

Gutachten

Digitalisierung der Energiewende

Topthema 3:

TK-Netzinfrastruktur und TK-Regulierung

Erstellt im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie

Digitalisierung der Energiewende



Topthema 3:

TK-Netzinfrastruktur und TK-Regulierung

Erstellt im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie

Berichtsjahr 2018

Ansprechpartner

Dr. Bernd Sörries

Direktor

Abteilungsleiter „Regulierung und Wettbewerb“

WIK Wissenschaftliches Institut für Infrastruktur und Kommunikationsdienste

Rhöndorfer Str. 68

53604 Bad Honnef

Telefon: +49 2224 922523

Mail: b.soerries@wik.org

Weitere Autoren

Stefano Lucidi

Dr. Lorenz Nett

Matthias Wissner

WIK Wissenschaftliches Institut für Infrastruktur und Kommunikationsdienste

Rhöndorfer Str. 68

53604 Bad Honnef

Telefon: +49 2224 92250

In Zusammenarbeit mit

Prof. Dr.-Ing. Christian Wietfeld

Stefan Böcker

Dr. Nils Dorsch

Vorbemerkungen

Im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie untersucht die Ernst & Young GmbH gemeinsam mit dem BET Büro für Energiewirtschaft und technische Planung GmbH und dem Wissenschaftlichen Institut für Infrastruktur und Kommunikationsdienste (WIK) GmbH die Digitalisierung der Energiewende.

Ziel des Projektes ist zum einen die Erfassung des aktuellen Stands der Digitalisierung der Energiewende sowie zum anderen die Identifikation von Trends und Ableitung von Handlungsvorschlägen, um die Digitalisierung der Energiewende voranzutreiben.

Die Erfassung des Status Quo der Digitalisierung der Energiewende wird im sogenannten Digitalisierungsbarometer abgebildet, welches beginnend mit 2018 bis 2021 jährlich aktualisiert und veröffentlicht wird.

Die Identifikation aktueller Trends und Ableitung von Handlungsvorschlägen erfolgt in Gutachten. Inhaltlich sind die Untersuchungen in drei Themenkomplexe unterteilt, sogenannte Tophemen:

- Tophema 1: Verbraucher, Digitalisierung und Geschäftsmodelle
- Tophema 2: Regulierung, Flexibilisierung und Sektorkopplung
- Tophema 3: Telekommunikations (TK)-Infrastruktur und TK-Regulierung

Jedes dieser Tophemen wird in einem separaten Gutachten beschrieben. Die Veröffentlichung dieser Gutachten erfolgt jeweils jährlich, beginnend mit 2018, bis einschließlich 2020.

Die im Tophema 3 adressierte Kernfragestellung ist: Sind die Telekommunikationsinfrastrukturen und Telekommunikations-Regulierung für die Anforderungen der Digitalisierung der Energiewende gerüstet?

Das Gutachten zum Tophema 3 zeigt im ersten Teil auf, welche Kommunikationstechnologien und -netze heute und künftig aus technischer und operativer Sicht in der Lage sind, die spezifischen Anforderungen einer digitalisierten Energiewirtschaft zu erfüllen. In der Studie werden Anwendungsfälle („Use-Cases“) aus den Bereichen der Sektorkopplung und des Steuerns und Schaltens von Netzelementen (Tophema 2) genauso wie weitere Anwendungen in den Verteilernetzen oder im Messwesen aufgegriffen. Diese Use-Cases stellen besondere Anforderungen an die örtliche und systemische Verfügbarkeit von Telekommunikationsnetzen und -diensten. Ziel des ersten Teils des Gutachtens ist es, zu prüfen, ob das aktuelle und absehbare Angebot an Telekommunikationsdiensten aus technischer und räumlicher Sicht geeignet ist, den Aufbau und Betrieb intelligenter Energienetze zu ermöglichen. Darüber hinaus wird eine Bewertung und Abschätzung von Kapazitätsengpässen in funkbasierten Telekommunikationsnetzen vorgenommen.

Im zweiten Teil des Gutachtens wird der Frage nachgegangen, inwieweit die sektorspezifische Regulierung im Bereich der Telekommunikation den Aufbau und Betrieb von intelligenten Energienetzen unterstützen kann. Insbesondere wird die Bedeutung der Frequenzregulierung und der Netzneutralität betrachtet. Um die deutschen Entwicklungen besser einordnen zu können, werden im Übrigen noch internationale Erfahrungen hinsichtlich des Einsatzes von TK-Diensten in der Energiewirtschaft für einige Anwendungen exemplarisch betrachtet.

Executive Summary – Tophema 3

Die Energiewende ist ein nationales Großprojekt, das die im Markt befindlichen Akteure mit vielfältigen Veränderungen konfrontiert. Verteilernetzbetreiber stehen vor der Aufgabe, ihre Prozesse mittels des Einsatzes von Informations- und Kommunikationstechnologien zu digitalisieren. Gleiches gilt für Messstellenbetreiber. Die Energiewende, mit der der Umbau der Elektrizitätsversorgung in Deutschland umgebaut wird, wird in Zukunft nicht mehr ohne die Digitalisierung von netzdienlichen und marktdienlichen Prozessen auskommen. Deshalb hat der Gesetzgeber 2016 das Gesetz zur Digitalisierung der Energiewende (GDEW) auf den Weg gebracht, welches den bundesweiten Rollout von digitaler Infrastruktur vorsieht. Wie sich der Netzbetrieb in den nächsten Jahren ändern wird, zeigt das Gutachten zu Tophema 2 (Regulierung, Flexibilisierung und Sektorkopplung).

Mit der Energiewende schreitet der Ausbau der erneuerbaren Energien kontinuierlich voran. Heute sind die meisten erneuerbaren Erzeugungsanlagen an die Stromverteilnetze angeschlossen. Dezentralität, Kleinteiligkeit und Volatilität der Erzeugung dieser Anlagen erhöhen die Komplexität der Energieversorgung. Die Anforderungen an die Verteilernetzbetreiber haben sich dementsprechend erhöht. Sie sind verantwortlich für die Betriebsführung und Spannungshaltung in ihren Netzen. Speziell beim Netzwiederaufbau nehmen die Verteilernetzbetreiber eine entscheidende Rolle ein, da sie den Übertragungsnetzbetreibern vorgelagert sind und diese somit in weiten Teilen auf die Verteilernetzbetreiber angewiesen sind. Verteilernetzbetreiber werden Betriebsmittel, EEG- und KWK-Anlagen, Speicher und neue Lasten (insbesondere Ladeinfrastruktur für E-Mobilität) bidirektional anzubinden und dabei auch die kommunikationstechnischen Anforderungen eines krisenfesten Workforce-Managements (Notfall-Managements) zu beachten haben. Dies schließt die Sprachkommunikation mit ein. Es ist in diesem Zusammenhang essentiell, zukünftig flexible Erzeuger und Abnehmer, die auf die Situation im Netz reagieren können, TK-seitig schwarzfallfest anzubinden.

Messstellenbetreiber haben nach dem GDEW mit dem Smart-Meter-Gateway als sichere und standardisierte Plattform bundesweit die Basisinfrastruktur für die bidirektionale Kommunikation von Netz- und Marktakteuren (nicht nur im Bereich Strom) bereitzustellen.

Die Anforderungen an Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT), die den Einsatz von Smart-Meter-Gateways unterstützen müssen, sind komplex und vielfältig, da das Gateway Anwendungen von Smart Metering über Smart Grid, Smart Mobility bis hin zu Smart Home, Services und Building unterstützen soll. Aus Sicht der dazu notwendigen Telekommunikationsdienste ist wesentlich, dass für eine Vielzahl von Anwendungen ein „Quality of Service“ bei der Datenübertragung genauso wie eine Verfügbarkeit beim Stromausfall (schwarzfallfester Telekommunikationsdienst) zwingend ist. Neben netzkritischen Datendiensten soll damit auch die im Notbetrieb essentielle Sprachkommunikation unterstützt werden. Hinsichtlich der Schwarzfallfestigkeit der eingesetzten Telekommunikationsdienste müssen Verteilernetzbetreiber entsprechende EU-rechtliche Vorgaben beachten und umsetzen.

Damit besteht eine Nachfrage, die im Markt unter Verteilernetzbetreibern und Messstellenbetreibern sehr unterschiedlich ausgeprägt ist. So gibt es Nachfrager, die Telekommunikationsdienste für eine Vielzahl von netzkritischen und marktlichen Anwendungen in den Verteilernetzen anstreben (synergetische Nutzung), wozu beispielsweise auch eine Notfall-Kommunikation gehört. Es ist aber auch eine Nachfrage feststellbar, die nur einzelne Anwendungen im Netzbetreiber oder im wettbewerblichen geprägten Bereich im Fokus hat.

Unabhängig von der konkreten Ausgestaltung der Nachfrage richtet sich der Blick von Verteilernetzbetreibern und Messstellenbetreibern in einer neuen Art und Weise auf Telekommunikationsinfrastrukturen und Telekommunikationsdienste. Es stellt sich für beide Akteure die Frage, ob die vorhandenen An-

gebote von Telekommunikationsnetzbetreibern hinreichend geeignet und (örtlich und systemisch) verfügbar sind, die Digitalisierung von energiewirtschaftlichen Prozesse entweder synergetisch (z. B. im Verteilernetz und im Messwesen) oder lediglich in Einzelbereichen (z. B. im Verteilernetz oder im Messwesen) zu unterstützen. Das Messstellenbetriebsgesetz (MsbG) sieht in diesem Zusammenhang vor, dass das Smart-Meter-Gateway die zentrale Infrastruktur für netzdienliche und marktliche Anwendungen sein soll. Bei der Auswahl von Telekommunikationsdiensten, die insbesondere netzdienliche Prozesse unterstützen sollen, haben Verteilernetzbetreiber und Messstellenbetreiber darauf zu achten, dass die zum Einsatz kommenden TK-Dienste schwarzfallfest sind, also auch bei einem Spannungabfall verfügbar bleiben, um ein geordnetes, sicheres und schnelles Hochfahren der Stromnetze zu ermöglichen. Die genutzten Telekommunikationsnetze müssen somit zwingend auf allen Netzebenen über eine Batteriepufferung bzw. Notstromversorgung verfügen. Ist dies nicht der Fall, können die nicht kommunikativ angebundenen Anlagen und Lasten im Schwarzfall durch unkontrollierte Abgabe bzw. Abnahme von Elektrizität kontraproduktiv und somit systemschädigend wirken.

Um die technische Eignung von Telekommunikationstechnologien und -netzen zu analysieren, wurden auf Basis gesetzlicher Anforderungen und Vorarbeiten technischer Gremien (FNN im VDE) Kriterien zur Bewertung aufgestellt und erläutert. In einer ersten Stufe der Analyse wurden dabei Technologien, die notwendige Eigenschaften wie die Bereitstellung garantierter und ausreichend bemessener Übertragungskapazitäten vermissen lassen, von der weiteren Betrachtung ausgeschlossen. Dies betrifft insbesondere Technologien, die in unlizenzieren, „offenen“ Funkbändern arbeiten. Auch Funktechnologien lizenzierter Frequenzbänder, deren langfristige Verfügbarkeit unsicher ist, die heute keine Priorisierung unterstützen oder die in ungeeigneten Frequenzbändern mit sehr hoher Dämpfung operieren (oberhalb von 1 GHz), werden als ungeeignet eingestuft (z. B. UMTS). Schmalbandige Technologien, die nur eine begrenzte Übertragungskapazität bieten, sind ebenfalls nicht für den flächendeckenden Ausbau geeignet (z. B. LTE eMTC, LTE NB-IoT), und nur im Einzelfall beispielsweise als Lösungsansatz zur Adressierung von isoliert anzubindenden SMGWs geeignet.

In einer zweiten Stufe der Analyse wurden aufbauend auf detaillierten, statistischen Systemmodellen umfassende Modellrechnungen durchgeführt, um den Bedarf an Infrastrukturkomponenten für unterschiedliche, mobilfunkbasierte Lösungsansätze beispielhaft zu quantifizieren. Das Ziel der Modellrechnung war dabei nicht eine konkrete Netzplanung für den realen Aufbau in einer definierten Region, sondern die statistische Abschätzung des Aufbau- bzw. Ausbaubedarfs im Vergleich zu existierenden TK-Infrastrukturen. Das übergreifende Ergebnis sieht wie folgt aus:

- **Kabelgebundene Breitbandinfrastruktur:** Breitbandkabel, Glasfaser und DSL sind technisch grundsätzlich sehr gut geeignet, jedoch sind verschiedene Einschränkungen zu berücksichtigen. Zunächst ist ein vom Endkundenanschluss entkoppelter Betrieb notwendig, um den geforderten Durchgriff des SMGW-Administrators auf das SMGW zu jedem notwendigen Zeitpunkt zu gewährleisten. Die hierfür notwendigen technischen Rahmenbedingungen (z. B. die Nutzung einer dedizierten physikalischen Leitung oder die Bereitstellung einer exklusiven Datenverbindung mit garantierter Bandbreite) sind heute beim Breitbandkabel und bei DSL nicht vorhanden. Im Rahmen des Glasfaserausbau, der in Deutschland mit ca. 10 % der angeschlossenen Haushalte noch in seinen Anfängen steckt, könnten die beiden Restriktionen wegfallen. Jedoch bleibt festzuhalten, dass eine flächendeckende Verfügbarkeit von kabelgebundenen TK-Infrastrukturen exklusiv für energiebezogene Anwendungen aktuell nicht gegeben ist und daher die Nutzung kabelgebundener Breitbandinfrastrukturen auch mittel- und langfristig nur in Kombination mit anderen TK-Infrastrukturen denkbar ist. Eine synergetische Nutzung dieser Technologien bzw. Netze (z. B. Steuerung und Kontrolle von Betriebsmitteln, Notfallkommunikation, marktliche Prozesse) ist nicht gegeben.

- **Power Line Communications (PLC):** Die PLC-Technik bietet in der breitbandigen Variante (BB-PLC) aus technischer Sicht grundsätzlich Potential für die Anbindung von SMGWs. Die Erfahrungsberichte aus Pilotprojekten vermitteln aber ein uneinheitliches Bild über die Leistungsfähigkeit der Technologie. Die Leistungsfähigkeit dieser Technologie hängt beispielsweise vom jeweils eingesetzten Standard ab. Zudem wird die Wirtschaftlichkeit maßgeblich von der Penetration von SMGW sowie der Nutzung von Wide-Area-Networks beeinflusst, mit denen der Datenverkehr zu den Backend-Systemen transportiert wird. Der Aufbau und Betrieb einer spezifischen PLC-Infrastruktur vor dem Hintergrund verschiedener im Gutachten benannter Einschränkungen ist als Teil einer hybriden Gesamtlösung, d. h. in einem Technologiemix mit weiteren draht- oder funkbasierten Telekommunikationsinfrastrukturen denkbar. Eine synergetische Nutzung ist nicht gegeben, da keine Sprachkommunikation im Notfall unterstützt wird.

Funkanwendungen im nicht exklusiv nutzbaren Funkspektrum: In den letzten Jahren wurden zunehmend Funktechnologien für Maschine-zu-Maschine-Kommunikation (Internet der Dinge) entwickelt, die auf Frequenzen zurückgreifen, für die es keine exklusiven Frequenznutzungsrechte gibt. Als Beispiel ist hier LoRaWAN oder Sigfox zu nennen. Da es keine exklusive Nutzung der Frequenzen gibt, können die Anbieter keine Übertragungsqualitäten garantieren. Netzkritische und sicherheitsrelevante Anwendungen im intelligenten Energienetz können insoweit nicht unterstützt werden. Ebenso reichen in der Regel die Übertragungskapazitäten dieser Funktechnologien nicht aus, um beispielsweise die gesetzlichen Vorgaben hinsichtlich einer Versorgung bei einer hohen Durchdringung von bis zu von 95 % der Haushalte zu erfüllen.

- **Öffentlicher LTE-Mobilfunk im Bereich unter 1 GHz:** In Deutschland werden drei parallele Mobilfunknetze betrieben. Die wesentlichen Anwendungen, die mit den Netzen und den eingesetzten Funktechnologien ermöglicht werden, sind dem Massenmarkt zuzuordnen. Energiewirtschaftliche Anwendungen, die stark von der Maschine-zu-Maschine-Kommunikation geprägt sind und auch in ihren technischen und örtlichen Anforderungen sich zum Teil erheblich von Massendienstleistungen unterscheiden, hatten bisher kaum Einfluss auf die eingesetzte Technologie oder den Netzaufbau. Jedoch verfügt die LTE-Mobilfunkinfrastruktur bereits über eine signifikante Anzahl von Basisstationsstandorten, die durch die Nutzung von sog. subGHz-Frequenzen (800 und 900 MHz) besonders geeignet sind, um auch die Erschließung schwierig anbindbarer Kellerraumstandorte zu ermöglichen. Über den weiteren Netzausbau im 700-MHz-Bereich kann sich die Versorgung weiterhin verbessern. Dennoch haben die durchgeführten Modellrechnungen gezeigt, dass die Erfüllung eines Abdeckungsziels von 95 % der potentiellen SMGWs einen statistisch betrachtet signifikanten Netzausbau, d. h. im Frequenzbereich unter 1 GHz mehr als 10.000 zusätzliche Basisstationen, auslöst. Es ist dabei nicht zu erwarten, dass die Mobilfunknetzbetreiber nur für die Anbindung von SMGW allein ihre Mobilfunknetze in dieser Größenordnung im Bereich unter 1 GHz ausbauen werden, zumal der Trend im Mobilfunkmarkt dahin geht, dass beim Netzausbaus verstärkt Kapazitätsfrequenzen oberhalb von 1 GHz zum Einsatz kommen, um beispielsweise 5G zu ermöglichen.

Wie das Beispiel der Stadt Hamburg zeigt, werden hier unter Verzicht auf den eingangs angesprochenen synergetischen Nutzen mehrere öffentliche Mobilfunknetze kombiniert für die Anbindung von SMGWs eingesetzt. Durch die Komplementarität der Abdeckung reduziert sich der Ausbaubedarf der beteiligten Mobilfunknetzbetreiber (in einer durchgeführten Modellrechnung bspw. um 10 % bei 5 % Komplementarität von drei Mobilfunknetzbetreibern). Neben der Abdeckungsproblematik ist als weiteres Defizit der aktuell angebotenen Mobilfunkdienste die fehlende Priorisierung von Daten bei der Übertragung zu benennen. Diese ist in LTE-Netzen zwar

technisch verfügbar und wird netzbetreiberintern z. B. für den VoIP-Dienst genutzt. Aktuell gibt es jedoch keine Angebote für Dritte, die es beispielsweise einem SMGW-Administrator oder einem Verteilernetzbetreiber ermöglichen würden, einen LTE-Datendienst mit einer garantierten Datenrate zu nutzen. Insofern ist es notwendig, die auch im Kontext von 5G angekündigten Funktionen zur Priorisierung exklusiver Ressourcen (über das sog. "Network Slicing") für Dritte verfügbar zu machen.

Unter der Voraussetzung der Umsetzung eines abdeckungsgetriebenen Netzausbaus und der Verfügbarkeit einer effektiven Priorisierung zeigen die durchgeführten Modellrechnungen, dass hinsichtlich der erforderlichen Übertragungskapazität keine Engpässe in Mobilfunknetzen zu erwarten sind und der Bandbreitenbedarf im Vergleich zu konsumentengetriebenen Diensten gering ist (etwa 2 % des Endkonsumentenverkehrs).

Aber selbst wenn das Abdeckungsziel von 95 % durch den Netzausbau statistisch erreicht wird, so kann vor allem aus wirtschaftlichen Erwägungen heraus mit der Mobilfunktechnik nicht garantiert werden, dass jeder beliebige gewünschte SMGW-Standort angebunden werden kann. Somit sind zur Erfüllung von spezifischen Anforderungen ergänzende technische Lösungen vorzuhalten. Eine synergetische Nutzung ist zudem theoretisch denkbar, aber praktisch nicht gegeben, weil die öffentlichen Mobilfunknetze in der Regel in ihren jeweiligen Zugangnetzen nicht schwarzfallfähig sind bzw. mehr als 26.000 Basisstationen schwarzfallfähig gemacht werden müssten.

- Dediziertes LTE-Mobilfunknetz für kritischen Infrastrukturen bei 450 MHz: Neben der Nutzung öffentlicher Mobilfunknetze ist auch der Aufbau eines dedizierten LTE-Mobilfunknetzes bei 450 MHz betrachtet worden. Durch die günstigeren Ausbreitungseigenschaften sind weniger Mobilfunkstandorte notwendig, um die geforderte Flächendeckung zu erzielen. Zwischen den öffentlichen Mobilfunknetzen und einem dedizierten Funknetz bei 450 MHz liegt hinsichtlich des Bedarfs von Basisstationsstandorten aufgrund der Ausbreitungseigenschaften der eingesetzten Frequenzen der Faktor 3. Dies bedeutet, im Bereich 450 MHz werden drei Mal weniger Sendeanlagen benötigt als in den Frequenzbereichen, die von öffentlichen Mobilfunknetzbetreibern genutzt werden.

Auf der Basis wohl definierter Nutzerkreise des dedizierten Netzes, kann zudem die Umsetzung von Priorisierungsfunktionen als Bestandteil des Betriebskonzepts angenommen werden. Somit kann von einer technischen Umsetzbarkeit beispielsweise aller notwendigen SMGW-bezogenen Kommunikationsanforderungen ausgegangen werden.

Anders als bei öffentlichen Mobilfunknetzen steht heute kein signifikantes, d. h. flächendeckendes Basisnetz zur Verfügung. Diese Frequenzen werden heute nur in einzelnen Regionen oder Städten in Deutschland eingesetzt. Hierbei kommt die CDMA-Technologie zum Einsatz. In der Folge müssen die nur punktuell verfügbaren CDMA-450-basierten regionalen Netze erweitert und im Sinne einer langfristigen Nutzung mittelfristig auf LTE migriert werden. Weiterhin zeigen Modellberechnungen, dass für die Erzielung einer flächendeckenden Abdeckung von Kellerstandorten unter Nutzung von 450 MHz eine signifikante Anzahl von Mobilfunkstandorten erforderlich ist. Der Netzausbau kann hier entsprechend des konkreten Bedarfs erfolgen. Es ist zu berücksichtigen, dass erste Netze im städtischen Umfeld zeigen, dass zur Abdeckung einer Großstadt wie Düsseldorf weniger als 10 Basisstationen errichtet werden müssen. Da ein 450-MHz-Netz im Vergleich zu anderen Funknetzen mit vergleichsweise wenigen Standorten und aktiven Netzelementen auskommt, kann eine Schwarzfallfestigkeit im Vergleich zu anderen TK-

Netzen deutlich einfacher und kostengünstiger realisiert werden. Diesen Weg gehen bereits einzelne Verteilernetzbetreiber.

Im Ergebnis zeigt die technische Analyse, dass bis auf die Ausnahme von Telekommunikationsdiensten in einem 450-MHz-Band die relevanten Kommunikationstechnologien bzw. -infrastrukturen keine synergetische Nutzung ermöglichen. Mit synergetischer Nutzung ist gemeint, dass sowohl eine Steuerung und Kontrolle von Betriebsmitteln, eine sichere Integration von EEG-Anlagen sowie eine Notfall-Kommunikation möglich ist, die eine Schwarzfallfähigkeit des eingesetzten TK-Dienstes erfordern, als auch marktliche Anwendungen von den TK-Diensten ermöglicht werden. Sofern nur Teile von energiewirtschaftlichen Anwendungen im Hinblick auf ihre telekommunikationsspezifischen Anforderungen betrachtet werden, stehen zwar mehrere Kommunikationstechnologien und -infrastrukturen zur Verfügung, die dann aber nur in einem Technologiemix genutzt werden können.

Die aus technischer und operativer Sicht präferierte Lösung steht jedoch unter der Einschränkung, dass es einen Interessenkonflikt zwischen Betreibern kritischer Infrastrukturen (z. B. im Energiesektor) einerseits und den Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS) und der Bundeswehr andererseits gibt. Es geht um die Frage, wie die heute von einzelnen Energieversorgern genutzten Frequenzen bei 450 MHz ab dem Jahr 2021 genutzt werden können. Sofern die Bundesnetzagentur den Frequenzplan dahingehend ändert, dass die Frequenzen künftig exklusiv für BOS und Bundeswehr zur Verfügung stehen, wäre zu bezweifeln, dass Verteilernetzbetreiber und Messstellenbetreiber überhaupt schwarzfall-feste Telekommunikationsdienste nutzen könnten. Es wäre dann damit zu rechnen, dass die am Markt angebotenen Telekommunikationsdienste solche Verfügbarkeitsbeschränkungen haben, dass relevante EU-rechtliche Anforderungen de facto nicht erfüllt werden können. Sofern weiterhin Telekommunikationsdienste, die auf 450-MHz-Frequenzen zurückgreifen, für energiewirtschaftliche Anwendungen genutzt werden können, sollte bei der Neuvergabe der Frequenzen die Bundesnetzagentur darauf achten, dass die Nutzungsbedingungen so ausgestaltet sind, dass Investitionen in ein national verfügbares Funknetz für kritische Infrastruktur gefördert werden.

Des Weiteren zeigen die Analysen im Bereich der TK-Regulierung, dass eine Anbindung von SMGW über Glasfaserzugangnetze dann erleichtert werden kann, wenn mittelbar die Anreize für Investitionen in solche Netze gestärkt werden. Eine höhere Penetration von FttB/H-Anschlüssen ist prinzipiell geeignet, die Anbindung von SMGW zu verbessern. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass zusätzlich noch Inhaus-Verkabelungen vorgenommen werden müssen.

Im Rahmen der Studie wurden noch internationale Erfahrungen mit der Anbindung von SMGW beleuchtet. Hier zeigt sich ein sehr unterschiedliches Bild. Während die Niederlande und auch Österreich auf den Einsatz von 450-MHz-Frequenzen setzen, werden in anderen Staaten auch leitungsgebundene Kommunikationstechnologien eingesetzt, wobei es hier keine synergetische Nutzung über Smart Grid und Smart Market gibt. Jedoch setzt sich die Energiewirtschaft über den Verband EUTC europaweit für die Nutzung von Frequenzen im Bereich 450 MHz ein.

Die Untersuchung zeigt im Ergebnis, dass die Möglichkeit besteht, eine TK-Infrastruktur synchron mit der Energiewende aufzubauen, um neben der SMGW-Vernetzung weitere spezifische energiewirtschaftliche Anwendungen im Verteilernetz zu unterstützen. Diese Option ist aber von der konkreten Ausgestaltung der Frequenzregulierung für den Frequenzbereich 450 MHz abhängig.

Executive Summary – Top Theme 3

The energy transition (“Energiewende”) is a major national project that confronts the market players with a variety of changes and challenges. Distribution system operators face the task of digitizing their processes through the use of information and communication technologies. The same applies to meter operators. If it is to be pushed further, an energy transition will no longer take place without digitization in the future. For this reason, in 2016, the German legislator initiated the Act on the Digitization of the Energiewende (GDEW), which envisages the nationwide roll-out of digital infrastructure. How the grid operation will change over the next few years is shown by the report on Top Theme 2 (regulation, flexibilisation and sector coupling).

With the energy transition, the expansion of renewable energies is progressing steadily. Today, most renewable generation plants are connected to the electricity distribution grids. The decentralization, small scale and volatility of the generation of these plants increase the complexity of the energy supply. The requirements for distribution system operators have increased accordingly. They are responsible for the operation and voltage stability in their networks. Especially in the case of grid restoration, distribution system operators play a crucial role as they are upstream of the transmission system operators and the latter are thus largely dependent on the distribution system operators. Distribution system operators will have to connect equipment, RES and CHP plants, storage facilities and new loads (in particular charging infrastructure for e-mobility) bidirectionally while also having to comply with the communication technology requirements of crisis-proof workforce management (emergency management). This includes voice communication. According to the new GDEW, meter operators will have to provide the basic infrastructure for the bi-directional communication of network and market players (not only in the field of electricity) nationwide with the smart meter gateways (SMGW) as a secure and standardized platform. In this context it is essential that future flexible generators and consumers, that are able to react on the situation in the grid, are able to communicate during a blackout.

This shows that the requirements are complex and diverse, ranging from Smart Metering to Smart Grid, Smart Mobility to Smart Home, Services and Building. Essential for a large number of applications is a "quality of service" (for example by prioritization) in the data transmission as well as the presence of blackfall-resistant (resilient) telecommunication services, which also include the voice services required to support emergency operation.

There is thus a very different demand in markets for telecommunication services. There are, for example, customers (DSO) who seek telecommunications services for a variety of applications in the distribution networks (synergetic use), including, for example, emergency communications. But there is also a demand that focuses merely on individual applications (or “use cases”). Regardless of the specific nature of demand, distribution system operators and meter operators contemplate telecommunications infrastructures and telecommunications services in a new manner. The question arises for both actors as to whether the existing offerings of telecommunications network operators are sufficiently suitable and (locally and systemically) available to support the digitization of their processes either synergistically (e.g. in the distribution network and metering) or only in their individual, specific areas (e.g. in the distribution network or in metering). An essential prerequisite for a synergetic use including applications of the distribution networks is resilience. This means that telecommunication services can also be used in the event of a voltage drop (power failure) because the corresponding telecommunications network has battery backup or emergency power supply at all network levels. If not, in the case of a blackout the sites and customers that are not connected via ICT, can have a counterproductive effect due to uncontrolled delivery or consumption of electricity and thus damage the system.

In order to analyse the technical suitability of telecommunication technologies and infrastructures, evaluation criteria and preliminary work of technical committees were set up and explained in this study. In a first stage of the analysis, technologies that lack the necessary characteristics, such as the provision of guaranteed and adequately dimensioned transmission capacities, were excluded from further consideration. This applies in particular to technologies operating in unlicensed "open" radio bands, e.g. the so-called Low Power Wide Area Networks (LPWAN). Also, licensed-band radio technologies whose long-term availability is uncertain, which do not support prioritization, or which operate in inappropriate frequency bands with very high attenuation, are classified as inappropriate (e.g. UMTS). Narrow-band technologies, which offer only limited transmission capacity, are also not suitable for wide-spread expansion (e.g. LTE eMTC, LTE NB-IoT), and only suitable in individual cases, for example, as a solution for isolated connection of SMGWs.

In a second stage of the analysis, comprehensive model calculations were carried out based on detailed, statistical system models in order to quantify the need for infrastructure components for different mobile-based solutions. The aim of the model calculation was not a concrete network planning for the real construction in a defined region, but the statistical estimation of the construction and / or expansion requirement in comparison to existing TC-infrastructures. The overall result looks like this:

- **Wired broadband infrastructure:** Broadband cable, fibre optic and DSL are technically very well suited, but there are several limitations to consider. First of all, an operation decoupled from the end customer equipment (connection) is necessary to ensure the required access of the SMGW administrator to the SMGW at any point in time. The necessary technical framework conditions (for example, the use of a dedicated physical line or the provision of an exclusive data connection with guaranteed bandwidth) are not available on the market today with broadband cable and with DSL. In the context of fibre optic expansion, which is still in its infancy in Germany with about 10 percent of the households connected, connectivity to SMGW without user equipment could be established. However, it remains to be noted that a nationwide availability of usable communication services exclusively for energy-related applications is currently not available and therefore the use of wired broadband infrastructures in the medium and long term is conceivable in combination with other telecommunications infrastructures only. There is no synergistic use of these technologies for applications both for the crosslinking of SMGWs and in the distribution network (for example control and monitoring of equipment) as well as voice applications (emergency communication).
- **Power Line Communications (PLC):** From a technical point of view, the PLC technology in the broadband version (BB-PLC) basically offers potential for the connection of SMGWs. The experience reports from pilot projects, however, give a mixed picture of the performance of the technology. The capability of this technology, for example, depends on the standard used. In addition, the economic efficiency is significantly influenced by the penetration of SMGW and the use of wide-area networks, with which the data traffic is transported to the backend systems. The construction and operation of a specific PLC infrastructure against the background of various limitations named in the report is considered part of a hybrid overall solution, i.e. it is conceivable in a technology mix with other wireless or radio telecommunications infrastructures. A synergistic use is not given because no emergency communication can be supported.
- **Radio applications in the non-exclusive radio spectrum:** In recent years, more and more radio technologies have been developed for machine-to-machine communication (Internet of Things) using frequencies for which there are no exclusive frequency usage rights. Examples are Lo-

RaWAN or Sigfox. Since there is no exclusive use of the frequencies, the providers can not guarantee a certain quality of services. Network-critical and security-relevant applications in the smart energy network cannot be supported in this respect. Likewise, the transmission capacities of these radio technologies are usually insufficient to meet, for example, the legal requirements for a supply with a high penetration of up to 95% of households.

- **Public LTE mobile communications in the range below 1 GHz:** In Germany, three parallel mobile networks are operated. The essential applications made possible by the networks and the radio technologies used are allocated to the mass market. Energy industry applications, which are strongly influenced by the machine-to-machine communication and in some cases also differ in their technical and local requirements significantly from mass market services, so far had little impact on the technology used or the network structure. However, the LTE mobile infrastructure already has a significant number of base station locations, which are particularly well-suited through the use of so-called subGHz frequencies (800 and 900 MHz), to enable the coverage of difficult to connect cellar rooms. The further expansion of the networks in the 700 MHz range can continue to improve supply. Nevertheless, the model calculations have shown that meeting a coverage target of 95% of the potential SMGWs results in statistically significant network expansion, i.e. in the frequency range below 1 GHz more than 10,000 additional base stations. It is not to be expected that mobile network operators will expand their mobile networks of this size only for the connection of SMGW alone, especially as the trend in the mobile communications market is that capacity frequencies of more than 1 GHz are increasingly used to introduce for example 5G.
- As the example of the city of Hamburg shows, several public mobile networks are used in combination for the connection of SMGWs, dispensing with the synergetic benefits mentioned above. Due to the complementarity of the coverage, the expansion requirements of the participating network operators are reduced (in a model calculation carried out, for example, by 10% with 5% complementarity of three network operators). In addition to the coverage problem lack of prioritization is to be named as a further deficit of the currently offered mobile services. Although this is technically available in LTE networks and is internally used by network operators e.g. for VoIP services, there are currently no offers for third parties that would allow, for example, an SMGW administrator or a distribution system operator to use an LTE data service with a guaranteed data rate. In this respect, it is necessary to make the functions announced in the context of 5G for the prioritization of exclusive resources (via the so-called "network slicing") available for third parties.
- Given the implementation of coverage-driven network deployment and the availability of effective prioritization, the model calculations show that there are no bottlenecks in terms of required transmission capacity and that bandwidth requirements are low compared to consumer-driven services (approximately 2 percent of end-user traffic).
- But even if the coverage target of 95% is achieved statistically by grid expansion, it cannot be guaranteed, especially for economic reasons, that any desired SMGW location can be connected using mobile technology. Thus, complementary technical solutions must be provided to meet specific requirements. A synergetic use is theoretically conceivable, but practically not given,

because the public mobile networks are usually not resilient in their respective access networks or more than 26,000 base stations would have to be made resilient.

- **Dedicated LTE mobile network for critical infrastructures at 450 MHz:** In addition to the use of public mobile networks, the construction of a dedicated LTE mobile network at 450 MHz has also been considered. Due to the more favourable propagation characteristics, fewer mobile sites are necessary to achieve the required area coverage. There is a factor of 3 between the public mobile networks and a dedicated radio network at 450 MHz for the needs of base station locations due to the propagation characteristics of the frequencies used. This means that in the 450 MHz range three times fewer sites are required than in the frequency bands used by public mobile network operators.
- On the basis of well-defined user groups of the dedicated network, the implementation of prioritization functions can also be assumed as part of the operating concept. Thus, a technical feasibility of, for example, all necessary SMGW-related communication requirements can be assumed.
- Unlike public mobile networks, today there is no significant, i.e. nationwide network available. These frequencies are now only used in single regions or cities in Germany. Here, the CDMA technology is applied. As a result, the CDMA-450-based regional networks, which are only available on a selective basis, need to be expanded and migrated over the medium term to LTE for long-term use. Furthermore, model calculations show that a significant number of mobile radio sites are required to reach coverage of cellar rooms using 450 MHz. The grid expansion can be accomplished here according to the specific needs. First networks in the urban environment show (Düsseldorf) that less than 10 base stations have to be built for the necessary coverage. Since a 450 MHz network deals with comparatively few locations compared to other radio networks, blackout resilience can be realized. Individual energy suppliers are already taking this route.

As a result, the technical analysis shows that, with the exception of telecommunications services in wireless network using 450 MHz, the relevant communication technologies or networks do not allow a synergistic use. Synergistic use means that both control and monitoring of network equipment, secure integration of RES sites and emergency communication are possible that require blackout resilience, as well as applications that access the smart meter gateway. If only parts of energy applications are considered with regard to their technical requirements, several communication technologies and networks are available, which can then only be used in a technology mix, however.

The preferred solution from a technical and operational point of view is subject to the restriction that there is a conflict of interest between operators of critical infrastructures (for example in the energy sector) and authorities and organizations with security tasks (PPDR). The German telecommunication regulator has to decide how the frequencies will be used from the year 2021 onwards. If the German regulator assign the frequencies to PPDR, there will be no valid options for grid operators to make use of resilient telecommunication services. It is more than questionable how grid operators would be in a position to comply with legal obligations which aims at establishing blackout resilient network infrastructure. If telecommunication services enabled by a 450 MHz network can be used for energy-related applications, the German regulator should ensure that with the new assignment the terms and conditions of use are designed in a way that investments in a nationwide mobile network for critical infrastructure are encouraged.

Furthermore, the analysis of sector specific regulation of telecommunication markets shows that connecting SMGW via fibre optical networks can be facilitated if, indirectly, the incentives for investing in such networks are strengthened. Higher penetration of FttB/H connections is likely to improve SMGW connection as well.

The study also considered international experiences with the connection of SMGW. Here we see a very heterogeneous picture. While the Netherlands and Austria are using 450 MHz frequencies, other countries are also using fixed line communication technologies, whereby there is no synergetic use covering smart grids and smart markets. However, the energy industry through the EUTC organisation votes for the use of frequencies in the range of 450 MHz all over Europe.

As a result, the study shows that it is possible to set up a telecommunications infrastructure synchronously with the energy transition in order to support or enable not only the SMGW network, but also other specific energy-related applications in the distribution network. However, this option depends on frequency regulation.

Inhaltsverzeichnis

Vorbemerkungen	3
Executive Summary – Topthema 3	4
Executive Summary – Top Theme 3	9
Inhaltsverzeichnis	14
Abbildungsverzeichnis	17
Tabellenverzeichnis	18
1 Einleitung des Gutachtens zum Thema „TK-Netzinfrastruktur und TK-Regulierung“	20
1.1 Ausgangslage	20
1.2 Vorgehensweise	24
2 TK-Netzinfrastruktur	26
2.1 Anforderungsanalyse	28
2.1.1 Relevante Anwendungsfälle	30
2.1.2 Übersicht der Kriterien	31
2.1.3 Anforderungen an die Verkehrskapazität der TK-Infrastruktur	45
2.1.4 Aggregation der Datenverkehrsanforderungen für die Engpassanalyse	53
2.2 Analyse TK-Technologien aus technischer Sicht	56
2.2.1 Funktechnologien	58
2.2.2 Power-Line-Communications	68
2.2.3 Drahtgebundene Techniken	70
2.2.4 Zusammenfassung der Bewertung in der Übersicht	72
2.3 Zwischenfazit	76
2.4 Engpassanalyse	76
2.4.1 Engpässe in TK-Infrastrukturen: Entstehung und Gegenmaßnahmen im Überblick	77
2.4.2 Netzplanung am Beispiel LTE und Ableitung eines LTE-Netzmodells	79
2.4.3 Realisierungsvarianten zur Verdichtung der Infrastruktur	96
2.5 Zwischenfazit	97
3 TK-Regulierung	102
3.1 Einleitung	102
3.2 Verfügbarkeit von Telekommunikationsinfrastrukturen und Kosten	103
3.3 Regulatorische Klassifizierung der Nachfrage nach Konnektivität	104
3.4 Symmetrische Marktregulierung	106
3.5 Frequenzregulierung	108
3.5.1 Ausgangslage	109
3.5.2 Frequenzen und Digitalisierung der Energiewende: relevante grundsätzliche Fragestellungen	110

3.5.3	Der Ordnungsrahmen von Frequenznutzungsrechten.....	111
3.5.4	Möglichkeiten der gemeinsamen Frequenznutzung: Sharing von Frequenznutzungsrechten	113
3.5.5	Änderung des Frequenzplans in Deutschland im Zusammenhang mit der Digitalisierung der Energiewende	116
3.6	Konzept einer Nutzung von 450-MHz-Frequenzen.....	117
3.6.1	Frequenzzuteilungsmechanismen (Auktionen versus Beauty-Contest) bei vorliegender Knappheit von Frequenznutzungsrechten)	117
3.6.2	Frequenznutzungsdauern.....	118
3.6.3	Mindestgebote bzw. Frequenzzuteilungsgebühren	119
3.6.4	Spezifische Frequenznutzungsbedingungen: Versorgungsaufgaben	119
3.6.5	Fazit zur Frequenzregulierung.....	120
3.7	Netzneutralität	120
3.7.1	Einordnung.....	121
3.7.2	Spezialdienste.....	121
3.7.3	Netzneutralität und intelligente Energienetze	123
3.8	Internationale Erfahrungen	124
3.8.1	Niederlande	124
3.8.2	Fallbeispiel 1: Alliander	124
3.8.3	Irland	128
3.8.4	Großbritannien	129
3.8.5	Spanien	130
3.8.6	Österreich	130
3.8.7	Frankreich	131
3.8.8	Dänemark	131
3.8.9	Zwischenfazit	132
4	Fazit und Handlungsempfehlungen	133
	Literaturverzeichnis	135
	Anhang A: Datenaufkommen von SMGW-Anwendungen	142
	Anhang B: Potential von Multi-Vendor und National-Roaming-Strategien in Abhängigkeit der Komplementarität der Netze	147
	Anhang C: Technische TK-Technologieübersicht	148
	Funktechnologien im lizenzierten Frequenzband	148
	Enhanced Data Rates for GSM Evolution (EGDE)	148
	Universal Mobile Telecommunications System (UMTS).....	150
	Long Term Evolution (LTE).....	152
	eMTC (LTE).....	154

Narrowband-IoT (NB-IoT).....	156
CDMA 450.....	158
Satellitenkommunikation.....	160
Funktechnologien im unlicenzierten Frequenzband	162
WLAN (Wireless Local Area Networks, IEEE 802.11n)	162
WLAN-IoT (Wireless Local Area Networks für das Internet der Dinge, IEEE 802.11ah)	164
LoRaWAN	166
SigFox	168
PLC (PLC)	170
Narrowband PLC (NB-PLC)	170
Broadband PLC (BB-PLC).....	172
Drahtgebundene Technologien.....	174
Digital Subscriber Line (xDSL)	174
Koaxial-Kabel	176
Fiber-To-The-Home (FTTH)	178
Anhang D: Validierung der Netzplanung	180
Anhang E: Sensitivitätsanalyse zum Einfluss des SMGW-Anteils in Deep-Indoor-Umgebungen.....	183
Anhang F: Einfluss der Netzzustandsüberwachung auf die LTE-Netzplanung	184
Anhang G: Szenario-Parameter der Engpassanalyse	187
Anhang H: Eckpunkte für hinreichende Frequenzen für drahtlose IoT-Anwendungen zur Ermöglichung der Energiewende in Deutschland	190
Abkürzungsverzeichnis.....	193

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Energiewirtschaftliche Anwendungen und Telekommunikationsdienste	23
Abbildung 2-1:	Fokus des Gutachtens auf TK-Infrastrukturen im Zugangsnetz	27
Abbildung 2-2:	Anforderungskriterien an SMGW-taugliche TK-Infrastrukturen im Überblick	31
Abbildung 2-3:	Ableitung der Anforderung an die max. Gebäudedämpfung	34
Abbildung 2-4:	Gebäudedämpfung für unterschiedliche Anteile von SMGW-Standorten in Kellern („Deep Indoor“)	35
Abbildung 2-5:	Ableitung einer Systemdatenrate am Beispiel LTE	38
Abbildung 2-6:	Ableitung einer Datenrate in der HVSt aus dem Datenvolumen	48
Abbildung 2-7:	Vergleich Einzeldatenrate vs. Flottendatenrate vs. Modellierung der Hauptverkehrsstunde (HVSt)	50
Abbildung 2-8:	Variation der Annahmen zu den Anforderungen der Netzzustandsüberwachung (NZÜ) an die TK-Infrastruktur	52
Abbildung 2-9:	Aggregierte Datenrate für Modellierung des Datenverkehrs gemäß FNN-HVSt	54
Abbildung 2-10:	Aggregierte Datenrate für Modellierung des Datenverkehrs gemäß FNN-Flotte	55
Abbildung 2-11:	Aggregierte Datenrate für Modellierung des Datenverkehrs gemäß FNN-Flotte	56
Abbildung 2-12:	Betrachtete TK-Infrastrukturen in der Übersicht	57
Abbildung 2-13:	Lizenziertes Frequenzspektrum im Bereich von 700 bis 3500 MHz	61
Abbildung 2-14:	Methodik der Engpassanalyse	78
Abbildung 2-15:	Stellgrößen der Netzplanung am Beispiel Mobilfunk	78
Abbildung 2-16:	Grundprinzipien der Mobilfunknetzplanung für SMGW-Anwendungen anhand der Dimensionen Abdeckung und Kapazität, ausgehend von der Dimensionierung öffentlicher Netze	80
Abbildung 2-17:	Klassifizierung des Deutschland-Szenarios anhand unterschiedlicher Regionstypen	87
Abbildung 2-18:	Vergleich von Netzplanung und realen LTE Netzdaten in Deutschland	88
Abbildung 2-19:	Abdeckungsbasierter Basisstationsbedarf in Deutschland unter Berücksichtigung unterschiedlicher Netztypen (privates 450-MHz-Netz, öffentliches subGHz-Netz) und Abdeckungsziele	89
Abbildung 2-21:	Erforderliche aggregierte Datenrate in Downlink- und Uplink-Richtung für SMGW- Anwendungen und Endkonsumenten	90
Abbildung 2-22:	Basisstationsbedarf in Deutschland im Hinblick auf Kapazitäts- und Abdeckungsziele	91
Abbildung 2-23:	Illustration der unterschiedlichen Komplementarität von Mobilfunkinfrastrukturen am Beispiel von zwei Mobilfunknetzen	93
Abbildung 2-24:	Basisstationsausbaubedarf unter Berücksichtigung verschiedener Varianten des Einsatzes einer globalen SIM	94
Abbildung 2-25:	Bandbreitenbedarf von SMGW-Anwendungen auf Grundlage des abdeckungsorientierten Mengengerüsts an Basisstationen	95
Abbildung 2-26:	Bandbreitenbedarf von SMGW-Verkehr (50 % Durchdringung) und verschiedene Anteile von NZÜ Verkehr auf Grundlage des abdeckungsorientierten Mengengerüsts an Basisstationen	96

Abbildung 2-26:	Gegenüberstellung unterschiedlicher Verdichtungsoptionen zur Erhöhung der flächendeckenden Erreichbarkeit von SMGWs bei Nutzung von LTE als Haupttechnologie	97
Abbildung 2-27:	Qualitativer Technologiemix bei Fokus auf SMGW-Vernetzung (links) bzw. bei synergetischer Nutzung von SMGWs und Verteilernetzanwendungen.	99
Abbildung 3-1:	Schematische Kostenverläufe verschiedener Technologien im Zeitablauf.....	104
Abbildung 3-2:	Technische Anforderungen an die TK-Infrastruktur und Maß an Kontrolle am Fallbeispiel Alliander (Niederlande).....	125

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Bewertungsmaßstab für Basis- und erweiterte Systemparameter.....	58
Tabelle 2-2:	Beispielintrag aus dem Frequenzplan für ein unlizenzieretes ISM-Band.....	59
Tabelle 2-3:	Beispielintrag aus dem Frequenzplan für ein lizenziertes Band.....	59
Tabelle 2-4:	Verfügbarkeit von leitungsgebundenen Breitbandtechnologien für Haushalte in Deutschland nach Bundesland in % (Stand Ende 2017, Statista)	71
Tabelle 2-5:	Bewertung der Basisparameter potentieller SMGW-Zugangstechnologien in der Übersicht.....	72
Tabelle 2-6:	Bewertung erweiterten Systemparameter potentieller SMGW-Zugangstechnologien in der Übersicht	74
Tabelle 2-7:	Linkbudget-Berechnung als Grundlage der abdeckungsorientierten Netzplanung	81
Tabelle 2-8:	Parameter der kombinierten Verteilungsfunktionen für die Dämpfung in Innen- und Kellerräumen	83
Tabelle 2-9:	Modellierungsparameter der abdeckungsorientierten Netzplanung.....	85
Tabelle 2-10:	Modellierungsparameter der kapazitätsorientierten Netzplanung.....	85
Tabelle 2-11:	Basisparameter Deutschland-Szenario.....	86

1 Einleitung des Gutachtens zum Thema „TK-Netzinfrastruktur und TK-Regulierung“

Die Energiewende ist ein nationales Großprojekt, das die im Markt befindlichen Akteure mit vielfältigen Herausforderungen konfrontiert. Zu den Herausforderungen gehört beispielsweise eine bidirektionale kommunikative Anbindung von Betriebsmitteln, EEG-Anlagen und Speichern. Zusätzlich müssen Verteilernetzbetreiber Antworten darauf finden, wie sie die kommunikationstechnischen Anforderungen eines krisenfesten Workforce-Managements (Notfall-Managements) erfüllen wollen. Dies schließt die Sprachkommunikation mit ein, wobei hier einige Anwender besondere Anforderungen (Gruppenruf) haben. Messstellenbetreiber sind ausweislich des Messstellenbetriebsgesetzes für eine sichere bidirektionale Anbindung von intelligenten Messsystemen (Smart-Meter-Gateways) verantwortlich.

