruht, vor allem bei Fenstern. Der Reduktionsfaktor wurde von den Mobilfunknetzbetreibern nicht beanstandet. Diese heben den einheitlichen Reduktionsfaktor positiv hervor, da eine einfache Überprüfung durch Outdoor-Messwerte möglich war.

Basierend auf Simulationen der Feldstärke auf einem 100x100-Meter-Raster wurde seitens der Regulierungsbehörde ermittelt, welche Abdeckung in Abhängigkeit von der Signalstärke erreicht werden kann. Es wurde ausgehend von der Mobilfunkbasisstation simuliert, welche Bandbreiten in welcher Entfernung theoretisch erreicht werden könnten. Auf einer Feldstärke-Karte wurde für die LTE-Technologie geschätzt, welche Bandbreiten theoretisch realisierbar wären. Um die geforderten Datenraten zu erreichen, waren in der Simulation zusätzlich zu errichtende Standorte erforderlich. Diese Analyse bildete die Grundlage für die festgelegten Bandbreitenvorgaben.

Die Inhalte der Frequenzvergabe und die Versorgungsaufgaben wurden mit den Marktteilnehmern diskutiert und unabhängig festgelegt.

4.1.4 Implementierung der Versorgungsaufgabe

Die Versorgungsverpflichtungen sind im Anhang³⁹ der Frequenzzuteilungsurkunde festgelegt. Dort wird definiert, welcher Versorgungsgrad mit dem zugeteilten Frequenzspektrum erreicht werden muss. Der Versorgungsgrad ist der Anteil der versorgten ansässigen Bevölkerung an der Gesamtbevölkerung.⁴⁰ Die Indoor-Versorgungsaufgabe war an die Nutzung des 800-MHz-Frequenzbands gebunden. Jeder Netzbetreiber erhielt zusammenhängende 5-MHz-Frequenzblöcke. Abhängig von der Anzahl der zugeteilten Blöcke mussten verschiedene Bandbreiten für mindestens 50 % der Bevölkerung indoor erreicht werden, um die Auflage zu erfüllen. (vgl. Tabelle 4-1).

³⁸ Dieser Wert wird beispielsweise auch von ETSI (2020, S.32) für Urban Macro (UMa) und Urban Micro (UMi) Szenarien bei Frequenzen unter 6 GHz angegeben. Er repräsentiert den durchschnittlichen Verlust des Funksignals, wenn es von außen in ein Gebäude eindringt.

³⁹ TKK (2013c), S. 18.

⁴⁰ TKK (2013d).

Tabelle 4-1: Notwendige Mindestbandbreiten indoor im 800-MHz-Band

Anzahl zugeteilter Frequenzblöcke	Downlink	Uplink
1	1 Mbit/s	0,25 Mbit/s
2 oder mehr	2 Mbit/s	0,5 Mbit/s

Quelle: WIK angelehnt an TKK (2013c, S. 19).

Die Nutzungsrechte umfassen für A1 Telekom Austria zweimal 20 MHz (791–811 MHz im Downlink; 832–852 MHz im Uplink) und für die T-Mobile Austria 10 MHz (811–821 MHz im Downlink; 852–862 MHz im Uplink).⁴¹ Die Umsetzung der Versorgungsaufgabe erfolgte gestaffelt, wobei eine festgelegte Anzahl an Gemeinden zu versorgen war (s. o.). Die Hälfte der ausgewählten Gemeinden musste innerhalb von 18 Monaten versorgt werden, die andere Hälfte innerhalb von drei Jahren.)

4.1.5 Operationelle Überprüfung sowie Herausforderungen und Probleme

Die Mobilfunknetzbetreiber waren verpflichtet, die Erfüllung der Versorgungsverpflichtungen mithilfe von Simulationen auf Basis realer Outdoor-Messungen nachzuweisen. Diese Simulationen beruhten auf bestehenden Mobilfunkstandorten und deren technischer Ausstattung. Für die Indoor-Abdeckung war in der Modellierung eine pauschale Zusatzdämpfung von 20 dB (vgl. Abschnitt 4.1.3) anzunehmen. Die Referenz bildete die Außenversorgung im stationären Betrieb mit marktüblichen Endgeräten in 1,5 m Höhe. Zur Sicherstellung der Erfüllung musste spätestens vier Wochen nach dem jeweiligen Stichtag (nach 18 Monaten und nach drei Jahren) eine Versorgungssimulation in 100-Meter-Rasterzellen bei der Behörde eingereicht werden (vgl. Tabelle 4-2).

⁴¹ TKK (2013d), S. 1–3.

Tabelle 4-2: Stichtage zur Erfüllung der Indoor-Versorgungsaufgabe

Stichtag	Betreiber	Gemeinden	Bandbreite (in Mbit/s)
19.05.2015	A1 Telekom	180 Gemeinden 50 % der Gemeindebevölkerung Indoor 90 % der Gemeindebevölkerung Outdoor	Downlink: 2 Uplink: 0,5
19.05.2015	T-Mobile	90 Gemeinden 50 % der Gemeindebevölkerung Indoor 90 % der Gemeindebevölkerung Outdoor	Downlink: 2 Uplink: 0,5
19.11.2016	A1 Telekom	360 Gemeinden 50 % der Gemeindebevölkerung Indoor 90 % der Gemeindebevölkerung Outdoor	Downlink: 2 Uplink: 0,5
19.11.2016	T-Mobile	180 Gemeinden 50 % der Gemeindebevölkerung Indoor 90 % der Gemeindebevölkerung Outdoor	Downlink: 2 Uplink: 0,5

Quelle: WIK angelehnt an RTR,

https://www.rtr.at/TKP/was_wir_tun/telekommunikation/spectrum/procedures/Multiband-Auktion_800-900-1800_MHz_2013/multibandauktion_coverage.de.html, zuletzt abgerufen am 02.05.2025.

Weiterhin mussten die Netzbetreiber folgende Unterlagen einreichen:

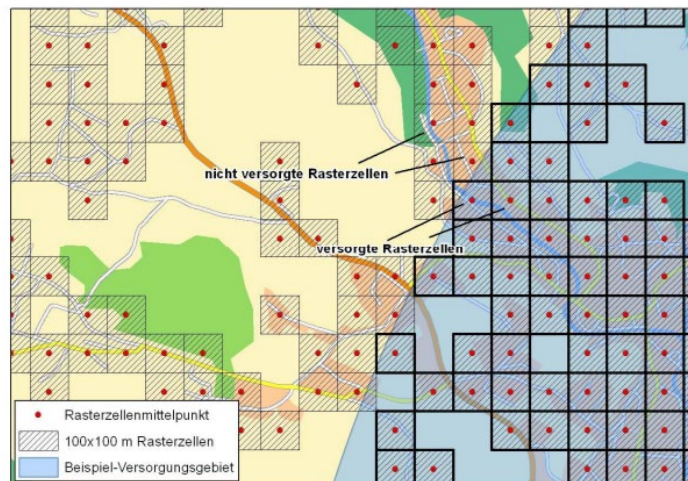
- „Aufstellung aller Basisstationsstandorte inkl. der geokodierten Daten (GIS-Format, Vektorgrafik) unter Angabe der jeweils genutzten Frequenzblöcke pro Zelle (Sektor),
- Verkehrswerte und Auslastungen der Zellen (Sektoren), weitere wesentliche Eingangsparameter für die Simulationsrechnungen,
- Kartendarstellung Österreichs mit Basisstations-Standorten und versorgten Gebieten (GIS-Format, Vektorgrafik),
- Liste der versorgten Rasterzellen und der daraus berechnete Versorgungsgrad.“⁴²

Der Versorgungsgrad wurde bestimmt, indem jede Rasterzelle eine Bevölkerungseinheit repräsentierte. Sie galt als versorgt, wenn ihr geometrischer Mittelpunkt abgedeckt war (vgl. Abbildung 4-1). War dieser Punkt nicht öffentlich zugänglich, wurde stattdessen der nächstgelegene öffentlich zugängliche Punkt zur Überprüfung herangezogen. Die versorgte Bevölkerung einer Gemeinde ergab sich aus der Summe der Einwohner aller versorgten Rasterzellen innerhalb der Gemeindegrenzen. Der Versorgungsgrad wurde als Verhältnis der versorgten Gemeinde zur Gesamtbevölkerung der jeweiligen Gemeinde beziehungsweise Österreichs berechnet.

⁴² TKK (2013c), S. 22.

Damit die Auflage als erfüllt gilt, müssen demnach eine örtliche Komponente und eine zeitliche Komponente erfüllt werden. Für die örtliche Erfüllung muss 50 % der Gemeinde in Gebäuden mit 2 Mbit/s im Downlink und 0,5 Mbit/s im Uplink versorgt werden (siehe Tabelle 4-2). Die zeitliche Komponente besagt, dass diese Datenrate zu jederzeit von den 50 % der Gemeinde erreicht werden muss.

Abbildung 4-1: Beispiel für versorgte und nicht versorgte Zellen



Quelle: TKK (2013c, S. 22).

Die TKK hat diese Versorgungsangaben durch einmalige Messungen in Stichproben vor Ort überprüft. Zur Überprüfung musste eine Testdatei mit der festgelegten Mindestdownloadgeschwindigkeit in maximal drei Minuten heruntergeladen werden können. Zur Erfüllung der Auflage war somit nicht die Erreichung eines Pegelwerts maßgeblich, sondern die tatsächlich realisierte Datenrate. Die Messung erfolgte in zwei Schritten: Zuerst wurde durch eine Outdoor-Messung per Smartphone der Signalpegel im Freien ermittelt. Im zweiten Schritt wurde die Indoor-Simulation durchgeführt. Hierzu wurde zur Nachbildung der Dämpfung ein Smartphone in einer Shield-Box mit einem programmierbaren Dämpfungsglied und einer externen Antenne verwendet.⁴³

Das Dämpfungsglied reduzierte das Signal um 20 dB, um die Bedingungen in Gebäuden zu simulieren. Da der Zugang zu Privatgebäuden nicht garantiert ist und die genaue Gebäudedämpfung unbekannt, sind reale Messungen in Gebäuden als unpraktikabel bewertet worden. Durch den einheitlichen Korrekturfaktor und die standardisierte Shield-Box-Messung konnte eine einheitliche und transparente Überprüfung sichergestellt werden. Wesentliche Probleme bei der operationellen Überprüfung gab es nicht.

⁴³ Eine Shield-Box ist eine Abschirmbox, die speziell für Tests mit mobilen Endgeräten entwickelt wurde, um externe Störungen zu minimieren und eine kontrollierte Umgebung für Messungen zu schaffen (Rhode & Schwarz, 2024).

Einzelne Netzbetreiber sehen mehr Nach- als Vorteile bei Indoor-Auflagen und deren Überprüfung. Bei Outdoorauflagen könnten topographische Bedingungen bei der Mobilfunknetzplanung gezielt eingebunden werden. Bei Indoor-Auflagen könnten Dämpfungen durch Gebäude, deren Isolation und die Fensterbeschichtungen nicht berücksichtigt werden. Es mangle an einheitlichen und vollständigen baurechtlichen Datenbanken, die bei der Netzplanung herangezogen werden könnten. Das erschwere die Netzplanung. Deshalb sei eine bessere Überprüfbarkeit bei Outdoorauflagen zu bevorzugen. Jedoch begrüßten die Mobilfunknetzbetreiber das Vorgehen des einheitlichen Reduktionsfaktors. Dies sei ein verlässlicher Weg, um von der Outdoor- die Indoor-Versorgung herzuleiten. So sei das komplexe Überprüfungsverfahren vereinfacht worden.

4.1.6 Auswirkungen der Indoor-Versorgungsaufgabe

Die Versorgungsaufgabe führte, wie prognostiziert, zur Errichtung zusätzlicher Basisstationen im ländlichen Raum. Dies verbesserte die Mobilfunkqualität messbar, was Netztestdaten belegten. Messungen zeigten, dass oft höhere Datenraten realisiert werden konnten als die Mindestanforderungen von 2 Mbit/s im Downlink. Die positiven Effekte wurden von den Medien wahrgenommen, da Österreich als Vorreiter für mobiles Breitband in Europa galt.⁴⁴ Insgesamt bewertet die Regulierungsbehörde die Indoor-Versorgungsaufgabe positiv. Angesichts der damals begrenzten Breitbandverfügbarkeit im ländlichen Raum, der gezielten Auswahl betroffener Gemeinden und der praxisnahen Überprüfung mittels Shield-Box sei eine umsetzbare Lösung für das komplexe Thema der Indoor-Versorgung gelungen. Eine verbesserte Outdoor-Versorgung wirke sich aber ebenso positiv auf die Indoor-Abdeckung aus. Daher müsse generell nicht zwingend eine spezielle Indoor-Auflage mit zusätzlicher Überprüfung eingeführt werden, um eine gute Versorgung innerhalb von Gebäuden sicherzustellen.

Derzeit sind in Österreich keine neuen Indoor-Versorgungsaufgaben geplant. Dafür nennt die Regulierungsbehörde drei Hauptgründe: Erstens habe die technische Komplexität durch neuere MIMO-Varianten eine Überprüfung mit einer Shield-Box erschwert. Zweitens könnten Versorgungsziele auch mit allgemeinen Outdoor-Versorgungsaufgaben erreicht werden. Drittens werden aktuell andere Prioritäten gesetzt, vor allem bei der Erschließung der Verkehrswege. Zudem sei durch den fortschreitenden Breitbandausbau die Notwendigkeit einer funkgestützten Breitbandversorgung gesunken.