Damit richtet sich der Blick von Verteilernetzbetreibern und Messstellenbetreiber in einer neuen Art und Weise auf Telekommunikationsinfrastrukturen und Telekommunikationsdiensten. Ohne die Nutzung von Informations- und Kommunikationstechnologien wird es keine Digitalisierung der Energiewende geben. Es stellt sich für sie die Frage, ob die vorhandenen Angebote von Telekommunikationsnetzbetreibern hinreichend geeignet und verfügbar sind, um Verteilernetzbetreiber und Messstellenbetreiber bei der Digitalisierung ihrer Prozesse (z.B. Steuerung und Kontrolle der Netze, Übertragung von Messwerten, Angebot von Mehrwertdiensten) zu unterstützen. Damit ist auch die Leitfrage dieses Gutachtens formuliert. Darüber hinaus werden wir analysieren, ob die TK-Regulierung einen Beitrag zur Energiewende leisten kann.

1.1 Ausgangslage

Um die oben formulierten Fragen beantworten zu können, sind grundsätzlich sämtliche Prozesse und Anwendungen zu betrachten, die die Digitalisierung der Energiewende ausmachen. Im besonderen Fokus der Digitalisierung der Energiewende stehen naturgemäß die Vernetzung der verteilten Verbraucher und Erzeuger im Verteilernetz, mithin das SMGW als Schlüsselkomponente der Digitalisierung des zukünftig stark dezentral organisierten Stromsystems. So bildet auch die Betrachtung der Anforderungen des SMGWs einen besonderen Fokus des Gutachtens. Darüber hinaus müssen aber auch die durch die Energiewende gestiegenen Anforderungen¹ im Betrieb des Energiesystems über alle Spannungsebenen hinweg inkl. erweiterter Anforderungen an den Betriebsfunk in eine Gesamtbewertung einfließen. Daher ist es geboten, die Nachfrage nach Telekommunikationsdiensten in den Gesamtkontext der Energiewende zu stellen.

Mit der Energiewende schreitet der Ausbau der erneuerbaren Energien kontinuierlich voran. Heute sind die meisten erneuerbaren Erzeugungsanlagen an die Stromverteilnetze angeschlossen. Das entspricht einer Windkraft- und Photovoltaikleistung von mehr als 100 GW, die vor Ort in der Regel nicht verbraucht wird. Dezentralität, Kleinteiligkeit und Volatilität der Erzeugung dieser Anlagen erhöhen die Komplexität der Energieversorgung, sind für die Stabilität der Stromversorgung eine Herausforderung und bieten Angriffsflächen für Cyber-Attacken.² In der Folge kann mit guten Gründen davon ausgegangen werden, dass durch eine regional verteilte, dargebotsabhängige Stromproduktion, neuen Lasten und der Bedrohung durch Cyber-Attacken die Ausfallwahrscheinlichkeit der (regionalen) Stromversorgung künftig ansteigen wird.³ Daher ist die Nachfrage nach schwarzfallfesten Telekommunikationsdiensten mehr als zweckmäßig und angebracht. Im Übrigen beinhaltet die EU-Verordnung 2017/2196 die Verpflichtung

¹ Forum Netztechnik/Netzbetrieb (FNN) im VDE: 5G fitmachen für den Stromnetzbetrieb, Positionspapier, 2017.

² Vgl. BT-Drs. 18/7555, S. 64.

³ T. Petermann et al.: Was bei einem Blackout geschieht. Folgen eines langandauernden und großräumigen Stromausfalls, Studien des Büros für Technikabfolgenschtzung beim Deutschen Bundestag - 33., S. 63, 2011.

zum Einsatz von schwarzfallfesten Telekommunikationsdiensten. Diese Verpflichtung gilt für Übertragungs- und Verteilernetzbetreiber. Die Schwarzfallfestigkeit der Telekommunikationsdienste ist beim Netzwiederaufbau nach einem Ausfall der Stromversorgung essentiell und damit kritisch, um die Versorgungsunterbrechung schnellstmöglich zu beheben.

Des Weiteren spielt das Engpassmanagement eine immer wichtigere Rolle. Durch den beschriebenen Zubau an erneuerbaren Energien und die Zunahme von E-Mobilität kommt es durch erhöhte Gleichzeitigkeit zunehmend zu Netzengpässen auch auf niedrigeren Spannungsebenen. Dies hat eine erhöhte Systembelastung zur Folge, die durch entsprechende Eingriffe des Netzbetreibers behoben werden müssen.

Insbesondere die Rolle des Verteilernetzbetreibers hat sich in den letzten Jahren durch die beschriebenen Entwicklungen stark verändert. Sie sind für die Betriebsführung und Spannungshaltung in ihrem Netz vollumfänglich verantwortlich. Durch die Aufgabe, die sichere Einbindung, Überwachung und Steuerung von EEG-Anlagen zu gewährleisten sind die Anforderungen stark gestiegen.⁴ Speziell beim Netzwiederaufbau sind die Übertragungsnetzbetreiber in weiten Teilen auf das Mitwirken der Verteilernetzbetreiber angewiesen, da diese vorgelagert an das Netz des ÜNB angeschlossen sind.

Vor diesem Hintergrund lassen sich unterschiedliche Anwendungsbereiche, die den Einsatz von Telekommunikationsdiensten voraussetzen, beschreiben, die insbesondere Betreiber von Mittel- und Niederspannungsnetzen angehen müssen (siehe Abbildung 1-1).

Verteilernetzbetreiber sind für eine sichere und stabile Steuerung und Überwachung von Betriebsmitteln verantwortlich. Dies schließt auch die Sprachkommunikation (im Notfall) mit ein. Wenn heute beispielsweise ein Fehler in den Mittelspannungsnetzen auftritt, sprechen die Leistungsschalter in den betroffenen einspeisenden Umspannstationen an und schalten die zugehörigen Abzweige ab. In der Folge müssen die nachgelagerten Ortsnetzstationen des betreffenden Mittelspannungsstrangs heute von Mitarbeitern des Verteilernetzbetreibers aufgesucht werden, um mittels einer Auswertung von Messgeräten oder Probeschaltungen die gestörten Netzabschnitte zu identifizieren.⁵ Eine Störung kann durch die Kommunikation von Daten schnellstmöglich behoben werden. Dazu können z.B. Schalt- und Netzpläne des betroffenen Gebietes übermittelt werden oder virtuelle Unterstützung durch die Netzleitstelle erfolgen. Dies ist für einen Not- und Krisenfall von essentieller Bedeutung. Sofern dagegen eine bidirektionale Anbindung von Produktionsanlagen und Betriebsmitteln besteht, können Fehler schneller, im besten Fall sogar vor dem Eintreten einer Störung lokalisiert und ferngesteuert behoben werden.

Ebenso lassen sich Netzausfälle im Vergleich zu heute deutlich schneller beheben. Gerade das schnelle, gezielt nach Prioritäten gesteuerte Hochfahren der Stromversorgung, die für sämtliche Bereiche in Wirtschaft und Gesellschaft essentiell ist, setzt den weitestgehend flächendeckenden Einsatz von geeigneten Informations- und Kommunikationstechnologien voraus. Aus dem schnellen, koordinierten Wiederhochfahren der Stromnetze resultieren Wohlfahrtsgewinne. So streben die Netzbetreiber den schnellen Wiederaufbau des Stromnetzes mit selektiver Versorgung der wichtigsten Kunden wie Polizei, Feuerwehr

⁴ So kann der Netzbetreiber beispielsweise entsprechend dem Ampelkonzept des BDEW einzelne Teilleitungen dadurch entlasten, indem er aktiv in gewissen Netzteilen Erzeuger oder Verbraucher zu- oder abschaltet. Die Vielzahl von möglichen Maßnahmen, die sämtlich sichere und hochverfügbare Kommunikationsdienste bedürfen, ermöglichen eine intelligente Netzüberwachung und Netzsteuerung von Mittel- und Niederspannungsnetzen.

⁵ Accenture Consulting /Fraunhofer ESK: Smart Grid = Connected Grid, Kommunikationstechnologien als Grundlage des Smart Grid, Whitepaper, S. 8., 2017.

oder Krankenhäuser an. Dazu bedarf es einer Kommunikationsinfrastruktur, die durch eine Batteriepufferung über mehrere Stunden (nach der EU-Verordnung bis zu 72 Stunden) selbst nicht vom Spannungsabfall betroffen ist und insoweit gezielt zum Hochfahren des Stromnetzes eingesetzt werden kann (Schwarzfallfestigkeit). Perspektivisch kann ein Echtzeit-Navigationssystem im Stromnetz installiert werden, das den Systemzustand feststellt, die Abfolge für einzelne Handlungsschritte zur effektiven und effizienten Wiederherstellung des Systems berechnet und diese Handlungsschritte im besten Fall selbst ausführt. Letztere Fähigkeit wird auch unter dem Begriff „selbstheilendes Stromnetz“ diskutiert.⁶

Wichtig ist hierbei auch die Einbindung der EE-Anlagen und flexiblen Lasten. Nur wenn diese ebenfalls schwarzfallfest in das Kommunikationssystem eingebunden sind, kann ein schnelles „Wiederhochfahren“ des Systems gelingen. Würde auf die Anbindung dieser Elemente verzichtet, so können sich sogar negative, dem Netzwiederaufbau entgegenwirkende Effekte ergeben, wenn die Anlagen unkontrolliert Strom einspeisen bzw. abnehmen.

Ein weiterer Vorteil einer Überwachung und Steuerung im Niederspannungsnetz durch den Einsatz von Informations- und Kommunikationstechnologie ist die Minimierung von Netzverlusten oder eine Weitbereichsregelung durch Einbindung intelligenter Ortsnetzstationen. Ebenfalls können Prognoseabweichungen festgestellt werden, so dass eine verbesserte Bilanzkreisbewirtschaftung möglich ist, die wiederum zu geringeren Ausgleichsenergiekosten führt.⁷

Mit der Zunahme dezentraler Erzeugungsanlagen, Speichern, Wärmepumpen und einer wachsenden Anzahl von PKW mit elektrischem Antrieb (E-Mobility) kommt noch eine Netzzustandsüberwachung hinzu, so dass zusätzlich eine kontinuierliche Auswertung von Daten über den Zustand der Niederspannungsnetze unausweichlich ist. Insbesondere eine Steigerung der Penetration von E-Mobility ist für die Niederspannungsnetze eine Herausforderung, weil sie für diese Lasten, zumal wenn sie gleichzeitig anfallen, nicht ausgelegt sind.

- Netzbetreiber und/oder Messstellenbetreiber sind für eine sichere und stabile bidirektionale Anbindung von intelligenten Messsystemen verantwortlich. Hierbei können sich Anwendungen mit denen der beiden anderen Bereiche überlappen, wenn sich beispielsweise hinter dem Smart-Meter-Gateway eine Steuerungseinheit für EEG-Anlagen befindet. Dies ist auch der Grund, wieso der Gesetzgeber mit dem Messstellenbetriebsgesetz vorsieht, dass das Smart Meter Gateway für systemkritische Anwendungen der Netzbetreiber genauso einzusetzen ist wie für marktliche Anwendungen (synergetische Nutzung von TK-Diensten).

Im Ergebnis lassen sich zwei Gruppen von Anwendungen identifizieren: (1) Die Anwendungen, wie die Notfall-/Krisenkommunikation und Netzbetriebsmittelsteuerung, deren größte Herausforderungen in Bezug auf TK-Dienste die Schwarzfallfähigkeit und die priorisierte Datenübertragung sind, und (2) die Anwendungen, wie die Abrechnung und das Messdatenmanagement, die ohne eine Schwarzfallfähigkeit auskommen, jedoch teilweise eine hohe Reaktionsfähigkeit erfordern. Die Netzzustandsüberwachung kann je nach Ausprägung in eine der beiden Gruppen einsortiert werden.

⁶ Vgl. z.B. M. Amin: Toward Self-healing Energy Infrastructure Systems, in: IEEE Computer Applications in Power, January 2001, S. 20 – 28, 2001; K. Moslehi et al.: Framework for a Self-Healing power Grid, in: IEEE Power Engineering Society General Meeting, S. 3027 – 3034, 2005.

⁷ Accenture Consulting /Fraunhofer ESK: Smart Grid = Connected Grid, Kommunikationstechnologien als Grundlage des Smart Grid, Whitepaper, S. 9., 2017.

Um den mit den oben genannten Herausforderungen verbundenen Risiken zu begegnen, bestehen nun zwei grundsätzliche Optionen für die Verteilernetzbetreiber: Entweder werden die Niederspannungsnetze mittels des Einsatzes von Informations- und Kommunikationstechnologien überwacht und steuerbar, sodass beispielsweise neue Lasten erkannt und geregelt werden können, oder es kommt zum traditionellen Ausbau der Niederspannungsnetze. Hierbei ginge es dann darum, die Leitungsinfrastruktur zu verstärken. Dies wäre nach Expertenmeinungen jedoch mit einem erheblichen (Mehr-) Aufwand verbunden, der aus volkswirtschaftlicher Sicht ineffizient ist. Die Bundesregierung setzt deshalb auf die Option „intelligente Energienetze“, die eine konsequente Digitalisierung der Energiewirtschaft verlangt.

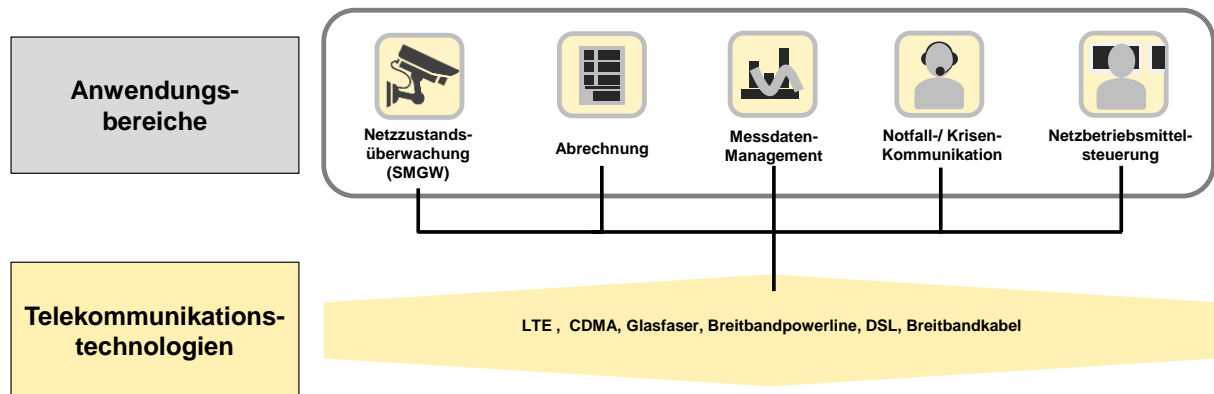


Abbildung 1-1: Energiewirtschaftliche Anwendungen und Telekommunikationsdienste

Wenn vor diesem Hintergrund über die zu digitalisierenden Prozesse diskutiert wird, können zwei strukturell unterschiedliche Bereiche des Energieversorgungssystems identifiziert werden:

Einerseits geht es darum, die *Stromnetze* mit Kommunikations-, Informations-, Mess- und Regeltechnik auszustatten, um die Netze zu steuern und kontrollieren zu können. Im Fokus stehen hier insbesondere die Stromverteilernetze, die zu „Smart Grids“ (oder „intelligenten Energienetzen“) weiterentwickelt werden sollen. Vordringliches Ziel ist es hierbei, den gesetzlichen Anforderungen hinsichtlich einer sicheren und stabilen Stromversorgung zu entsprechen. Davon ist sowohl ein hoher „Quality of Service“ (Priorisierung der Datenübertragung) der Telekommunikationsdienste als auch die Nutzbarkeit von Telekommunikationsdiensten während eines Spannungsabfalls betroffen. Bereits heute ist die Netzzustandsüberwachung in der Hochspannung und vielen Teilen der Mittelspannung Realität – mit zunehmender Tendenz.

Andererseits werden von der Digitalisierung die Wertschöpfungsprozesse im Bereich der Produktion, des Vertriebs oder des Handels erfasst. Diese Wertschöpfungsstufen werden dem „Smart Market“ zugeordnet.⁸ Hier fallen die Anforderungen an die Telekommunikationsdienste bzw. die Dienstegüte des nachgefragten TK-Diensten in der Regel deutlich geringer aus. Eine Schwarzfallfähigkeit von TK-Diensten wird es beispielsweise hier nicht bedürfen.

Eine solche Differenzierung in „Smart Market“ und „Smart Grid“ ist jedoch nicht immer trennscharf. So erfasst Art. 3 Abs. 11 der Stromrichtlinie 2009/72/EG, der darauf abzielt, dass Elektrizitätsunternehmen ihren Stromverbrauch optimieren, indem sie u.a. intelligente Messsysteme oder intelligente Netze einführen, sowohl den netzseitigen als auch den Bereich außerhalb des Netzes.

Die Veränderungen in der Energieerzeugung führen nun dazu, dass Daten einer großen Anzahl von Akteuren flexibel, bidirektional und nahezu in Echtzeit miteinander verknüpft und verarbeitet werden müssen. Nur wenn die relevanten Daten aus der Erzeugung, Verteilung und Nutzung soweit erforderlich ge-

⁸ B. Heinlein: Rechtsrahmen von Smart Grids und Smart Markets, in: Aichele, C. und O. D. Doleski, (Hrsg.): Smart Market: Vom Smart Grid zum intelligenten Energiemarkt, S. 53 – 79, 2014.

meinsam zur Verfügung stehen, lassen sich künftig Prozesse zur stabilen Netzsteuerung oder der Qualitätssicherung implementieren. Ein Beispiel dafür ist die Netzampel, bei der die marktlichen und die gesetzlichen Rollen zur Gewährleistung einer stabilen Versorgung systemisch miteinander verkoppelt werden. Aus diesem Grund wird von Branchenvertretern die Implementierung eines, sowohl die Aspekte des „Smart Grids“ als auch des „Smart Markets“ adressierenden, datenorientierten Architekturmodells gefordert.⁹

Natürlich erfordert ein gemeinsames datenorientiertes Architekturmodell noch nicht, dass einheitliche IKT-Systeme für „Smart Grid“- und „Smart Market“-Anwendungen angeschafft werden. Es ist möglich, für die Anwendungen im „Smart Market“ und im „Smart Grid“ unterschiedliche Telekommunikationsnetze bzw. -dienste, Managementsysteme oder Sicherheitsmaßnahmen vorzusehen. Der Preis für getrennte Systeme ist jedoch eine erhöhte Systemkomplexität, mehr Schnittstellen, darauf aufbauend höhere Transaktionskosten sowie geringere Skaleneffekte und Synergien. Zudem muss dann durch geeignete Mechanismen ausgeschlossen werden, dass die beiden (getrennten) Systeme in nachteiliger Art und Weise gegeneinander wirken.

Im Ergebnis führen die obigen Ausführungen zu folgenden Überlegungen und Untersuchungsgegenständen:

- Das Voranschreiten der Digitalisierung setzt die Verfügbarkeit von Telekommunikationsdiensten, die den technischen Anforderungen entsprechen, voraus. Soweit diese Dienste noch nicht am Markt angeboten werden, ist zu prüfen, über welche (regulatorischen) Maßnahmen ein entsprechendes Angebot an TK-Diensten angereizt und unterstützt werden kann.
- Die Leistungsfähigkeit von Telekommunikationsdiensten bzw. -netzen ist dahingehend zu untersuchen, ob bidirektionale Kommunikationsanbindungen die notwendigen Reaktionszeiten bei der Datenübermittlung, eine Priorisierung der Datenübertragung sowie eine Unterstützung im Spannungsabfall (Schwarzfallfähigkeit) ermöglichen. Insoweit stellt sich die Frage, inwieweit Telekommunikationsdienste im hier betrachteten Umfeld Krisen und Katastrophen beherrschbar machen.

1.2 Vorgehensweise

Das vorliegende Gutachten zum Topthema 3 soll im ersten Teil aufzeigen, welche Kommunikationstechnologien heute und künftig insbesondere aus technischer und operativer Sicht in der Lage sind, die spezifischen Anforderungen einer digitalisierten Energiewirtschaft zu erfüllen. In der Studie werden neben den Anwendungsfällen („Use-Cases“) aus dem Gutachten zu Topthema 2 (Sektorkopplung, Steuern und Schalten) auch Use-Cases beispielsweise um das Smart-Meter-Gateway betrachtet. Obwohl nicht sämtliche Use-Cases, die beispielsweise in Verteilernetzen vorhanden sind, explizit betrachtet und hinsichtlich ihrer Anforderungen erläutert werden, sind jedoch die Bewertungskriterien so angelegt, dass eine ganzheitliche Bewertung der jeweiligen Kommunikationstechnologie bzw. -netze nichtsdestotrotz möglich ist.

Ziel des ersten Gutachtenteils ist somit zu prüfen, ob das aktuelle und absehbare Angebot an TK-Diensten aus technischer und räumlicher Sicht geeignet ist, den Aufbau und Betrieb intelligenter Energienetze zu ermöglichen. Somit rückt die regionale Verfügbarkeit der jeweiligen Telekommunikationsinfrastrukturen oder die künftige Verfügbarkeit von Telekommunikationstechnologien, die in Deutschland

⁹ K. Straube et al.: Strategische Empfehlungen zur Umsetzung intelligenter Energienetze in Deutschland, Projektgruppe Intelligente Energienetze, Arbeitsgruppe 2, Digitale Infrastrukturen als Enabler für innovative Anwendungen, Nationaler IT Gipfel Essen, 2012.

hinsichtlich zukunftsfähiger, leistungsfähiger Anschlussnetze sehr unterschiedlich ausfällt, in den Fokus. Darüber hinaus wird eine Bewertung und Abschätzung von Kapazitätsengpässen in TK-Netzen vorgenommen.

Im zweiten Teil der Studie wird neben wirtschaftlichen Überlegungen eruiert, inwieweit die sektorspezifische Regulierung im Bereich der Telekommunikation den Aufbau und Betrieb von intelligenten Energienetzen unterstützen kann. Ein besonderer Fokus liegt hier auf der Frequenzregulierung, weil nur funkbasierte Telekommunikationsdienste geeignet sind, sämtliche Anwendungen potentiell zu unterstützen. Ob es sich dabei um stationäre oder mobile Anwendungen handelt, ist aus frequenzregulatorischer Sicht beim Einsatz von Mobilfunktechnologien unerheblich.¹⁰ Drahtgebundene Lösungen wie DSL oder Glasfaserzugänge können ein krisenfestes Workforce-Management nicht unterstützen. Im Übrigen gibt es keine Anhaltspunkte im Markt und in der Literatur dafür, dass Verteilernetzbetreiber oder Messstellenbetreiber darauf abzielen, sämtliche Smart-Meter-Gateways oder Sensoren und Aktoren mit leitungsgebundenen Technologien zu vernetzen.

In diesem Teil der Untersuchung wird betrachtet, ob bei der Frequenzregulierung oder der Regulierung von relevanten Vorleistungsmärkten im Festnetz Ansätze vorliegen oder denkbar sind, die einen Beitrag zum effektiven Einsatz von Kommunikationstechnologien in der Energiewirtschaft leisten können. Ebenfalls ist zu untersuchen, inwieweit die Anwendungsfälle eine Priorisierung von Datenübertragungen erfordern und insoweit die Bereitstellung entsprechender Konnektivität als „Spezialdienst“ einzustufen ist, der mit den Vorgaben zur Netzneutralität vereinbar sein muss. Des Weiteren wird die Analyse hinsichtlich ausländischer Erfahrungen abgerundet. Im Übrigen wird analysiert, inwieweit die Strategien der Telekommunikationsanbieter sowie der heutigen Förderung des Breitbandausbaus Impulse für die Digitalisierung der Energiewende liefern.

Die vorliegende Analyse basiert auf der Auswertung relevanter Literatur, Modellanalysen sowie Expertengesprächen mit relevanten Stakeholdern.

¹⁰ Gemäß des Frequenzplans kann eine Technologie, die dem Mobilfunkdienst zugeordnet wird, mobile, nomadische oder stationäre Anwendungen mit Konnektivität versorgen.

2 TK-Netzinfrastruktur

Kapitel auf einen Blick

Hinsichtlich der untersuchungsleitenden Frage, ob die bestehende oder künftige Telekommunikationsinfrastruktur die Energiewende unterstützt, bedarf es zunächst eines Untersuchungsrahmens. In diesem ersten Hauptkapitel des Gutachtens werden deshalb zunächst die Anforderungsanalyse und die Technologiebewertung dargelegt. Nachfolgend wird für funkbasierte Telekommunikationsdienste, die den technischen Anforderungen entsprechen, eine Engpassanalyse durchgeführt. Somit wird neben der technischen Eignung der Kommunikationstechnologien (Leistungsfähigkeit) ebenso analysiert, ob das Volumen der notwendigen Datenübertragungen ein Problem hinsichtlich der Digitalisierung der Energiewende darstellt. Auf Basis dieser Erkenntnisse wird ein technisch orientiertes Zwischenfazit gezogen und darauf basierende Empfehlungen ausgesprochen.

Im Ergebnis zeigt die Analyse, dass bis auf Telekommunikationsdienste, die funkbasiert im 450-MHz-Band angeboten werden bzw. die dort kurz- bis mittelfristig realisiert werden sollen, keine anderen TK-Infrastrukturen eine synergetische Nutzung zwischen unterschiedlichen Anwendungen erlauben, nämlich sowohl die Unterstützung einer Steuerung und Kontrolle von Betriebsmitteln, eine sichere Integration von EEG-Anlagen als auch weitere Anwendungen, die auf das Smart-Meter-Gateway zugreifen. Telekommunikationsdienste auf Basis von LTE im öffentlichen Mobilfunk oder Breitbandpowerline sind nicht schwarzfallfähig bzw. die Kosten, eine Schwarzfallfähigkeit zu implementieren, sind im Vergleich zur Realisierung im 450-MHz-Band so hoch, dass davon auszugehen ist, dass es kein entsprechendes Angebot am Markt geben wird. Sofern nur ein Ausschnitt von energiewirtschaftlichen Anwendungen im Hinblick auf ihre Anforderungen an TK-Dienste betrachtet werden, stehen mehrere Kommunikationstechnologien und -netze zur Verfügung, die dann aber nur in einem Technologiemix genutzt werden können, was sich auf die relevanten Kosten auswirkt. Der Technologiemix führt dann auch dazu, dass die fehlende örtliche Verfügbarkeit von einzelnen Kommunikationstechnologien (z. B. LTE) zweckmäßig kompensiert werden kann. Kapazitätsengpässe in öffentlichen Telekommunikationsnetzen sind in Bezug auf energiewirtschaftliche Anwendungen nicht zu erwarten.

Dieser Abschnitt hat das übergreifende Ziel, heute und in naher Zukunft verfügbare Telekommunikationsnetze im Hinblick auf ihre Eignung zur Erfüllung der gesetzlichen und regulatorischen Anforderungen für eine sichere Vernetzung von Smart-Meter-Gateways (SMGWs) und der das Energienetz im Backend steuernden IT-Infrastruktur zu bewerten.

Die kommunikationstechnischen Anforderungen an Telekommunikationsdienste, die von TK-Netzbetreibern am Markt oder in geschlossenen (dedizierten) TK-Netzen als Endkundenprodukte (Geschäftskundenprodukte) angeboten werden, leiten sich dabei aus den Regelwerken für die Umsetzung des SMGW-Rollouts (siehe Kapitel 2.2) sowie aus weiteren darüber hinausgehenden Anwendungen ab. Diese werden im Rahmen von weiteren Teilgutachten betrachtet und umfassen unter anderem die Elektromobilität und weitere steuerbare, verteilte Energieressourcen (*Distributed Energy Resources* – DER). Nicht explizit im Fokus der hier durchgeführten Betrachtungen steht die interne Vernetzung der im Kern der Energieinfrastruktur liegenden Komponenten (Hoch- und Mittelspannung, Umspannstationen, Kraftwerke, Windparks, sehr große Verbraucher, Ortsnetzstationen etc.) ebenso wie Betriebsfunkanwendungen.

Die Abbildung 2-1 visualisiert den beschriebenen Fokus des Gutachtens im Überblick.

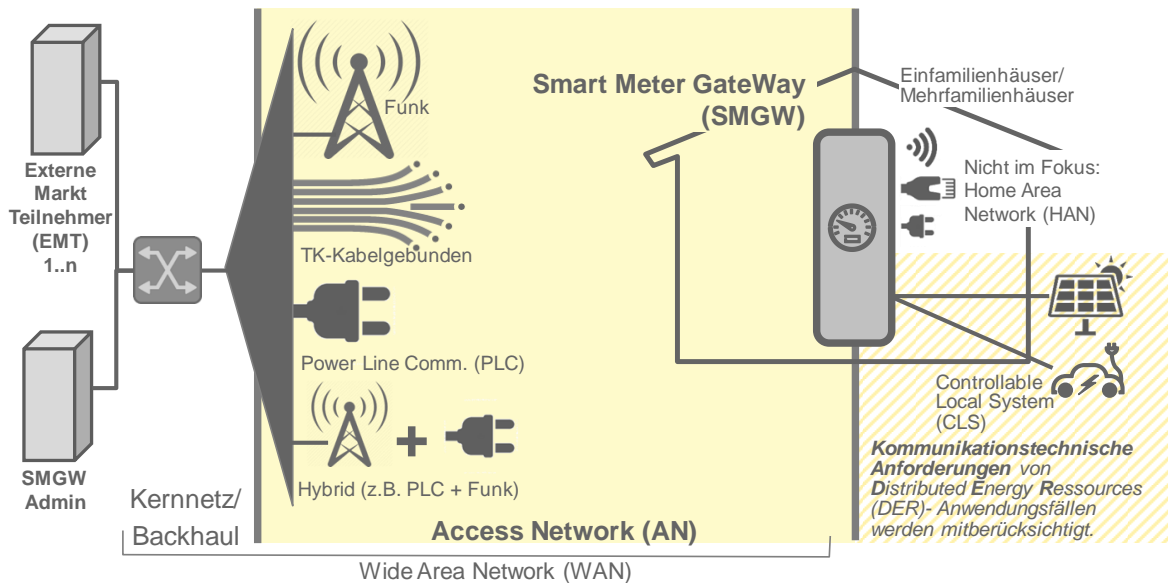


Abbildung 2-1: Fokus des Gutachtens auf TK-Infrastrukturen im Zugangnetz

Während Stromnetzbetreiber schon heute einzelne Stationen der Energieversorgungsinfrastruktur kommunikationstechnisch vernetzen, stellt sich die Vernetzung des SMGWs aufgrund der großen Menge in der Fläche weiträumig verteilter Kommunikationsknoten als neue und besondere Herausforderung dar. In den später noch detailliert diskutierten gesetzlichen und regulatorischen Vorgaben wird hierbei von der WAN (*Wide Area Network*)-Kommunikation gesprochen, die einerseits das Zugangnetz (*Access Network*) in der Fläche und andererseits die Kommunikation im Kernnetz bzw. *Backhaul*/betrifft.

Im Rahmen des ersten Teils des Gesamtgutachtens wird insbesondere die Eignung von verschiedenen Kommunikationstechnologien und / oder Zugangnetzen analysiert. Als **Optionen für das Zugangnetz** werden kabelgebundene (Kupfer, Breitbandkabel, Glasfaser), kabellose (Mobilfunk) und kabelgeführte Technologien (*Power Line Communications (PLC)*) betrachtet, wobei auch Kombinationen aus mehreren Techniken (Technologie-Mix) als Lösungsansatz in Frage kommen.

Nicht betrachtet wird hingegen die *Backhaul*-Infrastruktur, da für diese bewährte Lösungen existieren, die entweder von Energieversorgern selbst betrieben werden oder als öffentliche Infrastrukturen mit den Anforderungen von kritischen Infrastrukturen entsprechenden Dienstgütevereinbarungen angeboten werden. Hinsichtlich der lokalen *Inhouse*-Vernetzung existieren eine Vielzahl von technischen Optionen, die jedoch im Verantwortungsbereich des Hauseigentümers betrieben werden und daher im Rahmen dieses Gutachtens nicht als Teil einer hochverfügbaren Kommunikationslösung für das unter strengen regulatorischen und eichrechtlichen Bedingungen zu betreibende SMGW betrachtet werden.

Das oben benannte, übergreifende Ziel lässt sich in folgende Teilziele strukturieren:

- I. In einer **Anforderungsanalyse** wird das spezifische Anforderungsprofil für TK-Infrastrukturen zur Anbindung von SMGWs abgeleitet (Kapitel 2.1). Dabei werden vor allem die gängigen Regelwerke (Energiewirtschaftsrecht, Richtlinien für Informationstechnik (IT)-Sicherheit, Eichrecht) und Anforderungsspezifikationen (Netztechnik/Netzbetrieb) für intelligente Messsysteme berücksichtigt. Angesichts der Fülle der aus verschiedenen Blickwinkeln bereitgestellten Informationen besteht die besondere Herausforderung hierbei in der Extraktion und Konsolidierung der für das hier vorgestellte Gutachten relevanten Daten.

- II. In einem nächsten Schritt werden **Technologieoptionen** vorgestellt und im Hinblick auf das zuvor eingeführte Anforderungsprofil bewertet (Kapitel 2.2). Die hierfür notwendige Charakterisierung der Technologieoptionen erfolgt sowohl unter Rückgriff auf Standardisierungsdokumente und andere öffentlich zugängliche Quellen als auch auf Gesprächen mit Netzwerkherstellern, Telekommunikationsnetzbetreibern und Verteilernetzbetreiber, um praktische Erfahrungen aus Hersteller- und Betreibersicht einfließen zu lassen. Bei der **Bewertung** werden sowohl der Stand aktuell verfügbarer Implementierungen als auch mögliche Optionen einer Ertüchtigung für den zukünftigen Einsatz als SMGW-TK-Infrastruktur berücksichtigt. Als Ergebnis dieses Schritts werden grundsätzlich geeignete TK-Infrastrukturoptionen identifiziert, um deren Analyse im nächsten Schritt zu vertiefen.

- III. Der dritte Schritt hat zum Ziel, in einer **Engpassanalyse** die Leistungsfähigkeit verschiedener TK-Infrastrukturoptionen in kritischen Hochlastsituationen zu untersuchen und vergleichend zu bewerten (Kapitel 2.4). Hierfür werden geeignete Netzmodelle entwickelt und mit Daten realer Netze validiert. Um eine breite Akzeptanz herbeizuführen, werden analytische Netzmodelle eingeführt, die einerseits ausreichend realistisch aber andererseits auch in ihrer Struktur transparent und reproduzierbar sind. Angesichts der hierbei zu treffenden Vereinfachungen liegt der Fokus der Analyse in dem quantitativen Vergleich verschiedener Optionen und nicht auf der möglichst genauen Ableitung von Mengengerüsten für eine konkrete Netzinfrastruktur. Zur Parametrisierung der Netzmodelle werden Literaturangaben wie auch statistische Daten realer TK-Netze und zukünftiger SMGW-Installationen herangezogen.

- IV. Abschließend werden **Empfehlungen** für eine anforderungsgerechte Umsetzung von TK-Infrastrukturen abgeleitet und Handlungsbedarfe identifiziert.

Da sich das Gutachten an Experten aus verschiedenen Bereichen – insbesondere Technik, Wirtschaft und Regulierung sowohl im Energie- als auch TK-Sektor – richtet, wurde an verschiedenen Stellen Wert darauf gelegt, die Informationen der oft umfangreichen sektorspezifischen Originalquellen so aufzubereiten, dass die für das Gutachten erforderliche Essenz der Informationen übergreifend zugänglich wird. Die dabei teilweise durchgeführten Vereinfachungen und Abstraktionen sind aus Sicht der Autoren als Kompromiss notwendig, um die Erkenntnisse des Gutachtens für alle Seiten nachvollziehbar zu machen.

2.1 Anforderungsanalyse

Kapitel auf einen Blick

Die Anforderungen an Kommunikationstechnologien bzw. -netze speisen sich einerseits aus dem gesetzlichen Rahmen als auch andererseits aus den energiewirtschaftlichen Anwendungen, die bidirektionale Kommunikationsanbindungen erfordern. In diesem Kapitel wird somit der Grundstein für die nachfolgende, vergleichende Bewertung von Kommunikationstechnologien bzw. -netzen gelegt. Bei den Kriterien, die den konkreten Kommunikationsbedarf charakterisieren, werden dabei Kriterien herangezogen, die für Anwendungen beispielsweise im Rahmen der Steuerung und Kontrolle von Betriebsmitteln ebenfalls relevant sind. Wesentlicher Anknüpfungspunkt der Analyse ist aber das Smart-Meter-Gateway und die Anwendungen, die es hier mit Telekommunikationsdiensten zu unterstützen gilt.

Im Ergebnis wird gezeigt, dass bei funkgestützten Kommunikationstechnologien bzw. -netzen nur diejenigen zu betrachten sind, die Frequenzen unterhalb von 1 GHz einsetzen. Nur in diesem Bereich lässt sich eine „Deep-Indoor-Versorgung“ wirtschaftlich und technisch darstellen. Drahtgebundene Technologien erfüllen in der Regel die Leistungsanforderungen. Deren Herausforderung ist, dass sie wie bei

DSL oder Breitbandkabel in der Regel nur über Endkundenequipment genutzt werden können, was Verfügbarkeits- und Sicherheitsprobleme verursacht.

Aus den gesetzlichen und regulatorischen Vorgaben wurden für die Zwecke des Gutachtens Anforderungskriterien für die Bewertung von TK-Infrastrukturen abgeleitet. Für diese Anforderungsanalyse wurde insbesondere auf folgende Quellen zurückgegriffen:

- **Gesetz zur Digitalisierung der Energiewende (Messstellenbetriebsgesetz (MsbG) vom 29.8.2016¹¹), hier insbesondere folgende Paragraphen:**
 - § 21 Mindestanforderungen an intelligente Messsysteme
 - § 22 Mindestanforderungen an das Smart-Meter-Gateway durch Schutzprofile und Technische Richtlinien
 - § 29 Ausstattung von Messstellen mit intelligenten Messsystemen und modernen Messeinrichtungen
 - § 31 Wirtschaftliche Vertretbarkeit der Ausstattung von Messstellen mit intelligenten Messsystemen; Preisobergrenzen
- **Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) TR-03109 „Technische Vorgaben für intelligente Messsysteme und deren sicherer Betrieb“ (Nov 2015), hier insbesondere folgende Komponenten:**
 - TR-03109-1 „Anforderungen an die Interoperabilität der Kommunikationseinheit eines intelligenten Messsystems“¹²
- **Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) „Smart Metering – Digitale Kommunikation für Elektrizitäts- und andere Verbrauchsmessgeräte“, Oktober 2015¹³, hier insbesondere:**
 - Zeitsynchronisation des SMGWs

Die aus den gesetzlichen und regulatorischen Vorgaben direkt oder indirekt folgenden Anforderungen werden im ersten Unterkapitel 2.1.2 in einer Übersicht dargelegt.

Zur Vorbereitung der in Kapitel 2.4 vorgestellten Engpassanalyse vertieft das Unterkapitel 2.1.3 die quantitativen Anforderungen an die Verkehrskapazität der TK-Infrastruktur. Hierzu werden zunächst die vom VDE Forum Netztechnik/Netzbetrieb (FNN) formulierten „**Anforderungen an TK-Einrichtungen für den Betrieb von Messsystemen**“¹⁴ zusammengefasst, um im nächsten Schritt ergänzende Anforderungen, die aus dem Gutachten zum Topthema 2 resultieren, nämlich der Netzzustandsüberwachung und weiterer Dienste, einzuführen. Das Unterkapitel wird abgeschlossen mit der Ableitung einer unter her-

¹¹ Bundesregierung: Gesetz zur Digitalisierung der Energiewende, Bundesgesetzblatt, Nr. 43, S. 2034–2064, 2016.

¹² Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik: Technische Richtlinie BSI TR-03109-1, Anforderungen an die Interoperabilität der Kommunikationseinheit eines intelligenten Messsystems, 2013.

¹³ Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig: Smart Metering – Digitale Kommunikation für Elektrizitäts- und andere Verbrauchsmessgeräte, Amts- und Mitteilungsblatt Nr. 3, S. 19–23, 2015.

¹⁴ Forum Netztechnik/Netzbetrieb (FNN) im VDE: FNN-Hinweis Anforderungen an TK-Einrichtungen für den Betrieb von Messsystemen (Version 2), 2017.

ausfordernden Rahmenbedingungen auftretenden **aggregierten Kommunikationslast**, die es ermöglicht, im Zusammenspiel mit den in Kapitel 2.4 vorgestellten Netzmodellen mögliche Engpässe der TK-Infrastruktur aufzuzeigen.

2.1.1 Relevante Anwendungsfälle

Das FNN des VDE hat einen sog. FNN-Hinweis herausgegeben, in dem Anforderungen an TK-Einrichtungen für den Betrieb von Messsystemen formuliert werden. Dieses Dokument hat zwar keinen normativen Charakter, aber da im FNN das Expertenwissen aus der Energiebranche und der Kommunikationstechnik (Betreiber und Systemtechnikhersteller von sowohl Energiesystemen wie Kommunikationssystemen) gebündelt wird, hat es eine hohe Relevanz für dieses Gutachten. Für die jeweiligen Nutzungsszenarien werden detailliert einzelne sog. Anwendungsfälle („Use-Cases“) definiert. Da sich diese auf das WAN beziehen, werden diese als WAN-Anwendungsfälle oder kurz WAF bezeichnet. Ausgangspunkt der Definition der Anwendungsfälle sind die gesetzliche Vorgaben und so erfasst das Dokument eine Reihe von Nutzungsszenarien des SMGWs:

- Aufgaben in Bezug auf das intelligente Messsystem (Auslesen, Wartung, Tarife)
- Netzdienliche Funktionen (Schalten aufgrund von Marktfunktionen)
- Netzkritische Funktionen (Netzzustandsüberwachung, Schalten zur Schwarzfall-Vermeidung)

Im Kapitel 2.1.3 werden die konkreten Anforderungen der einzelnen Anwendungsfälle, z. B. Datenmengen und max. Verzögerungszeiten bei der Durchführung) zur Analyse der Verkehrskapazität aufgegriffen.

Im Rahmen des Gutachtens zum Topthema 2 wurden ergänzend zu den vom FNN beschriebenen Anforderungen übergreifende Konzepte und Anforderungen der **Netzzustandsüberwachung (NZÜ)** detailliert untersucht. Wie oben bereits angeführt, beinhaltet das Hinweisdokument des FNN bereits Anwendungsfälle, die die Netzzustandsüberwachung und daraus abgeleitete, zeitkritische Schaltvorgänge erfassen. Im FNN-Hinweis ist jedoch zunächst noch keine regelmäßige Übertragung von Netzzustandsdaten vorgesehen, sondern nur eine ereignisgesteuerte Anfrage entsprechender Daten im SMGW. Die im Topthema 2 vorgeschlagene regelmäßige Netzzustandsüberwachung, die innerhalb von engen Zeitintervallen erfolgen kann, führt zu spezifischen Anforderungen an die TK-Infrastruktur, die nachfolgend berücksichtigt werden.

Weitere Anforderungen lassen sich aus dem Bereich der **Elektromobilität** ableiten. Die Ladeinfrastruktur beinhaltet aktuell noch keine SMGW, jedoch läuft eine entsprechende Ausnahmeregelung 2020 aus. Die Anforderungen bzgl. Datenmenge und Zeitschranken sind zum Teil bereits durch die Anwendungsfälle des FNN abgedeckt. Die Hinzunahme der Elektromobilität beeinflusst vor allem das Mengengerüst und befördert die Durchdringung mit SMGWs. Dies wird entsprechend in der Engpassanalyse im Szenario 50%-SMGW-Durchdringung berücksichtigt.

Über den Energiesektor hinausgehende Anwendungen (*Smart Home, Smart Health*) können ebenfalls über das SMGW realisiert werden. Im Rahmen dieses Gutachtens wurden angesichts der noch bestehenden Unsicherheiten über die Marktentwicklungen keine quantitativen Anforderungen abgeleitet. Sollten sich die Anforderungen jedoch konkretisieren, können diese in einer zukünftigen Version des Gutachtens Berücksichtigung finden.

2.1.2 Übersicht der Kriterien

Die hier betrachteten TK-Infrastrukturen dienen dazu, anforderungsgerechte Kommunikationsverbindungen zu ermöglichen. Damit muss eine TK-Infrastruktur sowohl eine angemessene räumliche **Abdeckung** als auch eine möglichen Hochlastsituationen gewachsene **Kapazität** zur Verfügung stellen. Dies stellt somit übergreifende Ziele für den Aufbau und Betrieb der TK-Infrastruktur dar. Ob eine TK-Infrastruktur geeignet ist, diese Ziele zu erfüllen, wird anhand des nachfolgend eingeführten Kriterienkatalogs bewertet.

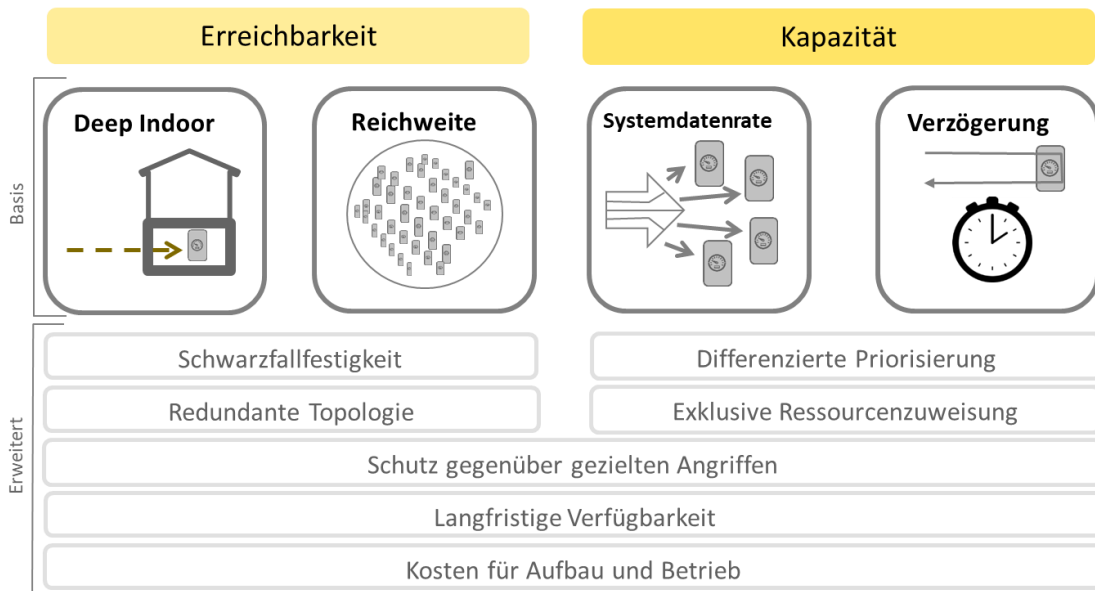


Abbildung 2-2: Anforderungskriterien an SMGW-taugliche TK-Infrastrukturen im Überblick

Die betrachteten TK-Infrastrukturen werden zunächst anhand folgender technischer Basiskriterien bewertet (siehe auch Abbildung 2-2):

- Deep-Indoor-Abdeckung
- Reichweite
- Systemdatenrate (*Uplink/Downlink*)
- Übertragungsverzögerung
-
- Darüber hinaus werden weitere Kriterien betrachtet, die sowohl für weitere Anwendungen beispielsweise im Smart-Grid-Bereich (Steuerung und Kontrolle von Betriebsmitteln) relevant sind, als auch eine angemessene Qualität und Wirtschaftlichkeit der Realisierung der Basiskriterien ermöglichen oder begünstigen:
- Redundante Topologie
- Schwarzfallfestigkeit

- Differenzierte Priorisierung von Datendiensten
- Verfügbarkeit exklusiver Ressourcen ohne Wechselwirkung mit Dritten
- Schutz gegenüber gezielten Angriffen
- Erwartung einer langfristigen Verfügbarkeit
- Kosten für Aufbau und Betrieb

Die Verwendung der obigen Kriterien ist somit geeignet, über den engen Fokus der Anwendungen hinaus Aussagen über die technische Eignung der jeweiligen Kommunikationstechnologien bzw. -netze zu treffen.

Nachfolgend werden die einzelnen Kriterien eingeführt und deren Anwendung im Rahmen des Gutachtens erläutert.

2.1.2.1 Deep-Indoor-Abdeckung

Zur Realisierung der im Gesetz zur Digitalisierung der Energiewende geforderten kommunikationstechnischen Anbindung des intelligenten Messsystems muss die Verfügbarkeit der TK-Infrastruktur am Ort der heutigen Stromzähler vorhanden sein, denn diese werden typischerweise durch das SMGW ersetzt.

In Deutschland sind die Stromzähler häufig im Sicherungskasten im Keller von Wohngebäuden verbaut. Der Grund liegt in der in Deutschland verbreiteten Erdverkabelung und der daraus folgenden Lage des Hausanschlusspunkts und des Hausanschlussraums im Keller eines Gebäudes. Gleichzeitig war der Hausanschlussraum bisher nicht im Fokus der kommunikationstechnischen Erschließung:

- Auch wenn Festnetz-TK-Infrastrukturen (Kupferkabel, Glasfaser, Breitbandkabel) aufgrund von sog. Mehrspartenanschlüssen in der Regel ebenfalls durch den Hausanschlussraum geführt werden, befinden sich Internetzugangsroutern oft an anderen Orten, vor allem in Wohnbereichen, in denen der unmittelbare Kommunikationsbedarf der Bewohner besteht.
- Öffentliche Mobilfunknetze sind bislang ebenfalls nicht auf die Erschließung von Kellerräumen ausgelegt. Man unterscheidet hier zwischen der Abdeckung im Freien (*Outdoor*) sowie in Gebäuden (*Indoor*), wobei hiermit nicht der Keller gemeint ist.

Für die Anbindung von SMGW sind daher gebäudeinterne TK-Infrastrukturlösungen gefordert, mit denen gezielt Kellerräume erreicht werden. In Anlehnung an entsprechende Definitionen im Rahmen der Standardisierung von Mobilfunknetzen (siehe unten) wird die Erreichbarkeit des Kelleranschlussraums im Rahmen des Gutachtens mit dem Begriff „*Deep-Indoor-Abdeckung*“ bezeichnet.

Im Folgenden soll konkretisiert werden, welche Anforderungen damit im Detail für die TK-Infrastruktur verbunden sind.

Nach § 29 (5) MsbG wird eine Ausstattung von „95% der betroffenen Messstellen“ mit intelligenten Messsystemen gefordert. Ergänzend wird in § 31 MsbG eine wirtschaftliche Vertretbarkeit anhand von Preisobergrenzen für das Entgelt definiert, welches dem Letztverbraucher für den Messbetrieb in Rechnung gestellt werden kann. Der Gesetzgeber sieht also vor, dass auf sehr aufwändig zu erschließende Messstellenstandorte verzichtet werden darf.

Für die **leitungsgebundenen Techniken** (Kupferkabel (DSL), Glasfaser, Breitbandkabel) muss das entsprechende Kabel von einem Verteiler (oder im Falle von Glasfaseranschlüssen von einem Medienwand-

ler) bis zum SMGW geführt werden. Da nicht davon auszugehen ist, dass in der Fläche spezifisch für die Anbindung der SMGWs Haushalte mit dedizierten Leitungen neu erschlossen werden oder Gebäudeeigentümer einer nachträglichen Verlegung von entsprechenden Leitungen zustimmen, ergibt sich der Erfüllungsgrad der Deep-Indoor-Abdeckung für leitungsgebundene Techniken nicht aus der allgemeinen Verfügbarkeit dieser Techniken in den Haushalten im Rahmen des regulären Netzausbaus sowie deren Nutzbarkeit für die SMGW-Infrastruktur unter Berücksichtigung weiterer Anforderungskriterien. Mit anderen Worten: Bei DSL-, Glasfaser-, oder Breitbandkabelzugangsnetzen ist eine zusätzliche Verkabelung in den Gebäuden notwendig, die nicht ohne Weiteres, wenn überhaupt, zu realisieren ist. Selbst bei Neubauten ist eine entsprechende Infrastruktur nicht sicher vorhanden, weil eine Einbaupflicht von SMGWs bei Neubauten nicht besteht. Dies führt zu höheren Kosten sowie vergleichsweise hohen Transaktionskosten bei der operativen Verfügbarkeit, weil beispielsweise die Zustimmung von Gebäudeeigentümern für die Inhaus-Verkabelung eingeholt werden muss.

Die **PLC Technik** ermöglicht die Nutzung der bestehenden Kupferleitungen des Stromnetzes und kann daher im Vergleich zu obigen Telekommunikationsinfrastrukturen ohne zusätzlichen Leitungsausbau in den Gebäuden in Betrieb genommen werden. Allerdings, dass zeigen Pilotversuche, ist für einen wirtschaftlichen Betrieb ein hoher Durchdringungsgrad von SMGW erforderlich. Eine detailliertere Betrachtung erfolgt in Kapitel 2.2.

Im Falle von **funkbasierten Techniken** ist es ebenfalls möglich, ohne bauliche Maßnahmen in den Gebäuden und dem unmittelbaren Umfeld der SMGW-Standorte eine Anbindung vorzunehmen. Allerdings sind im Zusammenhang mit der Erzielung einer Deep-Indoor-Abdeckung Gebäudeeigenschaften zu berücksichtigen. Die vom konkreten SMGW-Standort abhängigen Dämpfungseigenschaften von Gebäuden gehen dabei als Nebenbedingung in den Anforderungskatalog ein. Die Gebäudedämpfung ist frequenzabhängig und variiert aufgrund unterschiedlicher Bauformen und Materialien sehr stark. Innerhalb der ITU-R wurde auf der Basis von Daten umfangreichen Messkampagnen¹⁵, die für unterschiedliche Frequenzbereiche und Gebäudevarianten durchgeführt wurden, ein Modell für die Vorhersage der Gebäudedämpfung (*BEL – Building Entry Loss*) definiert.¹⁶ Dieses Modell ist für Frequenzbereiche von 80 MHz bis 10 GHz gültig und wird für Vergleichsstudien empfohlen. Das Modell berücksichtigt allerdings nicht die konkreten Einbauorte von SMGWs. Aus diesem Grund wurde im Rahmen der Studie auf die Ergebnisse von Messkampagnen zurückgegriffen, die an konkreten Installationsorten von SMGWs vorgenommen wurden^{17,18}. Da die Messkampagnen in Bezug auf SMGW-Standorte typischerweise nur für bestimmte Funkfrequenzen durchgeführt wurden (z. B. öffentlicher Mobilfunk bei 800 MHz und 900 MHz), ist es darüber hinaus notwendig, das Dämpfungsverhalten für andere Frequenzen zu extrapolieren. Hierbei kann auf die Ergebnisse von Forschungsarbeiten, in denen das Gebäudedämpfungsverhalten für verschiedene Funkfrequenzen untersucht wurde, zurückgegriffen werden¹⁹. Da keine gesicherten statistischen Daten zum Anteil der SMGW in Kellern vorliegen, soll es im Rahmen der später vorgestellten

¹⁵ International Telecommunication Union (ITU): Compilation of measurement data relating to building entry loss, Report ITU-R P.2346-2, 2017.

¹⁶ International Telecommunication Union (ITU): Prediction of building entry loss, Recommendation ITU-R P.2109-0, 2017.

¹⁷ S. Monhof, S. Böcker, J. Tiemann, and C. Wietfeld: Cellular Network Coverage Analysis and Optimization in Challenging Smart Grid Environments, Proceedings of IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids (SmartGridComm), 2018.

¹⁸ C. Lüders, L. Lange und B. Sörries: Überlegungen zum Einsatz von Mobilfunksystemen für Smart-Metering- und Smart-Grid-Anwendungen: CDMA450 versus LTE450, ITG-Fachbericht 258, VDE Verlag, 2015.

¹⁹ C. Hägerling, C. Ide, and C. Wietfeld: Coverage and capacity analysis of wireless M2M technologies for smart distribution grid services, IEEE International Conference on Smart Grid Communication, S. 368–373, 2014.

Engpassanalyse (Kapitel 2.4) schließlich möglich sein, unterschiedliche Mischungsverhältnisse untersuchen zu können.

In Abbildung 2-3 wird die Vorgehensweise schematisch dargestellt: ausgehend von frequenzspezifischen Verteilungsfunktionen für die Gebäudedämpfung für den Indoor- und Deep-Indoor-Fall ergibt sich eine Verteilungsfunktion für die Gebäudedämpfung gemäß dem vorgegebenen Mix. Unter Anwendung des Abdeckungsziels von mindestens 95 % können die Gebäude mit einer besonders hohen Gebäudedämpfung bei der Funknetzplanung unberücksichtigt bleiben.

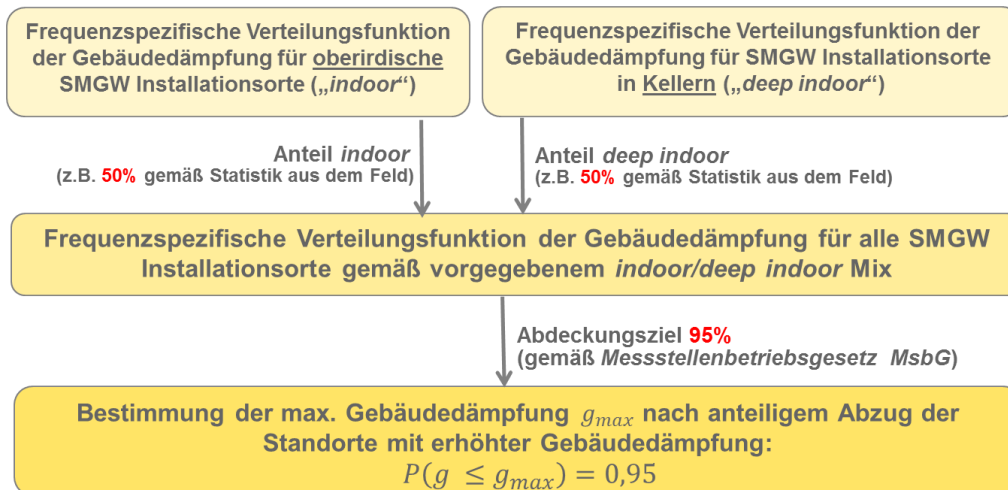


Abbildung 2-3: Ableitung der Anforderung an die max. Gebäudedämpfung

- Für die Zwecke des Gutachtens werden im Weiteren bei der Betrachtung von Funktechnologien folgende Anforderungsprofile betrachtet:
- Basisszenario: **Mittlerer Kelleranteil** von 50 %, und entsprechend 50 % oberhalb des Kellers
- Variationen: Hoher Kelleranteil von 80 %, bzw. niedriger Kelleranteil von 20 %

In Abbildung 2-4 sind beispielhaft die Grenzwert für die Gebäudedämpfung für unterschiedliche Mischungsverhältnisse beschrieben. Für das Szenario „Mittlerer Kelleranteil“ kann die maximale Gebäudedämpfung mit 22,9 dB angesetzt werden.

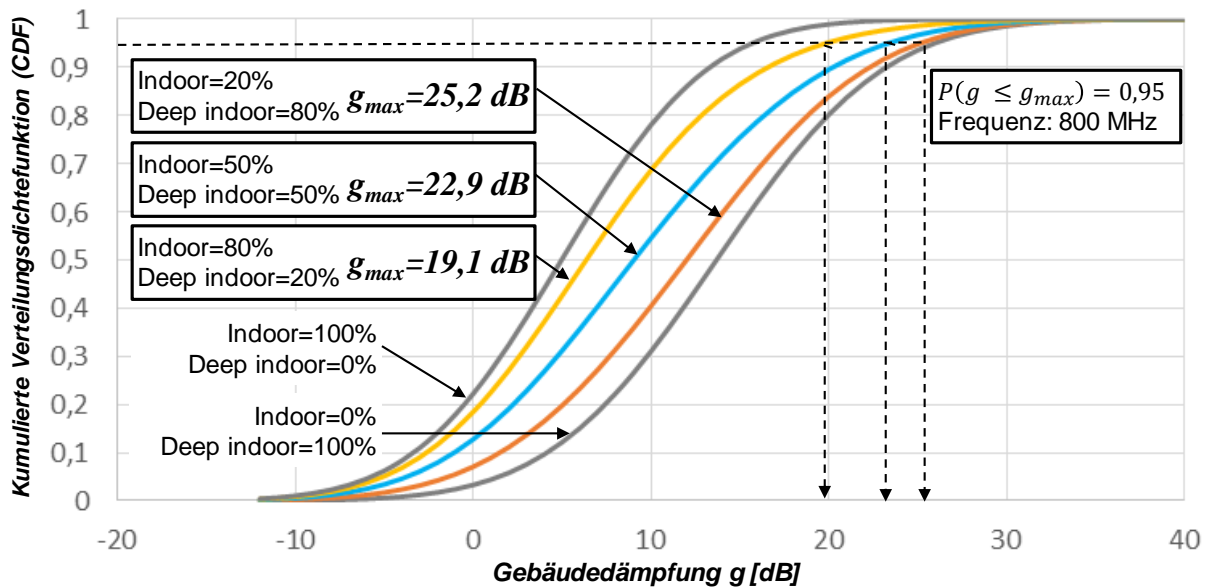


Abbildung 2-4: Gebäudedämpfung für unterschiedliche Anteile von SMGW-Standorten in Kellern („Deep Indoor“)²⁰

- Über das Anforderungsprofil „Mittlerer Kelleranteil“ kann auch die Auswirkung von technischen Maßnahmen zur Verbesserung der funktechnischen Anbindung von SMGW in Kellern abgedeckt werden. So ist es denkbar durch passend gewählte Antennenstandorte (z. B. in der Nähe von Lichtschächten) oder auch durch optimierte Funkübertragung durch *Extended-Coverage*-Mechanismen, den Einfluss der Kellerdämpfung zu mindern und damit die Verteilungsfunktion der Gebäudedämpfung günstig zu beeinflussen. Für andere Frequenzen können die Werte extrapoliert werden. So wurde für die Frequenz 450 MHz ein maximaler Dämpfungswert von 20,5 dB angenommen, um 95 % der SMGWs im 50/50-Szenario erreichen zu können.
- Die Erfüllung des Ausstattungsziels kann immer nur für eine konkret geplante TK-Infrastruktur bewertet werden, denn letztendlich ist jede der betrachteten Technologien, bei entsprechender Verdichtung des Netzes (ohne Berücksichtigung der Wirtschaftlichkeit), in der Lage, das Ausstattungsziel zu erreichen. Daher kann im Rahmen der im Kapitel 2.2 erfolgenden Technologiebewertung unter dem Aspekt der Deep-Indoor-Abdeckung zunächst eine grundsätzliche Eignung einer Kommunikationstechnik zur Erreichung des Ausstattungsziels im Vergleich zu den anderen Technologieoptionen gefunden werden. In Kapitel 2.4 werden im Rahmen der Engpassanalyse konkrete Netze geplant, für die dann ein absolutes Abdeckungsziel als Vorgabe herangezogen wird, um die geforderten Ausstattungsziele zu erreichen.

2.1.2.2 Reichweite

- Aus den zuvor diskutierten Anforderungen an die Abdeckung lässt sich insbesondere, aber nicht ausschließlich, beim Einsatz von Funktechnologien indirekt ableiten, dass **eine hohe Reichweite günstig für das Mengengerüst** der TK-Infrastruktur ist.

²⁰ abgeleitet aus: S. Monhof, S. Böcker, J. Tiemann, and C. Wietfeld: Cellular Network Coverage Analysis and Optimization in Challenging Smart Grid Environments, Proceedings of IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids (SmartGridComm), 2018.

- Die Reichweite einer Kommunikationstechnik wird im Rahmen des Gutachtens als maximaler Abstand zwischen Sende- und Empfangseinrichtung definiert, für den eine stabile Kommunikationsverbindung mit anforderungsgerechter Datenrate (siehe unten) möglich ist. Die Reichweite beispielsweise einer Funktechnologie ist abhängig von einer Reihe von Systemparametern, insbesondere Sendeleistung (*Tx Power*), Antennengewinnen, Umgebungsrauschen und Interferenzen, Empfängerempfindlichkeit (*Sensitivity*) und den frequenzabhängigen Eigenschaften des Übertragungskanal (Ausbreitungsdämpfung, Umgebungseinflüsse, Gebäudedämpfung). Die entfernungs- und frequenzabhängige Ausbreitungsdämpfung kann über verschiedene Methoden bestimmt werden. Bei kupferbasierten Technologien hängt die maximale Datenübertragungsrate des Anschlusses beispielsweise von der Entfernung vom Kabelverzweiger ab.
- Für die detaillierte Planung von Funknetzen kann dabei auf Werkzeuge zurückgegriffen werden, die die konkreten Umgebungseigenschaften (Bebauung, Geländeprofile, etc.) berücksichtigen. Für die Zwecke des Gutachtens werden realitätsnahe Mengengerüste auf der Basis etablierter **Funkausbreitungsmodelle nach Okumura-Hata**²¹ genutzt und um die zuvor erläuterten SMGW-spezifischen Überlegungen zur Gebäudedämpfung ergänzt.
- Mit Hilfe des sogenannten *Link Budget* kann unter Berücksichtigung von Sendeleistung und Empfängereigenschaften eine maximale Pfaddämpfung bestimmt werden. Diese wiederum dient dazu unter Nutzung des Okumura-Hata-Modells die maximale Reichweite und damit den maximalen Radius der Funkzelle abzuleiten. Im Funkbereich ist dabei typischerweise der *Uplink* durch geringere Sendeleistungen gekennzeichnet und ist im Falle der hier betrachteten bidirektionalen Kommunikation die reichweitenbestimmende Übertragungsrichtung.
- Für den in Kapitel 2.2 durchgeführten Systemvergleich von Funksystemen wird unter Berücksichtigung des maximalen Pfadverlustes (engl. *Maximum Path Loss*, MPL) der einzelnen Systemtechniken eine maximale Reichweite für typische Systemumgebungen abgeleitet und verglichen.
- Für die nachfolgende Engpassanalyse (Kapitel 2.4) wird die Reichweite ebenfalls anhand von differenzierten Kanalmodellen (Okumura-Hata) für unterschiedliche Systemumgebungen und Betriebsfrequenzen unter Einbeziehung der maximalen Gebäudedämpfung konkret berechnet. Aus der Reichweite ergibt sich die Größe der Funkzellen und dient als ein Eingabeparameter für die Netzplanung.
- Die im Rahmen des Gutachtens berücksichtigten Systemparameter sind im Detail im Abschnitt 2.4.2.1 dokumentiert.

2.1.2.3 Systemdatenrate

Die Technische Richtlinie des BSI fordert im Rahmen der Spezifikation des SMGWs (TR-03109-6²²) in Bezug auf die WAN-Anbindung eine ausreichende Dimensionierung: „*Die WAN Anbindung muss mit ausreichender Bandbreite während der Geschäftstätigkeit des SMGW Admin verfügbar sein. Ein Ausfall*“

²¹ M. Hata: Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services, IEEE Trans. Veh. Technol., vol. V, no. 3, S. 317–325, 1980.

²² Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI): Technische Richtlinie BSI TR-03109-6: Smart Meter Gateway Administration, S. 1–107, 2015

der WAN Anbindung würde sämtliche Kommunikationsverbindungen mit SMGW verhindern und daraus resultierend für die Dauer des Ausfalls keinen Betrieb des Kerngeschäfts ermöglichen. Sollte die Bandbreite gegenüber der zur Übertragung anstehenden Datenmenge nicht ausreichend dimensioniert sein, sind Engpässe in der Datenübertragung zu erwarten. Abhängig vom Ausmaß der Engpässe können bestehende Verbindungen ein Timeout erfahren und terminieren. Anstehende Verbindungen und Datenübertragungen können nur über Warteschlangen abgearbeitet werden und den Betrieb des Kerngeschäfts behindern. Wenn das Datenvolumen in Warteschlangen der SMGW und des SMGW Admin über einen längeren Zeitraum die verfügbare Bandbreite überschreitet, ist ein Betrieb des Kerngeschäfts bis zum Abbau der Warteschlangen nur partiell oder gar nicht möglich.“

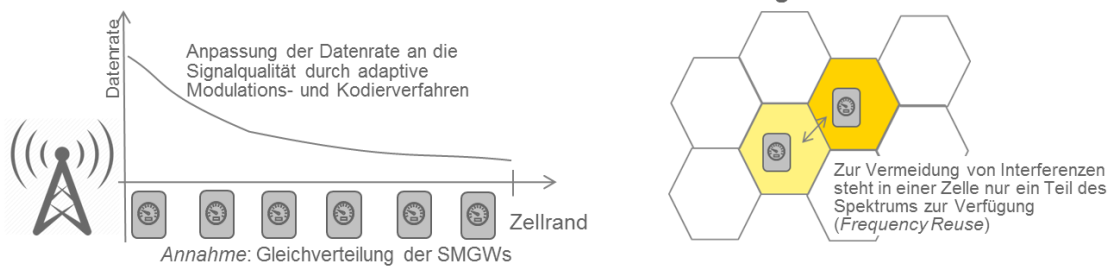
Die verfügbare Systemdatenrate einer TK-Infrastruktur ist daher ein wichtiger Indikator für die Eignung, wobei die im Zitat angesprochene Engpassbildung im Rahmen des Gutachtens in Kapitel 2.4 im Detail aufgegriffen wird.

Die Systemdatenrate beschreibt – jeweils separat betrachtet für die *Downlink*- und die *Uplink*-Verbindung – eine typischerweise verfügbare Datenrate einer TK-Infrastruktur. Im Unterschied zur oft diskutierten maximalen Übertragungsdatenrate, die nur unter optimalen Bedingungen verfügbar ist, soll damit eine im Mittel verfügbare Datenrate beschrieben werden. So wird die Variation der tatsächlich verfügbaren Datenrate in Abhängigkeit zur Leitungslänge bzw. Funkdistanz berücksichtigt:

- So ist die für VDSL angegebene maximale Datenrate nur in großer Nähe zum Kabelverzweiger verfügbar, während in einem Kilometer Entfernung nur ein Bruchteil verfügbar ist. Der Grund ist die ansteigende Dämpfung der Übertragungsstrecke, die über eine Anpassung der Übertragungsparameter kompensiert wird. Als Systemdatenrate wird hier eine über die üblichen Betriebsdistanzen verfügbare mittlere Datenrate angenommen.
- Analoges gilt für Mobilfunksysteme, bei denen am Zellrand durch adaptive Modulations- und Kodierverfahren, die sich an die stark ansteigende Ausbreitungsdämpfung anpassen, deutlich geringere Datenraten verfügbar sind. Neben den Dämpfungseffekten müssen weiterhin Wechselwirkungen mit anderen Funkzellen im Netz mitberücksichtigt werden. Die sog. **spektrale Effizienz** eines Funksystems (Datenrate pro Bandbreite und Funkzelle, sog. **Cell Spectral Efficiency (CSE)**²³) ist hier geeignet, eine Systemdatenrate abzuleiten. Die Systemdatenrate beschreibt ein realistisches Bild der im Mittel näherungsweise zu erwartenden Datenrate eines Netzabschnitts bzw. einer Funkzelle. So ergibt sich im urbanen Raum für die aktuelle Variante von LTE, dem sog. LTE-Advanced, beispielsweise anstatt der maximal möglichen Datenrate von 200 Mbit/s ein deutlich geringerer Wert von 25 Mbit/s als Systemdatenrate im Downlink für eine Bandbreite von 10 MHz (siehe Abbildung 2-5). Aufgrund unterschiedlicher Kanaleigenschaften kann die CSE differenziert nach Downlink und Uplink für unterschiedliche Topologien angegeben werden.

²³ A. Ghosh, R. Ratasuk, B. Mondal, N. Mangalvedhe, and T. Thomas: LTE-Advanced: Next-Generation Wireless Broadband Technology, IEEE Wireless Communications, no. 3, S. 10–22, 2010.

- Die für ein SMGW tatsächlich max. verfügbare Datenrate ist abhängig von **Abstand des SMGWs zur Basisstation** **Wechselwirkung mit benachbarten Zellen**



- Für Systembetrachtungen werden die verschiedenen Effekte über die sog. **spektrale Effizienz (Cell Spectral Efficiency CSE)** eines Funksystems zusammengefasst:

CSE [bit/s/Hz/cell]: **Datenrate** [bit/s] **pro Spektrumsanteil** [Hz] **und Funkzelle** [cell]

Annahme gemäß Literatur für LTE-A

	Urban	Suburban	Rural
CSE für Downlink:	2,5 bit/s/Hz/cell	2,7 bit/s/Hz/cell	2,9 bit/s/Hz/cell
CSE für Uplink:	1,5 bit/s/Hz/cell	1,45 bit/s/Hz/cell	1,4 bit/s/Hz/cell
Beispiel: $B=10$ MHz \rightarrow Verfügbare DL-Datenrate/Zelle: 25 Mbit/s (Urban)			

Quelle: A. Ghosh, R. Ratasuk, B. Mondal, N. Mangalvedhe and T. Thomas, "LTE-advanced: next-generation wireless broadband technology" in IEEE Wireless Communications, vol. 17, no. 3, pp. 10-22, June 2010.

- Für die **Engpassanalyse** wird die **mittlere verfügbare Systemdatenrate pro Zelle** entsprechend über die für das Gesamtsystem verfügbare Bandbreite B skaliert: $CSE \cdot B$

Abbildung 2-5: Ableitung einer Systemdatenrate am Beispiel LTE

Neben diesen durch die Dämpfung des Übertragungsmediums hervorgerufenen Effekte kommt hinzu, dass – je nach TK-Infrastrukturoption – die verfügbare Systemdatenrate mit anderen Diensten und Teilnehmern geteilt werden muss. Die Anforderungen an die Übertragungskapazität einer SMGW-tauglichen TK-Infrastruktur können in solchen Fällen nur durch Priorisierungsoptionen und effektive Ressourcenvergabe erfüllt werden (siehe weitere Kriterien unten).

Im Rahmen der Technologiebewertung (Kapitel 2.2) wird zunächst die Systemdatenrate ohne Berücksichtigung von Engpassituationen als verfügbar für ein SMGW angenommen. **Je höher die Systemdatenrate, desto mehr Kapazitätsreserven stehen zur Verfügung.** Als Mindestanforderung gilt jedoch, dass die vom FNN definierten Mindestdatenraten pro SMGW (Details hierzu siehe 2.1.3.) durch die zur Diskussion stehende Technik unterstützt werden kann.

Im Rahmen der Engpassanalyse (Kapitel 2.4) werden anhand von aus der Literatur abgeleiteten Annahmen für die spektrale Effizienz systemspezifische Systemdatenraten ermittelt und mittels konkreter Szenarien für unterschiedliche SMGW-Durchdringungsraten und Kommunikationsverkehrsanforderungen bewertet.

2.1.2.4 Übertragungsverzögerung

Die Übertragungsverzögerung zielt auf die Echtzeitfähigkeit der TK-Infrastruktur ab. Im Bereich der regulatorischen Vorgaben ergibt sich hier eine harte Anforderung aus dem Eichrecht. Dabei wird für ein minimales Intervall der Erfassung von Messwerten eine maximale Abweichung der internen Uhr von 3 % gefordert. Dies entspricht für ein minimales Intervall von 5 Minuten einer Abweichung von 9 Sekunden.

Das Gesetz für die Digitalisierung der Energiewende legt dabei fest, dass die „sichere Zeitsynchronisation der Smart-Meter-Gateways mit einer vertrauenswürdigen Zeitquelle im Weitverkehrsnetz“ erfolgt. Die entsprechende technische Lösung wird durch die Technische Richtlinie des BSI vorgeben:

- Die Zeitsynchronisation erfolgt über das Network-Time-Protocol (NTP).

- Die Genauigkeit des Verfahrens ist eng gekoppelt an die sog. RTT der verwendeten Weitverkehrsinfrastruktur. Die RTT beschreibt die Übertragungsverzögerung einer Übertragung und der darauf gesendeten Antwort in entgegengesetzter Übertragungsrichtung. Gemäß TR-031109-1²⁴ muss die RTT kleiner sein als das Zweifache der maximal erlaubten zeitlichen Abweichung. Für das oben bereits genannte Beispiel ergibt sich ein RTT-Wert von 18 Sekunden.
- Wird eine symmetrische Verzögerung in beide Übertragungsrichtungen angenommen, ergibt sich eine **maximale Übertragungsverzögerung in eine Übertragungsrichtung von 9 Sekunden**. Dies wird so auch entsprechend in der FNN-Verkehrsmodellierung berücksichtigt (siehe WAF 2.1, detaillierte Erläuterung in Unterkapitel 2.1.3.).

Unter moderaten Lastbedingungen bieten moderne TK-Infrastrukturen RTT im zwei- oder max. dreistelligen ms-Bereich. Für die Übertragungsverzögerung gilt jedoch ähnliches wie für die Datenrate: Im Falle einer gleichzeitigen Anforderung zeitkritischer Übertragungen kann es zu Engpässen kommen, die die Verzögerungen stark ansteigen lassen. Insofern ist es essentiell, dass auch unter Hochlast eine ausreichende Systemkapazität zur Verfügung steht, um zeitkritische Dienste erfolgreich zu realisieren.

Da im Rahmen des Gutachtens über die Messdienstleistungen hinaus auch eine Netzzustandsüberwachung unter Nutzung der SMGWs betrachtet wird, ergeben sich für bestimmte Szenarien ggf. erhöhte Anforderungen. Unter Berücksichtigung der geforderten 3%-Grenze ist für ein minimales Intervall zwischen zwei Übertragungen von 30 Sekunden entsprechend **eine maximale RTT von 1,8 s** zu berücksichtigen. Daraus abgeleitet berücksichtigt die TK-Analyse aus technischer Sicht (vgl. Kapitel 2.1.3.2) eine max. Übertragungsverzögerung von 900 ms.

Zur Technologiebewertung werden typische RTT-Werte herangezogen, die bei einer ausreichenden Dimensionierung zu erwarten sind, und mit den hier formulierten Anforderungen abgeglichen.

2.1.2.5 Redundante Topologie

Der sichere Betrieb des SMGWs erfordert eine hochverfügbare Datenverbindung und wird im Gesetz zur Digitalisierung der Energiewende als „sichere und leistungsfähige Fernkommunikationstechnik“ beschrieben. Die Technische Richtlinie führt zum Schutzziel „Verfügbarkeit“ im Rahmen der Spezifikation des SMGWs (TR-03109-6) in Bezug auf die WAN-Anbindung aus: *„Die Verfügbarkeit der Anbindung MUSS gewährleistet sein, wenn und solange sie benötigt wird.“*. An späterer Stelle wird die Notwendigkeit der hohen Verfügbarkeit betont: Als Beispiel für eine *„Fehlplanung und/oder mangelhafte Anpassung der Planung im Betrieb“* wird der *„Betriebsausfall durch Ausfall der WAN Anbindung“* angeführt (Abschnitt 2.4.3).

Eine geeignete TK-Infrastruktur muss daher die Möglichkeit bieten, Ausfälle einzelner Komponenten und Übertragungsstrecken innerhalb der TK-Infrastruktur, die in der Praxis unvermeidbar sind, über eine redundante Topologie zu kompensieren.

Das Kriterium „Redundante Topologie“ bewertet, **wie aufwendig es ist, Redundanzen in der TK-Infrastruktur zu ermöglichen**, z. B. durch überlappende Funkzellen oder vermaschte Netzarchitekturen.

2.1.2.6 Schwarzfallfestigkeit

Eingangs sind wir bereits auf die Notwendigkeit eingegangen, dass die Überwachung und Steuerung von Betriebsmitteln und EEG-Anlagen über Informations- und Kommunikationstechnologien zunehmend

²⁴ Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI): Technische Richtlinie BSI TR-03109-1: Anlage VI: Betriebsprozesse, 2013, S. 43.

zentral für eine stabile Stromversorgung ist. Insbesondere beim Spannungsabfall kann über eine „gehärtete“, d. h. mit Batterien versehene, Kommunikationsinfrastruktur die Stromversorgung deutlich schneller wieder hochgefahren werden. Aus diesen Überlegungen leitet sich die Forderung nach einer ununterbrochenen Verfügbarkeit der WAN-Kommunikationsanbindung ab, die für Anwendungen im Smart Grid essentiell ist. Störfälle in Kommunikationsnetzen zeigen immer wieder die enge Wechselwirkung zwischen Stromversorgung und Verfügbarkeit des Kommunikationsnetzes auf. Ein prominentes Beispiel ist der Ausfall des Internetknotens DE-CIX in Frankfurt aufgrund eines Stromausfalls²⁵ im April 2018.

Es existieren bewährte technische Lösungen, um die Funktionsfähigkeit einer TK-Infrastruktur auch bei großflächigen Stromausfällen abzusichern. Entsprechende Lösungen kommen z. B. für die TK-Infrastruktur für Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS) zum Einsatz²⁶:

- Notstromversorgung über batteriegestützte **unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV)** in den Basisstationen (ausgelegt auf einen Betrieb von mindestens 2 Stunden)
- **Netzersatzanlagen (NEA)** auf Basis von Brennstoffzellentechnologie und Dieselgeneratoren (ausgelegt auf einen Betrieb von mindestens 72 Stunden)

Die Notstromversorgung wird dabei wie folgt skaliert: Während die USV-Systeme flächendeckend zum Einsatz kommen und somit für mindestens 2 Stunden alle Teilnehmer des BOS-Funks unterstützen können, sind die NEA-Systeme so ausgelegt, dass zumindest die BOS-Funk-Endgeräte mit einer erhöhten Sendeleistung (Fahrzeugfunk) erreichbar bleiben, während Handfunkgeräte mit einer geringeren Verfügbarkeit rechnen müssen.

Analoge Überlegungen hinsichtlich einer skalierbaren Verfügbarkeit sind auch für Energiesysteme zu empfehlen und Gegenstand eines Gesamtkonzepts zum Umgang mit Schwarzfällen. Die Kommunikationsfähigkeit von SMGW im Schwarzfall mag bezüglich der Messaufgaben entbehrlich erscheinen. Andererseits kann im Schwarzfall die Erreichbarkeit zumindest eines Teils der SMGW im Rahmen der Netzstandsüberwachung auch hier dazu beitragen, Transparenz über die Ausmaße des Schwarzfalls zu erhalten. Dies ist beispielsweise eine wesentliche Information beim Hochfahren des jeweiligen Netzabschnitts.