Marktteilnehmer sehen die hohen Schwierigkeiten in der Überprüfung in geschlossenen Räumen als Grund, weshalb es nicht erneut zu Indoor-Versorgungsaufgaben kam. Hier werden vor allem die genannten unbekannten Bauweisen und Dämpfungen der Gebäude angeführt. Ebenso sei vor allem WLAN für die Indoor-Versorgung maßgeblich. Die Nutzung von Datendiensten über WLAN würde daher eher die Nutzererfahrung

⁴⁴ Der Mobilfunk-Netztest von „connect“ für das Jahr 2017 beurteilt die Mobilfunknetzbetreiber in Österreich als sehr gut, besonders im Vergleich in der DACH-Region. Dies sei vor allem zum Vorteil für Nutzende in Österreich, da ihnen ein sehr gutes Netz geboten werde (Connect.de, 2016).

widerspiegeln. Die Versorgungsaufgaben hätten für die betroffenen Gebiete dazu beigetragen, dass Österreich insgesamt eine sehr gute Mobilfunk-Abdeckung ohne viele Funklöcher habe. Grundsätzlich sei aber die Outdoor-Versorgung maßgeblich, die eine gute Indoor-Versorgung bedinge.

4.1.7 Versorgungsaufgaben für Verkehrswege

Für die Versorgung der Verkehrswege ist die Auktion im Jahr 2020 und die explizite Versorgungsaufgabe für Verkehrswege zu nennen.⁴⁵ Für spezifizierte Bundes- und Landesstraßen gelten gestaffelte Vorgaben zur Mobilfunkversorgung im *Outdoor*-Bereich. Bis zum 31.12.2023 war auf 90 % der jeweiligen Strecken ein Kommunikationsdienst mit einer Mindestdatenrate von 10 Mbit/s im Download und 1 Mbit/s im Upload bereitzustellen. Für definierte Teilstrecken sind unterbrechungsfreie Versorgungsgrade zu erreichen. Für Bundesstraßen müssen bis zum Jahr 2025 min. 75 % und bis 2028 min. 90 % der ausgewählten Strecken durchgängig versorgt sein. Für Landstraßen sind bis zum Jahr 2025 min. 70 % und bis 2028 min. 80 % der Strecken durchgängig zu versorgen.⁴⁶

Bei der Versorgung von Autobahnen und Schnellstraßen gibt es die Einschränkung, ob der Straßeninfrastrukturbetreiber die erforderlichen Standorte zur Verfügung stellt. Bei Bereitstellung muss auf mindestens 98 % der Streckenlänge eine Outdoor-Versorgung mit 10 Mbit/s im Download und 1 Mbit/s im Upload sichergestellt werden. Diese Verpflichtung gilt für Streckenabschnitte, auf denen zum 31.12.2019 Mobilfunkinfrastruktur vorhanden war oder die notwendigen Standorte spätestens sechs Monate vor dem jeweiligen Stichtag bereitgestellt wurden. Die Versorgungspflicht war erstmals zum 31.12.2023 zu erfüllen und bleibt über die gesamte Laufzeit der Frequenznutzungsrechte bestehen.⁴⁷

Für ausgewählte Bahnstrecken gelten analoge Vorgaben. Bei Bereitstellung von Standorten durch den Bahninfrastrukturbetreiber ist auf 98 % der Streckenlänge eine Outdoor-Versorgung mit min. 10 Mbit/s Down- und 1 Mbit/s Uploadgeschwindigkeit sicherzustellen. Diese Verpflichtung besteht für Abschnitte mit bereits bestehender Infrastruktur (Stichtag 31.12.2019) oder rechtzeitig bereitgestellten Standorten. Für im Bau befindliche Strecken gilt die Versorgungspflicht ab einem Jahr nach Inbetriebnahme.⁴⁸

Die Überprüfung der Versorgungspflicht für Straßen und Bahnstrecken verlangt, dass die Mindestdatenrate sowohl stationär als auch mobil erfüllt werden muss (Tunnel nur bei Bahnen). Dazu werden die Verkehrswege in 200-Meter-Abschnitte unterteilt, die als versorgt gelten, wenn mindestens 2 Mbit/s Download und 0,5 Mbit/s Upload erreicht werden. Erfüllt ist die Versorgung nur, wenn Versorgungsgrad, Mittelwert und 25 %-Perzentil der

⁴⁵ TKK (2019).

⁴⁶ TKK (2019), S. 22–23.

⁴⁷ TKK (2019), S. 22–23.

⁴⁸ TKK (2019), S. 22–23.

gemessenen Datenraten die Vorgaben erreichen und für Straßen zusätzlich eine unterbrechungsfreie Verbindung nachgewiesen wird.⁴⁹

Nach Auskunft eines Marktteilnehmers wurden diese Outdoor-Versorgungsaufgaben genutzt, um implizit die Mobilfunkversorgung innerhalb von Autos und Zügen zu verbessern. Wie in Abschnitt 4.1.6 beschrieben, nutzt die Regulierungsbehörde strengere Outdoor-Versorgungsaufgaben, um so die Versorgung in geschlossenen Räumen zu verbessern. So werden potentielle Probleme bei der operationellen Überprüfung vermieden.

4.2 Großbritannien

4.2.1 Ausgangssituation

Im Jahr 2013 waren im Vereinigten Königreichs vier Mobilfunknetzbetreiber aktiv: Everything Everywhere Limited (EE)⁵⁰, Telefónica UK Limited (O2), Vodafone Group Limited und Three (CK Hutchison Holdings).⁵¹

In einer öffentlichen Stellungnahme im Jahr 2012 verkündete Ofcom, in der nächsten Auktion an einen Frequenzblock der 800-MHz-Lizenzen eine Indoor-Versorgungsaufgabe zu knüpfen. Diese Verpflichtung bezog sich auf 2 x 10 MHz des Spektrums. Der Mobilfunknetzbetreiber wurde verpflichtet, einen mobilen Breitbanddienst für den Empfang innerhalb von Gebäuden für 98 % der britischen Bevölkerung bereitzustellen. Ofcom erwartete, dass dies im Freien zu einer Abdeckung von 99,5 % der Bevölkerung führen würde.⁵² Im Jahr 2013 wurde die Auktion durchgeführt. O2 ersteigerte die Frequenzen 811–821 MHz für den Downlink und 852–862 MHz für den Uplink.⁵³ Im Rahmen dieser ersteigerten Lizenz war O2 verpflichtet, bis Ende 2017 eine mobile Datenversorgung mit einer Downlink-Geschwindigkeit von min. 2 Mbit/s für min. 98 % aller Wohngebäude im Vereinigten Königreich bereitzustellen. Hierbei musste in jedem Landesteil (England, Wales, Schottland, Nordirland) mindestens 95 % Abdeckung erreicht werden. Die regionalen Zielvorgaben sollten den unterschiedlichen Topografien der Landesteile Rechnung tragen.⁵⁴

4.2.2 Gründe für Versorgungsaufgaben in geschlossenen Räumen

Ofcom sah in der Indoor-Auflage eine Chance, die flächendeckende Verfügbarkeit mobiler Breitbanddienste im Vereinigten Königreich zu fördern.⁵⁵ Zwar erwartete Ofcom, dass

⁴⁹ TKK (2019), S. 31–33.

⁵⁰ Im Jahr 2010 entstanden aus der Fusion von Orange UK und T-Mobile UK.

⁵¹ Ofcom (2013b).

⁵² Ofcom (2012a), S. 5.

⁵³ Ofcom (2013a).

⁵⁴ Ofcom (2021), S. 6–7.

⁵⁵ Siehe zu diesem Abschnitt: Ofcom (2012a), S. 5 ff.

der Wettbewerb zu einer breiten Netzabdeckung führen würde, dennoch erschien eine regulatorische Absicherung erforderlich. Hintergrund war die Sorge, dass sich der Ausbau allein durch Marktkräfte verzögern oder regional ungleichmäßig entwickeln könnte. Daher hielt Ofcom eine Mindestanforderung für notwendig, um einen schnellen und verlässlichen Zugang für möglichst viele Bürgerinnen und Bürger sicherzustellen. Diese Maßnahme wurde als geeignet angesehen, die Interessen der Nutzenden zu sichern und digitale Teilhabe zu fördern. Ofcom betonte, dass die Verpflichtung gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Nutzen stiften könne. Man wollte gewährleisten, dass niemand durch fehlende Infrastruktur vom digitalen Fortschritt ausgeschlossen wird und so Regionen oder Bevölkerungsgruppen dauerhaft benachteiligt werden. Zudem erachtete Ofcom eine asymmetrische Auflage als sinnvoll, um zunächst über einen Mobilfunknetzbetreiber eine bevölkerungsbezogene Indoor-Versorgung zu gewährleisten. Durch den wettbewerblichen Druck würden die weiteren Mobilfunknetzbetreiber nachziehen und eine ähnliche Versorgung sicherstellen.

4.2.3 Technische Herleitung der Versorgungsaufgabe

O2 war verpflichtet, bis spätestens Ende 2017 mobile Datenraten mit einer Wahrscheinlichkeit von 90 %⁵⁶ von min. 2 Mbit/s im Downlink bereitzustellen. Diese Datenraten müssen nur unter geringer Netzauslastung⁵⁷ erreicht werden. Die Versorgung muss innerhalb von Wohngebäuden sichergestellt werden und durch außerhalb der Gebäude installierte Funkanlagen erfolgen.⁵⁸ Der Signalverlust durch Wände durfte, je nach genutztem Frequenzband, festgelegte Grenzwerte nicht überschreiten (siehe Tabelle 4-4 für die exakten Werte je Frequenzbereich).⁵⁹

Ofcom modellierte den Gebäudedämpfungsverlust bei 800 MHz als lognormalverteilte Zufallsgröße mit einem Mittelwert, der sich aus dem Verlust durch die Außenwand und einem tiefenabhängigen Zusatzverlust ergibt.⁶⁰ $L_{BPL} = L_W + \alpha d$, „wobei L_W den mittleren Dämpfungsverlust (in dB) durch eine Außenwand bezeichnet, d die Tiefe (in Metern) innerhalb des Gebäudes am Empfangspunkt ist und α die Abhängigkeit (in dB pro Meter) des Building Penetration Loss (BPL) von der Eindringtiefe darstellt. Das Produkt αd ist ein Indikator für den mittleren zusätzlichen Verlust, der in bestimmten (Gebäude-)Tiefen auftritt.“⁶¹ Der tiefenabhängige Anteil steigt linear mit der Entfernung zur Außenwand, wobei ein Wert von 0,6 dB/m verwendet wird. Zwei Indoor-Szenarien werden betrachtet:

⁵⁶ Die Empfangswahrscheinlichkeit von 90 % ist eine theoretische Annahme, die bei Abdeckungssimulationen verwendet wird. Sie bedeutet, dass in einer Simulation mindestens 90% der Simulationen eines Ortes mit einem ausreichenden Signalpegel versorgt sein sollten.

⁵⁷ Ofcom (2017) definiert geringe Auslastung so, dass in der versorgenden Zelle nur ein einzelner Nutzer aktiv ist, während die umliegenden Zellen lediglich mit 22 % ihrer maximalen Leistung senden.

⁵⁸ Ofcom (2021), S. 7.

⁵⁹ Ofcom (2021), S. 7.

⁶⁰ Vgl. zu diesem Abschnitt: Ofcom (2012b), S. 81 ff.

⁶¹ Ofcom (2012b), S. 81, eigene Übersetzung.

„shallow“ (2,5 m) und „deep“ (12,5 m), was einem zusätzlichen Verlust von 6 dB entspricht.

Zur Ermittlung des mittleren Außenwandverlusts bei 800 MHz verwendete Ofcom vier Quellen:⁶² EU Kommission (1999), Qualcomm (2008), Tar und Cser (2009) sowie Okamoto et al. (2009). Es ergab sich bei der Untersuchung der EU Kommission (1999) ein interpolierter Mittelwert von 10,7 dB, bei Qualcomm (2008) 9,0 dB und bei Okamoto et al. (2009) pauschal 10 dB. Diese Werte wurden entweder gemessen oder durch Interpolation aus benachbarten Frequenzen abgeleitet. Qualcomm etwa hatte reale Messwerte bei 900 MHz (9,5 dB) und 2100 MHz (12,8 dB) erhoben, aus zwölf Gebäuden verschiedener Bauarten und dabei Verluste unmittelbar hinter der Außenwand dokumentiert. Da diese als „loss at the first wall“ bezeichnet werden, galten sie als repräsentativ für den Außenwandverlust.

Die größten Verluste und die stärkste Frequenzabhängigkeit wurden aus den Qualcomm-Daten abgeleitet. Diese bildeten die Basis für das sogenannte „Maxvar“-Profil. Die geringsten Verluste stammten von Tar und Cser (2009), während Okamoto et al. (2009) eine frequenzunabhängige Modellierung annimmt. Beides wurde in dem konservativere „Minvar“-Profil verwendet. Für 800 MHz ergab sich so ein mittlerer BPL-Wert von 8,4 dB (Minvar/shallow) bis 16,5 dB (Maxvar/deep). Die zugehörigen Standardabweichungen waren 5,4 dB (Minvar) und 6,8 dB (Maxvar), wobei auch hier der Wert von Qualcomm als Obergrenze genutzt wurde.

Die von Netzbetreibern bereitgestellten Annahmen lagen meist innerhalb des Maxvar-Bereichs; ein Betreiber meldete höhere Verluste.⁶³ Unterschiede je nach Umgebungstyp (z. B. urban oder suburban) wurden diskutiert, konnten aber mangels belastbarer Daten nicht modelliert werden. Da 80 % der Bevölkerung im suburbanen Raum lebten, basierte die Modellierung auf dieser Umgebung.

Die letztendliche Festlegung von 13,2 dB für die 800-MHz-Frequenz wurde auf Basis der Methodik der ITU-R P.2109 getroffen.⁶⁴ Diese ist eng verknüpft mit der oben beschriebenen Methodik von Ofcom.