Hinsichtlich des Kriteriums der Schwarzfallfestigkeit kann festgehalten werden, dass generell jede TK-Infrastruktur schwarzfallfest ausgeprägt werden kann, jedoch skaliert der Aufwand mit der Anzahl der mit USV oder NEA auszurüstenden Netzknoten: **Je weniger Netzknoten (aktive Komponenten) benötigt werden, um eine flächendeckende Abdeckung und anforderungsgerechte Kapazität zu ermöglichen, umso besser** kann eine TK-Infrastruktur hinsichtlich dieses Kriteriums bewertet werden. Es ergibt sich hier typischerweise eine Korrelation mit der Reichweite des Systems bzw. mit der Verdichtung der Netzknoten, die notwendig ist, um eine hohe Systemkapazität zu erzielen (siehe hierzu Kapitel 2.4 Engpassanalyse).

2.1.2.7 Differenzierte Priorisierung von Datendiensten

Im Zusammenhang mit der Einführung des Kriteriums „Systemdatenrate“ wurde bereits darauf hingewiesen, dass die Verfügbarkeit der notwendigen Übertragungskapazitäten in der Wechselwirkung mit anderen Diensten und Nutzern sichergestellt werden muss. Es können Anwendungsfälle unterschiedli-

²⁵ <http://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/diginomics/stromausfall-in-frankfurt-deutsches-internet-lahmgelegt-15534725.html>

²⁶ http://www.bdbos.bund.de/DE/Fachthemen/netzhaertung/netzhaertung_node.html

cher Priorität unterschieden werden. Ein angemessenes Verhalten der TK-Infrastruktur in Engpasssituationen wird dann **begünstigt, wenn es die TK-Technik erlaubt, die nichtpriorisierten Dienste zugunsten der priorisierten Dienste zurückzustellen**. In diesem Zusammenhang sei darauf hingewiesen, dass die Priorisierung zunächst nur innerhalb der Domäne des Betriebs der SMGW-Infrastruktur vorgenommen wird und damit keine Zurücksetzung von anderen Teilnehmern gefordert wird. Insofern könnten dann Fragen der Netzneutralität hier nicht betroffen sein. Sofern jedoch in Funknetzen bestimmte Kapazitäten einem SMGW oder anderen Betriebsmitteln zugewiesen werden, damit beispielsweise die Datenübertragung im Rahmen der netzkritischen Netzzustandsüberwachung gewährleistet und sichergestellt werden kann, stehen diese Kapazitäten anderen Teilnehmern in der Funkzelle nicht mehr zur Verfügung. Dann sind die Vorgaben zur Netzneutralität zu beachten. Darauf werden wir im zweiten Teil des Gutachtens näher eingehen. Generell sind Priorisierungen in TK-Infrastrukturen schon seit längerer Zeit standardisiert und auch speziell im Kernnetz im Rahmen der Durchsetzung von Service-Level-Agreements und für netzinterne Anwendungen (z. B. Voice-over-IP) verfügbar. Für die Vernetzung von SMGWs ist allerdings die Verfügbarkeit der Priorisierung für Anwender flächendeckend und vor allem im Zugangsnetz notwendig (vgl. Abschnitt 3.7). Hierzu gab es bislang in öffentlichen Netzen keine Angebote, sodass Stand heute die dort realisierten Telekommunikationsdienste beispielsweise den Anforderungen der Netzzustandsüberwachung nicht gerecht werden.

Die in Kapitel 2.2 vorgenommene Bewertung der TK-Infrastrukturen berücksichtigt in entsprechend aufsteigender Reihenfolge die grundsätzliche Verfügbarkeit einer entsprechenden Priorisierungsfunktion, deren Bewährung in der Praxis und als höchste Stufe deren Verfügbarkeit für Dritte.

2.1.2.8 Exklusive Ressourcen ohne Wechselwirkung mit Dritten

Ein weiteres Kriterium im Zusammenhang mit der Verfügbarkeit ausreichender Systemkapazitäten, auch in kritischen Hochlastsituationen, ist die Wechselwirkung mit Dritten, d. h. anderen Nutzergruppen der TK-Infrastruktur. Während die zuvor genannte differenzierte Priorisierung von Diensten vom Betreiber der SMGW-Infrastruktur gesteuert werden kann, soll hier die nicht steuerbare Konkurrenz mit anderen Nutzern erfasst werden.

Die Bewertung der TK-Infrastrukturen muss dabei folgendes berücksichtigen:

- Erlaubt die TK-Technik im Zugangsnetz bereits auf physikalischer Ebene einen Netzaufbau mit exklusiven Ressourcen (z. B. durch eine dedizierte Leitung oder Funkressourcen)?
- Werden die physikalischen Ressourcen durch verschiedene Nutzergruppen verwendet, stellt sich die Frage, ob die Verteilung von Kommunikationskapazitäten an einzelne Nutzer dezentral – im vom Zufall beeinflussten Wettbewerb – oder über die Zuweisung von exklusiv verfügbaren Kommunikationsressourcen erfolgt.

Ohne der Bewertung einzelner TK-Infrastrukturen vorzugreifen, kann bereits hier festgestellt werden, dass sich **nur in der Kombination von Priorisierung und exklusiv verfügbaren Systemressourcen Qualitätsgarantien sicher durchsetzen lassen**, so wie es im Gesetz zur Digitalisierung der Energiewende in § 21 gefordert ist: „Ein intelligentes Messsystem muss (...) 3. sichere Verbindungen in Kommunikationsnetze durchsetzen (...)“²⁷. Im Bereich von funkbasierten Technologien ist dies somit relevant bei exklusiv nutzbaren Frequenzen bzw. bei Frequenznutzungen, die auf Allgemeinenehmigungen basieren

²⁷ Bundesregierung: Gesetz zur Digitalisierung der Energiewende, Bundesgesetzblatt, Nr. 43, S. 2034–2064, 2016.

und in denen die Nutzer daher in diesen Netzen keine gesicherten Funkressourcen haben, auf die sie zurückgreifen können.

Insofern wird dieses Kriterium von entscheidender Bedeutung für die später zu treffende Auswahl sein.

Die Bewertung erfolgt dabei in folgender Abstufung:

- Optimal ist es, wenn exklusive Ressourcen von der TK-Infrastruktur zur Verfügung gestellt werden, die unabhängig von anderen Nutzergruppen garantiert zur Verfügung stehen. Dies kann über spezifische Übertragungswege in Kombination mit Ressourcenreservierung in den Routern realisiert werden, sei es physikalisch (z. B. eine Leitung oder ein exklusiver Frequenzbereich) oder auch über Software-technische Mechanismen (z. B. MPLS oder SDN). Im Rahmen der Entwicklung von 5G-Netzen ist auch der Begriff der *Network-Slices* geprägt worden. Unter Network-Slicing wird die softwarebasierte Bereitstellung (auf Basis von SDN) isolierter, dedizierter Ressourcen für eine Anwendung innerhalb einer geteilten Infrastruktur verstanden. In diesem Fall ist es möglich, dass der Nutzer einer *Network-Slice* die Ressourcen innerhalb der Slice selbst administrieren kann^{28,29}.
- Eine schwächere Ausprägung der Anforderung an exklusive Ressourcen ist die Verfügbarkeit von Priorisierungsmechanismen. Diese wurden oben bereits angesprochen. So wie diese dazu dienen können, einzelne Dienste innerhalb der Domäne der Energietechnik zu priorisieren, können die Mechanismen auch dazu dienen, die Dienste von Benutzergruppen gegeneinander zu priorisieren. Wenn allerdings mehrere Nutzergruppen unabhängig voneinander gleichzeitig Priorisierungsmöglichkeiten nutzen, können Ressourcenkonflikte entstehen.
- Eine weitere Variante der Reduktion von Wechselwirkungen ist die Etablierung von Fairness im Umgang mit gemeinsam genutzten Ressourcen. Diese Variante ist in lizenzfreien, offenen Frequenzbändern anzutreffen. Hier findet eine (Selbst-)Beschränkung des Zugriffs durch einzelne Stationen statt. Dies umfasst Mechanismen wie *Duty-Cycle* und *Listen-Before-Talk* (siehe hierzu auch Technologieanalyse in Kapitel 2.2). Eine Verlässlichkeit im Sinne einer Exklusivität ist damit aber nicht gegeben.
- Ein vollkommen ungesteuerter Zugriff auf gemeinsam genutzte Ressourcen entspricht einer ungenügenden Erfüllung der Anforderung.

2.1.2.9 Schutz gegenüber Angriffen

- Die Anforderungen an die Sicherheit der SMGWs werden im Rahmen der Technischen Richtlinie des BSI ausführlich und angemessen beschrieben.
-

Für die hier betrachteten TK-Infrastrukturen folgt daraus insbesondere, dass diese in der Lage sein müssen, **TLS (*Transport-Layer-Security*)-Verbindungen** aufbauen und betreiben zu können. Damit scheiden

²⁸ N. Dorsch, F. Kurtz, C. Wietfeld: Enabling Hard Service Guarantees in Software-Defined Smart Grid Infrastructures, in: Computer Networks, Elsevier, vol. 147, S. 112-131, Dezember 2018.

²⁹ F. Kurtz, I. Laukhin, C. Bektas, C. Wietfeld: Evaluating Software-Defined Networking-Driven Edge Clouds for 5G Critical Communications, in: International Conference on ICT Convergence (ICTC), IEEE, Jeju-si, Republic of Korea, Oktober 2018.

unidirektionale Kommunikationsverbindungen aus – ebenso wie Systeme mit sehr niedrigen Datenraten, die durch den entstehenden Overhead einer solchen Verbindung überfordert wären, selbst wenn die Daten für die reinen Nutzdaten ausreichend wären. Das heißt im zuvor eingeführten Basiskriterium Systemdatenrate wird implizit – über eine erhöhte Datenratenanforderung der SMGWs – auch der Aspekt der IT-Sicherheit adressiert. Über die durchgängige Nutzung von TLS (in Kombination mit weiteren detaillierten Vorgaben in Bezug auf das Schlüsselmanagement, Betriebsprozesse, etc.) werden insbesondere die Schutzziele **Integrität, Vertraulichkeit und Authentizität** für die TK-Infrastruktur angemessen abgesichert.

- Das Schutzziel **Verfügbarkeit** ist jedoch damit noch nicht berücksichtigt. Wie oben bereits angesprochen, sind TK-Infrastrukturen entsprechend zu dimensionieren und gegen Schwarzfälle abzusichern. Mit dem zusätzlichen Kriterium „Schutz gegenüber Angriffen“ soll die Robustheit und Absicherung gegen jegliche Art von möglichen Eingriffen in die TK-Infrastruktur adressiert werden, da diese unmittelbar oder mittelbar die Verfügbarkeit beeinträchtigen können. Dabei wird das Sicherheitsniveau der TK-Infrastruktur unabhängig von der über TLS abgesicherten Anwendung bewertet:
- **Schutzmaßnahmen gegenüber IT-Angriffen auf der Ebene der TK-Infrastruktur**, z. B. durch eindeutige Authentifizierung der angeschlossenen Endgeräte (z. B. durch Einsatz eines *Subscriber-Identity-Modules*) und/oder kryptografische Verschlüsselung der Kommunikationsverbindungen bereits auf Übertragungsebene. In Mobilfunknetzen ist zudem ein Access-Barring möglich, so dass sich nur bestimmte Anwender überhaupt in das Funknetz einbuchten können.
- **Schutzmaßnahmen gegenüber physikalischen Angriffen**, z. B. einer physikalischen Zerstörung von Kommunikationsverbindungen oder durch Jamming von Funkverbindungen.
- Die Einstufung der TK-Infrastruktur hinsichtlich dieses Kriteriums erfolgt qualitativ anhand von verfügbarer Literatur zu bekannt gewordenen **Sicherheitslücken oder -schwächen**.

2.1.2.10 Langfristige Verfügbarkeit

- Aus den gesetzlichen und regulatorischen Vorgaben lässt sich anhand der dort angegebenen Zeiträume ableiten, dass eine längerfristige Verfügbarkeit einer heute zum Einsatz kommenden Technologie sinnvoll ist:
- Das Gesetz zur Digitalisierung³⁰ sieht einen Einführungszeitraum von bis zu 15 Jahren vor (von 2017 bis 2032). Es erscheint aus betrieblicher und ökonomischer Sicht sinnvoll, während des Einführungszeitraums keinen fundamentalen Technologiewechsel vornehmen zu müssen, der einen Austausch von installierten Geräten bereits wenige Jahre nach deren Installation notwendig machen würde, ohne dass dies seitens eichrechtlicher Vorgaben erforderlich wäre.
- SMGWs unterliegen einer dem Schutzbedarf angemessenen Zertifizierung, um die Erfüllung der Schutzprofile zu gewährleisten. Auch wenn die TK-Infrastruktur selbst nicht zertifiziert wird – sondern nur das SMGW, der Betrieb des SMGW-Administrators und die PKI – sind Änderungen

³⁰ Bundesregierung: Gesetz zur Digitalisierung der Energiewende, Bundesgesetzblatt, 6, Nr. 43, S. 2034–2064, 2016.

der TK-Infrastruktur ggf. mit entsprechenden Updates der Firmware der SMGWs oder sogar der Hardware-Komponenten verbunden, die wiederum eine Rezertifizierung erfordern können.

Die betrachteten TK-Infrastrukturen werden dementsprechend **umso höher bewertet, je langfristiger von einer Verfügbarkeit der Technik ausgegangen werden kann**. Hierbei ist noch zu beachten, dass einzelne Hersteller von Technologien Migrationsoptionen auf Weiterentwicklungen anbieten, so dass ohne den Austausch von Hardware eine neue Technologie eingefügt werden kann. Neben der qualitativen Einordnung in einen Technologielebenszyklus wird dabei auch berücksichtigt, ob es sich um eine standardisierte Technologie handelt, die in der Regel von mehreren Anbietern der entsprechenden TK-Systemtechnik unterstützt wird; denn damit steigen die Chancen, dass die Technologie tatsächlich längerfristig verfügbar sein wird. TK-Technologien, die auf international breit akzeptierten Standards aufbauen und die von mindestens drei Herstellern im Markt aktiv vermarktet werden, erhalten eine höhere Bewertung.

Auch wenn eine Telekommunikations-Technik grundsätzlich langfristig verfügbar sein wird, begrenzen die Anbieter die Unterstützung durch Aktualisierung und Fehlerbehebungen von bestimmten Versionen der Technologie vertraglich typischerweise auf einen deutlich kürzeren Zeitraum, z. B. auf 3 Jahre. Die Unterstützung eines längeren Zeitraums bestimmter Versionen einer TK-Technik ist für SMGWs aufgrund der langen geplanten Lebensdauer (ca. 13 Jahre) notwendig und Gegenstand der zwischen Anbietern und Betreibern auszuhandelnden vertraglichen Rahmenbedingungen. Die hier vorgenommene Bewertung einer langfristigen Verfügbarkeit der TK-Technik stützt sich hingegen auf die generelle Erwartung an die Dauer des versionsübergreifenden Technologielebenszyklus.

2.1.2.11 Kosten für Aufbau und Betrieb

Das Gesetz zur Digitalisierung der Energiewende definiert wie oben bereits angesprochen Preisobergrenzen für die Kosten, die den Verbrauchern für den Messstellenbetrieb in Rechnung gestellt werden können. Dabei werden im Gesetz bspw. für den Bereich von 6.000 bis 10.000 kWh Jahresverbrauch maximale jährliche Kosten von 100 Euro angegeben. Nur ein Teil der in Rechnung gestellten Kosten steht für Aufbau und Betrieb der TK-Infrastruktur im engeren Sinne zur Verfügung.

Die Preisobergrenze soll sicherstellen, dass die vom Kunden zu tragenden Kosten für das intelligente Messsystem und die mit dem System vom Kunden realisierbaren Einsparungen im Mittel in einem wirtschaftlich vertretbaren Verhältnis stehen. Können dem Endkunden Kosten unterhalb der Preisobergrenze in Rechnung gestellt werden, ist dies akzeptanzförderlich.

Es ist daher offensichtlich, dass ein **möglichst kostengünstiger Aufbau und Betrieb der TK-Infrastruktur angestrebt** wird. Kostenüberlegungen sind daher bereits in die Bewertungsstufen der zuvor diskutierten Kriterien eingeflossen.

Mit dem an dieser Stelle explizit eingeführten Kriterium sollen die verschiedenen kostenrelevanten Faktoren zusammengefasst bewertet werden:

- Abschätzung (Kapitel 2.2) bzw. Berechnung (Kapitel 2.4) der Mengengerüste für Netzknoten, bedingt durch Reichweite und Deep-Indoor-Anforderungen sowie Systemdatenrate,
- Aufwände für Installation der Leitungen (Tiefbau), Aufwände für Lizenzen oder Antennenstandorte,
- Bewertung des Marktumfelds anhand der Anzahl der Anbieter der Systemtechnik, Internationalität und Nutzung von Komponenten, die auch in konsumentenorientierten Massenmärkten zum Einsatz kommen,

- Aufwände, die in Gebäuden beispielsweise für die Verkabelung vorgenommen werden müssen.

An dieser Stelle sei erwähnt, dass Experteninterviews ergeben haben, dass es in der Praxis Schwierigkeiten hinsichtlich der Allokation von Kosten und damit der Refinanzierung der Investitionen geben könnte, wenn über die TK-Infrastruktur sowohl Anwendungen aus dem regulierten Netzbereich als auch dem wettbewerblich geprägten Messstellenbetrieb unterstützt werden sollen. Das MsbG hat hierfür bereits Instrumente. Der Messstellenbetreiber kann gegen Zusatzentgelt Mehrwertdienste anbieten, die dann nicht auf die Preisobergrenze angerechnet werden. Es ist aber fraglich, ob damit ein ausreichender Mechanismus besteht, wenn es um Anwendungen geht, die betriebsnotwendig und netzkritisch sind und insoweit grundsätzlich in den Bereich der Anreizregulierung fallen. Die bereits mehrfach erwähnte Netzzustandsüberwachung ist ein solcher Anwendungsfall, der primär dem sicheren und stabilen Betrieb von Verteilnetzen zugeordnet werden kann. Hier ist ein grundsätzliches Thema angesprochen, das wir bereits in der Einleitung adressiert haben: Über Telekommunikationsdienste, die sämtliche TK-Anwendungen in einem Verteilnetz und die bidirektionale Anbindung von SMGW ermöglichen, können Synergien erzielt werden. Somit erfassen die Telekommunikationsdienste sowohl netzdienliche, betriebsnotwendige Anwendungen als auch nicht netzdienliche Anwendungen. Ein Ansatz, die jeweiligen Kosten verursachungsgerecht zu allozieren, wäre die Erstellung einer Routing-Matrix. Dies ist implizit bereits im MsbG im Hinblick auf Zusatzdienste vorgesehen.

2.1.3 Anforderungen an die Verkehrskapazität der TK-Infrastruktur

Kapitel auf einen Blick

Kommunikationsnetze können nur dann die Digitalisierung der Energiewende unterstützen, wenn sie über ausreichende Datenübertragungsraten (Kapazität) verfügen, die beispielsweise zur Durchführung der Netzzustandsüberwachung oder zur Steuerung und Kontrolle von Betriebsmitteln notwendig sind. Es wird somit betrachtet, wie hoch die Datenraten im Uplink und im Downlink sein sollten, um die Anwendungen sicher zu ermöglichen. Bei der Analyse wird auf Vorarbeiten von relevanten Industriegremien zurückgegriffen (z. B. FNN).

Die Analyse zeigt, dass die erforderlichen Datenraten im Vergleich zu Breitbandanwendungen im Massenmarkt sehr gering sind (<10 kbit/s).

Nachfolgend werden die spezifischen Anforderungen an die Datenverkehrskapazität der TK-Infrastruktur im Detail beleuchtet. Nach der Betrachtung der im entsprechenden FNN-Hinweis-Dokument zu intelligenten Messsystemen beschriebenen Anforderungen werden weitere Anforderungsprofile der Netzzustandsüberwachung und zusätzlicher, potentieller Dienste einbezogen. Abschließend wird die für dieses Teilgutachten abgeleitete Aggregation von Datenverkehrsanforderungen in besonders kritischen Situationen erläutert.

Die Dimensionierung von TK-Infrastrukturen orientiert sich jeweils an einer Spitzenbelastung, in der die verfügbaren Kommunikationsressourcen maximal ausgelastet werden. In öffentlichen Mobilfunknetzen müssen sehr unterschiedliche Anforderungsprofile verschiedener Nutzergruppen bedient werden. In dedizierten, nicht öffentlichen Netzen kann die Dimensionierung hingegen passgenauer für ein spezifisches Anforderungsprofil erfolgen.

Während klassische Telekommunikationsnetze harte Kapazitätsgrenzen besaßen, sind heutige TK-Infrastrukturen in der Lage, Datenpakete zwischenspeichern, wenn lokale Leitungen kurzfristig besonders stark belastet sind, oder es erfolgt ein Umlenken der Datenströme auf weniger ausgelastete Kommunikationswege. Die Nutzung von Telekommunikationsdiensten ist dabei oft vom Zufall beeinflusst und wird deshalb typischerweise mittels stochastischer Prozesse modelliert. Die sog. Verkehrs-

theorie oder auch Warteschlangentheorie liefert hierfür ein geeignetes mathematisches Instrumentarium. Auf diese Weise kann für eine gegebene Charakteristik des zu erwartenden Kommunikationsverkehrs die notwendige Anzahl von Ressourcen bestimmt werden, um eine bestimmte Dienstgüte erreichen zu können. Die Dienstgüte wird in Form von Wahrscheinlichkeiten beschrieben, d. h. unter Einsatz von x Kommunikationsressourcen ist zu erwarten, dass nicht mehr als y % der Kommunikationsanfragen nicht erfüllt werden können. Mit anderen Worten: die auf stochastischen Datenverkehrsanforderungen aufbauende Dimensionierung von öffentlichen Telekommunikationsnetzen nimmt in Kauf, dass Kapazitätsanforderungen nicht zu jedem Zeitpunkt vollständig erfüllt werden können.

Das hier zu betrachtende Anwendungsfeld hat jedoch davon deutlich abweichende Rahmenbedingungen:

- Auch wenn der Zeitpunkt des Auftretens von Anwendungsfällen nicht immer planbar ist (z. B.: die Durchführung von Schaltbefehlen), so kann deren Durchführung und damit die Ressourcenauslastung gezielt gesteuert werden. Somit ist es möglich, dass ein vom Zufall beeinflusstes, im Sinne der Auslastung der verfügbaren Systemkapazitäten ungünstiges Zusammentreffen von gleichzeitigen Kommunikationsanforderungen bei entsprechender Dimensionierung und Steuerung des Verhaltens der Systemkomponenten weitgehend vermieden wird und die zur Verfügung stehenden Ressourcen gleichmäßig ausgelastet werden. Es wird also angenommen, dass der SMGW-Administrator als Betreiber der SMGWs unter Berücksichtigung der durch das BSI festgeschriebenen Vorgaben das System so plant, dass eine angemessene und vergleichsweise gleichmäßige Auslastung der TK-Infrastruktur entsteht. Ein für die Systemauslastung ungünstiges Verhalten, wie z. B. ein gleichzeitiges Ausführen von Anwendungsfällen auf allen SMGWs, obwohl aus Anwendungssicht mehrere Stunden für eine Ausführung zur Verfügung stehen (siehe Flottenanforderung, Abschnitt 2.1.4), ist vermeidbar und wäre als Mangel des Systems zu bewerten. Neben den zu übertragenden Nutzdaten ist dabei auch der interne Signalisierungsverkehr der TK-Infrastruktur zu betrachten. So kann das oben bereits als nicht zielführend eingestufte, gleichzeitige Ausführen von Anwendungsfällen auf vielen SMGWs unter ungünstigen Bedingungen bereits zu einer Überlastung der Signalisierungskanäle führen, ohne dass Nutzdaten übertragen werden können (sog. *Signalling Storms*^{31,32}). Für die Zwecke des Gutachtens wird angenommen, dass die oben angesprochene Steuerbarkeit des Gesamtsystems auch dazu genutzt wird, Engpässe im Bereich der Signalisierung wirksam zu vermeiden.
- Unter der Voraussetzung der Steuerbarkeit des Datenverkehrs sollen andererseits ausreichende Ressourcen vorgehalten werden, um eine vollständige Umsetzung der angefragten Dienste innerhalb der Vorgaben zu ermöglichen. Insoweit besteht eine definierte Nachfrage, die durch eine angemessene Priorisierung abgesicherte Ressourcen im Netz bedarf. Eine Übertragung von Daten nach dem Best-Effort-Prinzip reicht hier dann nicht aus. In diesem Kontext wird angenommen, dass bei der Nutzung von extern betriebenen TK-Infrastrukturen durch entsprechende Service-Level-Agreements (SLAs) die Verfügbarkeit ausreichender Systemkapazitäten

³¹ G. Gorbil, O. H. Abdelrahman und E. Gelenbe: Storms in mobile networks, Proc. 10th ACM Symp. QoS Secur. Wirel. Mob. networks - Q2SWinet '14, S. 119–126, 2014.

³² P. Andres-Maldonado, P. Ameigeiras, J. Prados-Garzon, J. J. Ramos-Munoz, and J. M. Lopez-Soler: Reduced M2M signaling communications in 3GPP LTE and future 5G cellular networks, IFIP Wirel. Days, vol. 2016–April, S. 3–5, 2016.

durch wirksame Priorisierung und / oder Bereitstellung exklusiver Ressourcen, beispielsweise der Nutzung von Frequenzen abgesichert und garantiert wird.

Die nachfolgende Betrachtung spezifischer Anwendungsfälle fokussiert sich auf die zur Durchführung der Anwendungsfälle notwendige Verkehrskapazität in Form von aggregierten Datenraten, zu deren Bestimmung die Datenraten der die Spitzenlast hervorrufenden Anwendungsfälle über eine Anzahl von SMGWs aufsummiert werden. Diese gegenüber der klassischen Verkehrstheorie vereinfachte Vorgehensweise ist gerechtfertigt vor dem Hintergrund der zuvor beschriebenen Annahme einer Steuerbarkeit des Systems und der Verfügbarkeit exklusiver / priorisierter Ressourcen. Der Ansatz wurde weiterhin gewählt, um die im VDE Forum für Netztechnik/Netzbetrieb (FNN) gewählte Methodik nahtlos aufzugreifen und entsprechend für weitere Anwendungsfelder (Netzzustandsüberwachung) zu erweitern.

Die später durchgeführte Engpassanalyse liefert quantitative Hinweise auf eine angemessene Dimensionierung der TK-Infrastruktur.

2.1.3.1 Anforderungen der Intelligenten Messsysteme gemäß FNN

Wie bereits eingangs angesprochen, hat das FNN des VDE einen sog. FNN-Hinweis herausgegeben, in dem Anforderungen an TK-Einrichtungen für den Betrieb von Messsystemen formuliert werden. Das FNN-Hinweisdokument wurde in einer ersten Version 1.0 im Juli 2014³³ veröffentlicht und im August 2017 mit der Version 2.0³⁴ aktualisiert. Im Rahmen des Gutachtens wurden sowohl die Version 1.0 und die Version 2.0 in die Analyse einbezogen, da beide Versionen hinsichtlich der Modellierung von maximalen Datenraten leicht unterschiedlich vorgehen. Als Ergebnis des durchgeführten Vergleichs wurde im Rahmen des Gutachtens nur die Modellierung gemäß Version 2.0 des Hinweisdokuments berücksichtigt

Für die jeweiligen Nutzungsszenarien werden detailliert einzelne sog. Anwendungsfälle definiert. Da sich diese auf das WAN beziehen, werden diese als WAN-Anwendungsfälle oder kurz WAF bezeichnet. Für jeden WAF werden verschiedene Parameter definiert:

- Die **Häufigkeit** in Anzahl der Datenübertragungen pro Zeiteinheit, z. B. *1 Mal pro Stunde*
- Das **Datenvolumen** in Byte, z. B. *110 Byte*. Die aus den Anforderungen für die IT-Sicherheit folgenden *Overheads* (z. B. TLS) sind pauschalisiert mitberücksichtigt. Ebenso werden durch die genutzten Kommunikationsprotokolle bedingte Overheads einbezogen.
- Die **Hauptübertragungsrichtung(en)**, z. B. *UL/DL symmetrisch*
- Die **Zeitdauer**, nach der die Datenübertragung vollständig abgeschlossen sein muss, in Minuten, z. B. *5 Minuten*. Die Zeitdauer wird sowohl für ein einzelnes SMGW definiert wie auch für bestimmte Anwendungen für eine sog. Flotte, d. h. eine Gruppe von SMGWs.
- Die **Priorität** der Durchführung, entweder als mit Priorität (P) oder ohne (N), z. B.: *P*
- Die **Häufungsklassen**, welche die Planbarkeit der Durchführung erfasst, in den Kategorien Arbeitszeit (A), Zufällig (Z) und Regelmäßig (R)

³³ Forum Netztechnik/Netzbetrieb (FNN) im VDE: FNN-Hinweis Anforderungen an TK-Einrichtungen für den Betrieb von Messsystemen (Version 1), 2014.

³⁴ Forum Netztechnik/Netzbetrieb (FNN) im VDE: FNN-Hinweis Anforderungen an TK-Einrichtungen für den Betrieb von Messsystemen (Version 2), 2017.

Anhand dieser Charakterisierung können nun verschiedene, für die Belastung der TK-Infrastruktur relevante Parameter abgeleitet werden:

- **Datenvolumina**, die innerhalb eines Zeitrahmens (z. B. eines Monats) im Mittel anfallen: Der Wert wird bestimmt durch die Aufsummierung der Datenvolumina der einzelnen Anwendungsfälle unter Berücksichtigung der Häufigkeit. Hieraus lassen sich z. B. Rückschlüsse auf die angemessene Dimensionierung eines Datentarifs schließen. Für die Bewertung der TK-Infrastruktur ist der Wert noch nicht aussagekräftig genug, da der anwendungsspezifische Zeitbezug fehlt.
- **Datenvolumina, die in der sog. Hauptverkehrsstunde anfallen:** Der Parameter wird bestimmt unter Berücksichtigung von Datenvolumen, Häufigkeit, und Häufungsklasse. Über die Berücksichtigung der Häufungsklasse wird erfasst, dass bestimmte Dienste nicht deterministisch planbar sind und deshalb in der Hauptverkehrsstunde ungeplant gebündelt auftreten können. Hierfür müssen zusätzliche Netzressourcen vorgehalten werden. Diese Information über das Datenaufkommen in der sog. Hauptverkehrsstunde erlaubt dem TK-Infrastrukturbetreiber, eine typische Last (sog. Datentonnage) unter normalen Betriebsbedingungen abzuschätzen. Die Abbildung 2-6 zeigt, wie aus den in der Hauptverkehrsstunde zu übertragenden Datenmengen eine Kapazitätsanforderung in Form einer Datenrate (erforderliche Datenrate in der Hauptverkehrsstunde, oder kurz HVSt-Datenrate) abgeleitet werden kann.

► **Paketgröße:**

Bruttodatenvolumen pro Datenpaket

► **Häufigkeit:**

Häufigkeit in HVSt je Anwendungsfall

► **Häufung:**

Auftrittswahrscheinlichkeit in HVSt entsprechend der Häufungsklassen:

- *Arbeitszeit (A): planbar innerhalb der Arbeitszeit (Faktor: 2%)*
- *Zufällig (Z): nicht vorhersehbar, nicht planbar (Faktor: 500%)*
- *Regelmäßig (R): regelmäßig, definierte Zeitintervalle (Faktor: 100%)*

Ableitung der Datenrate in der Hauptverkehrsstunde (HVSt):

$$\text{Datenrate}_{\text{HVSt}} = \frac{\text{Paketgröße} \cdot \text{Häufigkeit} \cdot \text{Häufung}}{\text{Zeitdauer HVSt (3600s)}}$$

Datenrate_HVSt:



Beispiel 1
Alarmierung - Alive Meldungen
gemäß FNN

Alarm-Paket: 8566 Byte
Häufigkeit: 0,0417
Häufung: R → 100%
HVSt-Paketgröße: 356,9 Byte
→ HVSt-Datenrate: 0,79 bit/s

Datenrate_HVSt:



Beispiel 2
Firmware Upgrade
gemäß FNN

Upgrade: 12.000.000 Byte
Häufigkeit: 0,0003
Häufung: A → 2%
HVSt-Paketgröße: 82,2 Byte
→ HVSt-Datenrate: 0,18 bit/s

Abbildung 2-6: Ableitung einer Datenrate in der HVSt aus dem Datenvolumen

Wie unten im Zusammenhang mit der Diskussion von sog. Flottenanforderungen noch diskutiert wird, ergeben sich für einzelne Anwendungen in kritischen Situationen noch schärfere Kapazitätsanforderungen, die in der Engpassanalyse Berücksichtigung finden.

- **Minimale Anschlussbandbreiten in kbit/s (oder auch Einzeldatenrate):** Dieser Parameter gibt vor, welche Datenrate von einem SMGW bei einer Durchführung zeitkritischer WAFs unterstützt werden muss. Hierbei geht nun auch die oben eingeführte WAF-spezifische Zeitdauer (bezogen jeweils auf ein einzelnes SMGW) mit in die Betrachtung ein: Für jede Kombination von WAF-spezifischem Datenvolumen und dazugehöriger Zeitdauer ergibt sich eine Datenrate, die zur Bestimmung der minimalen Anschlussbandbreite berücksichtigt wird. Dabei können Prioritäten berücksichtigt werden: Unterstützt eine TK-Infrastruktur die Durchsetzung von Prioritäten, wer-

den nur diejenigen WAF-Dienste berücksichtigt, denen eine Priorität zugeordnet wurde, denn die nicht priorisierten WAF-Dienste können zu einem späteren Zeitpunkt abgewickelt werden. Die Berechnung der minimalen Anschlussbandbreite erfolgte in der ersten Version des Hinweisdokuments durch eine *Aufsummierung*, während die aktuelle Version 2.0 jeweils nur die *maximale Datenratenanforderung aller betrachteten Anwendungsfälle* berücksichtigt. Damit wird der Annahme Rechnung getragen, dass unterschiedliche systemkritische Anwendungsfälle nicht gleichzeitig durchgeführt werden, sondern sequentiell. Die Dimensionierung des Anschlusses orientiert sich somit an dem anspruchsvollsten Anwendungsfall. Das FNN-Hinweisdokument nennt für Netze mit und ohne Priorisierung konkrete Anschlussbandbreiten für *Uplink* (UL) und *Downlink* (DL)³⁵:

- Minimale Anschlussbandbreite mit Priorisierung im DL: 8,9 kbit/s
- Minimale Anschlussbandbreite mit Priorisierung im UL: 2,7 kbit/s
- Minimale Anschlussbandbreite ohne Priorisierung im DL: 11,9 kbit/s
- Minimale Anschlussbandbreite ohne Priorisierung im UL: 4,2 kbit/s

Im Rahmen der Bewertung einzelner TK-Infrastrukturen muss sichergestellt werden, dass die betrachteten Techniken grundsätzlich in der Lage sind, die minimalen Anschlussbandbreiten bzw. Mindestdatenraten im Einzelbetrieb unterstützen zu können. Das FNN-Hinweisdokument betont, dass es sich hierbei um absolute Untergrenzen handelt und dass die Anforderungen in der Praxis höher liegen werden (z. B. durch die Berücksichtigung von Verbindungsaufbauzeiten). Für die Zwecke des Gutachtens ist es sinnvoll, hier auch im Sinne der Berücksichtigung zukünftiger Anforderungen großzügig zu runden. So können TK-Infrastrukturen, die pro Anschluss nicht zuverlässig **mindestens 15 kbit/s im Downlink** sowie **7,5 kbit/s im Uplink** unterstützen können, keine weitere Berücksichtigung finden.

Auch wenn es grundsätzlich aus technischer Sicht denkbar ist, dass zeitkritische Anwendungsfälle parallel zur Ausführung kommen, wird im FNN-Hinweisdokument davon ausgegangen, dass der Betreiber der SMGWs durch die entsprechende Planung dafür Sorge tragen wird, dass die gleichzeitige Ausführung von vornherein vermieden wird, bzw. dass es bei einer gleichzeitigen Durchführung zu tolerierbaren Verzögerungen des Beginns der Ausführung einzelner Dienstleistungen kommen wird. Denn anders als in klassischen TK-Infrastrukturen, in denen sich die Nutzer zufällig verhalten, kann beim Betrieb der SMGW-Infrastruktur geplant vorgegangen werden. Wenn also z. B. die Systemsoftware von 100 SMGWs in einem Netzabschnitt ersetzt werden muss (Softwareupgrade), dann wird die Übertragung der Upgrade-Dateien nicht parallel mit der oben eingeführten Einzeldatenrate durchgeführt, sondern innerhalb eines vorgegebenen Zeitraums sequentiell gestaffelt begonnen, sodass eine Belastung der TK-Infrastruktur vermieden werden kann. Diesem Gedanken wird durch die nachfolgend beschriebenen Anforderungen an eine Flotte Rechnung getragen.

³⁵ Forum Netztechnik/Netzbetrieb (FNN) im VDE: FNN-Hinweis Anforderungen an TK-Einrichtungen für den Betrieb von Messsystemen (Version 2), 2017, Abschnitt 9.4., Seite 54. Eigene Berechnungen der Gutachter legen nahe, dass im veröffentlichten Hinweisdokument die Angabe der Werte für Uplink- und Downlink vertauscht wurden. Daher werden an dieser Stelle die Werte in anderer Reihenfolge als in der Originalquelle angegeben.

- Datenraten pro Netzabschnitt (oder auch Flottendatenrate):** Mit der Version 2.0 des Hinweisdokuments wurde eine Betrachtung einer beispielhaften Modellregion ergänzt³⁶. Die erforderliche Datenrate pro Netzabschnitt leitet sich dabei aus der sog. Flottenanforderung ab: ein Anwendungsfall muss dabei für alle SMGWs eines Netzabschnitts innerhalb einer vorgegebenen Zeitdauer umgesetzt werden. Die Anforderung an die Mindestdatenrate pro Netzabschnitt (zur Abgrenzung gegenüber der Einzeldatenrate als Flottendatenrate bezeichnet) kann nur auf der Basis einer konkret geplanten TK-Infrastruktur ermittelt und als quantitative Anforderung formuliert werden. Die Aufsummierung der Einzeldatenraten wird gemäß FNN-Dokument nicht als praxisrelevantes Szenario betrachtet, da dies die Gleichzeitigkeit der Ausführung eines Anwendungsfalls voraussetzen würde. Stattdessen wird durch das FNN als praxisnäherer Ansatz eine maximale Übertragungszeit für die gesamte Flotte definiert. Wie die Abbildung 2-7 aufzeigt, ergibt sich für das Beispiel eines Firmwareupdates bei Berücksichtigung einer Flottenanforderung für den Netzabschnitt ein deutlich niedrigerer Wert für die Datenrate als dies bei der Aufsummierung der oben angesprochenen Einzeldatenraten der Fall wäre (statt einer aus den Einzeldatenraten hypothetisch abgeleiteten Datenrate von 890 kbit/s ergeben sich mit Flottenanforderung nur 37,0 kbit/s als Anforderung an den Netzabschnitt mit angenommenen 100 SMGWs).

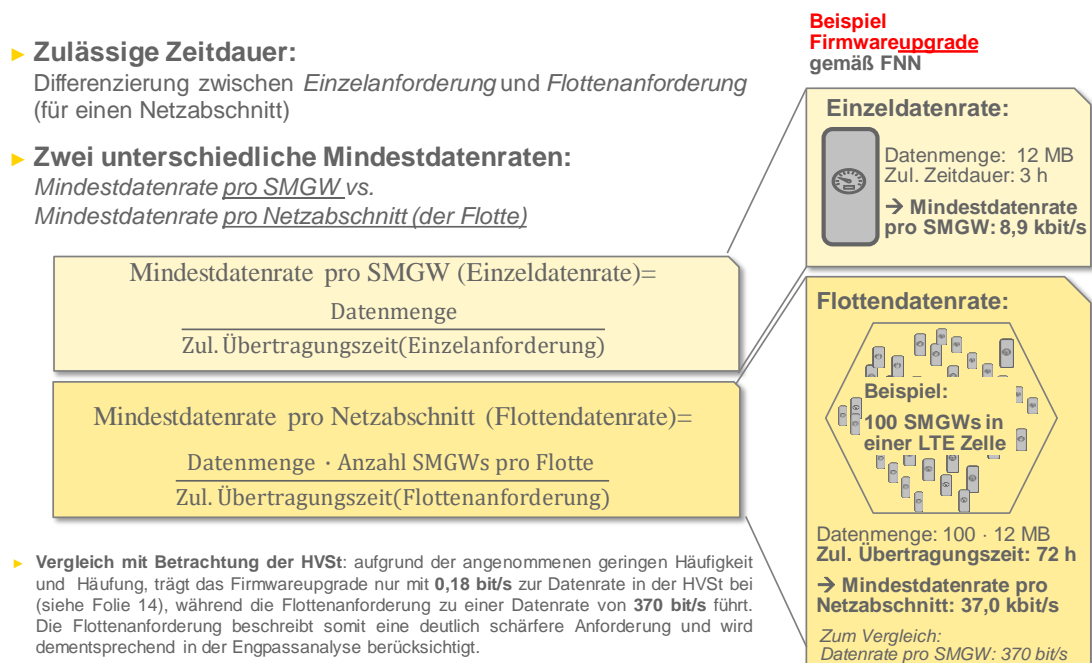


Abbildung 2-7: Vergleich Einzeldatenrate vs. Flottendatenrate vs. Modellierung der Hauptverkehrsstunde (HVSt)

- Der Vergleich mit der Betrachtung der Hauptverkehrsstunde liefert folgende Erkenntnis:** Aufgrund der angenommenen geringen Häufigkeit und Häufung, trägt der Anwendungsfall Firmwareupdate nur mit **0,18 bit/s** zur Datenrate in der HVSt bei, während die Flottenanforderung –

³⁶ Forum Netztechnik/Netzbetrieb (FNN) im VDE: FNN-Hinweis Anforderungen an TK-Einrichtungen für den Betrieb von Messsystemen (Version 2), 2017, Kapitel 10.

zur Illustration umgerechnet auf ein einzelnes SMGW³⁷ – zu einem Beitrag von 370 bit/s je SMGW führt. Die Flottenanforderung für den Anwendungsfall Firmwareupgrade beschreibt somit eine deutlich schärfere Anforderung und wird dementsprechend in der Engpassanalyse berücksichtigt. Detaillierte Betrachtungen zu den verschiedenen Anwendungsfällen und damit verbundenen Anforderungen finden sich in Anhang A: Datenaufkommen von SMGW-Anwendungen.

- Da das FNN-Dokument allerdings in der Version 2.0 nur für wenige Anwendungsfälle Flottenanforderungen definiert hat, wurden für die Zwecke des Gutachtens Ergänzungen vorgeschlagen (siehe unten).

2.1.3.2 Netzzustandsüberwachung und weitere potentielle Dienste

Eingangs wurde bereits erläutert, dass im Rahmen des Gutachtens / Topthema 2 übergreifende Konzepte und Anforderungen der Netzzustandsüberwachung detailliert untersucht wurden. Hieraus lassen sich nun spezifische Anforderungen an die TK-Infrastruktur extrahieren, die grundsätzlich auch für vergleichbare Anwendungen und Datenübertragungen im Verteilernetz bestehen.

Der Kernpunkt ist dabei eine regelmäßige Übertragung von Netzzustandsdaten im Rahmen der **Netzzustandsüberwachung** (NZÜ), sodass eine kontinuierliche Last sowie höhere, kumulierte Datenmengen entstehen. Da aber zeitkritische Prozesse bereits im Hinweisdokument des FNN berücksichtigt wurden, erhöht sich die für die spätere Engpassanalyse besonders relevante, zu unterstützende Datenrate pro Netzabschnitt nur dann spürbar, wenn die Abstände zwischen den Übertragungen der Netzzustandsdaten in den Sekundenbereich verkürzt werden.

Dieser Zusammenhang kann anhand der folgenden, in Abbildung 2-8 illustrierten, Überlegungen konkretisiert werden. Analog zu den oben beschriebenen Ableitungen einer Einzeldatenrate und Flottendatenrate lassen sich auch für die Netzzustandsüberwachung notwendige Einzeldatenraten (pro SMGW) und Flottendatenraten (für einen Netzabschnitt) ableiten. Hierbei werden folgende Annahmen berücksichtigt:

- Netto-Datenmenge pro Netzzustandswert gemäß Vorgabe Topthema 2,
- Overhead durch Kommunikationsprotokolle und sichere Übertragung (TLS),
- zulässige maximale Übertragungszeit pro SMGW und Netzabschnitt gemäß Vorgabe Topthema 2,
- Durchdringung der NZÜ vor dem Hintergrund der Annahme, dass nicht jedes SMGW für die Netzzustandsüberwachung eingesetzt werden muss (siehe hierzu detaillierte Überlegungen im Gutachten zu Topthema 2).

Hinsichtlich der Gewährleistung der sicheren Übertragung ist ein Overhead für die Verschlüsselung zu berücksichtigen. Bei den hier angenommenen häufigen Übertragungen (z. B. alle 30 Sekunden) ist es sinnvoll, davon auszugehen, dass die TLS-Session langfristig betrieben wird, sodass der Overhead des

³⁷ Die Umrechnung auf ein einzelnes SMGW erfolgt zur Illustration. Die tatsächlichen Datenraten bei der Umsetzung des Anwendungsfalls sind höher und orientieren sich an den Einzeldatenraten. Innerhalb der Flotte werden die Anwendungsfälle demnach sequentiell mit höheren Datenraten abgearbeitet.

TLS-Verbindungsaufbaus nicht für jede einzelne Übertragung zu berücksichtigen ist. Die Vorgaben des BSI erlauben es, eine TLS-Session bis zu 48 Stunden zu betreiben.

Zur Illustration der Auswirkungen unterschiedlicher zulässiger Übertragungszeiten und des TLS-Verbindungsaufbaus dient die Abbildung 2-8. Hierbei wird die Flottendatenrate für einen Netzabschnitt mit 100 SMGWs und einer Durchdringung der NZÜ von 100% für unterschiedliche zulässige Übertragungszeiten gezeigt und in Bezug zu den FNN-Anforderungen gesetzt. Die Betrachtung fokussiert sich auf den Uplink, da für die NZÜ naturgemäß vor allem Daten im Uplink übertragen werden. Man erkennt zunächst, dass die Annahme einer langfristig betriebenen TLS-Verbindung zu deutlich reduzierten Anforderungen führt, die sich für eine zulässige Übertragungszeit von 30s in einer Größenordnung mit den FNN-Anforderungen bewegt. Dies führt bereits an dieser Stelle zur Empfehlung, dass SMGWs, die die NZÜ in der vorgeschlagenen Form unterstützen sollen, in der Lage sein müssen, langfristige TLS-Verbindungen unter Ausschöpfung des von der BSI vorgegebenen Rahmens betreiben zu können.

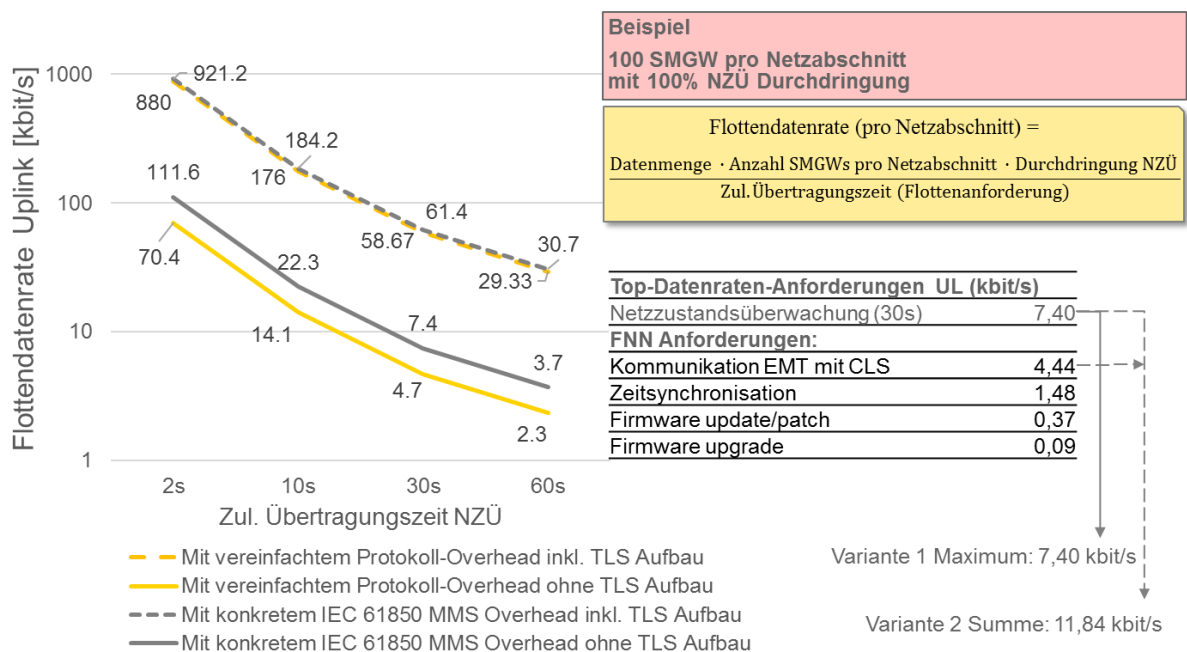


Abbildung 2-8: Variation der Annahmen zu den Anforderungen der Netzzustandsüberwachung (NZÜ) an die TK-Infrastruktur

Die Abbildung 2-8 beleuchtet zusätzlich zwei bisher noch nicht diskutierte Aspekte:

- Eine detaillierte Betrachtung des zu erwartenden Protokolloverheads unter Berücksichtigung des für die NZÜ relevanten Standards IEC 61850³⁸ zeigt, dass diese zu höheren Anforderungen führt als eine pauschalisierte Betrachtung (Aufschlag eines Faktors 1,5 gemäß FNN Vorgehensweise). Im Sinne einer konservativen Planung werden im Gutachten die höheren Werte berücksichtigt.

³⁸ International Electrotechnical Commission (IEC): Communication networks and systems for power utility automation, IEC 61850, 2018.

- Es ist zu entscheiden, ob die NZÜ gleichberechtigt in die Betrachtung der bereits durch FNN definierten Anwendungsfälle eingeht und auf dieser Basis eine Bildung des Maximums durchgeführt wird (Variante 1: Maximum). Alternativ wird die NZÜ als zusätzliche Anforderung additiv berücksichtigt (Variante 2: Summe). Für die Variante 1 wirkt sich die NZÜ nur für zulässige Übertragungszeiten unter 30s aus, sodass die Betrachtung der Variante 2 im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse als Szenario mit erhöhten Anforderungen Eingang in die Engpassanalyse findet. Zu beachten ist allerdings, dass bei niedrigeren Durchdringungen (z. B. 25 %) der Einfluss auch im additiven Fall deutlich geringer wird, als dies in der Abbildung aufgezeigt wird.

Zusammenfassend werden folgende Anforderungen als Arbeitsannahme³⁹ für die **Netzzustandsüberwachung** berücksichtigt:

- Zulässige Übertragungszeit von 30s
- Annahme einer existierenden TLS Verbindung (Overhead durch TLS-Verbindungsaufbau wird nicht berücksichtigt)
- Annahme einer typischen Durchdringung von 25 % (mit Variation von 100 % als Extremfall)
- Die Netzzustandsüberwachung wird im Szenario FNN+NZÜ additiv zu bestehenden FNN-Anforderungen berücksichtigt.

2.1.4 Aggregation der Datenverkehrsanforderungen für die Engpassanalyse

Die zuvor angesprochenen Anforderungen einzelner Anwendungsfälle müssen für die spätere Engpassanalyse angemessen aggregiert werden, sodass die Leistungsfähigkeit einer TK-Infrastruktur unter maximaler Belastung bewertet werden kann. Für die angemessene Dimensionierung des Netzes ist dabei die in einem Netzabschnitt zu unterstützende aggregierte Datenrate von entscheidender Bedeutung, denn diese berücksichtigt die vorgegebenen Zeitschranken. Ein Netzabschnitt wird dabei technologieabhängig definiert; z. B. umfasst dieser alle Stationen in einer Funkzelle oder alle Stationen, die an einem sog. PLC-Konzentrator angebunden sind.

Die Aggregation kann auf der Basis der zuvor eingeführten Anforderungen gemäß FNN und weiterer Anwendungsfälle aus zwei Perspektiven erfolgen:

- Betrachtung der Hauptverkehrsstunde
- Betrachtung der Flottenanforderungen pro Netzabschnitt

Wie auch schon anhand der zuvor durchgeführten Analyse einzelner Anwendungsfälle deutlich wurde, werden durch die Flottenanforderungen deutlich schärfere Anforderungen formuliert.

Dies wird anhand der Abbildungen 2–9 und 2–10 deutlich, die jeweils für eine Anzahl von 100 SMGWs und die FNN-Anwendungsfälle die aggregierten Datenraten im Uplink und Downlink aufzeigen.

³⁹ Die endgültige Festlegung der Anforderungen erfolgt als Ergebnis der Analysen im Topthema 2. Für das hier vorgelegte Basisgutachten wird zunächst mit einer Arbeitsannahme gearbeitet, die sich in den bisherigen, intensiven Diskussionen als eine sinnvolle Variante herausgebildet hat.

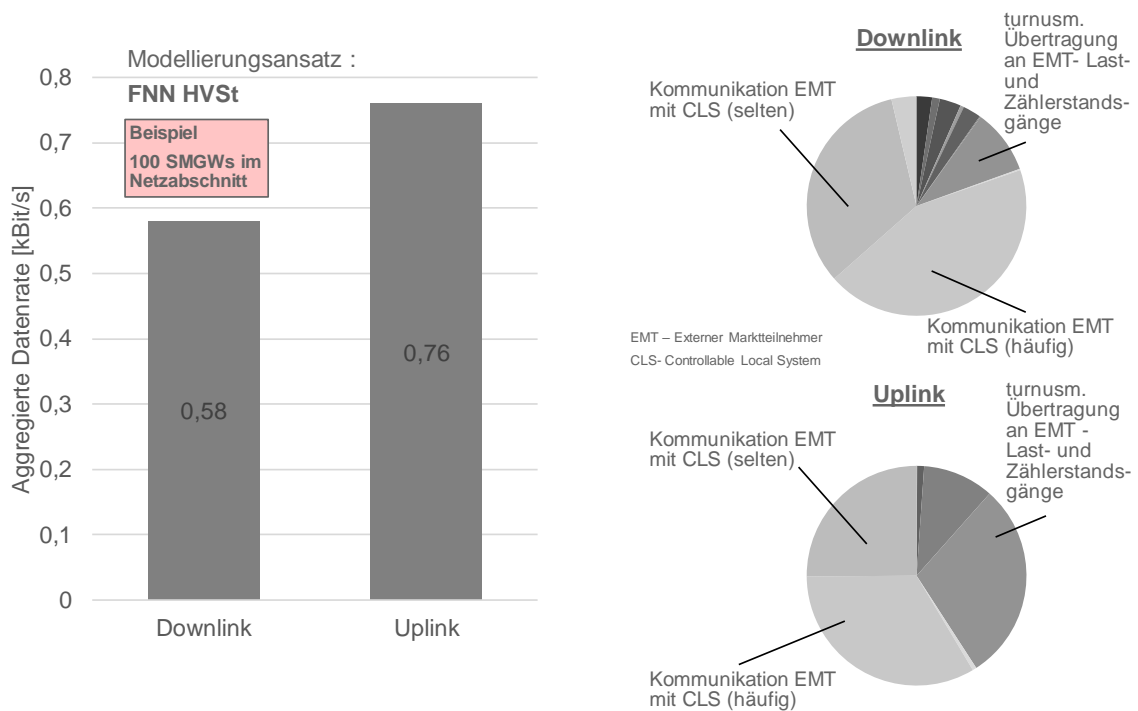
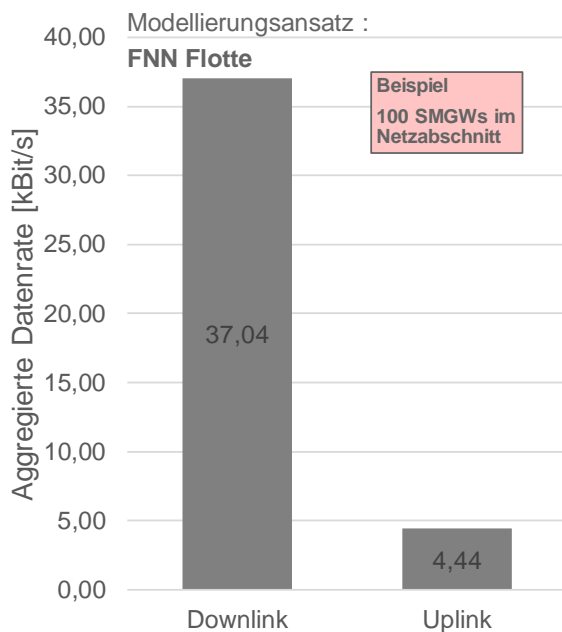


Abbildung 2-9: Aggregierte Datenrate für Modellierung des Datenverkehrs gemäß FNN-HVSt

Für die Modellierung des Datenverkehrs gemäß FNN-Hauptverkehrsstunde (HVSt) (Abbildung 2-9) zeigt sich, dass sich in Summe für 100 SMGWs niedrigere Datenraten von weniger als 1 kbit/s ergeben. Dies liegt begründet in der teilweise sehr geringen Häufigkeit und Häufung einzelner Anwendungsfälle. Anhand der grafisch illustrierten Aufteilung der Anteile einzelner Anwendungsfälle wird deutlich, dass die Datenrate in der Hauptverkehrsstunde dominiert wird durch folgende Anwendungsfälle:

- Häufige Kommunikation mit externen Marktteilnehmern (EMT) über eine Steuerungsschnittstelle mit den sog. *Controllable Local Systems* (CLS)
- Seltene Kommunikation mit EMT mit CLS
- Turnusmäßige Übertragung an EMT (Last- und Zählerstandsgänge)



Top-Datenraten-Anforderungen DL (kbit/s)

Firmware upgrade	37,04
Firmware update/patch	9,26
Kommunikation EMT mit CLS*	4,44
Zeitsynchronisation*	2,96

Top-Datenraten-Anforderungen UL (kbit/s)

Kommunikation EMT mit CLS	4,44
Zeitsynchronisation	1,48
Firmware upgrade	0,37
Firmware update/patch	0,09

*Anmerkung: Für aktuell in FNN nicht explizit beschriebene Flottenanforderungen wird eine max. Übertragungszeit für die Flotte von 15 Minuten angenommen

Abbildung 2-10: Aggregierte Datenrate für Modellierung des Datenverkehrs gemäß FNN-Flotte

Für die Modellierung des Datenverkehrs gemäß den Flottenanforderungen pro Netzabschnitt gemäß FNN ergibt sich ein anderes Bild (Abbildung 2-10).

In diesem Fall dominieren die Anwendungsfälle, in denen eine relativ große Datenmenge innerhalb einer vorgegebenen Zeit übertragen werden muss. Für Anwendungsfälle, für die noch keine Flottenanforderung gemäß FNN vorliegt, wird für die Zwecke des Gutachtens eine maximale Übertragungszeit für alle SMGWs innerhalb des Netzabschnitts von 15 Minuten angenommen (z. B. für die Zeitsynchronisation oder die Kommunikation von EMT mit CLS). Wie zuvor erläutert, ergibt sich die aggregierte Datenrate für alle SMGWs im Netzabschnitt jeweils durch die Aufsummierung der Datenrate des FNN-Anwendungsfalls mit den höchsten Anforderungen (Bildung des Maximums).

Im Vergleich zwischen beiden Ansätzen wird deutlich, dass bei den für die Engpassanalyse interessanten größeren Mengengerüsten, die Modellierung FNN-Flotte zu höheren Anforderungen führt. Für die Engpassanalyse wird somit mit dem Modellierungsansatz FNN-Flotte gearbeitet.

Abschließend wird nun noch der Fall FNN-Flotte mit 100 SMGWs plus NZÜ betrachtet (siehe Abbildung 2-11).

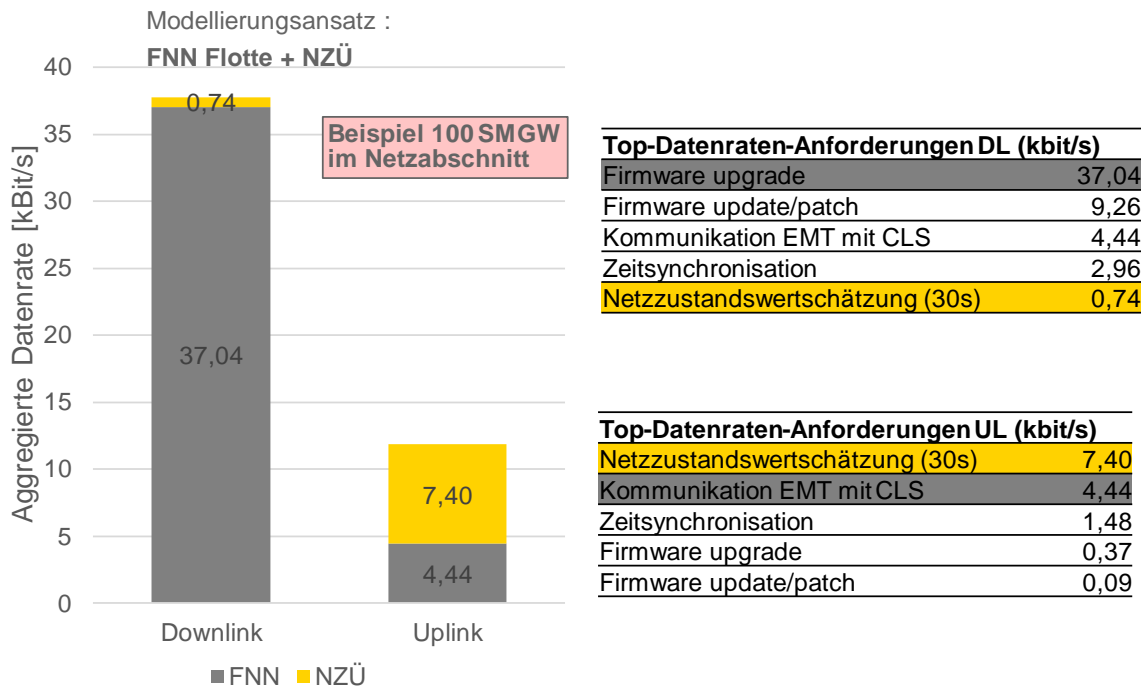


Abbildung 2-11: Aggregierte Datenrate für Modellierung des Datenverkehrs gemäß FNN-Flotte

Am hier gezeigten Beispiel für 100 SMGWs wird deutlich, dass die Netzzustandsüberwachung im Uplink zu einer deutlichen Anhebung der im Netzabschnitt zu unterstützenden Datenraten führt, während die Auswirkungen im Downlink gering sind. Im Anhang F wird aufgezeigt, dass der Anstieg der aggregierten Datenraten im Uplink je nach Szenario zwischen 50 % und 150 % liegen kann.

2.2 Analyse TK-Technologien aus technischer Sicht

Kapitel auf einen Blick

In diesem Kapitel werden denkbare Kommunikationstechnologien anhand der im vorherigen Kapitel hergeleiteten Kriterien analysiert.

In einem ersten Schritt zeigt sich, dass bei den Funktechnologien allein diejenigen zu betrachten sind, die exklusiv zugeteiltes Frequenzspektrum nutzen. Nur exklusive Frequenznutzungsrechte ermöglichen Qualitätsgarantien bei der Dienstleistung. Dies sind CDMA und LTE, wobei erstere Technologie heute nur im Bereich 450 MHz zur Anwendung kommt, während LTE in einer Vielzahl von Frequenzbändern realisiert werden kann. Des Weiteren betrachten wir leitungsgebundene Kommunikationstechnologien wie DSL, Breitbandkabel, Glasfaser und Powerline. Leitungsgebundene Technologien mit der Ausnahme von Powerline können nicht direkt mit dem SMGW verbunden werden. Hier bedarf es einer weiteren In-haus-Kommunikationsinfrastruktur. Zudem muss bei DSL und Breitbandkabel auf den Router des Endkunden zurückgegriffen werden, was aus Gründen der Verfügbarkeit und Sicherheit der Übertragung nicht akzeptabel ist. Eine synergetische Nutzung über alle energiewirtschaftlichen Anwendungen (im Smart Grid und im Messwesen) kann es nur geben, wenn Telekommunikationsdienste in einem 450-MHz-Funknetz genutzt werden. Es zeigt sich, dass sich ein Technologiemix von CDMA, LTE bei 450 MHz, öffentlichen Mobilfunkangeboten auf Basis von LTE und Breitbandpowerline ergeben könnte. Glasfaseranbindungen sind mittel- bis langfristig relevant.

Die Vernetzung von SMGWs über eine WAN-Kommunikation stellt aufgrund der großen Anzahl dezentral im Verteilnetz verorteter Kommunikationsknoten eine große Herausforderung dar. Neben auf dem Telekommunikationsmarkt etablierten kabelgebundenen TK-Lösungen (z. B. Kabel oder Glasfaser) zeigt

allein der Blick auf funkgestützte Technologien, dass es aktuell eine Vielzahl von Technologien gibt, die die Vernetzung von Kommunikationsknoten für das Internet der Dinge (engl. *Internet of Things*, IoT), zu dem auch intelligente Energienetze zählen, ermöglichen. Hierbei gibt es mindestens zwei Ecosysteme, die miteinander konkurrieren: standardisierte 3GPP-Zellularfunk-Technologien im lizenzierten sowie proprietäre TK-Technologien im unlizenzierten Spektrum. Ausgehend von der Größe des potentiellen Lösungsraums für TK-Lösungen zur SMGW-Anbindung leitet sich eine große Unsicherheit ab, die sich auch in der Heterogenität praktischer Erfahrungen wiederfindet. Die damit verbundene Aufgabe, eine Kommunikationslösung zu finden, die nach § 21 Abs. 1 Nr. 3 MsbG für die Digitalisierung des Messwesens eine leistungsfähige und technisch sichere Lösung darstellt und dabei gleichzeitig wirtschaftlich tragfähig ist, ist derzeit ungelöst.

Zur Beantwortung dieser Fragestellung wird im Rahmen der technischen Analyse von TK-Technologien die Eignung von verschiedenen TK-Infrastrukturen im Zugangsnetz analysiert. Als potentielle Technologieoptionen für das Zugangsnetz fokussiert sich das Gutachten auf die in Abbildung 2-12 dargestellten draht- und funkgestützten Technologien.

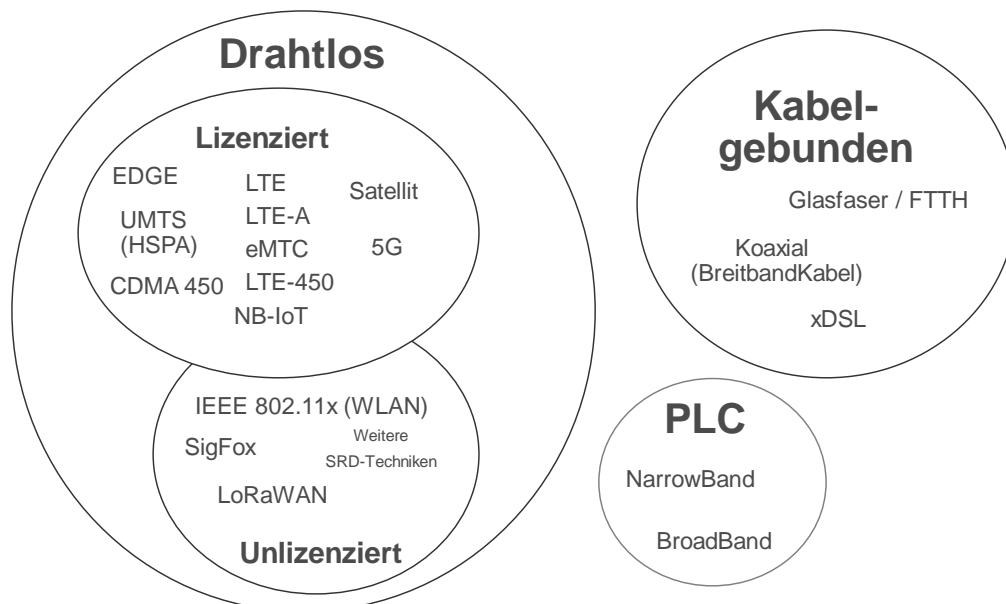


Abbildung 2-12: Betrachtete TK-Infrastrukturen in der Übersicht

Die gelisteten Technologieoptionen werden vorgestellt und im Hinblick auf die zuvor eingeführten diskutierten Evaluierungskriterien und Anforderungsprofile (Kapitel 2.1) vergleichend bewertet. Hieraus leitet sich für die notwendige Charakterisierung der Technologieoptionen das in Tabelle 2-1 zusammengefasste 5-stufige Bewertungsschema ab und erlaubt einen übergreifenden Vergleich über alle betrachteten Technologielösungen. Die Einordnung der Technologiekriterien in die Bewertungsstufen erfolgt auf Basis öffentlich zugänglicher Informationen (Technologiestandards, wissenschaftliche Veröffentlichungen, White Paper, etc.), sowie unter Einbezug von Expertengesprächen (Anwender, Netzbetreiber, Hersteller). Eine Detailübersicht der Technologieparameter findet sich für alle betrachteten Technologielösungen im Anhang C.

- Als Ergebnis stellt die nachfolgende technische TK-Analyse alle Technologielösungen vor, die das aus den Anforderungskriterien abgeleitete SMGW-Anforderungsprofil erfüllen. Hier war beispielsweise bei der Systemdatenrate die Überlegung, dass unabhängig von der de facto erforderlichen Systemdatenrate ein höherer Wert Sicherheitsreserven bietet und sich insoweit positiver darstellt.

Tabelle 2-1: Bewertungsmaßstab für Basis- und erweiterte Systemparameter

Anforderungskriterien		Bewertungsmaßstab				
		++	+	0	-	--
Basisparameter	Deep-Indoor-Abdeckung	geringer Aufwand	moderater Aufwand	erhöhter Aufwand	-	hoher Aufwand oder gar nicht realisierbar
	Reichweite	≥ 5000 m	< 5000 m	< 1500 m	< 500 m	< 50 m
	Systemdatenrate Downlink	≥ 10 MBit/s	< 10 MBit/s	< 1 MBit/s	< 0,015 MBit/s	< 0,01 MBit/s
	Systemdatenrate Uplink	≥ 10 MBit/s	< 10 MBit/s	< 1 MBit/s	< 0,0075 MBit/s	< 0,005 MBit/s
	Übertragungsverzögerung	< 10 ms	< 50 ms	< 900 ms	< 1800 ms	≥ 1800 ms
Erweiterte Systemparameter	Redundante Topologie	geringer Aufwand	mittlerer Aufwand	erhöhter Aufwand	stark erhöhter Aufwand	hoher Aufwand
	Schwarzfallfestigkeit	geringer Aufwand	mittlerer Aufwand	hoher Aufwand	sehr hoher Aufwand	nicht praktikabel
	Differenzierte Priorisierung von Datendiensten	uneingeschränkt verfügbar, externer Zugriff möglich	verfügbar, Zugriff durch Netz-betreiber	eingeschränkt verfügbar	-	nicht verfügbar
	Exklusive Ressourcen ohne Wechselwirkung mit Dritten	exklusive Ressourcenzuweisung, externe Administration	exklusive Ressourcen, nur Netz-betreiber administriert	Priorisierung von Nutzergruppen	Einschränkung der Wechselwirkung mittels DC oder LBT	ungesteuerte Wechselwirkung
	Schutz gegenüber Angriffen	höchstes Schutzniveau (aktuellster State-of-the-Art)	hohes Schutzniveau mit bekannten Lücken	mittleres Schutzniveau (State-of-the-Art)	Basisschutz (leichte Verschlüsselung)	geringer/ kein Schutz
	Erwartung einer langfristigen Verfügbarkeit	15+ Jahre	10-15 Jahre	5-10 Jahre	langfristige Verfügbarkeit unsicher	am Ende des Lebenszyklus, Nachfolgetechnologie verfügbar
	Kosten für Aufbau und Betrieb	sehr kosteneffizient	kosteneffizient	Eingeschränkt kosteneffizient	kostenintensiv	sehr kostenintensiv

2.2.1 Funktechnologien

Der Bedarf an Funktechnologien ist bedingt durch die einfache Implementierung, hohe Flexibilität und Mobilität sehr hoch. Technologielösungen existieren in vielfältigen Ausprägungen und kommen in unterschiedlichsten Anwendungsfällen privater und kommerzieller Domänen zum Einsatz. Die Nutzung einer Funktechnologie hängt von der Verfügbarkeit der limitierenden Ressource des Frequenzspektrums ab. Das Frequenzspektrum unterscheidet weltweit die Nutzung lizenzierter und unlizenzierter Frequenzbereiche, wobei nutzbare Frequenzbänder für den Zeitraum und die geographische Region der Nutzung

international und national reguliert werden. Die internationale Regulierung des Frequenzspektrums liegt in der Verantwortung der International Telecommunication Union (ITU) und koordiniert insbesondere Störungs- und Interferenzvermeidung zwischen Funkdiensten verschiedener Nationen⁴⁰. In Deutschland wird das Frequenzspektrum national durch die Bundesnetzagentur (BNetzA) reguliert und im nationalen Frequenzplan, der für die Frequenzuteilung und Nutzung der Frequenzen rechtlich verbindlich ist, dokumentiert⁴¹. Neben dem Frequenzbereich, den erlaubten Funkdiensten und dem Einsatzzweck (zivil oder militärisch) werden vor allem auch die regulatorischen, technischen und betrieblichen Bestimmungen für die Frequenznutzung abgebildet (vgl. Abschnitt 3.5). Der vorliegende technische Vergleich der Funktechnologien diskutiert hiervon im Wesentlichen die Kernparameter, charakterisiert durch Frequenzbereich, Lizenzbedingungen und technische Bestimmungen, z. B. Kanalbandbreite oder die maximal zulässige äquivalente Strahlungsleistung (EIRP). Jeweils ein Beispiel aus dem Frequenzplan für einen Eintrag aus dem unlicenzierten und lizenzierten Frequenzbereich ist in Tabelle 2-2 bzw. Tabelle 2-3 illustriert.

Tabelle 2-2: Beispieleintrag aus dem Frequenzplan für ein unlicenziertes ISM-Band⁴¹

Frequenznutzungsteilplan	302	Eintrag	302003
Frequenzbereich	2400 - 2450 MHz		
Nutzungsbestimmung(en)	D150 D282 10 26 31		
Funkdienst	-		
Nutzung	Ziv, mil		
Frequenznutzung	26: WLAN		
Frequenzteilbereich(e)	2400 - 2450 MHz		
Frequenznutzungsbedingungen	Breitbandige Datenübertragung Maximal zulässige äquivalente Strahlungsleistung: 100 mW EIRP Der Grenzwert der Strahlungsleistung bezieht sich – unabhängig vom Modulationsverfahren – auf die Summenleistung mit Bezug auf das Frequenzband 2400–2483,5 MHz		

Tabelle 2-3: Beispieleintrag aus dem Frequenzplan für ein lizenziertes Band⁴¹

Frequenznutzungsteilplan	248	Eintrag	248055
Frequenzbereich	440 - 470 MHz		
Nutzungsbestimmung(en)	D209 D286 D287 3 5 20 31		
Funkdienst	MOBILFUNKDIENST D286A		
Nutzung	Ziv		
Frequenznutzung	Betriebsfunk		
Frequenzteilbereich(e)	456,66 - 457,4 MHz		
Frequenznutzungsbedingungen	Übertragung innerbetrieblicher Nachrichten (Sprache und Daten) Maximal zulässige äquivalente Strahlungsleistung: 12 W ERP Kanalbandbreite: 12,5 kHz Kanalraster: 12,5 kHz		

⁴⁰ S. Marcus et al.: Flexibilisierung der Frequenzregulierung, WIK-Consult, Studie für die Bundesnetzagentur, S. 284, 2005.

⁴¹ Bundesnetzagentur: Frequenzplan, 2018.

2.2.1.1 Betrieb in lizenzierten Funkbändern

Die Nutzung von lizenziertem Spektrum geht insbesondere mit dem exklusiven Nutzungsrecht der zugeordneten Frequenzbänder einher und ist oftmals gepaart mit einer höheren Sendeleistung der eingesetzten Funktechnologie⁴². Interferenzen mit anderen Anbietern, Technologien oder Diensten sind grundsätzlich unwahrscheinlich, da eine unkoordinierte Sekundärnutzung rechtlich auszuschließen ist. Diese wirkt sich positiv auf die technische Verfügbarkeit einer Funktechnologie aus und ermöglicht die Umsetzung von sehr hohen Servicequalitäten bzw. Dienstgütegarantien. Abbildung 2-13 illustriert die in Deutschland öffentlich genutzten Mobilfunkfrequenzen für die GSM-, UMTS- und LTE-Technologie, exklusiv vergeben an die drei deutschen Mobilfunkbetreiber Deutsche Telekom, Vodafone und Telefónica. Die Befristung der zuletzt vergebenen Frequenzen reicht zur Zeit bis in das Jahr 2033, z. B. bei Frequenzen bei 700 MHz für die im Rahmen der digitalen Dividende 2 zuletzt freigemachten digitalen terrestrischen Fernsehfrequenzen (Migration zu DVB-T2). Im Gegensatz dazu sind Frequenznutzungsrechte im 2-GHz-Bereich derzeit bis 2020 bzw. 2025 befristet. Die Bundesnetzagentur wird die entsprechenden Frequenznutzungsrechte im Wege einer Versteigerung dem Markt wieder zur Verfügung zu stellen. Die Versteigerung hat im März 2019 begonnen. Aufgrund des sich daraus abzuleitenden kurzen Restlebenszyklus der UMTS-Technologie erfolgt in dieser Studie keine Detailbetrachtung und die Nutzung zur SMGW-Anbindung wird nicht empfohlen. Neben den durch öffentliche Mobilfunknetze exklusiv genutzten Frequenzen wird aufgrund der sehr guten Durchdringungseigenschaften (vgl. Kapitel 2.2) vor allem auch das Spektrum im lizenzierten 450-MHz-Bereich empfohlen.⁴³ „Die gepaarten Frequenzbereiche 450–455,74 MHz und 460–465,74 MHz wurden im Jahr 2004 mit einer Bandbreite von je 1,25 MHz für Zuteilungen von Frequenzen zur Nutzung für weitbandigen Bündelfunk zur Verfügung gestellt“⁴⁴. Ein Mobilfunkanbieter verfolgt für diese Frequenz unter Nutzung der CDMA-450- oder künftig LTE-450-Technologie das Ziel eines dedizierten Mobilfunknetzes für Anwendungen von Betreibern kritischer Infrastrukturen (z. B. im Energiemarkt). Die Laufzeit ist derzeit bis Ende des Jahres 2020 befristet, wobei die Bundesnetzagentur in 2018 eine Frequenzbedarfsabfrage für die zukünftige Nutzung der Frequenzen im Frequenzbereich 450 MHz vorgenommen hat⁴⁵. Diese Abfrage hat kein klares Bild über die künftige Nutzung ergeben. Eine Entscheidung, wie die Frequenzen ab 2021 genutzt werden können, steht noch aus. Im zweiten Teil des Gutachtens werden wir hierauf nochmals ausführlich eingehen. Für die zukünftige 5G-Technologie werden Frequenzen aus dem 3,6-GHz-Band, das ein Pionierband für 5G ist, vergeben⁴⁶.

⁴² C. Lüders und B. Sörries: Eignung von Funktechnologien für die Digitalisierung der Energiewende, 2017.

⁴³ D. Marger, J. Riedl, J. Tusch, C. Wietfeld, I. Wolff, and W. Zeitler: VDE-Positionspapier: Kommunikationsnetz für das Smart Grid, 2015.

⁴⁴ Bundesnetzagentur: Frequenzen im Bereich 450MHz, 2009.

https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/OeffentlicheNetze/RegionaleNetze/Z_FrequenzenBereich450%2%A0MHz.html.

⁴⁵ Bundesnetzagentur: Frequenzbedarfsabfrage für die zukünftige Nutzung der Frequenzen im Frequenzbereich 450MHz, 2017.

⁴⁶ Bundesnetzagentur: Orientierungspunkte zur Bereitstellung von Frequenzen für den Ausbau digitaler Infrastrukturen, 2017.

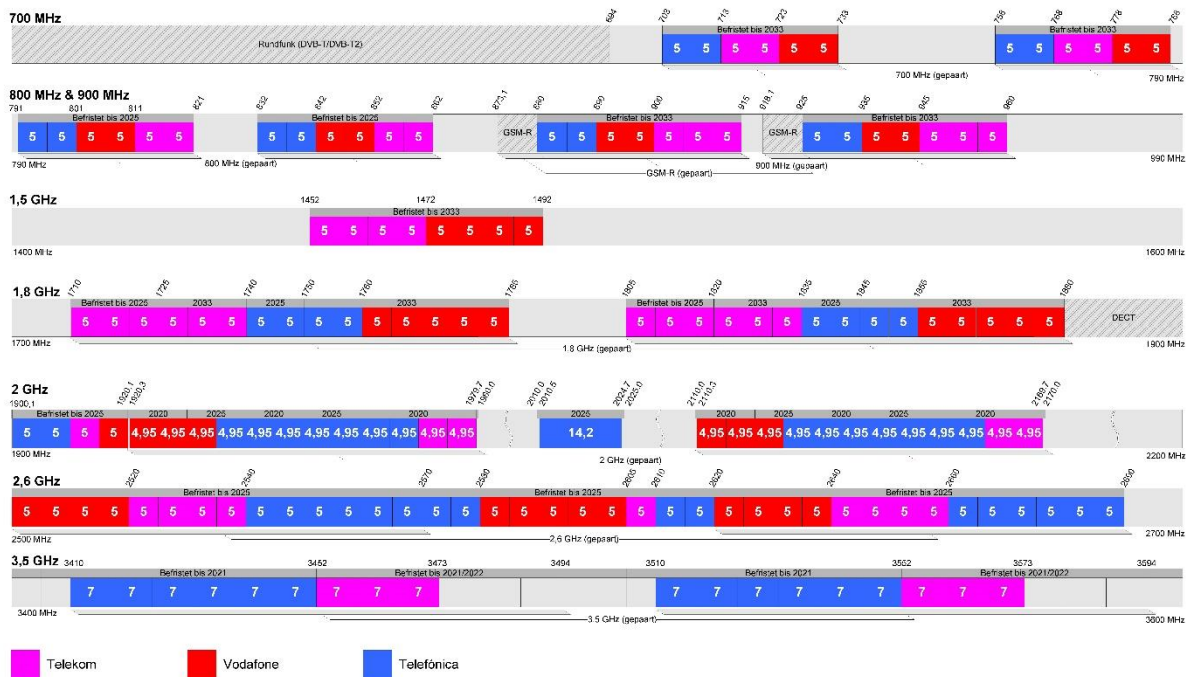


Abbildung 2-13: Lizenziertes Frequenzspektrum im Bereich von 700 bis 3500 MHz⁴⁷

Im Folgenden detailliert und vergleicht die Studie für die SMGW-Anbindung relevante TK-Technologien im lizenzierten Frequenzbereich.

Enhanced Data Rates for GSM Evolution (EGDE)

EDGE ist ein 1999 standardisierter Datendienst der GSM Mobilfunknetze und korreliert entsprechend mit der sehr hohen GSM-Netzverfügbarkeit. Unter der Voraussetzung der GSM-Frequenzen im 900-MHz-Bereich kann eine gute Kellerverfügbarkeit erzielt werden. Bedingt durch die eingeschränkte Leistungsfähigkeit in Abhängigkeit der Systemumgebung ist die Tauglichkeit als SMGW-Zugangsnetztechnologie jedoch nur eingeschränkt gegeben.

Universal Mobile Telecommunications System (UMTS)

Bei UMTS und dessen Erweiterungen High Speed Packet Access (HSPA bzw. HSPA+) handelt es sich um Mobilfunkstandards der dritten Generation (3G). Insbesondere die HSPA- und HSPA+-Erweiterungen ermöglichen hohe Datenübertragungsraten von bis 42,2 MBit/s und würden für den SMGW-Betrieb eine ausreichend hohe Kapazität zur Verfügung stellen. Allerdings wird UMTS in Frequenzbereichen um 1900 und 2100 MHz betrieben, weswegen eine flächendeckende Kellerverfügbarkeit auszuschließen ist bzw. nur unter sehr hohem Aufwand erzielt werden kann. Zudem ist voraussichtlich langfristig mit der UMTS-Netzabschaltung zugunsten leistungsfähiger LTE- oder 5G-Netze zu rechnen⁴⁸.

Long Term Evolution (LTE)

LTE ist ein Mobilfunkstandard der vierten Generation (4G) und ermöglicht einen Betrieb sowohl in sub-GHz als auch in Frequenzbereichen um 1,8 und 2,6 GHz. LTE wird heute von öffentlichen Mobilfunknetzbetreibern angeboten. Wie oben bereits ausgeführt, beabsichtigt ein Marktteilnehmer des Weiteren, LTE

⁴⁷ Bundesnetzagentur: Frequenzplan, 2018.

⁴⁸ U. Mansmann: Die Deutsche Telekom und die UMTS-Abschaltung, in: Heise online, 2017, online verfügbar: <https://www.heise.de/newsticker/meldung/Die-Deutsche-Telekom-und-die-UMTS-Abschaltung-3606384.html>.

im Bereich 450 MHz auszurollen, wobei hier keine Massenmarktanwendungen sondern Anwendungen aus dem Bereich Betriebs- und Bündelfunk in kritischen Infrastrukturen im Fokus stehen.

Unter Voraussetzung der subGHz-Frequenzen kann eine gute Kellerdurchdringung bei gleichzeitig ausreichender Systemperformance erzielt werden.^{49,50} Hierbei kann neben einem gut ausgebautem 800-MHz-LTE-Netz, vereinzelt auch auf 900 MHz zurückgegriffen werden.

Eine breite Verfügbarkeit harter Quality-of-Service-Garantien wird durch die Einführung der fünften Generation Mobilfunk (5G) in Aussicht gestellt, und zielt damit u. a. auch auf Smart-Grid-Anwendungen⁵¹. Eine detaillierte Bewertung dieser neuen Technologie wird in Aktualisierungen dieses Gutachtens behandelt werden. Die Voraussetzung hierfür bilden konkrete Rollout-Szenarien in Deutschland, welche in Abhängigkeit von der entsprechenden Frequenzversteigerung⁵² stehen.

Netzbetreiberpläne bestätigen, dass eine Ausweitung der LTE-Nutzung auf GSM-Frequenzen⁵³ die Nutzung von LTE als potentielle SMGW-Zugangsnetzlösung begünstigen kann. Die örtliche Verfügbarkeit von LTE lässt sich im Normalbetrieb über den Einsatz internationaler, globaler SIM-Karten zusätzlich steigern. Darüber hinaus unterstützt LTE QoS-Mechanismen leider nur für interne Applikationen (z. B. den Sprachdienst VoLTE), sodass kritische Anwendungen derzeit nicht auf eine Priorisierungsfunktion zurückgreifen können.

Enhanced Machine-Type Communications (eMTC)

eMTC ist ein zu LTE ergänzender Standard, der auf Basis bestehender Infrastruktur dazu dient, insbesondere IoT-Anforderungen zu unterstützen. eMTC wird vollständig in bestehenden LTE-Bändern operiert und kann auf die gleiche Kernfunktionalität zurückgreifen. Verschiedene Verbesserungen zur Steigerung der Robustheit (z. B. Mehrfachwiederholungen von Datenpaketen) resultieren in einer deutlich besseren Empfängerempfindlichkeit, die insbesondere gepaart mit den in LTE verfügbaren subGHz-Frequenzen zu einer verbesserten Reichweite bzw. einer sehr guten Kellerdurchdringung führen. Über eine eingeschränkt verfügbare Kanalbandbreite von 1,4 MHz stehen am erweiterten Zellrand effektive Systemdatenraten von nur 3,1 kbit/s im Uplink und 10 kbit/s im Downlink zur Verfügung (bei einem *Maximum Coupling Loss*, MCL⁵⁴ von 154 dB)⁵⁵. Bei geringer Reichweite mit einem MCL von 144 dB lassen sich die Systemdatenraten auf 40 kbit/s bzw. 76 kbit/s in Uplink- und Downlink-Richtung erhöhen. Neben dieser limitierten verfügbaren Systemdatenrate sprechen zwei weitere Gründe gegen die eMTC-Anwendung als SGMW-Zugangsnetzlösung: Bei schlechten Kanaleigenschaften sind durch mehrfache Wiederholungen einzelner Datenpakete Übertragungsverzögerungen von 200 ms und mehr zu erwarten.