In einem Konsultationsprozess zur allgemeinen Methodik der Berechnung der Dämpfungsverluste gab es seitens der Branche verschiedene Kommentare. In der Mehrheit der Rückmeldungen wurde die Bedeutung einer Indoor-Mobilfunkversorgung anerkannt. Kritische Positionen vertraten BT, Intellect und Everything Everywhere: Eine Indoor-Versorgungsaufgabe sei die falsche Zielsetzung, Indoor-Breitband für mobile Endgeräte würde durch das Festnetz bereitgestellt werden. Es käme zu falschen Signalen im Wettbewerb, wenn Mobilfunk als Substitut für Festnetz genutzt würde. H3G gab an, dass eine

⁶² BPL wurde auch für andere Frequenzen modelliert. Da die Indoor-Versorgungsaufgabe nur für die 800-MHz-Frequenz galt, beschränken wir uns an dieser Stelle in erster Linie auf diesen Bereich.

⁶³ Ofcom (2012b), S. 86 f. Obwohl die Auflage letztlich nur für einen Betreiber eingeführt wurde, wurden im Vorfeld verschiedene Stakeholder in den Festlegungsprozess einbezogen.

⁶⁴ Die Berechnung im Einzelnen wurde nicht veröffentlicht.

Signalstärke von -83 dBm ein akzeptabler Schwellenwert für eine Indoor-Versorgung sei.⁶⁵

4.2.4 Implementierung der Versorgungsaufgabe

In nur eine der vergebenen Lizenzen im 800-MHz-Band wurde die Versorgungsaufgabe als regulatorische Maßnahme integriert. Ofcom entschied, dass eine solche Verpflichtung notwendig sei, um die breitflächige Bereitstellung von mobilen Breitbanddiensten sicherzustellen. Es wurde festgelegt, dass nur ein Betreiber diese Versorgungsaufgabe zu erfüllen hat. Die Regulierungsbehörde erwartete, dass andere Anbieter durch den Wettbewerb ähnliche Abdeckungen erreichen würden.

Die Umsetzung erfolgte über spezifische technische und geografische Kriterien, die in die Lizenzbedingungen integriert wurden. Eine verpflichtende Zugangsregelung für Drittanbieter auf das Netz des Abdeckungspflichtigen wurde bewusst nicht eingeführt, um Investitionsanreize nicht zu gefährden.

4.2.5 Operationelle Überprüfung sowie Herausforderungen und Probleme

Ofcom hat eine umfassende Methodik zur Überprüfung der Indoor-Versorgungsaufgabe entwickelt und im Jahr 2018 auf dieser Basis die Einhaltung der Auflage durch O2 bestätigt. Für die Überprüfung musste O2 detaillierte Netzdaten bereitstellen.⁶⁶ Eine Vor-Ort-Messung fand nicht statt.

Um zu beurteilen, ob ein Endgerät die minimale Downlink-Geschwindigkeit empfangen kann, muss das Signal-Störungs-Rausch-Verhältnis (SINR) über einem Schwellenwert liegen, der für eine Downlink-Geschwindigkeit von min. 2 Mbit/s erforderlich ist. Der Schwellenwert ist abhängig von der Bandbreite und der verwendeten Technologie (LTE oder HSDPA). Der minimale SINR-Grenzwert wird mit -5 dB angenommen. Weitere Grenzwerte können der Tabelle 4-3 entnommen werden.⁶⁷ Die Grenzwerte wurden aus dem Dokument TR 36.942 der 3GPP abgeleitet.⁶⁸

⁶⁵ Ofcom (2012b).

⁶⁶ Ofcom (2017), Ofcom (2018).

⁶⁷ Ofcom (2017).

⁶⁸ 3GPP TR 36.942 Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Frequency (RF) system scenarios, Annex A Section A.1, <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/36942.htm>.

Tabelle 4-3: Grenzwerte für das Signal-Störungs-Rausch-Verhältnis (SINR)

Bandbreite (MHz)	Theoretischer SINR Grenzwert	Verwendeter SINR Grenzwert
HSDPA		
5	+0,2 dB	+0,2 dB
10	-3,6 dB	-3,6 dB
LTE		
5	-0,3 dB	-0,3 dB
10	-4,1 dB	-4,1 dB
15	-6,1 dB	-5,0 dB
20	-7,5 dB	-5,0 dB

Quelle: Ofcom (2017, S. 6).

Die Parameter zur SINR-Berechnung können der Tabelle 4-4 entnommen werden. Ofcom verwendete ein standardisiertes Ausbreitungsmodell basierend auf der ITU-R P.1812-2 Empfehlung, dass die Ausbreitung von Funksignalen simuliert.⁶⁹ Zur Modellierung durch Ofcom musste O2 u. a. folgende Daten des Netzwerks bereitstellen: Standort der Mobilfunkstationen, Höhe (m), Bandbreite (MHz), Technologie und Anzahl der Sektoren. Für jeden Sektor wurde zudem die Trägerfrequenz und Ausrichtung (Grad östlich von Nord) erfasst.⁷⁰ In der Modellierung wurden jedem Bevölkerungspunkt⁷¹ die zwanzig räumlich naheliegendsten Mobilfunkbasisstationen zugeordnet. Für jeden Sektor dieser Basisstationen wurde berechnet, wie viel Downlink-Leistung ein Endgerät in 1,5 m Höhe an diesem Punkt empfangen würde. Der Sektor mit der höchsten berechneten Empfangsleistung wurde als versorgender Sektor (*Serving Sector*) für diesen Punkt definiert. Der Serving Sector wurde bei LTE mit maximaler Sendeleistung, bei HSDPA mit 78 % betrieben. Alle anderen nicht versorgenden Sektoren wurden mit einer Sendeleistung von 22 % ihrer Maximalleistung angenommen (gering ausgelastetes Netz). Daraufhin wurde eine SINR-Verteilung durch eine Monte-Carlo-Simulation simuliert. Sobald bei mindestens 90 % der Simulationen der SINR-Wert über dem festgelegten Wert aus Tabelle 4-3 lag, galt der Bevölkerungspunkt als versorgt. Die versorgte Bevölkerung wurde aggregiert, bis 98 % der Gesamtbevölkerung erreicht waren.⁷²

⁶⁹ Ofcom (2017), S. 8.

⁷⁰ Ofcom (2017), S. 8.

⁷¹ Es wird ein Bevölkerungsdatensatz verwendet, der auf Adressdaten auf der Ebene von Postleitzahl-Einheiten basiert. Die Bevölkerung aus dem letzten Zensus wird gleichmäßig auf alle Adresspunkte verteilt. Ofcom (2017), S. 4.

⁷² Ofcom (2017), S. 8–9.

Tabelle 4-4: Parameter zur SINR-Berechnung für HSDPA und LTE

Parameter	HSDPA	LTE				
	900 MHz	800 MHz	900 MHz	1800 MHz	2100 MHz	2600 MHz
Rauschwert	10 dB	10 dB	10 dB	10 dB	9 dB	9 dB
Antennenverstärkung	0 dB	0 dB	0 dB	0 dB	0 dB	0 dB
Sendeleistung versorgender Sektor	78 %	78 %	78 %	78 %	78 %	78 %
Sendeleistung anderer Sektoren	22 %	22 %	22 %	22 %	22 %	22 %
Körper-/Orientierungsverlust ⁷³	2,5 dB	2,5 dB	2,5 dB	2,5 dB	2,5 dB	2,5 dB
Standortverlust in Innenräumen ⁷⁴	13,7 dB	13,2 dB	13,7 dB	16,5 dB	17,0 dB	17,9 dB

Quelle: Ofcom (2017, S. 7).

4.2.6 Auswirkungen der Indoor-Versorgungsaufgabe

Ofcom bestätigte im März 2018, dass O2 die Indoor-Abdeckungsverpflichtung erfüllt hatte. Die Auflage umfasste sowohl das Erreichen als auch das fortlaufende Aufrechterhalten dieser Versorgung.⁷⁵ Die Einhaltung wurde einmal verifiziert. Ofcom ging davon aus, dass eine wiederholte Überprüfung nicht notwendig sei, da eine Verschlechterung der Mobilfunkqualität während des Lizenzzeitraums als unwahrscheinlich angesehen wurde.

Ofcom sah in der angewandten Überprüfungsmethodik mehrere Vorteile: Sie war leichter zu implementieren und durchzuführen als reale Messungen. Es gab eine transparente Kommunikation mit dem Mobilfunkunternehmen und der Öffentlichkeit. Aufgrund des öffentlichen Modells war das Mobilfunkunternehmen zudem in der Lage, vor Ablauf der Frist die Erfüllung der Auflage selbst zu modellieren. Telefónica setzte hierzu auf gezielten Netzausbau, insbesondere durch neue Standorte, kleine Funkzellen und Ausbauten in urbanen Gebieten wie London und Aberdeen.⁷⁶ Die Umsetzung der Indoor-Versorgungsaufgabe fiel zeitlich mit einem erkennbaren Anstieg der Netzqualität und externen Auszeichnungen zusammen. Ob dies kausal zusammenhängt oder auf weitere Faktoren wie allgemeinen Netzausbau, Kooperationen oder Marktstrategie zurückgeht, lässt sich nicht abschließend klären. Ob und in welchem Umfang die beschriebenen Maßnahmen zu messbaren Verbesserungen der Netzqualität oder zu einer veränderten

⁷³ Der Körper- und Orientierungsverlust (*Body/orientation loss*) bezeichnet einen pauschalen Dämpfungswert, der den Signalverlust durch den menschlichen Körper und die Ausrichtung des Endgeräts bei der Pegelmessung berücksichtigt (Ofcom (2017, S. 7), Arup Alliance (2021)).

⁷⁴ Diese Werte werden von Ofcom für die verschiedenen Technologien und Frequenzen vorgegeben. Deren Herleitung ist nicht ersichtlich.

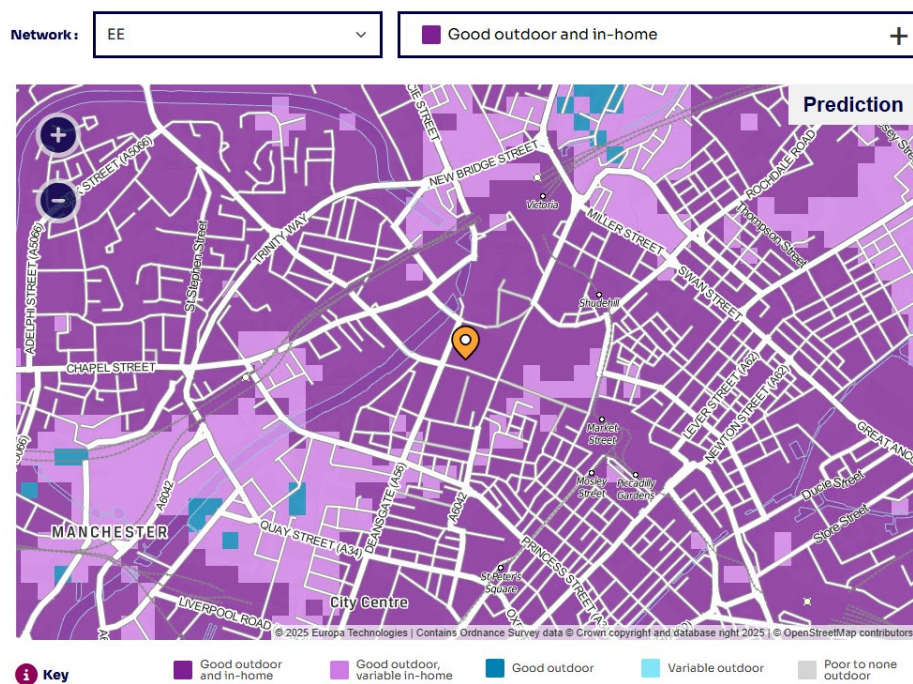
⁷⁵ Ofcom (2018).

⁷⁶ <https://news.virginmediao2.co.uk/archive/o2-builds-future-year-growth-innovation/>, zuletzt abgerufen am 01.07.2025.

Markenwahrnehmung führten, lässt sich daher nicht direkt ableiten. Zwar erhielt O2 in den Folgejahren verschiedene Branchenauszeichnungen, etwa durch uSwitch⁷⁷, doch ein direkter Zusammenhang mit der Indoor-Abdeckungspflicht ist nicht belegt. Insgesamt zeigt sich aber, dass O2 die regulatorische Vorgabe nachweislich erfüllt hat und dabei technische Maßnahmen zur gezielten Netzerweiterung einsetzte.

Ofcom hat das Instrument der Indoor-Versorgungsaufgabe nicht erneut gewählt. Von Seiten der Konsumenten sei eine Indoor-Versorgung zwar wünschenswert, allerdings sei fraglich, ob das eine effiziente Nutzung von Spektrum sei. Regulatorisch müsste eine solche Maßnahme gut gegenüber den Marktteilnehmern begründet werden. Stattdessen fokussiert sich Ofcom mittlerweile auf öffentliche Informationen und Transparenz. Beispielsweise enthält der neu veröffentlichte *Mobile Coverage Checker*⁷⁸ Informationen zur Indoor-Versorgung (vgl. Abbildung 4-2). Solche öffentlichen Informationen und Transparenz könnten Wettbewerb initiieren und so bessere Indoor-Versorgung gewährleisten, ohne konkrete Auflagen zu implementieren.

Abbildung 4-2: Indoor-Versorgungsprognose durch den Mobile Coverage Checker



Quelle: <https://www.ofcom.org.uk/mobile-coverage-checker>, Postleitzahl „M11AD“, zuletzt abgerufen am: 26.09.2025

⁷⁷ <https://news.virginmediaio2.co.uk/archive/uswitch-crowns-o2-as-uks-best-network-for-third-year-running>, zuletzt abgerufen am 01.07.2025.

⁷⁸ <https://www.ofcom.org.uk/mobile-coverage-checker>.