⁴⁹ S. Monhof, S. Böcker, J. Tiemann, and C. Wietfeld: Cellular Network Coverage Analysis and Optimization in Challenging Smart Grid Environments, IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids (SmartGridComm), 2018.

⁵⁰ A. Ghosh, R. Ratasuk, B. Mondal, N. Mangalvedhe, and T. Thomas: LTE-Advanced: Next-Generation Wireless Broadband Technology, IEEE Wireless Communications, no. 3, pp. 10–22, 2010.

⁵¹ F. Kurtz, C. Bektas, N. Dorsch, C. Wietfeld: Network Slicing for Critical Communications in Shared 5G Infrastructures - An Empirical Evaluation, In 4th IEEE International Conference on Network Softwarization (NetSoft 2018), Canada, Juni 2018.

⁵² Bundesnetzagentur: Mobiles Breitband - Frequenzen für 5G, 2018, online verfügbar: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/OeffentlicheNetze/Mobilfunknetze/mobilfunknetze-node.html.

⁵³ U. Mansmann: Telekom startet LTE auf 900 MHz, in: Heise Online, 2017, online verfügbar: <https://www.heise.de/newsticker/meldung/Telekom-startet-LTE-auf-900-MHz-3657557.html>

⁵⁴ Die Bedeutung des MCL für eMTC und ähnliche Systeme ist vergleichbar mit dem zuvor diskutierten maximalen Pfadverlust. In der Definition ergeben sich jedoch leichte Unterschiede.

⁵⁵ L. Olof, M. Sundberg, E. Wang, J. Bergmann, und J. Sachs: Cellular Internet of Things, Academic Press, 2018.

Dementsprechend ist eMTC derzeit nur in der Variante mit geringstem zulässigen MCL für einen fallweisen Einsatz als SMGW-Technologie geeignet. Die Voraussetzungen für einen flächendeckenden Einsatz müssen hingegen noch durch empirische Untersuchungen gehärtet werden. Zweitens steht durch die Einführung von NB-IoT eMTC in direkter Konkurrenz mit einer weiteren auf LTE basierenden IoT-Technologielösung (siehe unten). Da in Deutschland in einzelnen öffentlichen Mobilfunknetzen bereits NB-IoT ausgerollt wird, zeichnet sich aus heutiger Sicht ab, dass eMTC in Deutschland vorerst nicht zum Einsatz kommen wird. Allerdings könnte eMTC für private Netze genutzt werden.

Narrowband-IoT (NB-IoT)

NB-IoT ist neben eMTC eine weitere LTE-Lösung speziell standardisiert, um das Anforderungsprofil von IoT-Anwendungen bedienen zu können. Im Gegensatz zu eMTC ist NB-IoT mit einer verfügbaren Kanalbandbreite von 200 kHz noch schmalbandiger und verfügt dadurch über eine gesteigerte spektrale Leistungsdichte, was zu einer noch höheren Reichweite bzw. einem gesteigerten Potential für die Kellerdurchdringung führen kann. Zusätzlich ermöglicht die sehr schmalbandige Kanalbandbreite neben der klassischen LTE-*Inband*-Variante (hierbei werden Anteile des heute bereits genutzten Spektrums verwendet) auch den Betrieb in den Schutzbandern (*Guard Bands*) von LTE. Neben nur sehr geringen verfügbaren Systemdatenraten von 0,6 kbit/s in Downlink und 0,3 kbit/s in Uplink Richtung (für einen MCL von 164 dB) resultieren diese schwierigen Kanalsituationen in potentiell sehr hohen Übertragungsverzögerungen von mehr als 8s (1,1s für 154 dB maximalen Pfadverlust)⁵⁶. Wird hingegen ein geringerer MCL von 144 dB und damit eine geringere Reichweite akzeptiert, verbessern sich – wie auch bei eMTC – die Systemeigenschaften auf Systemdatenraten von 15 kbit/s bzw. 19 kbit/s in Downlink und Uplink bei Übertragungsverzögerungen von 300ms. Damit kann NB-IoT unter Nutzung des geringsten MCL fallweise zum Einsatz kommen, ist jedoch für den flächendeckenden Ausbau nur nach empirischer Evaluierung der spektralen Effizienz im Zellverbund zu berücksichtigen.

CDMA 450

CDMA (Code Division Multiple Access) ist ein weltweiter Standard aus der IMT-Familie, der aufgrund kurzer Latenzzeiten, hoher Bitraten und der Echtzeitfähigkeit für Maschine-zu-Maschine-Kommunikation eingesetzt wird. CDMA in der EVDO-Variante gehört zu den Mobilfunktechnologien der dritten Generation (3G).

CDMA ist eine ausgereifte Technologie. Mobilfunknetze auf Basis der CDMA-Technik bieten im Frequenzbereich bei 450 MHz auf Basis verfügbarer Kanalbandbreiten von 1,4–5 MHz ausreichend Kapazität, um das SMGW-Anforderungsprofil zu erfüllen. Inwieweit Investitionen in CDMA angesichts der Entwicklungen bei LTE bzw. 5G zielführend sind, ist schwer abzuschätzen. Eine Migration von CDMA auf LTE ist aber vergleichsweise einfach. Im Funkzugangnetz reicht ein Software-Update aus. Standorte oder Netzwerkelemente müssen nicht ausgetauscht werden. Änderungen müssen jedoch im Core-Netz (Zentraltechnik) vorgenommen werden⁵⁷.

Eine Nutzung von CDMA im 450-MHz-Band ist aktuell aufgrund der Frequenzuteilungsrechte bis Ende 2020 möglich. Aktuell läuft ein Verfahren zur künftigen Nutzung der Frequenzen, worauf wir im zweiten Teil des Gutachtens eingehen.

⁵⁶ A. Meloni and L. Atzori: The Role of Satellite Communications in the Smart Grid, IEEE Wirel. Commun., vol. 24, no. 2, S. 50–56, 2017.

⁵⁷ <https://www.450connect.de/loesung/>

Satellitentechnik

Satellitenkommunikationssysteme (Satcom) fokussieren zunehmend die Entwicklung von Dienstleistungen für den IoT- bzw. M2M-Markt. In diesem Zuge werden vor allem zwei Satcom-Systeme der GEO- und LEO-Umlaufbahnen im Umfeld intelligenter Energienetze diskutiert⁵⁸: Inmarsat (GEO-stationär) hat auf Basis des Broadband Global Area Network (BGAN) eine M2M-Lösung mit einer maximalen Datenrate von fast 500 kbit/s und Übertragungsverzögerungen von unter 1s eingeführt. Im Gegensatz dazu kann ein LEO-System deutlich geringere Übertragungsverzögerungen zur Verfügung stellen, dabei aber gleichzeitig nur auf geringere Datenraten zurückgreifen. Unabhängig von der Umlaufbahn verfügen alle Satellitensysteme jedoch über mangelhafte Durchdringungseigenschaften, da diese im Regelfall einer Sichtverbindung bedürfen und somit keine Kellerdurchdringung ermöglichen. Damit können Satellitensysteme grundsätzlich im Bereich intelligenter Energienetze, z. B. als Zugangsnetzwerk für einen Datenkonzentrator, zum Einsatz kommen, sind aber als SMGW-Zugangstechnologie im flächendeckenden Einsatz nicht geeignet.

2.2.1.2 Betrieb in unlizenzierteren Funkbändern

Im Bereich der unlicenzierten Frequenzspektren erfolgt die Regulierung auf Basis von Allgemeinverfügungen. Dabei unterscheidet die Frequenzbereichszuweisungsplanverordnung (FreqBZPV) Anwendungen aus dem Bereich der Industrie, Wissenschaft, Medizin (ISM), häusliche oder ähnliche Anwendungen sowie den Kurzstreckenfunk (engl. *Short Range Devices*, SRD). Tabelle 2-1 gibt eine zusammenfassende Übersicht über die relevanten Frequenzteilbereiche der unlicenzierten Frequenzbänder.

Tabelle 2-1: Unlizenzierte Frequenzbereiche in der Übersicht^{59,60}

Frequenzbereich [MHz]	Maximale äquivalente Strahlungsleistung (ERP)	Nutzungsbestimmungen / Störungsminderungsstechniken
433,050–434,790	10 mW	•
863–865	25 mW	• Max. Arbeitszyklus: 0,1 % ⁶¹
863–868	25 mW	<ul style="list-style-type: none"> • Bandbreite <1MHz • Max. Arbeitszyklus: <ul style="list-style-type: none"> • 10 % Netzzugangspunkte • 2,8 % Sonstige
865–868	500 mW	<ul style="list-style-type: none"> • Bandbreite ≤ 200 kHz • Max. Arbeitszyklus: <ul style="list-style-type: none"> • 10 % Netzzugangspunkte

⁵⁸ A. Meloni and L. Atzori: The Role of Satellite Communications in the Smart Grid, IEEE Wirel. Commun., vol. 24, no. 2, S. 50–56, 2017.

⁵⁹ Bundesnetzagentur: Frequenzplan, 2018.

⁶⁰ Bundesnetzagentur: Vfg 45/2016 - Allgemeinzuteilung von Frequenzen im Frequenzbereich 868 – 870 MHz für nichtöffentliche Funkanwendungen für Alarmierungszwecke, 2016.

⁶¹ Voraussetzung: Adaptive Power Control

Frequenzbereich [MHz]	Maximale äquivalente Strahlungsleistung (ERP)	Nutzungsbestimmungen / Störungsminderungs-techniken
		<ul style="list-style-type: none"> • 2,5 % Sonstige • Zusätzlich: APC
868,0–868,6	25 mW	<ul style="list-style-type: none"> • Max. Arbeitszyklus: 1 %
868,7–869,2	25 mW	<ul style="list-style-type: none"> • Max. Arbeitszyklus: 0,1 %
869,3–869,4	10 mW	<ul style="list-style-type: none"> • Kanalbandbreite 25 kHz
869,40–869,65	500 mW	<ul style="list-style-type: none"> • Max. Arbeitszyklus: 10 %
869,7–870,0	5 mW	<ul style="list-style-type: none"> •
	25 mW	<ul style="list-style-type: none"> • max. Arbeitszyklus: 1%
2400–2483,5	10 mW	<ul style="list-style-type: none"> • 100mW EIRP für WLAN
5150–5250	200 mW EIRP	<ul style="list-style-type: none"> • Nutzung ausschließlich innerhalb geschlossener Räume • Max. spektrale Leistungsdichte 10 mW/MHz (EIRP)
5250–5350	200 mW EIRP	<ul style="list-style-type: none"> • Nutzung ausschließlich innerhalb geschlossener Räume • Max. spektrale Leistungsdichte 10 mW/MHz (EIRP) • Leistungsregelung • Minderungs-techniken nach EN 301 893
5470–5725	1 W EIRP	<ul style="list-style-type: none"> • Max. spektrale Leistungsdichte 50 mW/MHz (EIRP) • Leistungsregelung • Minderungs-techniken nach EN 301 893

Alle in diesen Frequenzbereichen angesiedelten TK-Technologien können genehmigungsfrei unter Einhaltung der Frequenznutzungsbestimmungen Anwendung finden. Damit ist eine Störung durch Dritte zu

dulden, wobei die Leistungsfähigkeit und Verfügbarkeit der Technologielösungen im Wesentlichen durch die folgenden Frequenznutzungsparameter gesichert werden soll:

- **Maximale äquivalente isotrope Strahlungsleistung** (*engl. Equivalent Isotropically Radiated Power, EIRP*) drückt die Sendeleistung (P_S) multipliziert mit dem Antennengewinn (G_i) aus.
- $EIRP = P_S \cdot G_i$
- Als Referenz für den Antennengewinn wird bei EIRP der isotrope Kugelstrahler angenommen. Wird anstatt dessen der Halbwellendipol angenommen, spricht man von der maximalen äquivalenten Strahlungsleistung (ERP). Damit unterscheiden sich ERP und EIRP nur in der Bezugspanne.
- $EIRP = ERP \cdot 1,64$
- Die EIRP-Werte variieren in einer großen Spannweite von 10 mW bis 2 W wobei deutlich geringere Sendeleistungen die Regel sind (z. B. 100 mW EIRP bei WLAN im 2,4 GHz Bereich).
- **Relative Frequenzbelegungsdauer (Duty-Cycle)** in % kennzeichnet die maximal zulässige Dauer der Aussendungen auf einer Frequenz bezogen auf eine Stunde. Die Gesamtzeit der Aussendungen kann auf mehrere Intervalle aufgeteilt werden⁶². Bei einem typischen Wert von 1 % ist die maximal zulässige Aussendungsdauer nur 36s innerhalb von einer Stunde. Mit diesem Mechanismus soll eine faire Aufteilung der knappen Funkressourcen zwischen verschiedenen Anwendungen garantiert und gegenseitige Störungen weitgehend reduziert werden. Allerdings reduziert der Duty-Cycle damit gleichzeitig die Höhe der zu übertragenden Datenraten in Abhängigkeit der zur Verfügung stehenden Datenraten.
- **Zusätzliche Frequenzzugangs- und Störminderungstechniken** werden als Alternative zum Duty Cycle definiert. Für das 2,4-GHz-ISM-Frequenzband wird z. B. die Implementierung eines sogenannten *Listen Before Talk* (LBT)-Verfahrens vorgeschrieben, bei dem der Kommunikationsknoten vor dem Sendewunsch die Belegung des Frequenzbandes prüft oder ein selektives Frequenzsprungverfahren (*engl. Adaptive Frequency Hopping, AFH*) einleitet.⁶³ Derartige Verfahren unterliegen zwar nicht einer maximalen Frequenzbelegungsdauer, reduzieren aber die verfügbare Datenrate und erhöhen gleichermaßen die Übertragungsverzögerung für eine steigende Anzahl paralleler Kommunikationsverbindungen⁶⁴.

Im Folgenden detailliert die Studie die für die SGMW-Anbindung am häufigsten diskutierten Technologielösungen in unlizenzierten Frequenzbändern und begründet am Beispiel der jeweiligen Technologie, warum die Eignung als Zugangslösung für SMGW-Netze ausgeschlossen wird.

Wireless-Local-Area-Networks (WLAN)

⁶² Bundesnetzagentur: Vfg 45/2016 - Allgemeinzuteilung von Frequenzen im Frequenzbereich 868 – 870 MHz für nichtöffentliche Funkanwendungen für Alarmierungszwecke, 2016.

⁶³ European Telecommunications Standards Institute (ETSI): Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Wideband transmission systems; Data transmission equipment operating in the 2,4 GHz ISM band and using wide band modulation techniques; Harmonized EN covering the essential, EN 300 328 - V1.9.1, 2015.

⁶⁴ V. Jones and H. Sampath: Emerging Technologies for WLAN, no. 53(3), March 2015, S. 141–149, 2015.

WLAN bezeichnet drahtlose, lokale Funknetze der IEEE-802.11-Familie. Als wichtigste Vertreter werden in dieser Studie die Standards IEEE 802.11 n/ac⁶⁵ sowie IEEE 802.11ah⁶⁶ diskutiert. Der **IEEE-802.11n**-WLAN-Standard wird im 2,4 und 5 GHz unlizenziierten Frequenzband betrieben. Praktische Untersuchungen haben aber gezeigt, dass unter der Berücksichtigung einer limitierten Anzahl konkurrierender Netzknoten eine Systemdatenrate von ca. 45 MBit/s erzielt werden kann. Bedingt durch die technischen Frequenzeigenschaften des ISM-Bandes, gepaart mit einer geringen Empfängerempfindlichkeit, ist die maximale Reichweite jedoch auf ca. 200 m beschränkt und eine Kellererreichbarkeit gar nicht oder nur mit sehr hohem Aufwand realisierbar. Für den **IEEE-802.11ac**-Standard, betrieben im 5-GHz-ISM-Band, zeigen sich ähnliche Charakteristika mit höheren, verfügbaren Systemdatenraten bei jedoch geringeren Reichweiten im Vergleich zum IEEE-802.11n-Standard. Bedingt durch die vorliegenden schlechten Ausbreitungseigenschaften können sowohl der IEEE-802.11n- als auch der IEEE-802.11ac-Standard das SMGW-Anforderungsprofil nicht erfüllen.

Mit dem **IEEE-802.11ah**-Standard wird eine speziell auf IoT-Anforderungen ausgelegte WLAN-Version vorgeschlagen. Die geringere Betriebsfrequenz im 868-MHz-SRD-Band unterstützt deutlich bessere Ausbreitungseigenschaften im Vergleich zum 2,4- und 5-GHz-ISM Band bei gleichzeitig kontinuierlich ausreichend hohen typischen Systemdatenraten. Jedoch kann, bedingt durch die Implementierung im unlizenziierten, global geteilten SRD-Band, die Stör- und Interferenzsituation nicht gesteuert werden. Untersuchungen haben gezeigt, dass in hohen Lastsituationen (>2000 Teilnehmer), bedingt durch das zugrundeliegende Kanalzugriffsverfahren CSMA/CA, eine Übertragungsverzögerung von bis zu 1,5s zu erwarten ist, sodass auch die IEEE-802.11ah-Variante der WLAN-Familie nicht als taugliche Technologie für die SMGW-Zugangsnetzanbindung eingeschätzt wird.

LoRaWAN

LoRaWAN⁶⁷ ist eine von der LoRa-Alliance festgelegte Spezifikation der Low-Power-WAN (LPWAN)-Netzwerkprotokollfamilie. Die Spezifikation ist frei verfügbar und basiert auf der von Semtech spezifizierten LoRa-Modulation. LoRaWAN nutzt hauptsächlich das in Europa verfügbare SRD Band um 868 MHz, kann aber auch im ISM-Band bei 433 MHz betrieben werden. In Abhängigkeit der Umgebung können hohe Reichweiten von bis zu 11 km und eine gute Kellerdurchdringung erzielt werden. Die typischen Systemdatenraten variieren in Abhängigkeit der Systemparameter ohne die Berücksichtigung von Gleichkanalstörern von 0,25 bis 11 kbit/s⁶⁸, was mit einer Übertragungsverzögerung von mehr als 1s einhergeht. Unter Berücksichtigung der regulatorischen Duty-Cycle-Beschränkung von 1 % (LoRaWAN-Uplink) reduzieren sich, bedingt durch die vielfache Inaktivitätszeit (Time-Off) im Verhältnis zur Übertragungszeit pro Paket (Time-on-Air), die genannten Peakdatenraten auf einen deutlich geringen mittleren Durchsatz von 1,5 bis 97 bit/s⁶⁹. Für Datenübertragungen mit großen Datenmengen (z. B. FNN WAF 1.5-1/2, Firmware-Upgrade/-Update) geht dies mit einer nicht tolerierbaren Gesamtverzögerung einher. In Bezug auf das SMGW-Anforderungsprofil kann die LoRaWAN-Spezifikation also keine ausreichende Verbindungsqualität gewährleisten. SMGW-Netze, bei denen Sicherheit und Kontrolle im Vor-

⁶⁵ Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE): Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications IEEE Computer Society, IEEE Std 802.11-2007, 2007.

⁶⁶ Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE): IEEE Standard for Information technology — Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks — Specific requirements Part 11: Sub 1 GHz, 2016.

⁶⁷ LoRaTM Alliance: LoRaWAN TM Specification, S. 1–91, 2016.

⁶⁸ L. Feltrin, C. Buratti, E. Vinciarelli, R. De Bonis, and R. Verdone: LoRaWAN: Evaluation of Link- and System-Level Performance, IEEE Internet Things J., vol. 5, no. 3, S. 2249–2258, 2018.

⁶⁹ K. Mikhaylov, J. Petäjärvi und T. Hänninen: Analysis of Capacity and Scalability of the LoRa Low Power Wide Area Network Technology, European Wireless, S. 119–124, 2016.

dergrund stehen, könnten auf Basis der LoRa-Technologie die hier zugrunde gelegten Anforderungen nicht erfüllen.

SigFox

Sigfox ist ein französisches Telekommunikationsunternehmen, das die gleichnamige Mobilfunktechnologie bei 868 MHz betreibt. SigFox wird zur LPWAN-Familie gezählt, kann aber im Gegensatz zu LoRa-WAN nicht dediziert betrieben werden. Die Ausbreitungseigenschaften sind vergleichbar gut zu denen der LoRaWAN-Technologie, wobei die verfügbare Systemdatenrate die obere Grenze von 100 bit/s⁷⁰ nicht überschreitet. Gepaart mit einer Übertragungsverzögerung von bis zu 6s⁷¹ und einer maximalen Anzahl von 140 Nachrichten pro Tag kann SigFox keine ausreichenden Qualitätsgarantien als Zugangstechnologie für SMGWs bieten und damit das Anforderungsprofil nicht erfüllen.

Zusammenfassend kann keine der diskutierten Technologien im unlicenzierten Frequenzband vollständig das SMGW-Anforderungsprofil erfüllen.

Bedingt durch hohe und vor allem nicht aktiv durch den Betreiber beherrschbare Stör- und Interferenzpotentiale bei einer intensiven Nutzung der unlicenzierten Bänder ist die Verfügbarkeit und eine ausreichende, kontrollierbare Leistungsfähigkeit in Abhängigkeit einer nicht exklusiven Nutzung des unlicenzierten Frequenzbandes nicht gegeben. Die technischen Frequenznutzungsparameter können den Zugriff nur in eingeschränktem Maße regulieren, weswegen Technologielösungen in unlicenzierten Frequenzbändern nicht in der Lage sind, die für eine breite Einführung von SMGWs notwendige Leistungsfähigkeit, Verfügbarkeit und Dienstgütegarantien umzusetzen. Abschließend sei darauf hingewiesen, dass die Bundesnetzagentur in der Allgemeinzuteilung für SRD-Systeme explizit vermerkt: „*Die Bundesnetzagentur übernimmt keine Gewähr für eine Mindestqualität oder Störungsfreiheit des Funkverkehrs. Es besteht kein Schutz vor Beeinträchtigungen durch andere bestimmungsgemäße Frequenznutzungen. Insbesondere sind bei gemeinschaftlicher Frequenznutzung gegenseitige Beeinträchtigungen nicht auszuschließen und hinzunehmen.*“⁷²

2.2.2 Power-Line-Communications

Power-Line-Communications (PLC) bezeichnet eine Datenübertragungstechnik, die als Übertragungsmedium das vorhandene Stromnetz nutzt. Grundsätzlich lassen sich PLC-Systeme in zwei Kategorien aufteilen, schmalbandige (engl. *Narrowband PLC*, NB-PLC) und breitbandige (engl. *Broadband PLC*, BB-PLC) Systeme. Die genannten Powerline-Systeme setzen auf unterschiedlichen technologischen Realisierungen auf und stehen somit in unmittelbarer Konkurrenz zueinander.

Narrowband-PLC (NB-PLC)

Die schmalbandige Power-Line-Lösung des Standards G3 PLC operiert im Frequenzbereich von 3 bis 500 kHz. Die guten Ausbreitungseigenschaften im kHz-Bereich resultieren in effektiven Reichweiten von bis zu max. 8 km bei üblichen Systemdatenraten von 40 kbit/s. In vergleichenden Untersuchungen hat

⁷⁰ G. A. Akpakwu, B. J. Silva, G. P. Hancke, and A. M. Abu-Mahfouz: A Survey on 5G Networks for the Internet of Things: Communication Technologies and Challenges, IEEE Access, vol. 6, no. c, S. 3619–3647, 2017.

⁷¹ SigFox Q&A: <https://ask.sigfox.com/questions/1213/time-between-message-sent-and-message-recvied-at.html>

⁷²

https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/Allgemeinzuteilungen/2018_05_SRD_pdf.pdf;jsessionid=DBE6541C86C153EB7AD3B6B32B535460?__blob=publicationFile&v=2.

sich jedoch ein sehr divergierendes Bild mit Reichweiten von nur 200m gezeigt.⁷³ Vergleichbare Unsicherheiten ergeben sich auch bei der Untersuchung typischer Übertragungsverzögerungen, wobei sich der Mittelwert verschiedener Messungen bei ca. 450 ms ansiedelt, aber auch einzelne Ausreißer mit bis zu 1,2s Übertragungsverzögerung verzeichnet wurden⁷⁴.

Broadband-PLC (BB-PLC)

Im Gegensatz zur schmalbandigen PLC-Variante operieren die BB-PLC-Lösungen im unteren MHz-Bereich bis 30 MHz. Für das Energienetz ausgelegte Varianten konnten in breiten Feldversuchen auf Basis des IEEE-1901-Standards effektive Systemdatenraten von 7,8 Mbit/s im Downlink bzw. 7 Mbit/s im Uplink (107 BB-PLC Modems zzgl. 4 Headends und 25 Repeater)⁷⁵ erzielen. Auf Basis des vergleichbaren, aber etwas robusteren ITU-G.hn-BB-PLC-Standards können stabile Reichweiten bis zu 400m⁷⁶ erzielt werden, wobei vereinzelt in Abhängigkeit des Übertragungskanals auch Reichweiten bis zu 1500m (IEEE 1901) umgesetzt werden können.

Beide PLC Technologien bieten grundsätzlich Potential für die Anbindung von SMGWs und zeigen vor allem den großen Vorteil der Erreichbarkeit der SMGWs auch in schwer zugänglichen Kellerstandorten. Allerdings kann die schmalbandige NB-PLC-Technologie in Laboruntersuchungen zwar noch mit stabilen Ergebnissen überzeugen, offenbart in unterschiedlichen Feldversuchen jedoch eine große Instabilität, sodass das SMGW-Anforderungsprofil nicht in jedem Fall gesichert erfüllt werden kann. Dies begründet sich bei großen Distanzen vor allem in der schwierig prognostizierbaren Wechselwirkung mit dem Energienetz, gepaart mit der größeren Wahrscheinlichkeit paralleler, in der PLC Technologie implementierter, zufallsgesteuerter Kanalzugriffe⁷⁷. Im Markt sind aktuell keine Anstrengungen mehr sichtbar, die Anbindung von SMGWs mit NB-PLC zu realisieren.

Im Gegensatz dazu kann BB-PLC auch in Feldversuchen für kürzere Distanzen mit einer stabilen Datenrate alle Anforderungen an das SMGW-Anforderungsprofil erfüllen. Dies spiegelt sich auch in einer Empfehlung des VDE wider, der die Nutzung von BB-PLC-Systemen insbesondere in Niederspannungsverteilnetzen als eine geeignete Zugangstechnologie ansieht⁷⁸. Die Erfahrungen mit BB-PLC sind jedoch nicht einheitlich. Die Expertengespräche haben ergeben, dass, während sich eine Reihe von Verteilernetzbetreibern nach Pilotversuchen für alternative Kommunikationstechnologien entschieden haben, auch von Pilotinstallationen berichtet wird, die die Erwartungen erfüllt haben. Die hier eingesetzte Technik wird jedoch nur von zwei Unternehmen unterstützt, sodass ein funktionsfähiges Ecosystem, das für einen langfristigen Massenrollout förderlich wäre, noch nicht gegeben ist.

Bei der Ausbringung der vermascht betriebenen BB-PLC-Variante ist jedoch zu beachten, dass die Wirtschaftlichkeit erst ab einer Durchdringung von etwa 10 % erzielt werden kann. Bedingt durch die Notwendigkeit einer ausreichenden Anzahl an Relystationen bei gleichzeitig beschränkter Reichweite

⁷³ K. Sharma and L. M. Saini: Power-line communications for smart grid: Progress, challenges, opportunities and status, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 67, S. 704–751, 2017.

⁷⁴ M. Himmels (devolo AG): dLAN Real World Field Test Results, 2011.

⁷⁵ PPC AG: BPL stellt WAN-Tauglichkeit erneut unter Beweis, 2018, online verfügbar: <https://www.energiefachmagazin.de/2018/Ausgabe-1-2/Special-E-world-energy-water/BPL-stellt-WAN-Tauglichkeit-erneut-unter-Beweis>.

⁷⁶ devolo AG: Fünf Gründe für Breitband-Powerline im intelligenten Messsystem, 2018. online verfügbar: <https://www.devolo.com/products/Smart/devolo-BPL-Headend-and-Repeater/data/Produktinformation-devolo-BPL-Headend-and-Repeater-de.pdf>.

⁷⁷ G. Offner (devolo AG): Smarte Lösung für die letzte Meile, in: *BWK - Das Energie-Fachmagazin*, Nr. 03, S. 5–8, 2018.

⁷⁸ PPC AG: Eine Generation weiter, Das bewährte G4 Breitband-Powerline-System, 2017, online verfügbar: <https://www.ppc-ag.de/wp-content/uploads/2017/08/PPC-Flyer-BPL-PPC-17-2057-5D.pdf>.

empfiehlt sich also der BB-PLC-Rollout vor allem in Szenarien mit einer Mindestdurchdringung von 10 %. Hierbei bietet eine vollvermaschte Netzwerkstruktur Vorteile in Bezug auf die Ausfallsicherheit, sodass im Falle von kurzzeitigen Störungen einzelner Kommunikationsverbindungen automatisiert andere Verbindungen genutzt werden können. Aufgrund der zuvor benannten Reichweitenbeschränkungen und der notwendigen Mindestdurchdringung ist für den Roll-out eine differenzierte Netzplanung notwendig. Erst nach Erreichen bestimmter Schwellwerte ist die Ausstattung eines Netzabschnitts mit BB-PLC sinnvoll. Deshalb ist immer noch eine zweite Technologieoption (typischerweise Mobilfunk) notwendig, die für Regionen zum Einsatz kommt, in denen nur vereinzelt SMGWs angebunden werden müssen (z. B. gilt dies vor allem für Regionen mit geringer SMGW-Durchdringung).

PLC-Netzelemente sind aktive Komponenten, die einer Stromversorgung bedürfen. Eine Ausfallsicherheit ist dann gegeben, wenn Batterien zum Einsatz kommen. PLC-Geräte benötigen im Vergleich zu optischen Übertragungstechniken leistungsfähigere Batterien. Zudem ist der Anteil der aktiven Komponenten im Vergleich zu funkbasierten Lösungen deutlich höher, sodass die Absicherung und der Betrieb aufwendiger ausfallen.

Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass die PLC-Technik vor allem im Zugangsbereich zwischen SMGWs und den Unterstationen des Energienetzes eingesetzt wird. Da die Unterstationen oft noch nicht an TK-Infrastrukturen angebunden sind, wird hier auf Mobilfunktechnik oder andere öffentliche Netze zurückgegriffen. Die Unterstation überträgt dann den über alle SMGWs aggregierten Kommunikationsverkehr. Typischerweise ist es aber an Unterstationen möglich, günstige Antennenstandorte zu wählen, sodass die Anforderungen an das Mobilfunknetz geringer sind als für den Fall, dass Mobilfunkabdeckung auch in Kellern angestrebt wird. Gleichzeitig sind weniger SIM-Karten bzw. Mobilfunkverträge notwendig.

Im Markt werden auch SMGWs angeboten, die sowohl PLC- als auch LTE-Mobilfunk unterstützen. Hierbei ist die Überlegung, auf der Basis eines PLC-Netzes als Standardoption immer dann auf Mobilfunkbasierte Anbindung auszuweichen, wenn die Dichte der PLC-Installation noch nicht ausreicht, oder die Abstände zwischen den PLC-Modems zu groß sind oder lokal begrenzte Wechselwirkungen mit dem Energienetz den zuverlässigen Betrieb mit PLC nicht ermöglichen.⁷⁹

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die BB-PLC-Technik im Rahmen eines Technologiemixes zum Einsatz kommen kann. Hierbei müssen jedoch betreiberspezifische Chancen und Risiken eines Betriebs abgewogen werden, da aufgrund der zuvor beleuchteten Anforderungen an die Netzplanung eines PLC-Netzes noch immer mindestens eine weitere TK-Infrastrukturtechnologie zum Einsatz kommen muss.

2.2.3 Drahtgebundene Techniken

Eine weitere Alternative zur Realisierung einer SMGW-Zugangsnetzlösung sind drahtgebundene Techniken. Hierbei werden im Wesentlichen drei verschiedene Technologielösungen unterschieden:

Digital Subscriber Line (xDSL)

Die über Kupferdrahtverbindungen realisierte Technik des betrachteten VDSL-Standards kann auch in dichten Netzsträngen eine hohe Systemdatenrate von 25 Mbit/s bei gleichzeitig sehr geringer Übertra-

⁷⁹ Telefónica: Kampf den blinden Flecken in der Netzabdeckung, 2018, online verfügbar: <https://www.energiefachmagazin.de/2018/Ausgabe-03/Special-Smart-Metering/Kampf-den-blinden-Flecken-in-der-Netzabdeckung>.

gungsverzögerung zur Verfügung stellen⁸⁰. Reichweiten von bis zu 1km ermöglichen die Anbindung abseits gelegener Standorte.

Koaxial-Kabel (engl. *Cable TV*, CATV)

Der über TV-Kabelnetze realisierte DOCSIS-Standard weist im Vergleich zu xDSL-Lösungen mit einer Systemdatenrate von 12 MBit/s und Reichweiten im km-Bereich ähnlich gute Leistungseigenschaften auf und kann entsprechend als Alternative zu xDSL zum Einsatz gebracht werden.

Fibre-To-The-Home (FTTH) / Fibre-To-The-Building (FTTB)

Die über Glasfaserverbindungen (Lichtwellenleiter) bis in den Haushalt (FFTH) oder die Gebäudeinfrastruktur (FTTB) unterstützte Breitbandtechnik auf Basis des GPON Standards gilt aufgrund der sehr großen verfügbaren Systemdatenraten von mehr als 150 Mbit/s als eine der zukunftssichersten Zugangslösungen. Jedoch ist bedingt durch den in Deutschland derzeit sehr geringen Ausbaugrad von unter 10 % (vgl. Tabelle 2-4) eine flächendeckende Abdeckung aufgrund teurer Tiefbauarbeiten auszuschließen.

Tabelle 2-4: Verfügbarkeit von leitungsgebundenen Breitbandtechnologien für Haushalte in Deutschland nach Bundesland in % (Stand Ende 2017, Statista⁸¹)

Bundesland	Verfügbarkeit in %		
	DSL	FTTH/B	CATV
Baden-Württemberg	97.5	1.9	67
Bayern	98.1	10.6	61.8
Berlin	99.9	0.9	89.3
Brandenburg	96.1	4.5	41.9
Bremen	99.8	0	92.6
Hamburg	99.9	70.9	87.3
Hessen	97.8	7.1	62.4
Mecklenburg-Vorpommern	91.9	3.5	51.4
Niedersachsen	96.8	4.9	63.7
Nordrhein-Westfalen	98.8	8.2	70.4
Rheinland-Pfalz	95.7	2.4	58.7
Saarland	97.9	2.5	63
Sachsen	92.6	7.9	49.1
Sachsen-Anhalt	92.2	5.4	36.8
Schleswig-Holstein	95.6	20.1	67.4
Thüringen	96	0.9	41.9
Durchschnitt	96,7	9,5	62,8

Grundsätzlich zeichnen sich alle diskutierten drahtgebundenen Technologien durch eine hohe verfügbare Kapazität aus und würden sich in Bezug auf dieses Kriterium grundsätzlich als SMGW-Zugangstechnologie anbieten. Problematisch ist jedoch, dass die primär privat genutzten Anschlüsse

⁸⁰ NGA-Forum AG Interoperabilität: Grundsatzdokument Technische und operationelle Aspekte des Zugangs zu Glasfasernetzen und anderen NGA-Netzen, 2011.

⁸¹ <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/442057/umfrage/verfuegbarkeit-von-verschiedenen-breitbandtechnologien-nach-bundesland/>.

zwar bis in den Haushalt bzw. das Gebäude verfügbar sind, aber keine direkte SMGW-Anbindung zur Verfügung steht. Da das BSI für die Anbindung der SMGW eine hohe Verfügbarkeit voraussetzt („Die Verfügbarkeit der Anbindung MUSS gewährleistet sein, wenn und solange sie benötigt wird“⁸²), wird für die folgende Diskussion der Eignung drahtgebundener Technologien vorausgesetzt, dass eine dedizierte, vom Einfluss des Endkunden unabhängige SMGW-Anbindung ermöglicht wird. Dazu können SMGWs mit dedizierten Leitungen oder geeigneten Softwarelösungen (z. B. Network-Slicing) technisch so ausgerüstet werden, dass die Dienste intelligenter Netze unabhängig von anderen Internetdiensten des Haushalts betrieben sowie absolute Bandbreitengarantien umgesetzt werden können. In diesem Fall könnte allein auf Basis der DSL-Technologie eine Verfügbarkeit von mehr als 95 % gewährleistet werden (vgl. Tabelle 2-4).

2.2.4 Zusammenfassung der Bewertung in der Übersicht

Die in Tabelle 2-6 und Tabelle 2-7 illustrierte Übersicht über alle betrachteten Technologien liefert ein vergleichendes Gesamtbild der Technologie-Leistungsfähigkeit in Bezug auf das in Kapitel 2.1 definierte Anforderungsprofil. Die Bewertung der technischen Basisparameter (vgl. Tabelle 2-5) erfolgt quantitativ, während die Bewertung der erweiterten Systemparameter (vgl. Tabelle 2-6) qualitativ unter Einbeziehung von Quellen und Erfahrungen aus Diskussionen mit Stakeholdern vorgenommen wurde. Hierbei können alle Technologien, die für die Basisparameter (vgl. Tabelle 2-5) eine positive Bewertung („++“, „+“) erzielen, das SMGW-Anforderungsprofil vollständig erfüllen. Im Folgenden wird die Eignung einzelner Technologien bzw. Technologiegruppen zusammenfassend diskutiert.

Tabelle 2-5: Bewertung der Basisparameter potentieller SMGW-Zugangstechnologien in der Übersicht

Anforderungsparameter	EDGE	UMTS/HSPA	LTE		eMTC	NB-IoT	CDMA 450	Satellit	WLAN-IEEE-802.11n	WLAN-IoT-IEEE-802.11ah	LoRaWAN	SigFox	BB-PLC	NB-PLC	xDSL	Koaxial	FTTH	
			450 Mhz	subGHz ⁸³														
Basisparameter	Deep-Indoor-Abdeckung	+	-	++	+	++	++	++	-	-	o	++	++	++	++	++	++	++
	Reichweite	+	+	++	+	++	++	++	++	-	+	++	++	+	++	++	++	++
	Systemdatenrate Downlink	o	+	++	++	o	o	+	o	++	o	-	-	+	o	++	++	++
	Systemdatenrate Uplink	o	+	++	++	o	o	o	o	++	o	-	-	+	o	++	+	++
	Übertragungsverzögerung	o	o	+	+	o	-	o	-	+	o	-	-	+	o	++	+	++

⁸² Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik: Technische Richtlinie BSI TR-03109-6: Smart Meter Gateway Administration, S. 1–107, hier S. 61, 2015.

⁸³ Öffentliche Mobilfunknetze unterstützen sowohl subGHz, als auch höher liegende Frequenzbereiche. Hinsichtlich der Erfüllung der SMGW-Abdeckungsziele sind im Wesentlichen die subGHz-Frequenzen (ohne 450 MHz) von besonderem Interesse.

Leitungsgebundene Techniken wie DSL und Breitbandkabel können grundsätzlich ausreichende Kapazitäten bieten; jedoch müssten diese technisch so aufgerüstet werden, dass die Dienste intelligenter Netze unabhängig von anderen Internetdiensten des Haushalts betrieben sowie absolute Bandbreitengarantien umgesetzt werden können, d. h. die Übertragung der Daten muss unabhängig vom Router des Endkunden sein. Wird der Router des Endkunden genutzt, entstehen erhebliche operative Kosten (z. B. beim Mieterwechsel, Defekt des Routers). Grundsätzlich wäre zwar ein Ressourcenmanagement mit einer Bandbreitengarantie technisch möglich (analog zum unten angesprochenen 5G-Network-Slicing), jedoch sind die weiteren Rahmenbedingungen komplexer als bei Funksystemen (z. B. Besitzverhältnisse des Hausanschlusses, der bei bestehenden leitungsgebundenen Anschlüssen mitgenutzt werden würde). Eine direkte Anbindung des SMGW beispielsweise bei DSL wäre theoretisch denkbar, wenn noch Kupferleitungen dafür im Gebäude zur Verfügung stünden. Jedoch kann hier keine Aussage dahingehend getroffen werden, ob diese Kupferleitungen überhaupt bis zur nächsten Vermittlungsstelle durchgezogen sind. Wäre dies der Fall, könnte ein Unternehmen sich am nächsten Hauptverteiler anschließen. Damit sind jedoch erhebliche Investitionen in eine eigene Telekommunikationsinfrastruktur verbunden, wobei vorab gar nicht transparent wäre, ob diese technische Lösung überhaupt bei allen anzuschließenden SMGWs verfügbar wäre. Im Ergebnis scheidet diese Möglichkeit des Anschlusses von SMGWs praktisch aus. Beim Breitbandkabel besteht diese theoretische Möglichkeit überhaupt nicht. Vorleistungsprodukte sind im Markt nicht verfügbar; sie werden nicht angeboten.

Eine **glasfaserbasierte Netzinfrastruktur** erfüllt alle heute bekannten Anforderungen und bietet erhebliche Kapazitätsreserven. Da die Infrastruktur für Intelligente Netze aufgrund der Verfügbarkeitsvorgaben des BSI separat zur Telekommunikationsinfrastruktur für konsumentenorientierte Internetdienste ausgeführt werden sollte, wird empfohlen, beim aktuell stattfindenden Glasfaserausbau idealerweise zusätzliche Fasern zu verlegen, die einem späteren Ausbau eines Intelligenzen Energienetzes dienen können. Dies gilt speziell dann, wenn der potentielle Betriebsort des SMGWs im funktechnisch schwer zugänglichen Keller liegt. Hierbei sei jedoch angemerkt, dass es im Markt keine einheitlichen Sichtweisen beispielsweise über die Anzahl von Fasern gibt. Aktuell wird im eigenwirtschaftlichen Ausbau in der Regel so gebaut, dass eine direkte Anbindung des SMGWs ausscheidet. Der Aufwand, mehrere Fasern zu verlegen beträgt nach Expertenschätzungen ca. 30 %. Hierbei ist dann fraglich, ob allein die SMGW-Anbindung einen derartigen Mehraufwand betriebswirtschaftlich rechtfertigt. Sofern nur eine Faser zum Einsatz kommt, muss in diesen Fällen eine weitere Inhouse-Kommunikationslösung eingesetzt werden, die jedoch unabhängig vom Endkundenequipment realisiert werden kann.

Tabelle 2-6: Bewertung erweiterter Systemparameter potentieller SMGW-Zugangstechnologien in der Übersicht

Anforderungsparameter	EDGE	UMTS/HSPA	LTE		eMTC	NB-IoT	CDMA 450	Satellit	WLAN-IEEE-802.11n	WLAN-IoT-IEEE-802.11ah	LoRaWAN	SigFox	BB-PLC	NB-PLC	xDSL	Koaxial	FTTH	
			450 MHz	subGHZ														
Erweiterte Systemparameter	Redundante Topologie	+	+	o	+	+	+	o	o	o	o	o	o	o	-	-	-	
	(Schwarzfallfestigkeit) ⁸⁴	-	-	+	-	-	-	+	++	-	o	+	+	-	o	-	-	
	Differenzierte Priorisierung von Daten-diensten	o	o	+	+	+	+	+	o	o	o	--	--	+	o	+	+	+
	Exklusive Ressourcen ohne Wechselwirkung mit Dritten	o	o	o	o	o	o	o	o	-	-	-	-	o	o	+	+	+
	Schutz gegenüber Angriffen	+	+	+	+	+	+	o	o	+	o	-	o	+	o	+	+	+
	Langfristige Verfügbarkeit	o	-	++	++	-	++	-	+	++	-	+	o	+	-	+	++	++
	Kosteneffizienz bei Aufbau und Betrieb	+	-	+	+	+	+	o	--	+	+	+	++	o	o	o	o	-

Funksysteme in lizenzierten Funkspektren können die Anforderungen weitestgehend erfüllen, auch wenn ein gewisser Anteil von Installationsorten von SMGWs entweder durch einen Ausbau der Funknetze (Verdichtung) erreichbar gemacht wird oder zusätzliche Maßnahmen (z. B. nach außen geführte Antennen für besonders stark dämpfende Kellerräume) ergriffen werden. Der Lebenszyklus der heute im Einsatz befindlichen LTE-Technik wird durch die aktuell in 3GPP laufende, internationale Standardisierung von 5G-Netzen abgesichert. LTE-basierte Netze werden mit der Verfügbarkeit von Network-Slicing zukünftig um Funktionen erweitert, die insbesondere auf die Bedürfnisse der Intelligenten Netze zugeschnitten sind. Andere Mobilfunktechniken (CDMA) erscheinen als TK-Infrastruktur für SMGWs angesichts ihres Lebenszyklus nur als Brückentechniken für den beschränkten Einsatz bei geringen Mengen oder speziellen Szenarien (z. B. abgesetzte Betriebe im ländlichen Raum) geeignet. Angesichts der durch das Eichrecht begrenzten Lebensdauer von SMGWs lässt sich ein schrittweiser Austausch realisieren.

Für den Betrieb von Funksystemen für intelligente Netze müssen ausreichende Kapazitäten in Form von **Funkspektren** zur Verfügung stehen. Neben der funktechnischen Abdeckung, die die generelle Erreichbarkeit absichert, spielt die Verfügbarkeit einer ausreichenden Verkehrskapazität eine erhebliche Rolle, da die in Funknetzen zur Verfügung stehenden Ressourcen nur jeweils anteilig für SMGWs genutzt werden können.

⁸⁴ Die Bewertung bezieht sich darauf, wie viele aktive Komponenten schwarzfallfähig gemacht werden müssen.

Die Anforderungen an hochverfügbare Kommunikationsdienste sind unvereinbar mit einer alleinigen Abstützung auf allgemein nutzbare, **unlizenzierte Funkbänder**, da hier konkurrierender Verkehr anderer Nutzer zu einer unvorhersehbaren Überlast führen kann, selbst wenn sich alle beteiligten Stationen an die Nutzungsbedingungen halten. Diese Funkssysteme sind daher nur für nicht priorisierte Dienste in Kombination mit anderen Funksystemen geeignet.

Die Umsetzung von intelligenten Messsystemen mittels öffentlicher LTE-Netze erscheint als Ergebnis dieser ersten, vergleichenden Betrachtungen grundsätzlich möglich, wird jedoch im Rahmen der Engpassanalyse (vgl. Kapitel 2.4) detaillierter betrachtet. Gleiches gilt für CDMA bzw. für den Einsatz von LTE im Bereich 450 MHz in einem dedizierten, nicht öffentlichen Funknetz. Hier sticht hervor, dass in diesem Frequenzbereich eine Schwarzfallfähigkeit von Telekommunikationsdiensten ungleich kostengünstiger realisiert werden kann. Ebenso besteht hier kein Ressourcenkonflikt mit Anwendungen des Massenmarktes.

Mit der Weiterentwicklung von LTE Richtung **5G** steigt die Leistungsfähigkeit der Mobilfunknetze weiter an, nicht nur in Bezug auf die Systemkapazität, sondern insbesondere auch hinsichtlich der Möglichkeit, garantierte Ressourcenzuweisungen zu bieten. Auf diese Weise kann die Steuerbarkeit der Netzressourcen durch den SMGW-Administrator ermöglicht werden.

Die **PLC-Technik** bietet in der breitbandigen Variante (BB-PLC) grundsätzlich Potential für die Anbindung von SMGWs, die weder über Glasfaser oder DSL noch Funk geeignet angebunden werden können. Hierbei kann insbesondere die Strecke zwischen Unterstation und SMGW potentiell per PLC überbrückt werden und in Kombination z. B. mit einem LTE-Funknetz den Zugang zum SMGW-Administrator gewährleisten. Fraglich ist aber, ob es ein ausreichendes Ecosystem gibt, auf das sich ein Massenrollout beziehen kann. Die Expertengespräche lassen dies aktuell bezweifeln, weshalb innerhalb der Standardisierungsgremien Initiativen gestartet wurden, dieses Ecosystem zu etablieren. Anwendungen im Verteilernetz sind dagegen mit erheblichen Ausgaben verbunden, weil beispielsweise zur Realisierung einer Schwarzfallfestigkeit eine Vielzahl von aktiven Komponenten mit Batterien zu versehen sind.

2.3 Zwischenfazit

Hinsichtlich der Frage, wo bestehende oder künftige Kommunikationstechnologien und -netze die Energiewende unterstützen können, gibt es, sofern eine ganzheitliche, synergetische Betrachtung von energiewirtschaftlichen Anforderungen präferiert wird, nur eine Option: ein Funknetz auf Basis von CDMA oder LTE im Bereich 450 MHz. Die große Reichweite dieser Frequenz führt dazu, dass im Vergleich zu LTE in öffentlichen Mobilfunknetzen deutlich weniger Sendeanlagen schwarzfallfähig errichtet werden müssen. Heute sind die öffentlichen Mobilfunknetze nicht gehärtet, d. h. die Sendeanlagen fallen mit einem Spannungsabfall aus. Zudem besteht im Bereich 450 MHz kein Ressourcenkonflikt mit Anwendungen im sonstigen Mobilfunk. Da es hier bisher nur regionale Netze gibt, kann die weitere Funkinfrastruktur so aufgebaut werden, dass beispielsweise auch die Vorgaben des MsbG hinsichtlich der Anzahl von anzubindenden SMGW umgesetzt werden können. Jedoch ist die Verfügbarkeit von Telekommunikationsdiensten im Bereich 450 MHz über den 31.12.2020 hinaus ungewiss, weil es einen Nutzungskonflikt mit BOS und Bundeswehr gibt. Diese beanspruchen eine exklusive Zuteilung der Frequenzen ab dem 1.1.2021, worauf wir im 3. Kapitel näher eingehen werden.

Sofern beispielsweise nur Kommunikationstechnologien für Anwendungen um das SMGW gesucht werden und diese nicht netzkritisch sind, sind alle kabelgebundenen öffentlichen Telekommunikationsnetze leistungsfähig. Die zu übertragenden Daten können ohne Weiteres übertragen werden. Jedoch zeigt sich, dass nach aktuellem Stand keine „Stand-alone“-Lösung einer Technologie realisiert werden kann. Entweder muss wie bei Breitbandpowerline eine zusätzliche WAN-Anbindung an der Ortsnetzstation erfolgen, oder es müssen Inhaus-Kommunikationsinfrastrukturen errichtet werden. Beides hat Auswirkungen auf die relevanten Kosten und teilweise auf die Akzeptanz von Gebäudeeigentümern, wenn eine zusätzliche Inhaus-Verkabelung notwendig ist. Zudem gibt es in den öffentlichen Netzen heute keine Priorisierung des Datenverkehrs außerhalb von Voice-over-IP. Die Datenübertragung im Bereich der Netzstatusüberwachung ist somit in kritischen Netzsituationen nicht in jedem Fall gewährleistet.

2.4 Engpassanalyse

Kapitel auf einen Blick

Öffentliche Mobilfunknetze auf Basis von LTE-Technologie sowie LTE in einem dedizierten Funknetz bei 450 MHz sind hinsichtlich ihrer technischen Eigenschaften in der Lage, einzelne oder eine Vielzahl von energiewirtschaftlichen Anwendungen zu unterstützen. Es stellt sich aber die Frage, ob die Kapazität in diesen Funknetzen ausreicht.

Im Ergebnis zeigt dieses Kapitel, dass die öffentlichen Mobilfunknetze über genügend Kapazitäten verfügen, jedoch örtlich – speziell in Kellerräumen – nicht immer vorhanden sind (Abdeckungslücke auf Basis von Praxiserfahrungen in einer Größenordnung zwischen 30 bis 40 %). Wollte man sämtliche (potentiellen) SMGW-Standorte erreichen, wäre eine zusätzliche Netzverdichtung in einer Größenordnung von über 15.000 Stationen im Bereich unter 1 GHz notwendig. Im Bereich 450 MHz werden wegen der Ausbreitungseigenschaften der Frequenz deutlich weniger Sendeanlagen benötigt, je nach Deep-Indoor-Rate und Berechnungsverfahren maximal 8.000 Sendeanlagen. Der Endausbau kann dabei schrittweise erreicht werden. Praxiserfahrungen legen nahe, dass eine Großstadt wie Düsseldorf mit weniger als 10 Sendeanlagen auskommt. Demnach müssten deutlich weniger als 8.000 Sendeanlagen gebaut werden. Kapazitätsengpässe sind weder in öffentlichen Mobilfunknetzen noch in einem dedizierten Netz bei 450 MHz zu erwarten.

2.4.1 Engpässe in TK-Infrastrukturen: Entstehung und Gegenmaßnahmen im Überblick

Engpässe in Telekommunikationsinfrastrukturen können in zwei unterschiedlichen Dimensionen auftreten. Zunächst muss die grundsätzliche Anbindung eines Teilnehmers oder Endgerätes an ein Kommunikationsnetz gewährleistet werden. Ist dies nicht gegeben, so besteht ein Engpass im Hinblick auf die Erreichbarkeit (Verfügbarkeit). Die zweite zu betrachtende Dimension ist die verfügbare Verkehrskapazität. So kann auch bei grundsätzlicher Erreichbarkeit eines Endgerätes ein Kapazitätsengpass auftreten, falls die Anbindung nicht ausreichend dimensioniert ist, um die Verkehrslast des Endgerätes zu tragen. Dabei ist außerdem zu unterscheiden, an welcher Stelle des Netzes es zu dem Verkehrsengpass kommt. Dieser kann sowohl im Zugangnetz (*Access*) als auch im *Backhaul* auftreten.

Abhängig von der zu betrachtenden Telekommunikationstechnologie kann die eine oder andere Dimension von Engpässen ausschlaggebend für die Netzplanung sein. So sind beispielsweise Glasfaserinfrastrukturen im Wesentlichen durch das Erreichbarkeitsziel getrieben, da bei existierender Anbindung die gebotene Kapazität in der Regel ausreichend hoch ist, um unterschiedlichste Verkehrsanforderungen zuverlässig zu erfüllen. Aufgrund der – aus Erreichbarkeitsgründen – hohen Dichte von Knotenpunkten lässt sich typischerweise auch bei Breitbandpowerline-Communications (BB-PLC) von hinreichenden Verkehrsressourcen ausgehen. Dies gilt insbesondere, wenn eine dedizierte BB-PLC-Infrastruktur für Anwendungen des SMGWs vorausgesetzt wird. Demgegenüber müssen für die Dimensionierung von (öffentlichen) Mobilfunknetzen in der Regel beide Faktoren, d. h. Abdeckung und Kapazität berücksichtigt werden:

- **Schritt 1: Abdeckung** → Die SMGWs müssen grundsätzlich im Einzelbetrieb mit Mindestdatenrate erreichbar sein.
- **Schritt 2: Kapazität** → Die aggregierte Datenrate aller SMGWs innerhalb einer Funkzelle muss auch im Worst Case verfügbar sein. In Hinblick auf die Verkehrskapazität ist dabei neben der Anzahl der benötigten Basisstationen insbesondere auch die erforderliche Breite des eingesetzten Frequenzbandes zu bestimmen.

Einen Gesamtüberblick über die Methodik der entwickelten Engpassanalyse liefert Abbildung 2-14. Ausgehend von Kommunikationsanforderungen und Mengengerüst werden dabei entsprechend Kapitel 2.1.3 Datenraten-Anforderungen abgeleitet. Diese dienen als Eingangsgröße der Verkehrsprognose und somit der kapazitätsbasierten Netzplanung. Gleichzeitig ergeben sich aus Mengengerüst und Regionenmix die Erfordernisse der abdeckungsorientierten Netzplanung. Unter Berücksichtigung spezifischer Technologieeigenschaften können so Engpässe bestimmt werden.

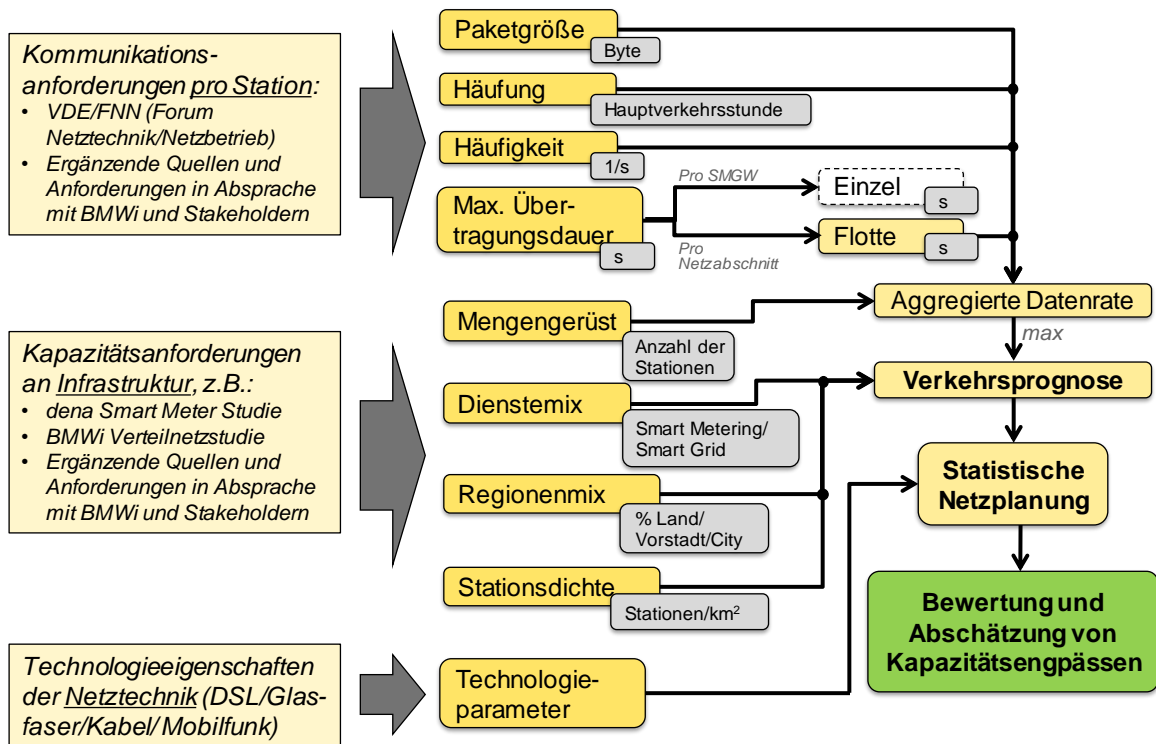


Abbildung 2-14: Methodik der Engpassanalyse

Die nachfolgende Abbildung 2-15 verdeutlicht den schrittweisen Ansatz, der die im Rahmen der Anforderungsanalyse diskutierten Rahmenbedingungen in Bezug auf Systemumgebung und Datenverkehrslast in Kombination mit den Systemparametern einbezieht.

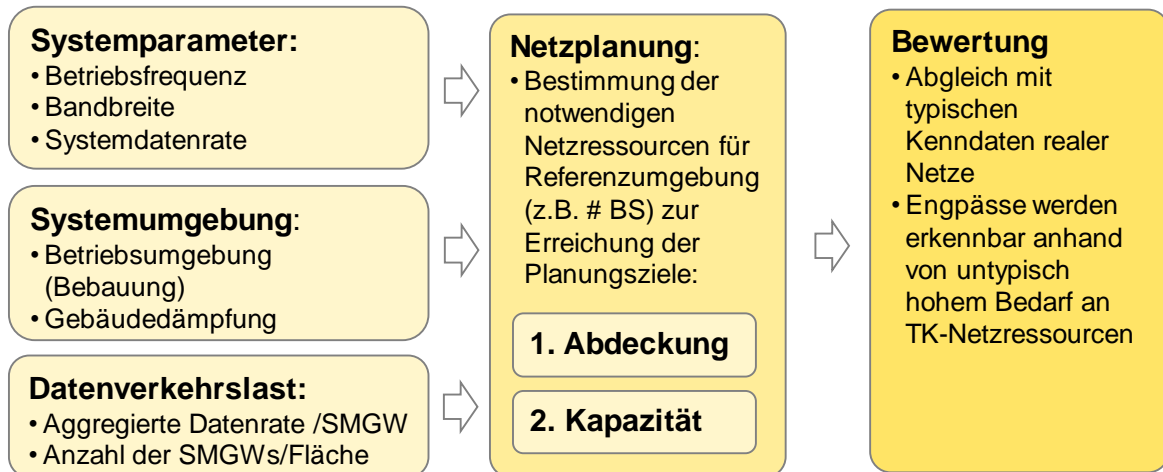


Abbildung 2-15: Stellgrößen der Netzplanung am Beispiel Mobilfunk

Vor diesem Hintergrund wird im Folgenden eine beispielhafte, statistische Netzplanung auf Basis der LTE-Technologie durchgeführt.

2.4.2 Netzplanung am Beispiel LTE und Ableitung eines LTE-Netzmodells

Hinweise zum Modellierungsansatz einer statistischen Netzplanung

Es ist hervorzuheben, dass es sich bei der vorliegenden Netzplanung um einen statistischen Ansatz handelt. Dieser erhebt nicht den Anspruch, eine detaillierte Dimensionierung für die reale Umsetzung zu bieten. Vereinfachend werden unterschiedliche Landschafts- bzw. Bebauungstypen betrachtet, die über unterschiedliche Funkausbreitungseigenschaften verfügen. Im Zuge dieser statistischen Netzplanung werden im Sinne der Identifikation von Obergrenzen auch Flächen berücksichtigt, die bei einem realen Netzaufbau unter Umständen nicht einbezogen werden (z. B. Wald- und Wasserflächen). Ebenso wird für die Dämpfung innerhalb von Gebäuden eine statistische Verteilung zugrunde gelegt. Dementsprechend können Mengengerüste realer Netzaufbauten von den hier präsentierten Zahlenwerten abweichen. Die dargestellten Ergebnisse sollen als Indikation dienen und im Sinne der Engpassanalyse mögliche Engpässe aufzeigen.

Wie zuvor ausgeführt, müssen bei der Planung eines Mobilfunknetzes sowohl das Erreichbarkeits- bzw. Abdeckungsziel als auch das Kapazitätsziel Eingang finden. Abbildung 2-16 bietet einen Überblick über diese Grundprinzipien der Mobilfunknetzplanung. Hierbei wird zunächst eine statistische abdeckungsorientierte Planung durchgeführt, im Zuge derer die benötigte Anzahl an Basisstationen für eine flächendeckende Erreichbarkeit von Endgeräten bestimmt wird. In öffentlichen Netzen erfolgt dies unter Berücksichtigung eines Indoor-Abdeckungsziels (oberes linkes Feld A). Ausgehend hiervon kann – einem Deep-Indoor-Abdeckungsziel folgend – eine Netzverdichtung erfolgen, um beispielsweise SMGWs in Kellerräumen anzubinden (oberes rechtes Feld C). Hieran schließt sich die kapazitätsorientierte Netzplanung an. Im Rahmen dieses zweiten Schrittes kann entweder eine erforderliche Verdichtung um weitere Basisstationen abgeleitet oder die notwendige Bandbreite unter Berücksichtigung des bestehenden abdeckungsorientierten Basisstationsmengengerüsts kalkuliert werden. In öffentlichen Mobilfunknetzen erfolgt die kapazitätsorientierte Netzplanung auf Basis des Endkonsumentenverkehrs (unteres linkes Feld B). Mobilfunknetze für SMGW-Anwendungen müssen hingegen entweder dediziert für den entsprechenden Verkehr ausgelegt werden oder das Verkehrsaufkommen von sowohl Endkonsumenten als auch SMGWs berücksichtigen (unteres rechtes Feld D). Die Dimensionierung kann entweder ausgehend von der Deep-Indoor-Abdeckungsplanung oder auf Basis der Verkehrsplanung des öffentlichen Mobilfunknetzes erfolgen. Als Ergebnis kann es zu einer weiteren Verdichtung kommen oder es können Kapazitätsreserven entstehen, sofern die Dimensionierung im vorherigen Schritt bereits eine ausreichende Höhe erreicht hat.

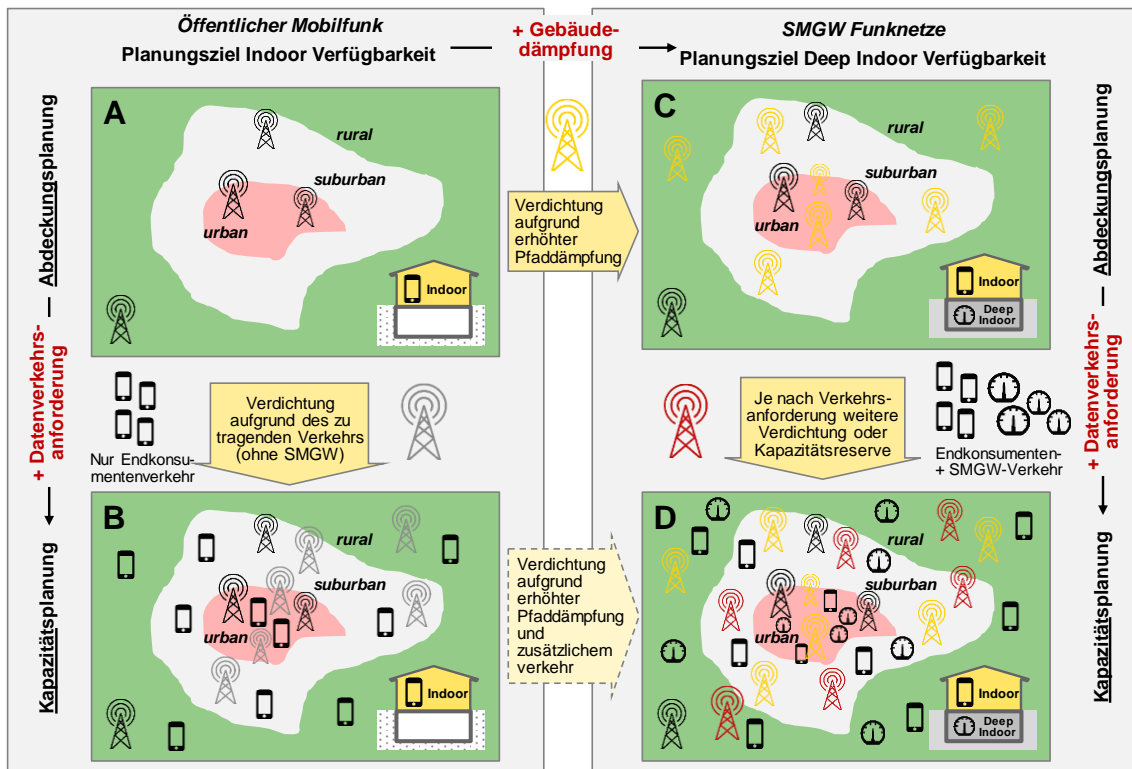


Abbildung 2-16: Grundprinzipien der Mobilfunknetzplanung für SMGW-Anwendungen anhand der Dimensionen Abdeckung und Kapazität, ausgehend von der Dimensionierung öffentlicher Netze

2.4.2.1 Abdeckungsorientierte Planung

Ziel der abdeckungsorientierten Netzplanung ist es, Teilnehmer bzw. Endgeräte in einem definierten Gebiet kommunikationstechnisch anzubinden. Hierbei geht es ausschließlich um eine flächenmäßige Erreichbarkeit, wobei jedoch eine bestimmte Mindestsignalstärke nicht unterschritten werden darf. Eine direkte Berücksichtigung der dabei erzielbaren Datenrate in Downlink- und Uplink-Richtung findet hingegen erst im zweiten Schritt der Netzplanung statt.

Die erforderliche Mindestsignalstärke wird im Zuge der abdeckungsorientierten Netzplanung über den maximal zulässigen Pfadverlust ausgedrückt, welcher sich in einem Linkbudget als Differenz zwischen Sendeleistung und Empfangsleistung ergibt. Die aus der Literatur adaptierte Linkbudget-Berechnung⁸⁵ in Tabelle 2-7 liefert einen maximalen Pfadverlust von 145,9 dB für Teilnehmer am Zellrand und kann somit als Basis für die weitere Netzplanung herangezogen werden. Bei diesem Linkbudget handelt es sich um eine Betrachtung in Uplink-Richtung, da diese den für die Dimensionierung kritischeren Fall darstellt.

Ausgehend von dem, mit Hilfe des Linkbudgets bestimmten, maximal zulässigen Pfadverlusts wird der Pfad des Funksignals auf Grundlage des etablierten Okumura-Hata-Modells⁸⁶ für die Dämpfung von Funksignalen modelliert. Das vergleichsweise alte Modell wird hier aus zweierlei Gründen neueren Ansätzen wie WINNER II^{87/+88} oder den ITU Reports ITU-R M.2135-1⁸⁹, M.2412-0⁹⁰ vorgezogen:

⁸⁵ C. Johnson: Long Term Evolution in Bullets, 2nd ed., 2012.

⁸⁶ M. Hata: Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services, IEEE Trans. Veh. Technol., vol. V, no. 3, S. 317–325, 1980.

⁸⁷ T. P. Kyösti, J. Meinilä, L. Hentilä, X. Zhao, A. Jämsä, C. Schneider, M. Narandzić, M. Milojević, R. Hong, J. Ylitalo, V.-M. Holappa, M. Alatossava, T. R. Bultitude, und Y. de Jong: WINNER II Project Deliverable 1.1.2 Channel Models, Deliv. 1.1.2 Tech. Rep., vol. 1, no. 82, S. 82, 2008.

- 1) Es ermöglicht umfassende Berechnungen für alle relevanten Betriebsfrequenzen und Regionstypen, während die Anwendung neuerer Modelle zum Teil auf spezifische Szenarien beschränkt ist.
- 2) Bis heute ist das Okumura-Hata Modell auch in der Praxis ein häufig verwendeter Ansatz.

Hier wird das Okumura-Hata-Modell unter Berücksichtigung der COST231-Erweiterung⁹¹ verwendet, die eine Ausweitung des zulässigen Frequenzbereiches auf Betriebsfrequenzen oberhalb von 1,5 GHz bietet.

Tabelle 2-7: Linkbudget-Berechnung als Grundlage der abdeckungsorientierten Netzplanung

Parameter	Wert
Allozierte Resource-Blocks	8
Allozierte Subcarrier	96
Maximale Sendeleistung	23,0 dBm
Sender-Antennengewinn	2,0 dBi ⁹²
Körperverlust	0,0 dB
Sende-EIRP	25,0 dBm
Thermisches Rauschen pro Subcarrier	-132,2 dBm
Aggregiertes thermisches Rauschen	-112,4 dBm
Empfänger-Rauschzahl	2,5 dB
Interferenzabstand	0,0 dB
Interferenzuntergrenze	-109,9 dBm
SINR-Anforderung	0,5 dB
Empfänger-Signalstärke-Anforderung	-109,4 dBm
Empfänger-Antennengewinn	18,0 dBi
Kabelverlust	0,0 dB
Slow-Fading-Abstand	9,0 dB
Shadowing-Handover-Gewinn	2,5 dB
Gebäudeverlust	0,0 dB
Empfänger-EIRP	-120,9 dBm
Maximal zulässiger Pfadverlust	145,9 dB

Während das Model bei regulärer Verwendung den Pfadverlust über eine vorgegebene Distanz als Ergebnis liefert, wird es hier eingesetzt um – umgekehrt – für den maximal zulässigen Pfadverlust die resultierende, maximal überbrückbare Distanz zu ermitteln. Dies erfolgt unter Berücksichtigung folgender wesentlicher Parameter:

⁸⁸ P. Heino et al.: WINNER+ Project Deliverable 5.3: Final Channel Models, Deliv. 5.3 Tech. Rep., vol. 1, no. 107, S. 107, 2010.

⁸⁹ International Telecommunication Union (ITU): Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced”, Rep. ITU-R M.2135-1, 2009.

⁹⁰ International Telecommunication Union: Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020, Rep. ITU-R M.2412-0, 2017.

⁹¹ E. Damosso et al.: COST 231 Final Report: Digital Mobile Radio Towards Future Generation Systems”, COST 231 Final Rep., 1996.

⁹² Welotec: Smart-Meter-Gateway Antennen Starter Kits, o.D., online abrufbar: <https://www.welotec.com/files/welotec/dokumente/smart-meter-gateway-antennen.pdf>.

- Installationshöhe der Basisstation
- Höhe des Endgerätes
- Regionstyp: urban / suburban / rural
- Betriebsfrequenz

Die Betriebsfrequenz stellt dabei den bedeutendsten Treiber der abdeckungsorientierten Netzplanung dar. Je höher die gewählte Betriebsfrequenz ist, desto geringere Distanzen können – bei vorgegebener Signalstärke am Empfänger – überwunden werden. Auch die verschiedenen Regionstypen zeigen einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Netzplanung. So schränkt die hohe Dichte von Hindernissen in urbanen sowie zum Teil auch in suburbanen Räumen die ungehinderte Ausbreitung der Funksignale ein und mindert somit die maximalen Distanzen.

Aufgrund der Lage zahlreicher SMGWs in Innen- und Kellerräumen ergibt sich für die Anbindung mittels Mobilfunk eine weitere Herausforderung. So muss eine zusätzliche Dämpfung durch Wände und Decken berücksichtigt werden. Dies geschieht hier auf Basis von veröffentlichten empirischen Untersuchungen⁹³ sowie Simulationen⁹⁴. Als Ergebnis der Messungen wurden zunächst statistische Verteilungen der Signaldämpfungen in Innenräumen und Kellern bestimmt, welche unter Anwendung der folgenden Vorschriften für die Verknüpfung zweier Verteilungsfunktionen kombiniert werden können:

$$m_{I/DI} = \alpha_I \cdot m_I + \alpha_{DI} \cdot m_{DI} \quad (1)$$

$$\sigma_{I/DI} = \sqrt{\alpha_I \cdot \sigma_I^2 + \alpha_{DI} \cdot \sigma_{DI}^2 + \alpha_I \cdot \alpha_{DI} \cdot (\sigma_I - \sigma_{DI})^2} \quad (2)$$

Dabei ist $m_{I/DI}$ der Mittelwert der neuen Verteilungsfunktion, welcher sich durch Gewichtung der individuellen Mittelwerte m_I für Innenräume und m_{DI} für Kellerräume mit den Faktoren α_I bzw. α_{DI} ergibt. Analog kann die Standardabweichung der kombinierten Funktion $\sigma_{I/DI}$ anhand von Formel (2) aus den Standardabweichungen der einzelnen Verteilungsfunktionen bestimmt werden⁹⁵.

Mit Hilfe dieser beiden Parameter lässt sich dann die kumulierte Gesamtverteilungsdichtefunktion für den kombinierten Fall bestimmen. Beispielhafte Illustrationen für unterschiedliche Gewichtungsfaktoren finden sich in Abschnitt 2.1.2.1. Aufgrund gesetzlicher Vorgaben (MsbG § 29 (5)), nach denen es ausreichend ist 95 % aller Pflichteinbauten von SMGWs tatsächlich durchzuführen, werden für die Bestimmung des relevanten Grenzpunktes der Dämpfung die obersten 5 % mit den schwierigsten Anbindungsbedingungen ausgespart. Auf Basis der Messdaten konnte diese Analyse für Frequenzen von 800 MHz und 1800 MHz durchgeführt werden, während die Werte für 450 MHz entsprechend der Formeln (3) und (4) durch lineare Interpolation aus Simulationsdaten gewonnen wurden.

$$\tilde{m}_{m,450} = \frac{\left(m_{m,800} + (m_{s,450} - m_{s,800})\right) + \left(m_{m,1800} + (m_{s,450} - m_{s,1800})\right)}{2} \quad (3)$$

⁹³ S. Monhof, S. Böcker, J. Tiemann, and C. Wietfeld: Cellular Network Coverage Analysis and Optimization in Challenging Smart Grid Environments, IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids (SmartGridComm), 2018.

⁹⁴ C. Hägerling, C. Ide, and C. Wietfeld: Coverage and capacity analysis of wireless M2M technologies for smart distribution grid services, IEEE Int. Conf. Smart Grid Commun., S. 368–373, 2014.

⁹⁵ H. Büning und G. Trenkler: Nichtparametrische statistische Methoden, De Gruyter, 2013.

$$\tilde{\sigma}_{m,450} = \frac{(\sigma_{m,800} + (\sigma_{s,450} - \sigma_{s,800})) + (\sigma_{m,1800} + (\sigma_{s,450} - \sigma_{s,1800}))}{2} \quad (4)$$

Abschließend gibt Tabelle 2-8 einen Überblick über die kalkulierten Parameter Mittelwert, Standardabweichung und Grenzpunkt für die kombinierten Verteilungsfunktionen.

Tabelle 2-8: Parameter der kombinierten Verteilungsfunktionen für die Dämpfung in Innen- und Kellerräumen

Kombinationsverhältnis Deep Indoor / Indoor [%]	80/20		50/50		20/80	
	450	800	450	800	450	800
Frequenz [MHz]						
Mittelwert [dB]	9,5	11,9	7,7	9,3	5,9	6,7
Standardabw. [dB]	6,8	8,1	7,0	8,2	6,8	7,6
Grenzpunkt 95% [dB]	20,7	25,2	19,2	22,9	17,0	19,1

Die zuvor detaillierten Zusammenhänge der verschiedenen Einflussfaktoren ergeben sich direkt aus dem Okumura-Hata-Modell, welches hier in Formel (5), nach der Distanz d aufgelöst, angegeben ist:

$$d = 10^{\left(\frac{L - L_{in,base} - 69,55 - 26,16 \cdot \log(f) - c_t + 13,82 \cdot \log(h_b) + c_a}{44,9 - 6,55 \cdot \log(h_b)}\right)} \quad (5)$$

wobei L den maximal zulässigen Pfadverlust und $L_{in,base}$ die zusätzlich auftretende Signaldämpfung in Innenräumen bzw. Kellern definiert. Die Betriebsfrequenz wird mit f bezeichnet, während h_b die Höhe der Basisstation darstellt. Weiterhin finden die Korrekturfaktoren c_a und c_t Eingang in die Bestimmung der maximal überbrückbaren Distanz. Diese sind wie folgt definiert:

$$c_a = \begin{cases} 0,8 + (1,1 \cdot \log(f) - 0,7) \cdot h_m - 1,56 \cdot \log(f), & \text{kleine, mittelgroße Städte} \\ 8,29 \cdot (\log(1,54 \cdot h_m))^2 - 1,1, & \text{große Städte, } 150 \leq f \leq 200 \\ 3,2 \cdot (\log(11,75 \cdot h_m))^2 - 4,97, & \text{große Städte, } 200 < f \leq 1500 \end{cases} \quad (6)$$

$$c_t = \begin{cases} 0, & \text{urban} \\ 2 \cdot \left(\log\left(\frac{f}{28}\right)\right)^2 - 5,4, & \text{suburban} \\ 4,78 \cdot (\log(f))^2 + 18,33 \cdot \log(f) - 40,94, & \text{rural} \end{cases} \quad (7)$$

mit der Höhe des Endgerätes h_m .

Die als Ergebnis gewonnene maximale Distanz d wird in der Folge genutzt, um die daraus resultierende, durchschnittliche Basisstationsfläche A zu bestimmen, wobei mit dem Hexagonalfaktor 2,6 anstelle von π gearbeitet wird. Mittels Division der abzudeckenden Gesamtfläche durch die Größe der durch eine Basisstation abdeckbaren Fläche ergibt sich schließlich die Anzahl der erforderlichen Basisstationen in der abdeckungsorientierten Netzplanung.

2.4.2.2 Kapazitätsorientierte Planung

Die kapazitätsorientierte Netzplanung legt den Fokus auf die Herausforderung für die Teilnehmer bzw. Endgeräte, innerhalb einer Zelle ausreichende Ressourcen bereitzustellen. Hierzu werden Verkehrsanforderungen pro Teilnehmer über die Gesamtzahl der Teilnehmer aggregiert und mit der Verkehrskapazität pro Funkzelle in Beziehung gesetzt. Die Bestimmung der erforderlichen Verkehrskapazität für SMGW-Anwendungen erfolgt entsprechend des in Kapitel 2.1.3 dargestellten Konzepts der aggregierten Datenraten. Ergänzend wird der Einfluss des Endkonsumentenverkehrs in öffentlichen Mobilfunknetzen mit Hilfe eines in der Literatur vorgestellten Ansatzes⁹⁶ modelliert:

$$R(t) = \frac{p}{N_{op}} \cdot \alpha(t) \cdot (r_h \cdot s_h + r_a s_a) \quad (8)$$

Dabei ergibt sich die Gesamtdatenratenanforderung $R(t)$ aus dem individuellen Datenratenbedarf pro Teilnehmer r , aufsummiert über alle Teilnehmer p und aufgeteilt auf die Anzahl von Kommunikationsnetzbetreibern N_{op} . Bei der individuellen Datenratenanforderung wird unterschieden zwischen Teilnehmern mit durchschnittlichem Bedarf r_a und solchen mit hohem Bedarf r_h , welche mit den jeweiligen Gewichtungsfaktoren s_a und s_h eingehen. Weiterhin wird der Hauptverkehrsstundenfaktor $\alpha(t)$ in die Berechnung einbezogen.

Die von einer LTE-Zelle angebotene Verkehrskapazität drückt sich in der Anzahl zur Verfügung stehender *Resource Blocks* aus, welche sich unmittelbar aus der verfügbaren Bandbreite ergibt. Die daraus resultierende Nutzdatenrate ist jedoch abhängig von den gewählten Modulations- und Kodierungsverfahren, deren Auswahl unter Berücksichtigung der Ausbreitungseigenschaften des Funksignals innerhalb einer Zelle variiert. Tendenziell werden für die Kommunikation von Teilnehmern am Zellrand – aufgrund der geringeren Signalstärke in diesen Bereichen – robustere Verfahren eingesetzt, die für eine gegebene Datenratenanforderung eine höhere Anzahl von *Resource Blocks* benötigen. Dieser Zusammenhang wird über den Parameter der spektralen Effizienz abgebildet, welcher definiert ist als die Datenrate pro Signalbandbreite. Vereinfachend wird bei der kapazitätsorientierten Netzplanung von einer mittleren spektralen Effizienz für die gesamte Zelle ausgegangen, welche einen Durchschnitt über geringe Werte am Rand sowie höhere Werte im Zentrum bietet. Dabei wird jedoch eine spezifische mittlere spektrale Effizienz je nach Übertragungsrichtung und Regionstyp berücksichtigt. Die verfügbare Datenrate pro LTE-Zelle ergibt sich dann als Produkt von spektraler Effizienz und zur Verfügung stehender Bandbreite.

Davon ausgehend wird die aus Kapazitätssicht erforderliche Anzahl an Basisstationen bestimmt, indem die Gesamtdatenratenanforderung durch die verfügbare Datenrate pro Zelle geteilt wird. Dies erfolgt getrennt nach Übertragungsrichtung, wobei sich die Gesamtzahl als Maximum des Basisstationsbedarfs in Uplink und Downlink ergibt. Insgesamt zeigt sich die verfügbare Bandbreite als wesentlicher Treiber der kapazitätsorientierten Netzplanung. Die Kombination von abdeckungsorientierter und kapazitätsorientierter Netzplanung erfolgt schließlich durch eine weitere Maximumsbildung über die Ergebnisse beider Dimensionierungsansätze.

Umgekehrt ist es auch möglich für eine gegebene Anzahl an Basisstationen – beispielsweise ausgehend von einer abdeckungsorientierten Netzplanung – die erforderliche Bandbreite zu bestimmen, welche für eine Versorgung aller Endgeräte ohne Zubau weiterer Basisstationen ausreichend ist. Entsprechend Formel (9) wird hierzu der Verkehrsbedarf R durch das Produkt von spektraler Effizienz η und Anzahl an Basisstationen n_{BS} geteilt. Dies erfolgt getrennt nach Up- und Downlink, sodass als Ergebnis der Band-

⁹⁶ G. Auer und O. Blume: EARTH Project D2.3 - Energy efficiency analysis of the reference systems, areas of improvements and target breakdown", Energy Aware Radio Netw. Technol. (EARTH), INFISO-ICT-247733, ver. 2.0., 2012, online verfügbar: <http://www.ict-earth.eu/>.

breitenbedarf pro Übertragungsrichtung vorliegt. Weiterhin ist diese Berechnung einzeln für die verschiedenen Regionstypen durchzuführen. Unter der Prämisse fester Bandbreitenzuweisung wird davon ausgegangen, dass das Maximum über alle Regionstypen den übergreifenden Bandbreitenbedarf B darstellt.

$$B = \frac{R}{\eta \cdot n_{BS}} \quad (9)$$

2.4.2.3 Annahmen und Modellierungsparameter

Der folgende Abschnitt fasst wesentliche Annahmen und Modellierungsparameter für die beispielhafte LTE-Netzplanung in Abschnitt 0 zusammen. Tabelle 2-9 zeigt dabei wesentliche Parameter der abdeckungsorientierten Netzplanung, während Tabelle 2-10 auf die kapazitätsorientierte Dimensionierung fokussiert.

Tabelle 2-9: Modellierungsparameter der abdeckungsorientierten Netzplanung

Parameter	Symbol	Wert
Betriebsfrequenz (bestehendes öffentliches Netz)	f	800 MHz
Betriebsfrequenz (dediziertes privates Netz)	f	450 MHz
Zulässige Empfangsleistung	L	145,9 dB ⁹⁷
Signaldämpfung Keller (800 MHz)	L_{base}	23,1 dB ⁹⁸
Basisstationshöhe urban	h_b	25 m ⁹⁹
Basisstationshöhe suburban	h_b	35 m
Basisstationshöhe rural	h_b	35 m
Endgerätehöhe	h_m	1,5 m
Flächenfaktor Hexagon		2,6

Tabelle 2-10: Modellierungsparameter der kapazitätsorientierten Netzplanung

Parameter	Symbol	Wert
Anzahl Netzbetreiber	N_{op}	3
Höchstverkehrsstunden-Faktor	$\alpha(t)$	0,16 ¹⁰⁰
Datenratenanforderung mittel	r_a	40 kbps
Datenratenanforderung hoch	r_h	320 kbps
Anteil Teilnehmer mittlere Anforderung	s_h	80 %

⁹⁷ C. Johnson: Long Term Evolution in Bullets, 2nd ed., 2012.

⁹⁸ L. Olof, M. Sundberg, E. Wang, J. Bergmann, und J. Sachs: Cellular Internet of Things, Academic Press, 2018.

⁹⁹ International Telecommunication Union (ITU): Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced", Rep. ITU-R M.2135-1, 2009.

¹⁰⁰ G. Auer und O. Blume: EARTH Project D2.3 - Energy efficiency analysis of the reference systems, areas of improvements and target breakdown", Energy Aware Radio Netw. Technol. (EARTH), INFOS-ICT-247733, ver. 2.0., 2012, online verfügbar: <http://www.ict-earth.eu/>.

Parameter	Symbol	Wert
Anteil Teilnehmer hohe Anforderung	S_a	20 %
Bandbreite (bestehendes öffentliches Netz)	B	10 MHz
Bandbreite (dediziertes privates Netz)	B	1,4 MHz
Spektrale Effizienz DL urban		2,50 Bit/s/Hz
Spektrale Effizienz UL urban		1,50 Bit/s/Hz
Spektrale Effizienz DL suburban		2,70 Bit/s/Hz
Spektrale Effizienz UL suburban		1,45 Bit/s/Hz
Spektrale Effizienz DL rural		2,90 Bit/s/Hz
Spektrale Effizienz UL rural		1,40 Bit/s/Hz

Weitergehende Informationen zu den verwendeten Modellierungsparametern finden sich in Anhang G: Szenario-Parameter der Engpassanalyse.

2.4.2.4 Validierung des Netzmodells anhand einer Beispielregion

In einem ersten Schritt wird das entwickelte Modellierungskonzept anhand des öffentlichen Mobilfunknetzes in Deutschland validiert. Dazu werden Ergebnisse der Netzmodellierung realen LTE-Netzdaten gegenübergestellt.

Abbildung 2-17 zeigt hierzu eine Einteilung Deutschlands entsprechend der Regionstypen urban, suburban und rural auf Basis von Daten des Statistischen Bundesamtes¹⁰¹. Die Unterteilung berücksichtigt dabei sowohl die Gesamtbevölkerungszahl als auch die Bevölkerungsdichte eines Siedlungsraums. Auf diese Weise wird die Grundlage für eine statistische Mobilfunknetzmodellierung anhand der drei Regionstypen geschaffen. Es ergibt sich das in Tabelle 2-11 präsentierte Mengengerüst.