4.2.7 Versorgungsauflagen für Verkehrswege

Für Innenräume in Verkehrsmitteln wurden bisher keine Versorgungsauflagen erlassen. Ähnlich wie in Österreich gibt es aber explizite Outdoor-Versorgungsauflagen für Verkehrswege. Die Shared Rural Network (SRN)-Initiative der britischen Regierung und der Mobilfunknetzbetreiber (EE, O2, Vodafone, Three) aus dem Jahr 2020 sieht Verpflichtungen für Verkehrswege vor. Die Netzbetreiber haben zugestimmt, dass ihre 900-MHz- und/oder 1800-MHz-Lizenzen geändert werden, um neuen Versorgungsaufgaben nachzukommen. Die Betreiber haben sich dazu verpflichtet, bis zum 31. Januar 2027 eine bessere Mobilfunkversorgung für bestimmte Straßenabschnitte bereitzustellen. Ofcom fasst dies als spezielle „Roads Requirements“ zusammen.⁷⁹ So soll die Mobilfunkqualität auf insgesamt 16.000 km Streckenlänge verbessert werden.⁸⁰ Jeder der Netzbetreiber muss eine Streckenlänge x abdecken, die im Jahr 2019 noch nicht durch den jeweiligen Netzbetreiber abgedeckt war. Neu gebaute Straßen nach 2019 sind hiervon ausgenommen. Die Auflage wird nach dem Stichtag im Jahr 2027 durch Drive-Tests von Ofcom und den Netzbetreibern überprüft.⁸¹

Tabelle 4-5: Versorgungsaufgabe zur Straßenabdeckung je Mobilfunknetzbetreiber

Mobilfunknetzbetreiber	Streckenlänge (km)
EE	4.000
Three	4.000
O2	10.000
Vodafone	8.500

Quelle: Ofcom (2024a): Network Licence EE, Ofcom (2024b): Network Licence Hutchison 3G UK, Ofcom (2024c): Network Licence Telefónica, Ofcom (2024d): Network Licence Vodafone.

4.3 Rumänien

Im Rahmen des rumänischen Frequenzlizenzierungsverfahrens wurden bei den Frequenzauktionen in den Jahren 2012, 2021 und 2022 Verpflichtungen zur Indoor-Versorgung eingeführt.⁸²

4.3.1 Ausgangssituation

Im Jahr 2012 waren auf dem rumänischen Mobilfunkmarkt sechs Netzbetreiber vertreten.⁸³ In der Auktion von 2012 ersteigerten fünf davon, Orange Romania, Vodafone Romania, Cosmote (heute Telekom Romania Mobile), RCS & RDS sowie 2K Telekom

⁷⁹ Ofcom (2024f).

⁸⁰ Ofcom (2024e).

⁸¹ Ofcom (2024f), S. 6.

⁸² Siehe dazu ANCOM (2012a, 2021a, 2022a).

⁸³ ANCOM (2012b): Romanian Users Increasingly Access Mobile Broadband Internet.

Frequenznutzungsrechte.⁸⁴ In den darauffolgenden Auktionen ersteigerten im Jahr 2021 wiederum RCS & RDS und Invite Systems S.R.L. Frequenznutzungsrechte,⁸⁵ im Jahr 2022 zum wiederholten Male RCS & RDS sowie Orange Romania und Vodafone Romania.⁸⁶

4.3.2 Gründe für Versorgungsaufgaben in geschlossenen Räumen

Hauptgründe für die Einführung von Indoor-Versorgungsaufgaben waren insbesondere die Verbesserung der Nutzererfahrung in unterversorgten oder stark nachgefragten Gebieten. Die Einführung von Vorschriften zur Innenbereichsabdeckung hatte somit das Ziel, die tatsächlichen Erfahrungen der Endnutzer und ihre bei der rumänischen Regulierungsbehörde ANCOM eingegangenen Beschwerden besser widerzuspiegeln, insbesondere in Bereichen, in denen Kunden überwiegend mobile Dienste nutzen – wie zu Hause, im Büro und in öffentlichen Gebäuden. Die Einführung von Korrekturfaktoren war daher nicht nur eine technische Anpassung des Outdoor-Modells, sondern auch eine regulatorische Maßnahme, um die Betreiber dazu zu bringen, die Diensteverfügbarkeit in den Bereichen zu verbessern, die den Nutzern am wichtigsten waren.

Ein Nachteil besteht jedoch darin, dass ANCOM ausschließlich Messungen im Freien durchführt (mit Ausnahme von Zügen und Flughäfen). Die Abdeckung in Innenräumen wird daher lediglich über Korrekturfaktoren abgeschätzt. Dies kann zu Unsicherheiten führen, da diese Korrekturmargen möglicherweise nicht alle realen Ausbreitungsbedingungen zuverlässig widerspiegeln.

4.3.3 Technische Herleitung der Versorgungsaufgabe

Um die Signalqualität in Innenräumen zu berücksichtigen, hat ANCOM Versorgungsgrenzwerte definiert, die Korrekturfaktoren einbeziehen, die sowohl an das jeweilige Frequenzband als auch an die Einsatzumgebung (städtisch oder ländlich) angepasst sind. Es ist wichtig zu betonen, dass es sich hierbei um Modellannahmen handelt. Die Anwendung der Korrekturfaktoren ermöglicht eine Schätzung der Innenraumleistung, gewährleistet jedoch keine verlässliche Feststellung der Versorgungsqualität unter allen realen Bedingungen, insbesondere in komplexen Innenräumen oder Gebäuden mit hohen Dämpfungsverlusten.

Die Korrekturfaktoren wurden im Vorfeld jeder Frequenzauktion im Rahmen öffentlicher Konsultationen in Abstimmung mit den Mobilfunkanbietern entwickelt. Ihre Aufnahme in die finale Leistungsbeschreibung beruhte sowohl auf technischen Erwägungen als auch

⁸⁴ ANCOM (2012c): Spectrum Auction Successfully Concluded.

⁸⁵ ANCOM (2021): This year's spectrum auction wraps up.

⁸⁶ ANCOM (2022): This year's spectrum auction wraps up.

auf den Rückmeldungen der beteiligten Akteure, mit dem Ziel, Transparenz zu schaffen und eine breite Akzeptanz sicherzustellen.

Die Differenzierung zwischen städtischen und ländlichen Gebieten wurde eingeführt, um den realen Unterschieden bei der Signaldämpfung Rechnung zu tragen. Diese ergeben sich unter anderem durch Gebäudetypen, Baumaterialien, Bebauungsdichte und die architektonische Komplexität. In städtischen Gebieten kommt es typischerweise zu höheren Signalverlusten aufgrund dichter Bebauung, während in ländlichen Regionen die Funksignale Innenräume in der Regel besser durchdringen können. Die Einführung von Korrekturfaktoren – insbesondere für die Modellierung der Innenraumabdeckung – stieß bei den Mobilfunkbetreibern zunächst auf Vorbehalte⁸⁷. Durch Dialog und technische Abstimmung konnte jedoch ein Konsens erzielt werden.

4.3.4 Implementierung der Versorgungsaufgabe

Die Auflagen finden sich in den jeweiligen Lastenheften zu den einzelnen Vergabeverfahren der Frequenznutzungsrechte.⁸⁸ Tabelle 4-6 gibt eine Übersicht über die wichtigsten Vorgaben aus den jeweiligen Verfahren. Die Verpflichtungen verlangen eine generelle Einhaltung der Anforderungen unter üblichen Nutzungsbedingungen, ohne dabei ausdrücklich zwischen Busy Hour und verkehrsarmen Phasen zu differenzieren. Die festgelegten Leistungsgrenzen sollen dabei über den gesamten Tagesverlauf erfüllt werden.

Die „95 %ige Empfangswahrscheinlichkeit in Innenräumen“ ist eine theoretische Annahme, die bei rechnerischen Abdeckungssimulationen verwendet wird. Sie bedeutet, dass in einer Simulation mindestens 95 % der Fläche eines Ortes mit einem ausreichenden Signalpegel versorgt sein sollten. Dabei werden zusätzliche Abschwächungen durch Wände oder Gebäude mithilfe von Korrekturfaktoren berücksichtigt. Diese Annahme ist besonders wichtig, wenn die Netzausbreitung modellgestützt überprüft wird, zum Beispiel in der Planungsphase oder bei der Erstellung von Berichten.

Bei tatsächlichen Messungen gilt ein Ort nur dann als abgedeckt, wenn bei Messungen im Freien auf Straßenebene mindestens 95 % der Fläche tatsächlich ein ausreichendes Signal aufweisen, ohne dass zusätzliche Modellierungen oder Wahrscheinlichkeitsannahmen berücksichtigt werden.

⁸⁷ Die genauen Gründe werden von ANCOM nicht offengelegt.

⁸⁸ Vgl. z. B. für die Vergabe 2022: ANCOM (2022a).

Tabelle 4-6: Versorgungsaufgaben mit Indoor-Bezug in Rumänien

Jahr der Frequenzauktion	Frequenz(en)	Geforderte Datenübertragungsrate	Indoor-Auflage	Bemerkungen	Werte des Korrekturfaktors für die Dämpfung bei der Ausbreitung in Innenräumen	Überprüfung
2012	800, 900 MHz	Abdeckung mit Breitband-Datendiensten mit einer Downlink-Datenübertragungsrate von mindestens 2 Mbit/s	Wahrscheinlichkeit von 95 % für den Empfang in Innenräumen in Gebieten, die von mindestens 60 % (etablierte Betreiber) bzw. 30 % (Newcomer) der Bevölkerung bewohnt werden	Andere Auflagen für Netzbetreiber, die MVNOs Zugang gewähren	Ländliche Gebiete sowie Versorgung entlang nationaler und europäischer Straßen sowie Autobahnen: 6 dB Städtische Gebiete: 12 dB	Outdoormessungen für Städte, Gemeinden und Hauptverkehrsstraßen und Simulationen für Ortschaften (außerhalb von Städten und Gemeinden) unter Anwendung der Korrekturfaktoren
	1.800, 2.600 MHz	Abdeckung mit Breitband-Datendiensten mit einer Downlink-Datenübertragungsrate von mindestens 2 Mbit/s	Wahrscheinlichkeit von 95 % für den Empfang in Innenräumen in Gebieten, die von mindestens 30 % (etablierte Betreiber) bzw. 15 % (Newcomer) der Bevölkerung bewohnt werden	Andere Auflagen für Netzbetreiber, die MVNOs Zugang gewähren	Ländliche Gebiete sowie Versorgung entlang nationaler und europäischer Straßen sowie Autobahnen: 8 dB Städtische Gebiete: 16 dB	s. o.
2021	800 MHz	Abdeckung mit Breitband-Datendiensten mit einer Downlink-Datenübertragungsrate von mindestens 2 Mbit/s	Versorgung von 95 % der Bevölkerung in 56 Ortschaften (als un- oder unzureichend versorgt identifizierte Orte); 95 % Wahrscheinlichkeit für den Empfang in Innenräumen	Andere Auflagen für Newcomer	Wie im Jahr 2012 für ländliche Gebiete	- Netzbetreiber: Meldungen zu Standorten und Technik, Versorgungskarten, Versorgungsgrad mit Berechnung, Messausrüstung, Software, Ausbreitungsmodell und Technologien für jede Ortschaft. - Regulierungsbehörde: Simulationen/Outdoormessungen
2022	700 MHz	Abdeckung mit Breitband-Datendiensten mit einer Downlink-Datenübertragungsrate von mindestens 2 Mbit/s	Versorgung von 95 % der Bevölkerung in 80 Ortschaften (als unzureichend versorgt identifizierte Orte); 95 % Wahrscheinlichkeit für den Empfang in Innenräumen		Für die Abdeckung in ländlichen Gebieten sowie auf Straßen und Autobahnen: 6 dB Städtische Gebiete: 12 dB	Grundsätzlich erfolgt die Überprüfung der Abdeckung wie folgt: - Prognose und/oder Messungen zur Überprüfung der Abdeckungsverpflichtung zu den Feldstärken (Outdoor-)Messungen zur Überprüfung der Datenabdeckung mit einer Downlink-Geschwindigkeit von mindestens 2 Mbit/s
	3400–3800 MHz	Mobile Kommunikationsdienste mit einer Datenübertragungsrate (Downlink) von mindestens 100 Mbit/s	Wahrscheinlichkeit von 85 % für den Empfang in Innenräumen an 13 internationalen Flughäfen		Für die Abdeckung in ländlichen Gebieten sowie auf Straßen und Autobahnen: 8 dB Städtische Gebiete: 16 dB	Indoor-Messungen

Quellen: ANCOM (2012a, 2021a, 2022a)

Im Jahr 2022 wurden für die 700-MHz-Frequenz erstmals konkrete Signalstärken vorgegeben. Für die generelle Outdoor-Abdeckung gilt seitdem: „Die Abdeckung mit mobilen Breitbanddiensten muss ein Funksignal mit einem mittleren Pegel des Pilot-Signals (RSRP, SS-RSRP) bieten, gemessen im Freien in 1,5 m Höhe über dem Boden, bezogen auf eine Antenne mit 0 dBi Gewinn, von mindestens -85 dBm in städtischen Gebieten bzw. -92 dBm in ländlichen Gebieten.“⁸⁹

Für die 80 ausgewählten Ortschaften bei 700 Mhz gilt heute: Der Signalpegel muss mindestens der Empfängerempfindlichkeit entsprechen, die auf mindestens -104 dBm (outdoor) festgelegt wurde.⁹⁰ Zusätzlich werden zwei Aufschläge berücksichtigt: +10 dB Sicherheitsreserve (um allgemeine Schwankungen und Störungen auszugleichen) und der jeweilige Korrekturfaktor für Gebäudedämpfung, damit auch Indoor-Nutzung möglich ist.⁹¹ Damit entspricht für Gemeinden die geforderte Signalstärke outdoor städtisch: -82dBm und outdoor ländlich: -88 dBm.

Des Weiteren wird neben der zu erfüllenden Mindestdatenrate (2 Mbit/s bei 700 Mhz) eine bestimmte Signalqualität (SINR $\geq$ -5 dB) gefordert.

4.3.5 Operationelle Überprüfung sowie Herausforderungen und Probleme

Die Regulierungsbehörde führt grundsätzlich keine Indoor-Messungen durch. Wie in Tabelle 4-6 dargestellt, werden die Versorgungsaufgaben auf verschiedene Weise überprüft. Die Outdoor-Messungen wurden mit Hilfe von Fahrzeugen durchgeführt, die entsprechende Antennen auf dem Dach verbaut hatten.⁹² Es gab während der letzten Jahre verschiedene Messkampagnen, wie Tabelle 4-7 zeigt.

Tabelle 4-7: Messungen der Mobilfunkversorgung in Rumänien

Jahr	Messzeitraum	Anzahl Ortschaften	Straßenabdeckung (km)	Abgedeckte Bevölkerung*	Messpunkte (50x50 m)
2019	Mai – September	13.377	246.000,00	20.116.255	
2020	August – Dezember	13.398	249.175,00	(von 20.121.587 laut INS 2011)"	
2021	September – Dezember	1.786	25.156,00	20.117.553	
2022	Mai – Oktober	13.388	>240.000	Fokus auf Gebiete mit Netzverbesserungen; Metro-Netz (Bukarest) integriert	3.581.833 (davon 383.828 neu)"
2024	April – Oktober	13.283	>240.000	20.116.846	3.471.739

Quelle: ANCOM, <https://www.aisemnal.ro/despre-harta>, zuletzt abgerufen am 25.05.2025.

⁸⁹ ANCOM (2022a), S. 37, Übersetzung aus dem Rumänischen mit ChatGPT.

⁹⁰ ANCOM (2022a), S. 78.

⁹¹ ANCOM (2022a), S. 76.

⁹² Vgl. <https://www.aisemnal.ro/masuratori>, zuletzt abgerufen am 23.05.2025.

Die jährlichen Messkampagnen wurden so lange fortgeführt, bis die Mobilfunknetzbetreiber ihre Versorgungsverpflichtungen weitgehend erfüllt hatten. Da diese nun größtenteils erreicht sind, zieht ANCOM in Betracht, die Häufigkeit der Kampagnen zu reduzieren – etwa auf einen Turnus von zwei bis drei Jahren – oder künftig stichprobenartige Kontrollen durchzuführen, um die nachhaltige Einhaltung der vorgeschriebenen Versorgungsstandards sicherzustellen.

Ergänzend zu diesen großflächigen Erhebungen können auch gezielte Messungen in ausgewählten Gebieten erfolgen. Alle Messungen (außer in Zügen und Flughäfen) werden im Außenbereich vorgenommen und basieren auf einer transparenten, standardisierten Methodik, die öffentlich auf der Plattform [aisemnal.ro](https://www.aisemnal.ro) zugänglich ist.⁹³

Die Überprüfung der Auflagen stellte in der Vergangenheit eine enorme Herausforderung dar, da sie die Auswertung einer großen Anzahl von Messungen erforderte, um die landesweiten Mobilfunkverpflichtungen zu bewerten. Aufgrund des großen Umfangs der Kampagnen, die Tausende von Gemeinden und umfangreiche Straßennetze umfassten, wurden enorme Mengen an Rohmessdaten generiert. Um diese Datenmenge zu verarbeiten und zu interpretieren war ein erheblicher Aufwand notwendig.

Darüber hinaus waren standardisierte Methoden und zentralisierte Validierungsprozesse erforderlich, um die Einheitlichkeit der Messverfahren über mehrere Regionen und Teams hinweg zu gewährleisten. Dies stellte sicher, dass die Messungen konsistent und zuverlässig durchgeführt wurden, um eine genaue Bewertung der Mobilfunknetze zu ermöglichen.

Die Entscheidung für Außenmessungen in Kombination mit Korrekturfaktoren für den Innenbereich basiert auf deren Praktikabilität, Skalierbarkeit und Transparenz. Dieses Vorgehen ermöglicht eine landesweit einheitliche Überprüfung der Netzabdeckung unter Einsatz standardisierter Geräte und Verfahren – und das ohne den organisatorischen Aufwand, der mit Innenraummessungen verbunden wäre. Aus diesem Grund gilt die derzeit angewandte Methodik als ein ausgewogener Kompromiss zwischen technischer Genauigkeit, effizientem Ressourceneinsatz und rechtlicher Umsetzbarkeit.

Mobilfunknetzbetreiber hingegen nutzen Ausbreitungsmodelle, um ihre Mobilfunkabdeckung zu modellieren. Diese Modellvorhersage wird laut eines Betreibers dann mit den tatsächlichen Messungen von ANCOM intern verglichen. Der Vergleich dient den Netzbetreibern einerseits zur Verbesserung ihrer eigenen Ausbreitungsmodelle. Andererseits kommt es auch zu Problemen hinsichtlich der Feststellung der Netzabdeckung in den unterversorgten Gebieten. Hier gibt es nach Angaben eines Netzbetreibers Abweichungen zwischen den Ergebnissen der Messungen durch ANCOM und der modellierten Abdeckung des Netzbetreibers. Zudem wird seitens der Branche kritisiert, dass die

93 <https://www.aisemnal.ro/masuratori>, zuletzt abgerufen am 06.10.2025.

Berechnung der Mobilfunkabdeckung und die Methoden der Datenauswertung durch ANCOM nicht transparent seien.

4.3.6 Auswirkungen der Indoor-Versorgungsaufgabe

Die Umsetzung der Versorgungsverpflichtungen hat zu einer deutlichen Verbesserung der Mobilfunkqualität in unterversorgten Gebieten geführt. Durch die Durchsetzung von allgemeinen und ortsspezifischen Verpflichtungen haben die Netzbetreiber ihre Infrastruktur erweitert und optimiert, was zu einer verbesserten geografischen Abdeckung und einer höheren Verfügbarkeit von Datendiensten geführt hat.

Die regelmäßigen Messkampagnen von ANCOM, deren Ergebnisse unter anderem auf der Website www.aisemnal.ro veröffentlicht werden, zeigen eine kontinuierliche Verbesserung der Signalqualität und -verfügbarkeit, insbesondere bei Sprachdiensten und der 4G-Abdeckung.

ANCOM verfolgt den Ansatz zur Regulierung der Indoor-Abdeckung auch weiterhin. Das aktuelle Modell, das auf Außenmessungen und Korrekturfaktoren basiert, bleibt somit gültig. ANCOM beobachtet jedoch auch die internationalen Entwicklungen im Bereich der Mobilfunkabdeckung und die Integration der Indoor-Leistung in regulatorische Rahmenbedingungen.

4.3.7 Versorgungsaufgaben für Verkehrswege

Obwohl Korrekturfaktoren zur Dämpfung der Ausbreitung in Innenräumen bereits im Rahmen der Auktion 2012⁹⁴ auch für Verkehrswege erwähnt wurden, erfolgten Vorgaben zur Versorgung für konkrete Verkehrswege erstmals im Jahr 2022.⁹⁵ So gilt auf gewissen Autobahn- und Eisenbahnabschnitten für etablierte Anbieter, die 700-MHz-Frequenznutzungsrechte erworben haben, ⁹⁶ dass sie ein Funksignal mit einem durchschnittlichen Feldpegel des Pilotsignals (RSRP, SRSRP) sicherstellen müssen, das im Außenbereich in 1,5 m Höhe über dem Boden gemessen wird. Dabei ist eine Antenne mit 0 dBi Gewinn zugrunde zu legen. Der Mindestwert beträgt -92 dBm. Die Umsetzung erfolgt in zwei Etappen, wobei 85 % der Länge des jeweiligen Abschnitts innerhalb von vier Jahren ab dem Datum der Zuteilung der Rechte abgedeckt werden müssen, jedoch spätestens bis zum Ende der Gültigkeit der Lizenz. Die restlichen 10 % der Abschnittslänge sind innerhalb von sechs Jahren ab dem Datum der Zuteilung der Rechte zu versorgen, ebenfalls spätestens bis zum Ende der Gültigkeit der Lizenz.

Im Fall der Eisenbahnstrecken werden die Messungen bei Reisegeschwindigkeit des Zuges durchgeführt, wobei die Antennen im Inneren des Wagens, nahe oder in Höhe der

⁹⁴ ANCOM (2012a), S. 32.

⁹⁵ ANCOM (2022a), S. 37 ff.

⁹⁶ ANCOM (2022a), S. 37 ff.

verglasten Flächen, in einer Höhe angebracht werden, die sicherstellt, dass der Ausbreitungskanal auf beiden Seiten des Wagens nicht abgeschirmt wird. Dabei wird der höhere der beiden gemessenen Pegel berücksichtigt. Zudem wird der Schwellenwert für die im Zuginneren durchgeführten Messungen um einen durch Messungen bestimmten Wert oder um 7 dB angepasst.⁹⁷

4.4 Frankreich

In Frankreich gibt es keine flächen- oder bevölkerungsbezogenen Indoor-Versorgungsaufgaben. Die verpflichtenden Abdeckungsziele richten sich auf den Außenbereich. Arcep schreibt Mobilfunknetzbetreibern jedoch sogenannte „Indoor-Maßnahmen“ vor. Diese unterscheiden sich von klassischen Versorgungsaufgaben, wie sie am Beispiel der vorherigen Länder beschrieben worden sind. Die Mobilfunknetzbetreiber sind angehalten, Maßnahmen zu verfolgen und Technologien bereitzustellen, um eine bessere Indoor-Mobilfunkversorgung zu gewährleisten. In Frankreich gibt es derzeit vier große Anbieter, die ein eigenes Mobilfunknetz betreiben: Orange, SFR, Bouygues Telecom und Free.

4.4.1 Ausgangssituation

Im Jahr 2017 lag Frankreich im Vergleich mit anderen europäischen Ländern deutlich in der Mobilfunkqualität zurück.⁹⁸ Zudem gab es starke regionale Unterschiede in der Mobilfunkverfügbarkeit. Deshalb verkündete Frankreichs Präsident Emmanuel Macron im Juli 2017 mehrere Ausbauziele: Gewährleistung eines schnellen Internetzugangs (über 8 Mbit/s) für alle Bürgerinnen und Bürger, Aufbau von schnellen Zugangsnetzen (mit mehr als 30 Mbit/s) in allen Regionen des Landes bis zum Jahr 2022 und flächendeckenden Mobilfunk bis zum Jahr 2020. Zur Verbesserung der Mobilfunkabdeckung wurde Arcep beauftragt, verbindliche Verpflichtungen auszuarbeiten, die gemeinsam mit Netzbetreibern getroffen werden können. In einem Dialog zwischen Staat, Arcep und den Mobilfunknetzbetreibern wurde der New Deal Mobile geschlossen, welcher Maßnahmen zur Verbesserung des Mobilfunks umfasst. Diese Maßnahmen wurden im Kontext einer Verlängerung der Frequenznutzungsrechte für 900 MHz, 1800 MHz und 2,1 GHz in die Lizenzen aufgenommen.⁹⁹

4.4.2 Maßnahmen zur verbesserten Indoor-Versorgung

Die aktuellen Indoor-Maßnahmen leiten sich aus dem oben beschriebenen New Deal Mobile aus dem Jahr 2018 ab. So müssen alle Mobilfunknetzbetreiber ihren Kunden

⁹⁷ ANCOM (2022a), S. 80.

⁹⁸ Siehe bspw. Downloadgeschwindigkeiten bei Opensignal (2017): <https://www.opensignal.com/reports/2017/02/global-state-of-the-mobile-network>, zuletzt abgerufen am: 23.07.2025.

⁹⁹ Arcep (2018a); Arcep (2018b); Arcep (2022b).

Sprachanrufe und SMS-Versand über WiFi ermöglichen, damit Nutzende bei schlechter Mobilfunkabdeckung in Innenräumen darauf ausweichen können.¹⁰⁰

Im Rahmen der Frequenzauktion 2020 (3,4–3,8 GHz) wurden zudem zwei Auflagen zur Verbesserung der Indoor-Mobilfunkversorgung in Unternehmen und öffentlichen Einrichtungen eingeführt. Diese betreffen den Anschluss von Distributed Antenna Systems (DAS) und die Bereitstellung von Multi-Operator-Lösungen für Small Cells.¹⁰¹ Die Mobilfunknetzbetreiber sind verpflichtet, auf Antrag des Kunden den Anschluss ihres Netzes an ein von Dritten installiertes DAS zu ermöglichen. Diese DAS bestehen aus mehreren im Gebäude verteilten Antennen, die für eine leistungsfähige Indoor-Abdeckung sorgen. Die Betreiber sind verpflichtet, Anschlussanträgen innerhalb eines angemessenen Zeitrahmens nachzukommen. Voraussetzung ist, dass das System die technischen Anforderungen des veröffentlichten Lastenhefts erfüllt. Die Preiskonditionen zur Verbindung mit dem Netzwerk müssen marktgerecht sein und veröffentlicht werden.¹⁰² Zum anderen müssen Netzbetreiber gemeinsam nutzbare Small-Cell-Lösungen bereitstellen. Diese Verpflichtung zielt darauf ab, die parallele Nutzung durch mehrere Betreiber (Multi-Operator) zu ermöglichen. Insbesondere in größeren Gebäuden müssen die Betreiber Lösungen anbieten, die eine gleichzeitige Nutzung durch alle Netzbetreiber sicherstellen. Für Unternehmen und öffentliche Einrichtungen muss diese Multi-Operator-Versorgung zu einem kompetitiven Preis bereitgestellt werden.¹⁰³

4.4.3 Messungen und Transparenz über die Mobilfunkversorgung

Arcep veröffentlicht Abdeckungskarten¹⁰⁴ für die Mobilfunkversorgung in vier Qualitätsstufen (keine / begrenzte / gute / sehr gute Abdeckung) für Sprach-/SMS- und Datendienste. Gute bzw. sehr gute Abdeckung beschreibt die Wahrscheinlichkeit, dass Datendienste indoor in einigen bzw. in den meisten Fällen genutzt werden können. Diese Abdeckungskarten werden durch Simulationen der Netzbetreiber erstellt. Die Simulation berücksichtigt den Standort der Mobilfunkmasten, ihre Sendeleistung und die Topografie. Arcep überprüft die simulierte Abdeckung stichprobenhaft mit regelmäßigen Outdoor-Messkampagnen. Dabei muss mindestens eine Zuverlässigkeitsrate von 98 % erreicht werden.¹⁰⁵ Für eine gute Versorgung wird ein Korrekturfaktor von -10 dB mit einem Mobilfunk-Dämpfungsfilter herangezogen, für eine sehr gute Abdeckung -20 dB.¹⁰⁶ Die Überprüfung der Versorgungssimulation besteht in einem Test zur Durchführung von Sprachanrufen und dem Download einer Datei. Für Sprachdienste besteht der Test darin, einen Anruf aufzubauen, der innerhalb von 30 Sekunden einen Klingelton erzeugt. Für Datendienste wird getestet, ob eine 512-Byte-Datei in weniger als 15 Sekunden

¹⁰⁰ Arcep (2018a); Arcep (2022b).

¹⁰¹ Arcep (2020a).

¹⁰² Arcep (2020a), S. 17–18; Arcep (2022a); Arcep (2022b).

¹⁰³ Arcep (2020a), S. 17–18; Arcep (2022a); Arcep (2022b).

¹⁰⁴ Siehe: <https://monreseaumobile.Arcep.fr/>, zuletzt abgerufen am: 23.07.2025.

¹⁰⁵ Arcep (2024b); Arcep (2020b).

¹⁰⁶ Arcep (2024a), S. 17; BEREC & RSPG (2017).

heruntergeladen werden kann. Diese Tests werden mit den jeweiligen Dämpfungen durchgeführt.¹⁰⁷

In jährlich durchgeführten Messkampagnen wird zudem die Versorgungsqualität überprüft. Für das Jahr 2024 wurden so über eine Millionen Messungen durchgeführt. Diese finden outdoor wie indoor und innerhalb wie außerhalb von Verkehrsmitteln bzw. -wegen statt.¹⁰⁸ In der Abdeckungskarte werden für jeden Datenpunkt die genauen Messumstände (Datum, Endgerät, Anruf-/SMS-/Datendienst-Test) angegeben.¹⁰⁹

4.4.4 Versorgungsaufgaben für Verkehrswege und Bahnstrecken

Es gelten besondere Verpflichtung für die Netzabdeckung in definierten Gebieten des Straßen- und Schienenverkehrs. Diese Verpflichtungen wurden ursprünglich im Jahr 2019 im Rahmen des oben beschriebenen New Deal Mobile definiert.¹¹⁰ Durch den New Deal Mobile sind Bouygues Telecom, Orange und SFR verpflichtet, auf 100 % der vorrangigen Straßen¹¹¹ im Innenraum der Fahrzeuge Sprach-, SMS- und Datendienste anzubieten. Die betroffene Streckenlänge dieser Straßen umfasst insgesamt 54.913 km. Orange und SFR mussten bis zum 25.01.2022 und Bouygues Telecom bis zum 09.10.2025 Mobilfunkdienste innerhalb von Fahrzeugen auf diesen Straßen anbieten. Dabei muss ein Mobiltelefon eine Downloadgeschwindigkeit von 60 Mbit/s bei 10 MHz Bandbreite erreichen.¹¹² Diese Versorgungsaufgaben wurden im November 2020 in den Lizenzen der jeweiligen Anbieter für das 3,5-GHz-Band festgelegt.¹¹³

Für das oberirdische regionale Schienennetz¹¹⁴ gelten weitere Vorgaben. So mussten Bouygues Telecom, Free Mobile, Orange und SFR bis zum 17.01.2022 auf 60 % des nationalen Streckennetzes die Versorgung im Innenraum der Züge sicherstellen. Bis zum Januar 2027 müssen alle Betreiber eine Abdeckung von 80 % auf nationaler und 60 % auf regionaler Ebene des Streckennetzes erreichen. Bis zum Dezember 2030 müssen 90 % der Strecken auf nationaler Ebene und 80 % auf regionaler Ebene abgedeckt werden. Dabei muss eine Downloadgeschwindigkeit von 60 Mbit/s bei einer Bandbreite von

¹⁰⁷ Arcep (2024a), S. 11 und S. 17; BEREC & RSPG (2017).

¹⁰⁸ Arcep (2025a).

¹⁰⁹ Beispiel für einen [Datenpunkt](#), zuletzt abgerufen am: 29.07.2025.

¹¹⁰ Arcep (2019b); Arcep (2023); Arcep (2025c).

¹¹¹ Vorrangige Straßen sind: Autobahnen; Verbindungsstraßen innerhalb eines Départements, die Departementhauptstadt mit den Bezirkshauptstädten verbinden (bei mehreren Verbindungsstraßen muss min. eine versorgt werden); und Straßenabschnitte mit durchschnittlich min. 5000 Fahrzeugen pro Tag (Arcep, 2023).

¹¹² Arcep (2019b); Arcep (2023); Arcep (2025c).

¹¹³ Arcep (2023).

¹¹⁴ Das oberirdische regionale Schienennetz umfasst: *Transport express régional* (TER, Regionale Expressstrecken) in Metropolregionen außerhalb von Paris und Korsika; alle TER-Stufen und Transilien (Vortzüge) im Großraum Paris; und alle Züge auf Korsika.

10 MHz sichergestellt werden.¹¹⁵ Diese vorgenannten Versorgungsaufgaben sind in der Nutzungslizenz des 700-MHz-Bands festgehalten.¹¹⁶

Diese Versorgungsaufgaben werden durch Arcep verifiziert. Für die Verpflichtung zur Abdeckung im Fahrzeug wurde die Einhaltung bereits für die Betreiber Orange und SFR überprüft, die diese im Jahr 2022 zu erfüllen hatten. In diesem Fall wurden Benchmarking-Geräte¹¹⁷ verwendet, die die Mobilfunkqualität erfassen. Hierfür nutzte Arcep¹¹⁸ das Accuver XCAL-PU9¹¹⁹ und Accuver XCAL-Pu12¹²⁰. Diese Geräte wurden im Fahrzeug platziert. Die Benchmarking-Geräte können simultan mit mehreren Smartphones verbunden werden. Dabei müssen 95 % der Tests in den als abgedeckt gemeldeten Gebieten erfolgreich sein. In den Tests wurde zunächst überprüft, ob innerhalb von 30 Sekunden ein Klingelton für den Sprachdienst erzeugt werden konnte. Zudem wurde das Herunterladen einer 512 Byte großen Datei innerhalb von 15 Sekunden für mobiles Internet überprüft (vgl. Kapitel 4.4.3).¹²¹ Die Lizenzen sehen vor, dass die Dienste bei min. 95 % der Verbindungsversuche verfügbar sein müssen. Diese Verfügbarkeit ist innerhalb fahrender Fahrzeuge zu gewährleisten und gilt rund um die Uhr, auch zu Stoßzeiten.¹²² Die Methode zur Überprüfung der Versorgungsaufgabe im Innenraum von Zügen wird aktuell noch von Arcep erarbeitet. Hierbei spielen mehrere Faktoren eine Rolle, wie beispielsweise die Bauweise des Zugs oder die Berücksichtigung der Busy Hour.

Die Messdaten zur Überprüfung der Versorgungsaufgabe werden nicht veröffentlicht. Im Rahmen der jährlichen Qualitätsmessung werden hingegen auch Messungen mit Smartphones in Zügen und Autos durchgeführt, die veröffentlicht werden (s. Kapitel 4.4.3).¹²³ Für die Qualität der Abdeckung gibt es für Verkehrswege drei Qualitätsstufen (nicht erfolgreich / teilweise erfolgreich / erfolgreich). Für Datendienste müssen dabei an dem jeweiligen Standort zehn Webseiten im Durchschnitt in mehr als 10 Sekunden / weniger als 10 Sekunden / weniger als 5 Sekunden vollständig geladen werden. Für Sprachdienste bricht der Anruf unter 120 Sekunden ab / wird 120 Sekunden lang aufrechterhalten und der niedrigste MOS-Wert¹²⁴ liegt unter/über 2,1.¹²⁵

¹¹⁵ Arcep (2019b); Arcep (2023); Arcep (2025c).

¹¹⁶ Arcep (2023).

¹¹⁷ Für die Messpunkte in der „Mon Réseau Mobile“ werden Smartphones verwendet, siehe bspw. diesen [Datenpunkt](#), zuletzt abgerufen am: 22.08.2025.

¹¹⁸ Siehe <https://www.accuver.com/sub/company/newsEvent.php?boardid=news&idx=50&mode=view&utm>, zuletzt abgerufen am: 22.08.2025.

¹¹⁹ Siehe <https://www.accuver.com/sub/products/view.php?idx=8>, zuletzt abgerufen am: 22.08.2025.

¹²⁰ Siehe <https://www.accuver.com/products/network-optimization/XCAL-PU12>, zuletzt abgerufen am: 22.08.2025.

¹²¹ Arcep (2024a), S. 11 und S. 17–18.

¹²² Arcep (2019a), S. 38.

¹²³ Siehe: <https://monreseaumobile.arcep.fr/>. Messungen für [Schienenwege](#) und für [Straßen](#), zuletzt abgerufen am: 29.07.2025.

¹²⁴ Der MOS-Wert ist definiert als eine Note, die von einem Algorithmus vergeben wird, der die Übereinstimmung eines Eingangssignals mit einem Ausgangssignal bewertet. Er reicht von 0 bis 5. Das Eingangssignal wird in 10-Sekunden-Unterproben unterteilt. Damit der Test erfolgreich ist, müssen alle Teilproben einen MOS-Wert von über 2,1 aufweisen (vgl. [Arcep](#), zuletzt abgerufen am: 20.08.2025).

¹²⁵ Siehe [Arcep](#), zuletzt abgerufen am: 20.08.2025.

4.4.5 Auswirkungen der Maßnahmen des New Deal Mobile

Die Entwicklung des Mobilfunks wird durch Arcep quartalsweise berichtet.¹²⁶ Arcep beschreibt die Entwicklung durch den New Deal Mobile als Erfolg. Es wurde eine flächendeckende 4G-Abdeckung und eine Verbesserung der Abdeckung der Transportwege erreicht.¹²⁷ Zudem erhalten 95 % der Bevölkerung eine sehr gute Abdeckung mit Mobilfunk, die somit laut Definition in den meisten Fällen auch indoor verfügbar ist.¹²⁸

¹²⁶ Siehe <https://www.data.gouv.fr/datasets/mon-reseau-mobile/>, zuletzt abgerufen am: 23.07.2025.

¹²⁷ Arcep (2025b).

¹²⁸ Siehe <https://monreseau-mobile.arcep.fr/?page=couverture-theorique&lang=fr&theme=default&territory=perimetreMetro&departement=M%C3%A9tropole&id=metropole&operators=20801&techno=4g&service=internet>, zuletzt abgerufen am: 23.07.2025.

4.5 Länderüberblick

Tabelle 4-8: Erkenntnisse aus dem Ländervergleich für Indoor-/InCar-/InTrain-Versorgungsauflagen

Land (Regulierungs- behörde)	Gründe für die Versorgungsaufgabe Indoor/InCar/InTrain	Implementierung der Ver- sorgungsaufgabe	Operationelle Überprüfung	Auswirkungen der Versor- gungsaufgabe	Ausblick auf zukünftige Versorgungsaufgaben
Österreich (RTR)	- Unzureichende Abdeckung spezifischer ländlicher Gemeinden mit festen Breitbandanschlüssen - Keine Auflage InCar/InTrain	- Auswahl der zu versorgenden Gemeinden - Versorgungsaufgabe an Frequenzband geknüpft - Vorgabe von Mindestdatenraten	- Propagationsmodelle der MNB - Überprüfung durch Outdoor-Messungen mit Dämpfungsglied	Messbare Verbesserung der Mobilfunkqualität	- Keine erneute Indoor-Auflage - Problem des fehlenden Breitbands behoben - Bessere Indoor-/InCar-/InTrain-Versorgung kann über strengere Outdoor-Auflagen erreicht werden
Vereinigtes Königreich (Ofcom)	Verbesserung der Mobilfunkversorgung im ländlichen Raum	Indoor-Versorgungsaufgabe gebunden an ein Frequenzband für nur einen MNB	- Propagationsmodell durch Ofcom - Vorab Transparenz über das Modell	- Verbesserung der Mobilfunkversorgung - Asymmetrische Auflage bewegt alle Marktteilnehmer zu besserer Versorgung	- Keine erneute Indoor-Versorgungsaufgabe - Indoor-Auflage wird nicht als effiziente Nutzung von Spektrum bewertet
Rumänien (ANCOM)	Verbesserung der Nutzererfahrung in unterversorgten oder stark nachgefragten Gebieten	Bereitstellung einer Mindestdatenrate	- Überwiegend Outdoor-Messungen - Nutzung von Korrekturfaktoren, die band- und regionenspezifisch sind	Deutliche Verbesserung der Mobilfunkqualität in unterversorgten Gebieten	- Indoor-Abdeckung bleibt zukünftigen Frequenzuteilungen erhalten. - Nutzererlebnis bleibt ein relevanter Aspekt
Frankreich (Arcep)	- Im EU-Vergleich langsame Downloadgeschwindigkeiten - Kein flächendeckendes Mobilfunknetz	- Einigung auf Maßnahmen zur Indoor-Verbesserung - Keine Indoor-Auflagen - Auflagen für die Versorgung in Verkehrsmitteln - Rechtliche Verbindlichkeit durch Lizenzen	- Outdoor-Messungen mit verschiedenen Dämpfungsfaktoren und Messungen in Verkehrsmitteln - Transparente Darstellung der Ergebnisse der öffentlichen Messkampagne	Signifikante Verbesserung der Mobilfunkqualität	Öffentliche Transparenz über Mobilfunkqualität

Quelle: WIK, die Zusammenfassung basiert auf der durchgeführten Analyse.

5 Fazit und Ausblick

Die Erfahrungen in den hier betrachteten Ländern zeigen, dass bei der Umsetzung von Indoor-/InCar-/InTrain-Auflagen sowohl Vor- als auch Nachteile mit entsprechenden Transaktionskosten entstehen, wobei sich die Motive für die Einführung von Indoor-Vorgaben durchaus unterscheiden können.

In Österreich zielte die Regulierung darauf ab, eine mobile Alternative für Regionen mit unzureichendem Festnetz-Breitband zu schaffen. Ofcom in Großbritannien betrachtete die Indoor-Auflage als notwendige Ergänzung zum marktbasierten Ausbau, um eine flächendeckende Versorgung sicherzustellen. In Rumänien stand die Verbesserung der tatsächlichen Nutzererfahrung im Mittelpunkt, insbesondere in stark nachgefragten oder unterversorgten Gebieten. Frankreich verfolgte ähnliche Ziele, nachdem das Land 2017 im europäischen Vergleich deutliche Defizite in der Mobilfunkqualität und starke regionale Unterschiede aufwies. Festzuhalten bleibt aber auch, dass im Großteil der europäischen Länder keine Indoor-Auflagen bestehen.¹²⁹

Bezüglich der Vor- und Nachteile sind Outdoor-Auflagen grundsätzlich technisch einfacher, klarer zuzuordnen und politisch leichter durchsetzbar. Sie legen die Basis für allgemeine Mobilfunkversorgung. Indoor-Auflagen gehen einen Schritt weiter in Richtung der Nutzerperspektive, sind aber komplexer in der Umsetzung und schwerer kontrollierbar. Die wesentlichen Vor- und Nachteile von Indoor-Auflagen in Gebäuden sind in Tabelle 5-1 zusammengefasst.

Tabelle 5-1: Vor- und Nachteile von Indoor-Versorgungsauflagen

Vorteile	Nachteile
Bei Umsetzung: Bessere Erreichbarkeit und Datennutzung in Gebäuden (z. B. Büros, Wohnungen etc.)	Monitoring der Auflage schwieriger: • Messung Innerhalb von Gebäuden: ○ Zugang schwieriger ○ Gebäudespezifische Merkmale erschweren einheitliche Messung • Messung außerhalb macht Abschätzung der Signaldämpfung notwendig → Verzerrungen möglich durch abstrakten Korrekturfaktor
Ausbau dort, wo Nutzen für die Bevölkerung hoch ist (im Vgl. zu Outdoor-Auflagen)	Begrenzter Beitrag zur Flächenabdeckung
Standardisierte und zuverlässige Qualität kann Geschäftsmodelle und flexible Arbeitsformen begünstigen	Netzplanung sehr feinkörnig (raumbezogen), Planung auf Gebäudeebene nötig: Höherer Aufwand pro Standort
Gleichbehandlung aller Nutzergruppen	Alternative Technologien für die Innenraumabdeckung einsetzbar (WiFi, DAS)

Quelle: Eigene Darstellung.

¹²⁹ Sörries et al. (2020), S. 9. Diese Studie nennt Zahlen für das Jahr 2017. Eine aktuelle Recherche ergab keine wesentlichen Veränderungen.

Entscheidet man sich für die Umsetzung einer Indoor-Auflage, sind belastbare Mess- und Prüfverfahren entscheidend, um die Mobilfunkversorgung innerhalb von Gebäuden objektiv zu erfassen. Zunächst muss festgelegt werden, welche Qualitätsparameter gemessen werden sollen, etwa Signalstärke (RSRP), Datenrate oder Signalqualität (SINR). Diese Parameter müssen realitätsnah unter typischen Nutzungsbedingungen geprüft werden, z. B. in verschiedenen Räumen, bei geschlossenen Fenstern oder mit baulichen Abschirmungen. Wichtig ist auch die zeitliche Komponente: Die Messung sollte nicht nur punktuell, sondern über bestimmte Zeiträume hinweg stattfinden, um Schwankungen zu erfassen. Weiterhin braucht es standardisierte Messgeräte und -methoden, die einheitlich eingesetzt werden können. Eine weitere Herausforderung ist die Vergleichbarkeit zwischen unterschiedlichen Wohnlagen, Gebäudetypen und Nutzungsszenarien. Hierfür sind Klassifizierungen und Referenzwerte erforderlich.

In der Wissenschaft existieren für die Vorhersage von Verlust- und Dämpfungswerten verschiedene Methoden. Machine- und Deep-Learning-Modelle ersetzen dabei zunehmend frühere Ansätze.¹³⁰ So wurden im Laufe der Jahre verschiedene empirische Ausbreitungsmodelle entwickelt. Diese Modelle basieren auf Messdaten eines bestimmten Standorts und sind recheneffizient, erfassen jedoch nicht alle komplexen Welleneffekte, die die Funkverbindung beeinflussen. Deterministische Modelle liefern genauere, standortspezifische Vorhersagen. Sie sind jedoch sehr rechenintensiv.¹³¹ Machine-Learning-basierte Modelle kombinieren klassische Pfadverlustmodelle mit Deep Learning auf Basis geografischer und bildbasierter Umgebungsdaten, um komplexe nichtlineare Effekte zu erfassen und die Vorhersagegenauigkeit der Empfangsqualität (RSRP) gegenüber traditionellen Verfahren deutlich zu verbessern. Im Hinblick auf Indoor-Messungen ist dies also ein Fortschritt. Andererseits können auch solche Modelle nur annähernd die realen Werte vor Ort bestimmen.

Bei der Anwendung von Indoor-Versorgungsaufgaben ist also eine Abwägung zwischen einer stärkeren Gewichtung der Nutzerperspektive einerseits und der möglichen Granularität bzw. Zielgenauigkeit bei der Überprüfung der Auflagen andererseits erforderlich. Ebenso ist abzuwägen, inwiefern Versorgungsaufgaben eingesetzt werden können, um Wettbewerb zu initiieren.

Zudem könnten Indoor-Vorgaben für den Zugang zu Infrastrukturen (wie am Beispiel Frankreich gezeigt) die Versorgung verbessern, ohne ex-ante eine konkrete Versorgungsaufgabe zu erlassen. Dabei gibt es verschiedene Möglichkeiten, um die mobile Empfangsqualität innerhalb von Gebäuden zu verbessern. Es können WLAN-Netzwerke oder ein Distributed Antenna System (DAS) als Ergänzung eingesetzt werden. Diese

¹³⁰ Mladenović et al. (2022).

¹³¹ Seretis und Sarris (2021). Beispielhafte empirische Modelle sind Okumura-Hata oder Walfish-Bertoni; bei den deterministischen Ansätzen zählen Verfahren auf Basis von Maxwell-Gleichungen, Ray-Tracing oder anderen numerischen Methoden.

Maßnahmen können vom Nutzer initiiert werden und müssen vom Netzbetreiber umgesetzt werden.

Zudem bietet sich die Nutzung von WLAN-Calling als Alternative bei schwachem Mobilfunksignal an. In Verkehrsmitteln lassen sich Außenantennen einsetzen, um ein stärkeres Mobilfunksignal zu erhalten.

Abzuwarten bleibt für Deutschland, wie konsequent die Deutsche Bahn und die Mobilfunkanbieter den Ausbau und die Verdichtung der Netzinfrastruktur entlang der Strecken in den kommenden Jahren vorantreiben. Gelingt die flächendeckende Integration moderner 5G-Technik, könnten Reisende künftig auch bei hohen Geschwindigkeiten und auf bislang schlecht versorgten Abschnitten von einer stabilen und leistungsfähigen Datenverbindung profitieren.

Literatur

- A1 Telekom Austria (2025): A1 Net Cube mit Vertrag. Abgerufen am 03. 04 25 von <https://www.a1.net/internet/mobile-internet-tarife/net-cube-mit-vertrag>
- ANCOM [National Authority for Management and Regulation in Communications of Romania] (2012a): Terms of reference for the organisation of the competitive selection procedure in view of awarding the rights to use the radio frequencies in the 800 MHz, 900 MHz, 1800 MHz and 2600 MHz bands.
- ANCOM [National Authority for Management and Regulation in Communications of Romania] (2012b): Romanian Users Increasingly Access Mobile Broadband Internet. Abgerufen am 28. 05 2025 von https://www.ancom.ro/en/internetul-in-banda-larga-accesat-din-ce-in-ce-mai-mult-la-puncte-mobile-de-catre-utilizatorii-din-romania_4910.
- ANCOM [National Authority for Management and Regulation in Communications of Romania] (2012c): Spectrum Auction Successfully Concluded. Abgerufen am 28. 05 2025 von https://www.ancom.ro/en/licitatie-spectru-2012_4688.
- ANCOM [National Authority for Management and Regulation in Communications of Romania] (2021a): Terms of reference for the organisation of the competitive selection procedure for awarding some frequency usage rights in the 800 MHz, 2600 MHz and 3400-3600 MHz bands.
- ANCOM [National Authority for Management and Regulation in Communications of Romania] (2021b): This year's spectrum auction wraps up. Abgerufen am 28. 05 2025 von https://www.ancom.ro/en/licita539ia-din-acest-an-pentru-alocarea-de-spectru-s-a-finalizat_6392
- ANCOM [National Authority for Management and Regulation in Communications of Romania] (2022a): Caiet de sarcini pentru organizarea procedurii de selecție competitive în vederea acordării unor drepturi de utilizare a frecvențelor radio în benzile de 700 MHz, 1500 MHz, 2600 MHz și 3400-3800 MHz.
- ANCOM [National Authority for Management and Regulation in Communications of Romania] (2022b): This year's spectrum auction wraps up. Abgerufen am 28. 05 2025 von https://www.ancom.ro/en/licitatie-de-spectru-din-acest-an-s-a-finalizat_6706
- ANCOM [National Authority for Management and Regulation in Communications of Romania] (2023): Statistical Data Report on Romanian Electronic Communications Market - 2023, 1st Semester. Abgerufen am 03. 06 2025 von <https://sscpds.ancom.ro/storage?id=125&apiKey=9f260c15-50ae-47aa-886e-bbf8db914828&action=view>
- Arcep (2018a): New Deal Mobile. Abgerufen am 22. 07 2025 von <https://en.arcep.fr/news/press-releases/view/n/new-deal-mobile-6.html>
- Arcep. (2018b). Signature of an historic agreement between the Government, Arcep and mobile operators to accelerate mobile coverage in the regions. Abgerufen am 23. 07 2025 von <https://en.arcep.fr/news/press-releases/view/n/signature-of-an-historic-agreement-between-the-government-arcep-and-mobile-operators-to-accelerate-mobile-coverage-in-the-regions.html>
- Arcep (2019a): Décision n° 2019-1386. Abgerufen am 22. 08 2025 von https://www.arcep.fr/uploads/tx_gsavis/19-1386.pdf
- Arcep (2019b): Échéances des obligations de couverture en France métropolitaine à compter de septembre 2019. Abgerufen am 21. 07 2025 von <https://www.arcep.fr/fileadmin/cru->

1714402758/user_upload/grands_dossiers/couverture_mobile/obligations-couverture-mobile-sept2019.pdf

Arcep (2019c): Échéances des obligations de couverture en France métropolitaine à compter de septembre 2019. Abgerufen am 21. 07 2025 von https://www.arcep.fr/fileadmin/cru-1714402758/user_upload/grands_dossiers/couverture_mobile/obligations-couverture-mobile-sept2019.pdf

Arcep (2020a): Décision n° 2020-1255. Abgerufen am 18. 07 2025 von https://www.arcep.fr/uploads/tx_gsavis/20-1255.pdf

Arcep (2020b): Mobile Coverage Maps. Abgerufen am 07 2025 von <https://en.arcep.fr/news/press-releases/view/n/mobile-coverage-maps-081220.html>

Arcep (2022a): Improving mobile coverage inside buildings for professionals. Abgerufen am 18. 07 2025 von <https://www.arcep.fr/mes-demarches-et-services/entreprises/fiches-pratiques/amelioration-couverture-mobile-interieur-batiments-professionnels.html>

Arcep (2022b): The New Deal Mobile. Abgerufen am 18. 07 2025 von <https://www.arcep.fr/la-regulation/grands-dossiers-reseaux-mobiles/la-couverture-mobile-en-metropole/le-new-deal-mobile.html>

Arcep (2023): Coverage of transport axes. Abgerufen am 21. 07 2025 von <https://www.arcep.fr/la-regulation/grands-dossiers-reseaux-mobiles/la-couverture-mobile-en-metropole/la-couverture-des-axes-de-transports.html>

Arcep (2024a): Décision n° 2024-1220. Abgerufen am 21. 07 2025 von https://www.arcep.fr/uploads/tx_gsavis/24-1220.pdf

Arcep (2024b): Mobile Coverage. Abgerufen am 21. 07 2025 von <https://en.arcep.fr/news/press-releases/view/n/mobile-coverage-020924.html>

Arcep (2025a): Mobile Quality of Service in Metropolitan France. Abgerufen am 28. 07 2025 von <https://en.arcep.fr/news/press-releases/view/n/mobile-quality-of-service-in-metropolitan-france-260625.html>

Arcep (2025b): New Deal Mobile. A successful gambit of nationwide and high-quality ultrafast mobile coverage. Abgerufen am 23. 07 2025 von <https://en.arcep.fr/news/press-releases/view/n/new-deal-mobile-140125.html>

Arcep (2025c): Operators' deployment obligations. Abgerufen am 21. 07 2025 von <https://www.arcep.fr/la-regulation/grands-dossiers-reseaux-mobiles/la-couverture-mobile-en-metropole/les-obligations-de-deploiements-des-operateurs.html>

ARD/ZDF-Forschungskommission. (2024). ARD/ZDF-Medienstudie 2024. Abgerufen am 01. 05 2025 von https://www.ard-zdf-medienstudie.de/files/Download-Archiv/Medienstudie_2024/Basispraesentation_ARD-ZDF-Medienstudie_2024.pdf

Arup Alliance (2021): Mobile Connectivity in rolling stock - radio frequency attenuation characteristics. Abgerufen am 28. 04 2025 von <https://assets.publishing.service.gov.uk/media/618d299cd3bf7f055b29332f/mobile-connectivity-in-rolling-stock-radio-frequency-attenuation-characteristics.pdf>

BEREC & RSPG (2017): Facilitating mobile connectivity in "challenge areas". Abgerufen am 11. 07 2025 von https://radio-spectrum-policy-group.ec.europa.eu/document/download/25ba45bf-ae80-466a-86f1-2b66b0d6f31f_en?filename=RSPG18-001-BEREC_RSPG_report-mobile-connectivity.pdf&prefLang=hr

- Bergman, A. et al. (2025): Open Private 5G Networks, From Business Needs to Realization.
- BNetzA (2022): Positionspapier zur Bereitstellung von Frequenzen in den Bereichen 800 MHz, 1.800 MHz und 2.600 MHz für den Ausbau digitaler Infrastrukturen, Stand: September 2022.
- Buşu, M. (2014): How concentrated is the Romanian Mobile Market? SEA - Practical Application of Science, 473-482.
- Check24 (2025): 25 MBit/s oder 5G: Wie schnell sollte mein Tarif sein? Abgerufen am 13. 02 2025 von <https://handytarife.check24.de/ratgeber/lte-geschwindigkeit-wie-schnell-sollte-tarif-sein?context=default>
- Connect.de (2016): Die Handy-Netze in Österreich im Vergleich. Abgerufen am 16. 04 2025 von Mobilfunk-Netztest 2017: <https://www.connect.de/vergleich/netztest-2017-bestes-handy-netz-oesterreich-mobilfunk-3196569.html>
- Deloitte (2025): Broadband Consumer Survey 2025.
- Deutsche Bahn (2020): Fensterscheiben im neuen ICE sichern guten Empfang. Abgerufen am 29. 04 2025 von https://www.deutschebahn.com/resource/blob/6860170/6faa3c91d257440d4b620e560c9c1ab8/Faktenblatt_Der-neue-ICE_Scheiben-data.pdf
- Ericsson (2021): Ericsson Mobility Report. Abgerufen am 02. 05 2025 von <https://www.ericsson.com/4a03c2/assets/local/reports-papers/mobility-report/documents/2021/june-2021-ericsson-mobility-report.pdf>
- ETSI (2020): 5G; Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 GHz, 3GPP TR 38.901 version 16.1.0 Release 16.
- European Commission (1999): Directorate-General for the Information Society and Media, COST Action 231 – Digital mobile radio towards future generation systems: Final Report, Publications Office.
- ewi/bet (2025): Energiewende. Effizient. Machen, Monitoringbericht zum Start der 21. Legislaturperiode.
- Geis, M., Schippers, H., Danger, M., Krieger, C., Bocker, S., Freytag, J., Priyanta, I.F., Roidl, M., Wietfeld, C. (2023): IndoorDRaGon: Data-Driven 3D Radio Propagation Modeling for Highly Dynamic 6G Environments, in: European Wireless 2023, Rome, Italy, October 2023.
- Goldmedia (2021): Perspektiven zur Nutzung des UHF-Bands 470-694 MHz nach 2030, Studie im Auftrag der Bundesnetzagentur.
- Hossain, F., Geok, T.K., Rahman, T.A., Hindia, M.N., Dimyati, K., Ahmed, S., Tso, C.P., Rahman, N.Z.A (2019): An Efficient 3-D Ray Tracing Method: Prediction of Indoor Radio Propagation at 28 GHz in 5G Network, in: Electronics 2019, 8(3), 286.
- ITU [International Telecommunication Union] (2017): Recommendation ITU-R P.1238-9 (06/2017), Propagation data and prediction methods for the planning of indoor radio-communication systems and radio local area networks in the frequency range 300 MHz to 100 GHz.
- Kroon, P., Godlovitch, I., & Plückebaum, T. (2023). Sustainability Benefits of 6 GHz Spectrum Policy. Abgerufen am 26. 05 2025 von

https://www.wik.org/fileadmin/user_upload/Unternehmen/Veroeffentlichungen/Studien/2023/WIK-C_Study_SustainabilityBenefitsof6GHzSpectrumPolicy.pdf

LS telcom UK (2017): In-car Mobile Signal Attenuation Measurements, Final Report.

Ofcom (2012a): Assessment of future mobile competition and award of 800 MHz and 2.6 GHz. Abgerufen am 29. 04 2025 von <https://www.ofcom.org.uk/siteassets/resources/documents/consultations/uncategorised/8141-award-800mhz-2.6ghz/associated-documents/secondary-documents/statement.pdf?v=319922>

Ofcom (2012b): Assessment of future mobile competition and award of 800 MHz and 2.6 GHz. Annex 7-12. Abgerufen am 16. 07 2025 von <https://www.ofcom.org.uk/siteassets/resources/documents/consultations/uncategorised/8141-award-800mhz-2.6ghz/associated-documents/secondary-documents/annexes7-12.pdf?v=319818>

Ofcom (2013a): Award of the 800 MHz and 2.6 GHz spectrum bands. Abgerufen am 29. 04 2025 von https://webarchive.nationalarchives.gov.uk/ukgwa/20220104154340mp_/https://www.ofcom.org.uk/__data/assets/pdf_file/0025/92446/Final-results-of-the-800-MHz-and-2.6GHz-4G-auction.pdf

Ofcom (2013b): Communications Market Report 2013. Abgerufen am 23. 04 2025 von https://www.ofcom.org.uk/siteassets/resources/documents/research-and-data/cmr/cmr13/2013_uk_cmr.pdf?v=368185

Ofcom (2017): 4G Coverage Obligation Notice of Compliance Verification Methodology Compliance Verification Methodology. Abgerufen am 30. 04 2025 von <https://www.ofcom.org.uk/siteassets/resources/documents/spectrum/spectrum-information/4g-coverage-methodology.pdf?v=322855>

Ofcom (2018): O2's data coverage obligation. Abgerufen am 29. 04 2025 von https://www.ofcom.org.uk/siteassets/resources/documents/spectrum/spectrum-information/mobile-coverage-obligation/o2_4g_obligation_compliance_letter_090318.pdf?v=323045

Ofcom (2021): Spectrum Access 800 MHz Licence. First issued: 01/03/13 – Licence Number: 0943537– 01/11/21. Abgerufen am 02. 03 2025 von <https://www.ofcom.org.uk/siteassets/resources/documents/manage-your-licence/mobile-wireless-and-broadband/cellular/licences/sa-800-licence-telefonica-uk-0943537.pdf?v=335053>

Ofcom (2022): Ofcom's future approach to mobile markets and spectrum. Abgerufen am 29.08.2025 von <https://www.ofcom.org.uk/siteassets/resources/documents/consultations/category-3-4-weeks/232279-ofcoms-future-approach-to-mobile-markets/associated-documents/conclusions-mobile-spectrum-demand-and-markets.pdf?v=328882>

Ofcom (2024a): Network Licence EE. Abgerufen am 30. 04 2025 von <https://www.ofcom.org.uk/siteassets/resources/documents/manage-your-licence/mobile-wireless-and-broadband/cellular/licences/cellular-licence-ee-0249666-09-11-22.pdf?v=374166>

Ofcom (2024b): Network Licence Hutchison 3G UK. Abgerufen am 30. 04 2025 von <https://www.ofcom.org.uk/siteassets/resources/documents/manage-your-licence/mobile-wireless-and-broadband/cellular/licences/cellular-licence-hutchison-3g-0931984.pdf?v=374164>

Ofcom (2024c): Network Licence Telefónica. Abgerufen am 30. 04 2025 von <https://www.ofcom.org.uk/siteassets/resources/documents/manage-your-licence/mobile->

wireless-and-broadband/cellular/licences/cellular-licence---telefonica-uk-0249663.pdf?v=368647

Ofcom (2024d): Network Licence Vodafone. Abgerufen am 30. 04 2025 von <https://www.ofcom.org.uk/siteassets/resources/documents/manage-your-licence/mobile-wireless-and-broadband/cellular/licences/cellular-licence-vodafone-0249664.pdf?v=368347>

Ofcom (2024e): Shared Rural Network (SRN) progress update - September 2024. Abgerufen am 05. 05 2025 von <https://www.gov.uk/government/publications/shared-rural-network-srn-progress-update-september-2024/shared-rural-network-srn-progress-update-september-2024#fnref:1>

Ofcom (2024f): Shared Rural Network Coverage Obligations. Abgerufen am 05. 05 2025 von <https://www.ofcom.org.uk/siteassets/resources/documents/spectrum/spectrum-information/mobile-coverage-obligation/shared-rural-network-coverage-obligations.pdf?v=379965>

Opensignal (2025): The German mobile experience on motorways and railways: more bars on the Autobahn. Abgerufen am 03. 06 2025 von <https://www.opensignal.com/2025/04/02/the-german-mobile-experience-on-motorways-and-railways-more-bars-on-the-autobahn/dt>

Polak, L., Kufa, J., Sotner, R., Fryza, T. (2024): Measurement and analysis of 4G/5G mobile signal coverage in a heavy industry environment, in: *Sensors*, 24(8), 2538.

Qualcomm (2008): UMTS900 lessons learned, engineering service note 80-W1115-1 Rev E.

Rhode & Schwarz (2022): Mobilfunk-Messungen entlang von Bundesstraßen sowie fahrgaststarken Bahnstrecken in Bayern. Abgerufen am 12. 02 2025 von https://www.stmwi.bayern.de/fileadmin/user_upload/stmwi/Foerderungen/Mobilfunkinitiative/Abschlussbericht_Mobilfunk-Messungen_Bayern_2022_StMWi.pdf

Rhode & Schwarz (2024): R&S®CMW-Z10 RF SHIELD BOX. Abgerufen am 09. 05 2025 von https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/pdm/cl_brochures_and_datasheets/product_brochure/5214_0601_12/CMW-Z10_bro_en_5214-0601-12_v1000.pdf

RTR (2013): RTR Telekom Monitor Jahresbericht 2013. Abgerufen am 02. 05 2025 von https://www.rtr.at/TKP/aktuelles/publikationen/publikationen/TM_Jahresbericht_2013.pdf

RTR (2025): Welche Bandbreite benötige ich? Abgerufen am 07. 02 2025 von https://www.rtr.at/TKP/service/rtr-nettest/help/technology/netztestfaq_required_bandwidth.de.html

Seretis, A., Sarris, C.D. (2021): An Overview of Machine Learning Techniques for Radiowave Propagation Modeling, in: *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 70, no. 6, pp. 3970-3985.

Simić, Ljiljana (2025): Methodology for the Mapping of Quality of Service of 5G Mobile and 5G Fixed Wireless Access Networks – 2nd Draft, im Auftrag der Europäischen Kommission,

Sliwa, B., Geis, M., Bektas, C., López, M., Mogensen, P., Wietfeld, C. (2022): DRaGon: Mining latent radio channel information from geographical data leveraging deep learning, in: *Proceedings of the 2022 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*.

- Statista (2013): Market share held by mobile phone operators in the United Kingdom (UK) as of February 2013. Abgerufen am 15. 04 2025 von <https://www.statista.com/statistics/279993/market-share-of-mobile-phone-operators-in-the-united-kingdom-uk/>.
- Sörries, B., Franken, M., Baischew, D., Lucidi, S. (2020): Einfluss von Versorgungsauflagen auf die Mobilfunkabdeckung in der EU, WIK-Diskussionsbeitrag Nr. 470.
- TKK (2013a): Anhang H zur Zuteilungsurkunde. Abgerufen am 07. 05 2025 von https://www.rtr.at/TKP/aktuelles/entscheidungen/entscheidungen/Anhang_H_zur_Zuteilungsurkunde.pdf
- TKK (2013b): Anhang I zur Zuteilungsurkunde. Abgerufen am 07. 05 2025 von https://www.rtr.at/TKP/aktuelles/entscheidungen/entscheidungen/Anhang_I_zur_Zuteilungsurkunde.pdf
- TKK (2013c): Frequenzzuteilungsurkunde. Anlage 1) zum Bescheid F 1/11-283 der Telekom-Control-Kommission vom 19.11.2013. Abgerufen am 28. 04 2025 von https://www.rtr.at/TKP/aktuelles/entscheidungen/entscheidungen/Zuteilungsurkunde_F_1_11.pdf
- TKK (2013d): Zuteilungsurkunde F 1/11-283. Abgerufen am 29. 04 2025 von https://www.rtr.at/TKP/aktuelles/entscheidungen/entscheidungen/Zuteilungsurkunde_F_1_11.pdf
- TKK (2019): Ausschreibungsunterlage im Verfahren betreffend Zuteilungen 700, 1500 und 2100 MHz. Abgerufen am 09. 05 2025 von https://www.rtr.at/TKP/was_wir_tun/telekommunikation/spectrum/Ausschreibungsunterlage-700_1500_2100_MHz-F_1_16_DE.pdf
- Zhou C., (2017): Ray Tracing and Modal Methods for Modeling Radio Propagation in Tunnels With Rough Walls, in: IEEE Trans Antennas Propag. 2017 May, 65(5): pp. 2624-2634.

ISSN 1865-8997