Tabelle 2-11: Basisparameter Deutschland-Szenario

	Urban	Suburban	Rural	Gesamt
Fläche [km²]	17.827	102.332	238.164	358.322
Haushalte	15.963.607	16.899.703	8.468.355	41.331.665
Bevölkerungszahl	29.532.673	34.137.401	18.715.064	82.385.138

¹⁰¹

<https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/LaenderRegionen/Regionales/Gemeindeverzeichnis/Administrativ/Archiv/GVAuszugQ/AuszugGV2QAktuell.html>.

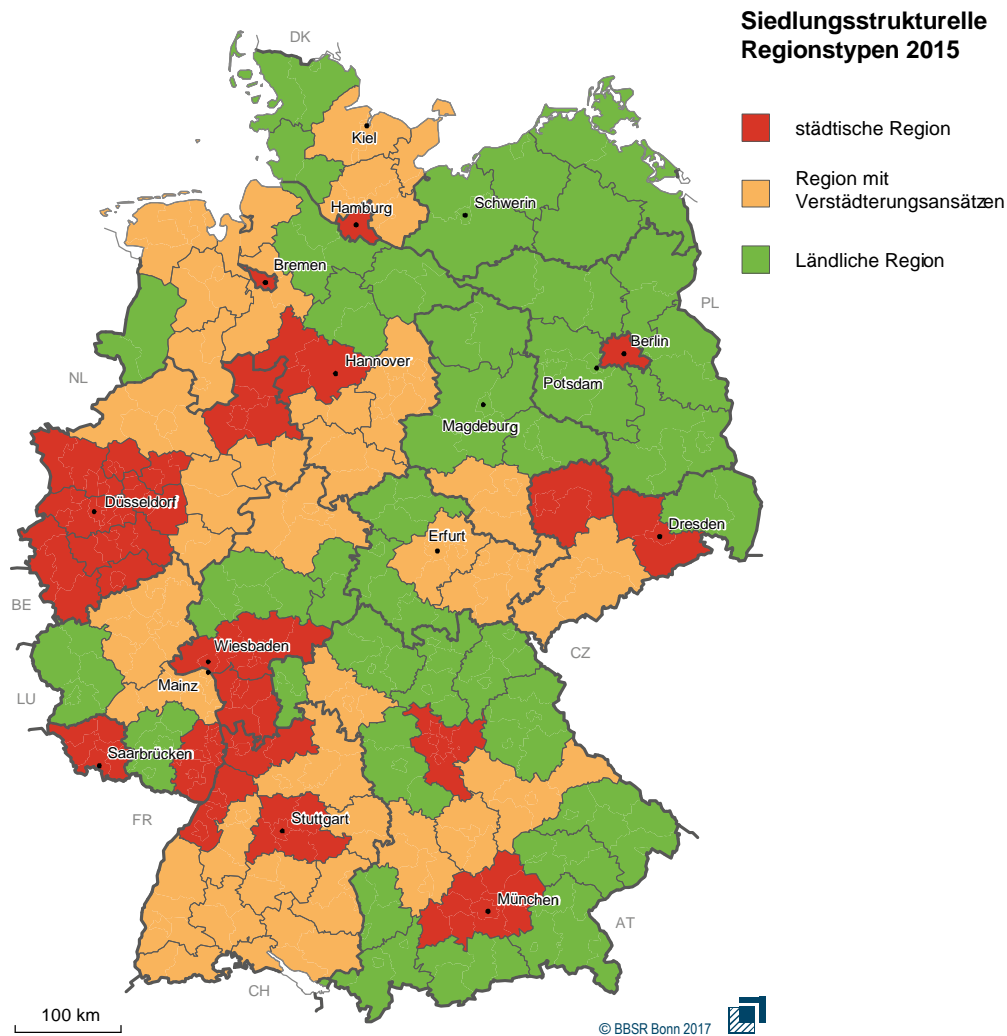


Abbildung 2-17: Klassifizierung des Deutschland-Szenarios anhand unterschiedlicher Regionstypen

Aus Sicht eines von insgesamt drei Mobilfunknetzbetreibern ergibt die kombinierte Netzplanung des Netzes anhand von Abdeckungs- und Kapazitätszielen eine statistische Anzahl von 16.000 Basisstationen, wie in Abbildung 2-18 gezeigt. Dabei werden eine Fläche von 358.322 km² sowie Endkonsumentenverkehr auf Grundlage von Tabelle 2–10 berücksichtigt. Die Flächenabdeckung über alle drei Regionstypen hinweg wird mittels ca. 5.500 Basisstationen im subGHz-Bereich erzielt. Demgegenüber werden für die Bedienung der Verkehrsanforderung insgesamt etwa 16.000 Basisstationen bei 10 MHz Bandbreite benötigt. Daraus ergibt sich zusätzlich zum Bedarf für die Flächenabdeckung ein kapazitätsbedingter Zubau von Basisstationen in der Höhe von 10.500.

Ein Vergleich mit den statistischen Daten für die in Deutschland von allen Netzbetreibern installierte Anzahl von insgesamt 48.146¹⁰² Basisstationen (2017) dient der Validierung dieser Modellierung: Wird die im Modell für einen Netzbetreiber bestimmte Anzahl der Basisstationen von 16.000 über alle drei Netzbetreiber aggregiert, liegt die Gesamtzahl bei 48.000. Dieser Wert zeigt eine hinreichend gute Übereinstimmung mit den realen Daten und bestätigt damit den Modellierungsansatz.

¹⁰² Statista: Anzahl der LTE-Basisstationen in Deutschland in den Jahren 2012 bis 2017, online verfügbar: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/793776/umfrage/anzahl-der-lte-basisstationen-in-deutschland/>.

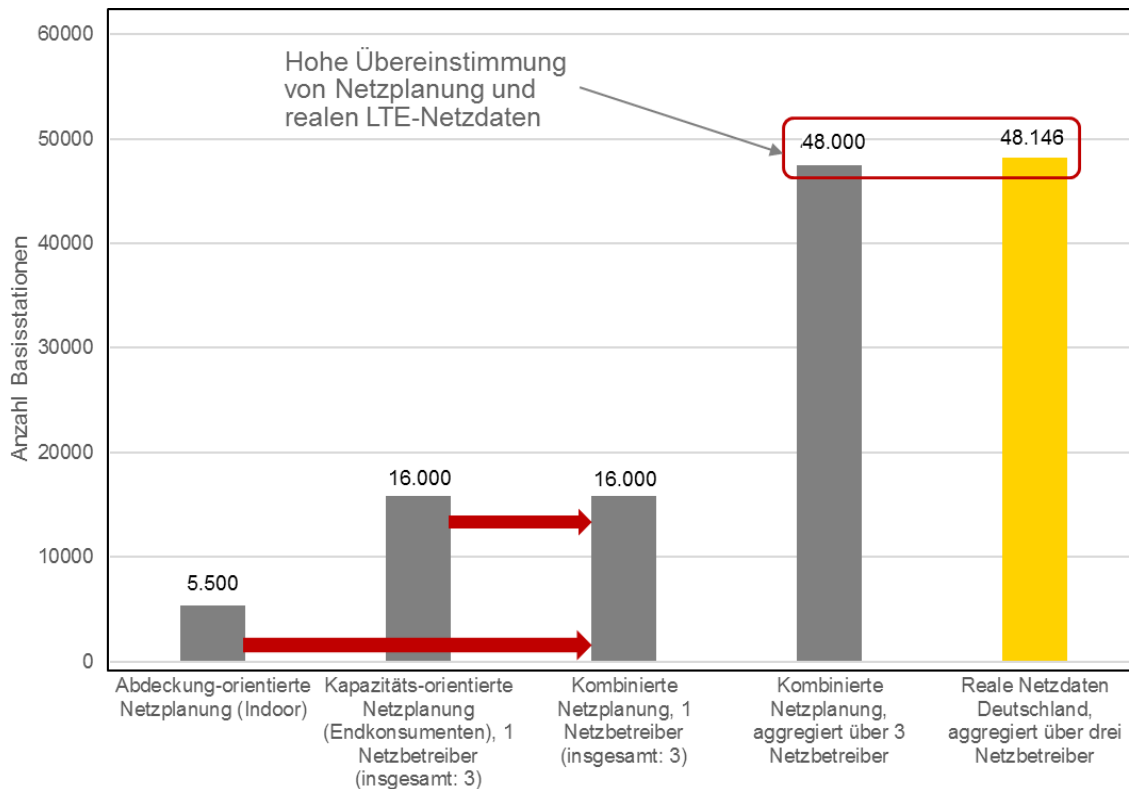


Abbildung 2-18: Vergleich von Netzplanung und realen LTE Netzdaten in Deutschland

Eine ergänzende Studie für die Stadt Dortmund unterstreicht ebenfalls eine adäquate Übereinstimmung der Modellierung mit realen Netzdaten der Ergebnisse (siehe Anhang D: Validierung der Netzplanung)

Im Rahmen der folgenden Fallstudie wird ein deutschlandweites Mobilfunknetz auf Basis der LTE-Technologie zur kommunikationstechnischen Anbindung von SMGWs modelliert. Dabei werden zwei Fälle unterschieden:

1. Der Aufbau eines dedizierten (privaten) Mobilfunknetzes für SMGW-Anwendungen bei 450 MHz. Dabei stehen insbesondere die Anzahl erforderlicher Basisstationen für eine weitreichende Deep-Indoor-Abdeckung sowie der mit den SMGW-Anwendungen verbundene Bandbreiten-Bedarf im Vordergrund.
2. Die Mitnutzung bestehender (öffentlicher) LTE-Infrastrukturen. In diesem Fall ist ein Ausbaubedarf für die flächendeckende Erreichbarkeit der SMGWs zu bestimmen. Weiterhin ist die Höhe des zusätzlichen Datenaufkommens durch SMGW-Anwendungen aufzuzeigen.

2.4.2.5 Abdeckungsorientierte Netzplanung

Entsprechend der vorgestellten Modellierungsmethodik wird zunächst eine abdeckungsorientierte Netzplanung durchgeführt. Dabei werden für die Nachbildung bestehender Mobilfunknetze Frequenzen im subGHz-Bereich (800, 900 MHz) zur Flächenabdeckung herangezogen.

Abbildung 2-19 zeigt die erforderliche Anzahl an Basisstationen in Deutschland für die zuvor genannten Szenarien unter Berücksichtigung der folgenden drei Abdeckungsziele:

- Outdoor: Die Erreichbarkeit durch Mobilfunk wird nur außerhalb von Gebäuden sichergestellt.

- **Indoor:** Innerhalb von Gebäuden wird in 75 % aller Fälle eine Erreichbarkeit ermöglicht. Dieses Abdeckungsziel wird als Vergleichswert für die Planung bestehender Mobilfunknetze herangezogen.
- **Deep Indoor/Indoor:** Dieses Abdeckungsziel ist auf eine 95 % Erreichbarkeit von SMGWs innerhalb von Gebäuden zugeschnitten. Dabei lassen sich verschiedene Mischungsvarianten für den Einbau der SMGWs berücksichtigen:
 - 80 % aller SMGWs im Keller, 20 % oberhalb
 - 50 % aller SMGWs im Keller, 50 % oberhalb
 - 20 % aller SMGWs im Keller, 80 % oberhalb

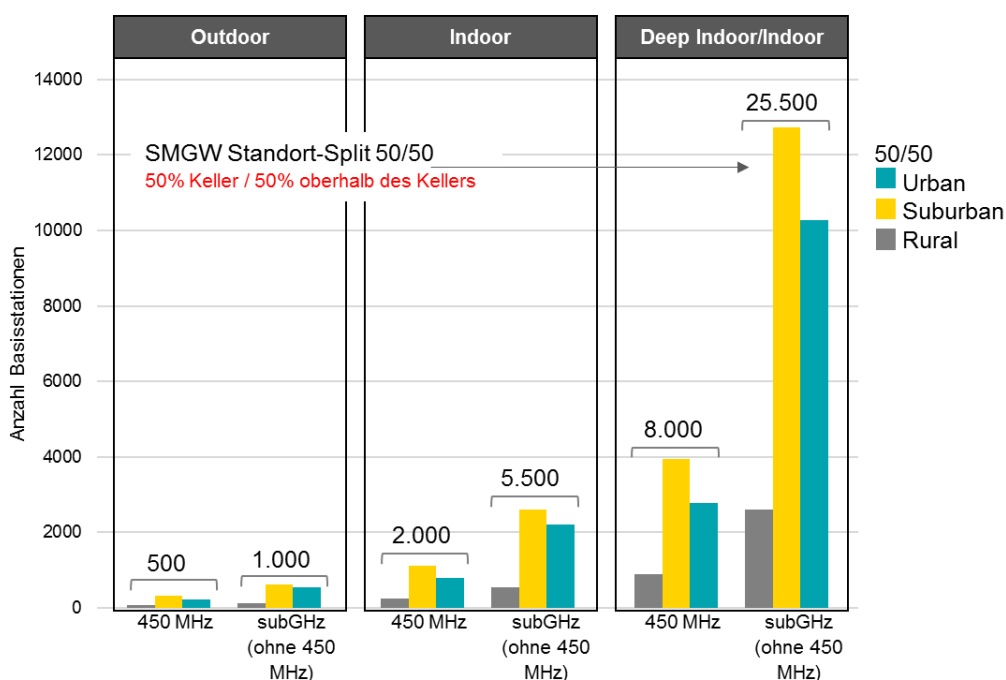


Abbildung 2-19: Abdeckungsbasierter Basisstationsbedarf in Deutschland unter Berücksichtigung unterschiedlicher Netztypen (privates 450-MHz-Netz, öffentliches subGHz-Netz) und Abdeckungsziele

Über alle Szenarien hinweg lässt sich der größte Abdeckungsbedarf im suburbanen Raum identifizieren. Dies begründet sich durch die im Vergleich zum urbanen Raum deutlich größere Fläche sowie geringere Zellgrößen als in ruralen Bereichen. Weiterhin zeigt sich erwartungsgemäß statistisch gesehen ein deutlicher Anstieg bei der benötigten Anzahl von Basisstationen zwischen dem *Outdoor*- und dem Deep-Indoor-/Indoor-Abdeckungsziel mit einem Anstieg von ca. 1.000 auf 25.500 Basisstationen im Fall des subGHz-Mobilfunknetzes. Bedingt durch die zusätzliche Dämpfung, welche für eine Erreichbarkeit der SMGWs in Kellerräumen überwunden werden muss, steigt insbesondere in diesem Fall der Basisstationsbedarf gegenüber dem Indoor-Szenario noch einmal sehr stark an. Im Vergleich hierzu erhöht sich das Mengengerüst, wenn von einem höheren Anteil von SMGWs im Keller ausgegangen wird (80 % im Keller). Hierbei sind insgesamt etwa 35.000 Basisstationen erforderlich. Wird hingegen von einem geringeren SMGW-Anteil im Keller ausgegangen (20 % im Keller) reduziert sich die erforderliche Anzahl an Basisstationen auf ca. 16.000.

Ebenso ergibt sich ein günstigeres Mengengerüst von insgesamt ungefähr 8.000 Basisstationen im Fall des 450-MHz-Netzes (50 %/50 % Deep-Indoor- / Indoor-Aufteilung), da auf diesem Weg höhere Distanzen überwunden werden können und damit größere Basisstationsradien möglich sind.

Eine detaillierte Übersicht der Ergebnisse für verschiedene Deep-Indoor- / Indoor-Relationen und -Frequenzen findet sich in Anhang E: Sensitivitätsanalyse zum Einfluss des SMGW-Anteils in Deep-Indoor-Umgebungen.

2.4.2.6 Kapazitätsorientierte Netzplanung

Unmittelbar anschließend an die abdeckungsorientierte Netzplanung wird eine kapazitätsorientierte Betrachtung durchgeführt. Wie in Abschnitt 2.4.2.2 ausgeführt, kann sich diese entweder auf einen Zubau von Basisstationen oder auf einen Bandbreitenbedarf bei gegebenem Basisstationsmengengerüst fokussieren.

Grundlage für beide Varianten ist die Bestimmung der gesamten Verkehrskapazität im Mobilfunknetz. Hierzu zeigt Abbildung 2-20 die aggregierten Datenratenanforderungen in Downlink- und Uplink-Richtung für die drei SMGW-Durchdringungsszenarien sowie für den durch Endkonsumenten verursachten Verkehr. Dabei ist zu beachten, dass eine logarithmische Skalierung der y-Achse verwendet wurde, um die Lesbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Unter der Maßgabe der angenommenen Mengengerüste ergibt sich, dass der SMGW-Verkehr – selbst bei einer Durchdringung der Hälfte aller Haushalte in Deutschland – lediglich eine kumulierte Datenratenanforderung von weniger als 8 Gbit/s¹⁰³ im Downlink induziert. Im Vergleich hierzu liegt der aggregierte Downlink-Datenratenbedarf der Endkonsumenten bei über 400 Gbit/s. Damit liegt der SMGW-Verkehr in der Spitze bei einer Höhe von 2 % des Endkonsumentenbedarfs im Downlink bzw. 1 % im Uplink.

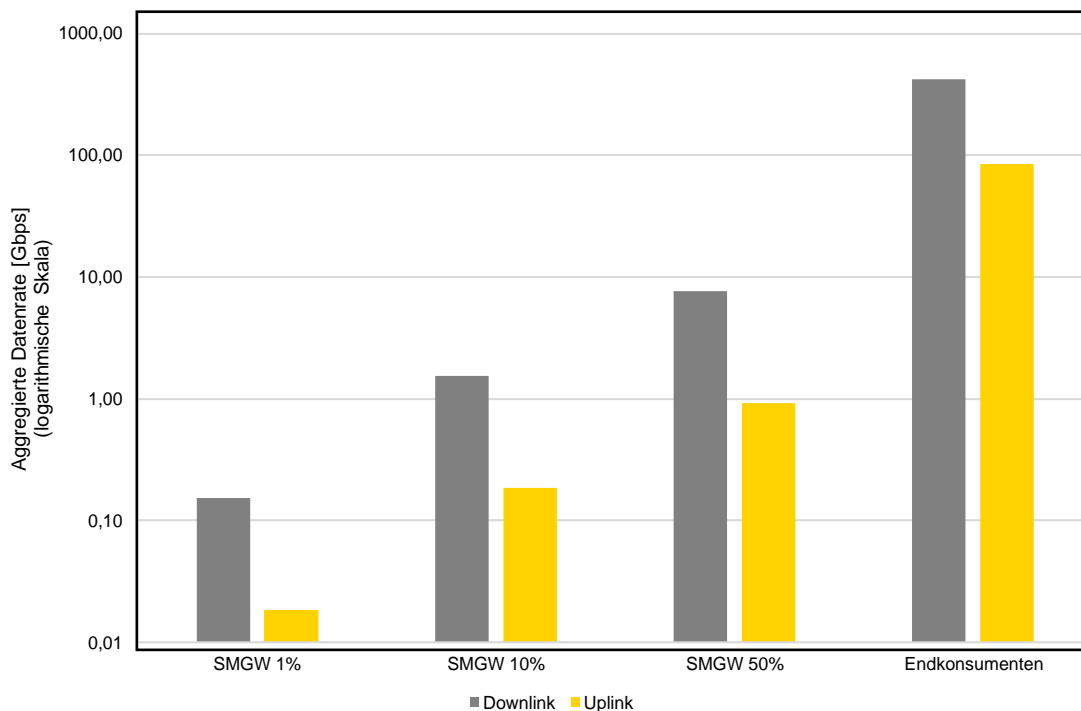


Abbildung 2-20: Erforderliche aggregierte Datenrate in Downlink- und Uplink-Richtung für SMGW-Anwendungen und Endkonsumenten

¹⁰³ Herleitung auf Basis des die Auslastung dominierenden FNN Anwendungsfalls.

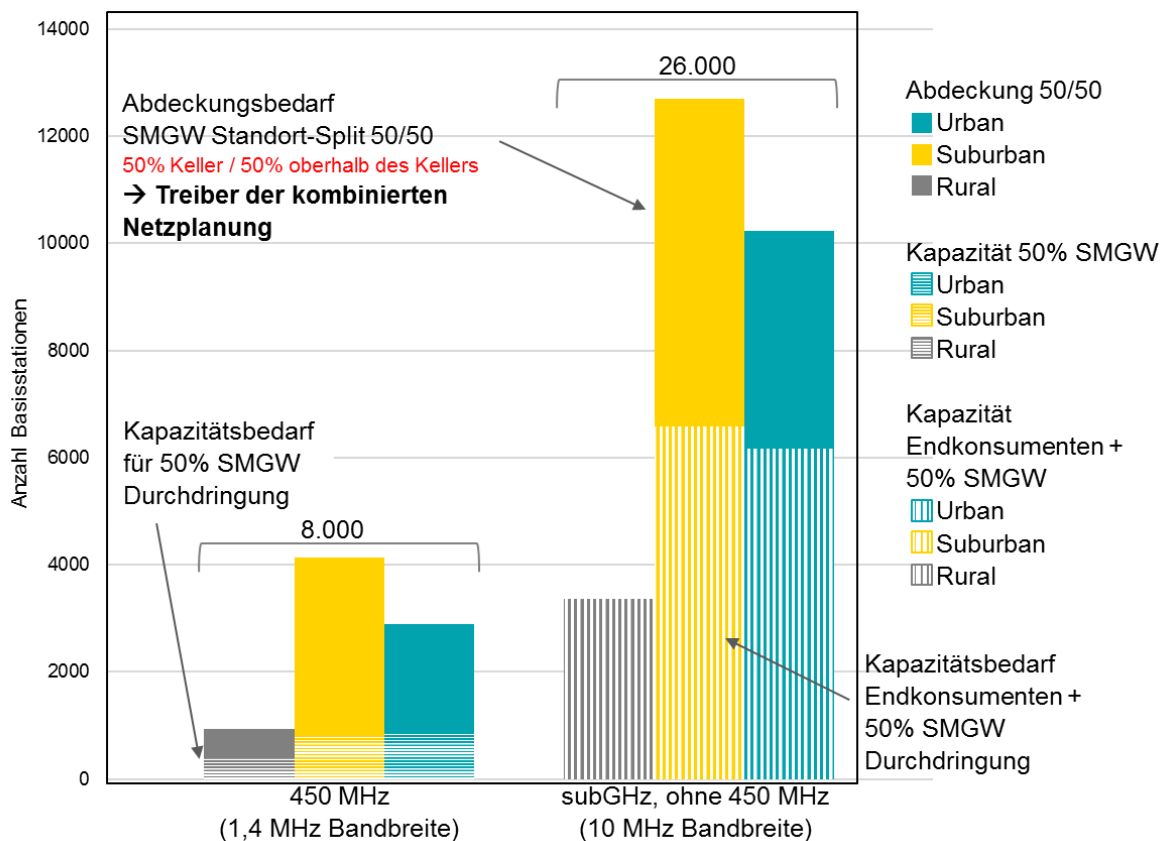


Abbildung 2-21: Basisstationsbedarf in Deutschland im Hinblick auf Kapazitäts- und Abdeckungsziele

Anknüpfend an diese Betrachtung zeigt Abbildung 2-21 den Basisstationsbedarf bei Kombination der beiden Dimensionierungsziele Abdeckung und Kapazität für den Fall des dedizierten 450-MHz-LTE-Netzes sowie den des öffentlichen Mobilfunknetzes. In Hinblick auf die Abdeckung ist hier jedoch ausschließlich das Mengengerüst für das Deep-Indoor / Indoor-Abdeckungsziel dargestellt, da dieses für die SMGW-Anbindung ausschlaggebend ist. Flächig gefüllte Säulen illustrieren jeweils das abdeckungs-basierte Mengengerüst, während schraffierte Flächen den Kapazitätsbedarf abgrenzen. Dieser unterscheidet sich zwischen den beiden Netztypen. Während für das 450-MHz-Netz ausschließlich SMGW-Verkehr berücksichtigt wird (horizontale Schraffur), bedient das öffentliche Netz sowohl SMGW-Anwendungen als auch Endkonsumentenverkehr (vertikale Schraffur). Es zeigt sich eindeutig, dass für beide Netztypen der Abdeckungsbedarf dominiert und somit maßgeblich die Gesamtdimensionierung bestimmt. Dementsprechend sind die Säulen des abdeckungs-basierten Mengengerüsts äquivalent zu denen der kombinierten Netzplanung. Eine Ausnahme hierzu bildet lediglich die Versorgung des ruralen Raums mittels öffentlicher Mobilfunkinfrastrukturen. In diesem Fall übersteigt der kapazitätsorientierte Bedarf die entsprechende Abdeckungsanforderung. Gemäß der hier durchgeführten Modellrechnung liegt der Gesamtbedarf bei ca. 8.000 und 26.000 Basisstationen für die 450-MHz-Infrastruktur bzw. das öffentliche LTE-Netz. Insgesamt zeigt sich, dass eine abdeckungszielerfüllende Deep-Indoor-Netzdimensionierung zu Überkapazitäten führt. Es bieten sich folgende Optionen an:

- Berücksichtigung von *Multi-Vendor* bzw. *National-Roaming*-Ansätzen, um den Ausbaubedarf von Basisstationen im öffentlichen Mobilfunknetz für einen einzelnen Netzbetreiber zu minimieren.

- Parallele Nutzung des Netzes für weitere Anwendungen. So könnte ein 450-MHz-Netz durch weitere kritische Infrastrukturen genutzt werden.

Im Folgenden wird näher auf Multi-Vendor und National-Roaming-Konzepte eingegangen.

2.4.2.7 Multi-Vendor-Strategie und Global-SIM-Karte

Die Nutzung mehrerer Mobilfunkinfrastrukturen ermöglicht es, Abdeckungslücken zu schließen und die Verkehrslast auf mehrere Netze zu verteilen. Dabei lassen sich zwei Varianten unterscheiden:

- **Multi-Vendor-Strategie:** Es bestehen vertragliche Beziehungen zu mehreren Netzbetreibern. In Abhängigkeit zur lokalen Verfügbarkeit wird Netzbetreiber A oder Netzbetreiber B für einen bestimmten Standort ausgewählt. Die lokale Verfügbarkeit muss entweder im Vorfeld gemessen oder über Verfügbarkeitsmodelle abgeschätzt werden. Grundsätzlich sind Multi-Vendor-Strategien im Einkauf weit verbreitet, um einseitige Abhängigkeiten zu bestimmten Anbietern zu vermeiden.
- **Global-SIM-Karten:** Durch den Einsatz von ausländischen SIM-Karten, kann die SIM-Karte des Netzbetreibers A in Abhängigkeit zur Verfügbarkeit auf das Mobilfunknetz des Betreibers B oder sogar C ausweichen (abhängig von den Roamingvereinbarungen). Eine Abschätzung der Verfügbarkeit vor Ort ist nicht zwingend notwendig, weil die Netzauswahl dynamisch vor Ort durchgeführt werden kann. Auch bei einem Netzausfall des einen Netzes, kann ein ebenfalls verfügbares, anderes Netz genutzt werden. Einschränkend ist anzumerken, dass nicht automatisch ein Wechsel in das stärkste Netz erfolgt, solange das Heimnetz noch mit geringer Signalstärke verfügbar ist. Ein Wechsel findet erst statt, wenn das Endgerät (SMGW) dies unterstützt. Die SMGW-Planung sieht dies nicht vor. Das kann Auswirkungen auf die Qualität der Datenübertragung haben. Expertenbefragungen ergaben, dass die Verfügbarkeit bei ca. 76 % liegt. Dieser Wert kann sich durch den weiteren Netzausbau, der durch Versorgungsaufgaben bei 700 MHz getrieben wird, weiter nach oben bewegen.
- Sofern in einer Multi-Vendor-Strategie nur nationale SIM-Karten zum Einsatz kommen, besteht noch die Option, dass ein Mobilfunknetzbetreiber mit einer internationalen SIM-Karte arbeitet, die sich in alle am Einsatzort verfügbaren Mobilfunknetze einbuchen kann.

Im Rahmen der Vernetzung von SMGWs könnte die kombinierte Nutzung mehrerer Mobilfunknetze insbesondere zur Erzielung einer angemessenen Deep-Indoor-Abdeckung hilfreich sein. Unter der Voraussetzung, dass sich die Netze ergänzen, d. h. über unterschiedliche Basisstationsstandorte eine schwache Abdeckung des einen Netzes durch eine gute Abdeckung des anderen Netzes ergänzt wird, ergibt sich ein großes Potential für Synergieeffekte. Die Abbildung 2-22 illustriert denkbare Szenarien und das jeweilige Potential in Abhängigkeit der Komplementarität der Netze.

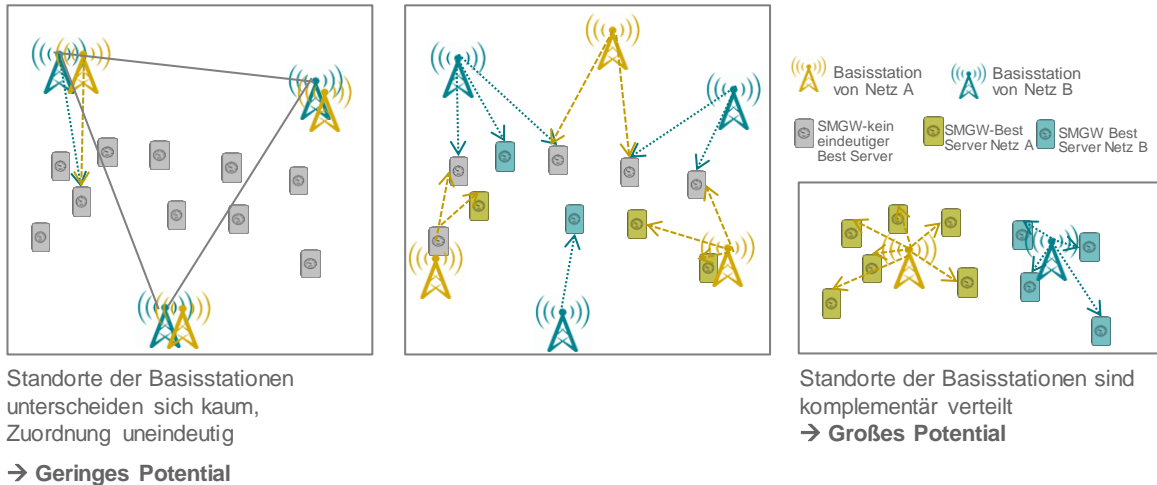


Abbildung 2-22: Illustration der unterschiedlichen Komplementarität von Mobilfunkinfrastrukturen am Beispiel von zwei Mobilfunknetzen

Im Anhang B wird die unterschiedliche Komplementarität von Mobilfunknetzen an einem Netzausschnitt beispielhaft illustriert. Die Ergebnisse des Beispiels können jedoch keinesfalls verallgemeinert werden: Die Komplementarität muss jeweils spezifisch für unterschiedliche Netze analysiert werden. Systematische Untersuchungen zur Komplementarität verschiedener LTE-Netze liegen aktuell nicht vor.

Daher wird für die Zwecke des Gutachtens wie folgt vorgegangen: Es werden bezogen auf das berechnete Mengengerüst zur Erzielung einer angemessenen Abdeckung unterschiedliche Grade der Komplementarität zwischen 0 und 30 % betrachtet. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass es in Deutschland aktuell drei öffentliche Mobilfunknetze gibt, wird im Rahmen des Gutachtens die Komplementarität jeweils für zwei und drei Netze betrachtet. Wie zuvor in Abschnitt 2.4.2.6 gezeigt, ist dieser Bedarf maßgeblich durch Deep-Indoor-Abdeckungsziele verursacht. Unter Berücksichtigung der oben eingeführten Grade der Komplementarität lässt sich der jeweilige Ausbaubedarf bezogen auf die Anzahl real existierender LTE-Basisstationen in Deutschland (48.146¹⁰⁴) für die verschiedenen Regionstypen ableiten (vgl. Abbildung 2-23).

¹⁰⁴ Statista: Anzahl der LTE-Basisstationen in Deutschland in den Jahren 2012 bis 2017, online verfügbar: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/793776/umfrage/anzahl-der-lte-basisstationen-in-deutschland/>

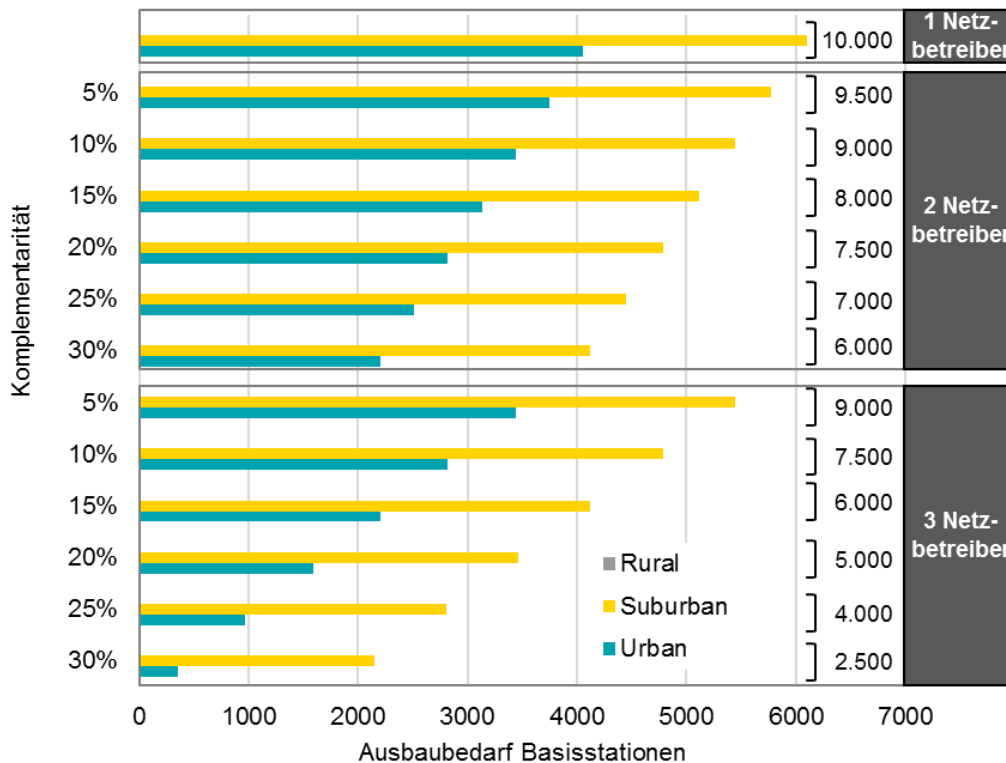


Abbildung 2-23: Basisstationsausbaubedarf unter Berücksichtigung verschiedener Varianten des Einsatzes einer globalen SIM

2.4.2.8 Bandbreitenbedarf von SMGW-Anwendungen

Nachdem zuvor vor allem die Anzahl der notwendigen Basisstationen zur Erfüllung des Abdeckungsziels im Vordergrund stand, wird nachfolgend betrachtet, welcher Bandbreitenbedarf mit den SMGW-Anwendungen verbunden ist.

Der Bandbreitenbedarf ergibt sich dabei unter Berücksichtigung der zuvor durchgeführten Zellplanung und der Dichte der SMGW/pro Fläche. Gemäß den zuvor beschriebenen Annahmen, wird hierbei davon ausgegangen, dass die Bandbreite exklusiv bereit gestellt wird (d. h. über Priorisierungs- und Reservierungsmechanismen). Dabei werden zwar regionenspezifische Unterschiede in der Dichte berücksichtigt, jedoch basieren die hier vorgestellten Modellrechnungen auf der Annahme von geografisch gleichverteilten SMGW-Standorten. Somit wird der tatsächliche Bandbreitenbedarf in der Praxis zellspezifisch deutlich variieren. Die Ergebnisse der hier vorgestellten Modellrechnung geben aber – unter Berücksichtigung eines Sicherheitsfaktors von 2-3 – Hinweise auf die durchschnittliche Größenordnung des Bedarfs.

Die Untersuchung in Abbildung 2-24 zeigt den Bandbreitenbedarf von SMGW-Anwendungen bei Nutzung des abdeckungsorientierten Basisstationsmengerüstes unter Berücksichtigung verschiedener Realisierungsstufen der SMGW-Durchdringung. Abermals werden die beiden Netztypen des dedizierten 450-MHz-Netzes mit 1,4 MHz verfügbarer Bandbreite und das öffentliche LTE-Netz mit 10 MHz Bandbreite unterschieden. Im Fall des dedizierten LTE-Netzes bei 450 MHz ergibt sich in der Spitze bei 50 % SMGW-Durchdringung ein Bandbreitenbedarf von unter 0,6 MHz im Downlink und ca. 0,14 MHz im Uplink. Es zeigt sich, dass ein Funkband mit 1,4 MHz Bandbreite unter Berücksichtigung eines Sicherheitsfaktors ausreichend erscheint. Bei Nutzung bestehender öffentlicher Mobilfunknetze liegt der Bandbreitenbedarf mit etwa 200 kHz bzw. 50 kHz in Down- und Uplink noch einmal deutlich unter der Erfordernis im 450-MHz-Netz. Dies ist begründet durch das grundlegend höhere

Basisstationsmengengerüst der bestehenden Infrastruktur. Dadurch steht in diesen Netzen eine höhere Verkehrskapazität zur Verfügung.

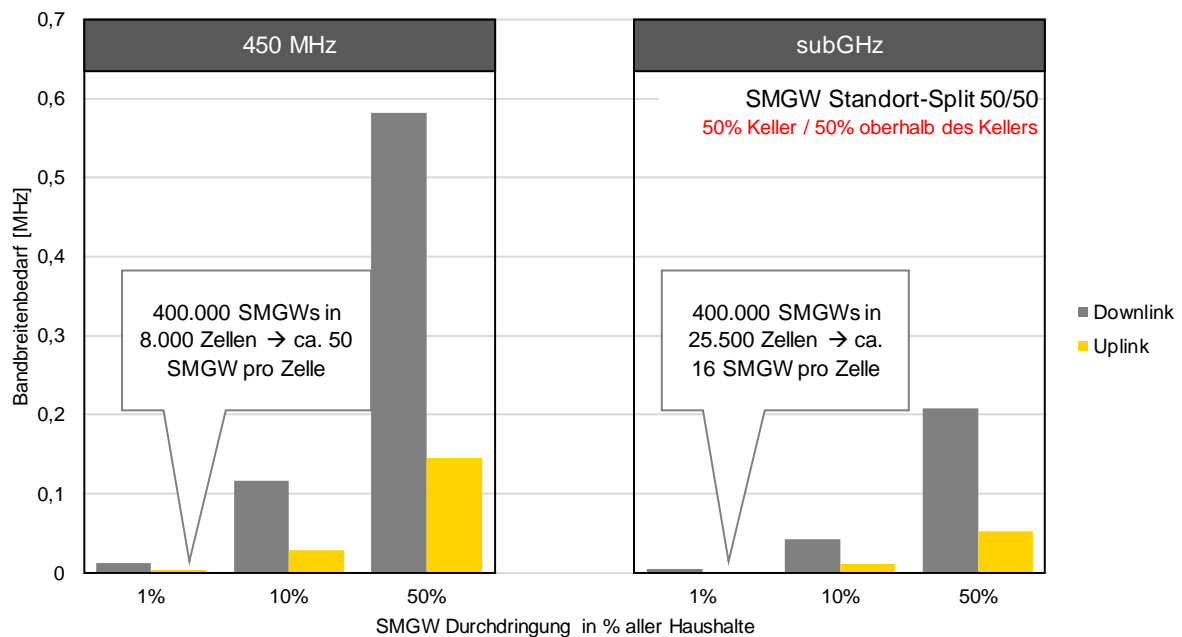


Abbildung 2-24: Bandbreitenbedarf von SMGW-Anwendungen auf Grundlage des abdeckungsorientierten Mengengerüsts an Basisstationen

Ergänzend zeigt Abbildung 2-25 den Bandbreitenbedarf, welcher entsteht, wenn zusätzlich zum Smart Metering (FNN-Verkehr) der Verkehr aus der Netzzustandsüberwachung berücksichtigt wird. Als Referenz dient der Fall von 50 % SMGW-Durchdringung ohne NZÜ. Davon ausgehend werden unterschiedliche Ausbaustufen der NZÜ untersucht. Dabei bedeutet beispielsweise 10 % NZÜ, dass 10 % der SMGW für die NZÜ eingesetzt werden, bei einem SMGW-Mengengerüst von 50 % (ca. 20 Millionen Stück deutschlandweit) bedeutet dies eine Nutzung von 2 Millionen SMGW in Deutschland. Es zeigt sich, dass die NZÜ eine kaum merkbare Auswirkung auf den Bandbreitenbedarf in Downlink-Richtung hat. Im Gegensatz dazu lässt sich ein nicht unbedeutender Anstieg in Uplink-Richtung feststellen. So steigt im Fall des 450-MHz-Netzes der Uplink-Bandbreitenbedarf von etwa 140 kHz auf über 270 kHz. Ein ähnliches Verhalten gilt auch für das öffentliche Mobilfunknetz. Eine ergänzende Betrachtung zum Einfluss der NZÜ auf die Netzdimensionierung findet sich anhand unterschiedlicher Energietztypen in Anhang F: Einfluss der Netzzustandsüberwachung auf die LTE-Netzplanung.

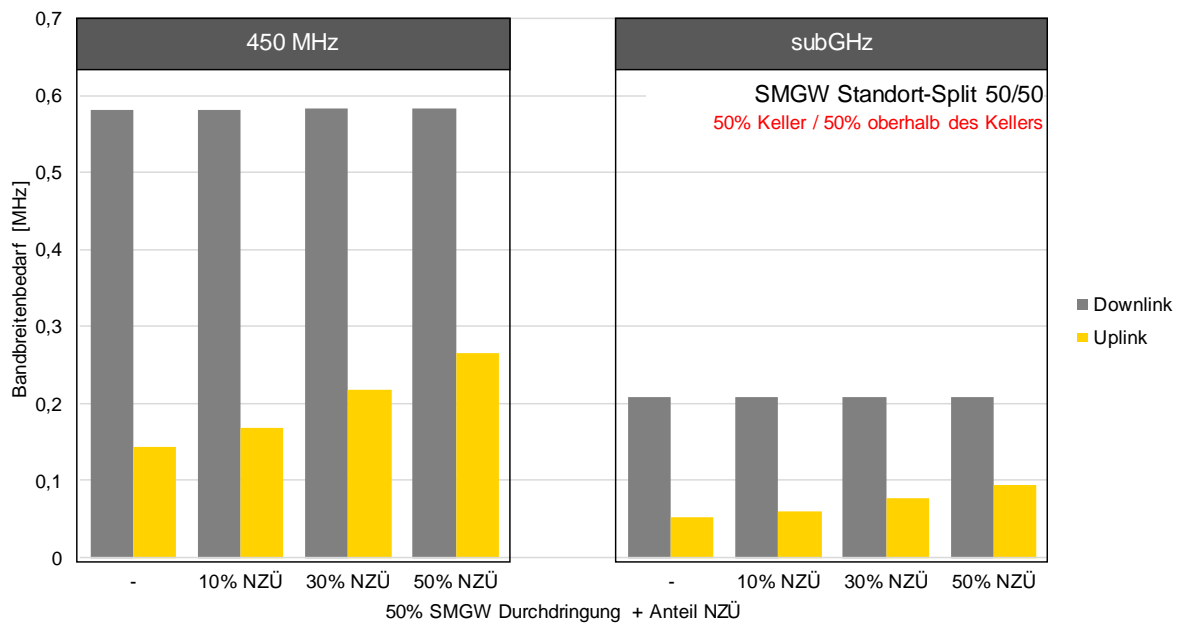


Abbildung 2-25: Bandbreitenbedarf von SMGW-Verkehr (50 % Durchdringung) und verschiedene Anteile von NZÜ Verkehr auf Grundlage des abdeckungsorientierten Mengengerüsts an Basisstationen

2.4.3 Realisierungsvarianten zur Verdichtung der Infrastruktur

In Ergänzung zu der im vorherigen Abschnitt ausgeführten Option des National Roamings, werden im Folgenden weitere Möglichkeiten zur Verbesserung der Erreichbarkeit schwieriger Einbaufälle diskutiert:

- Verdichtung mittels eMTC (LTE-M) / NB-IoT: Beide Technologien basieren auf LTE und können an bestehenden Mobilfunkstandorten punktuell ergänzt werden. Bei gleichzeitig geringerer Verkehrskapazität erzielen sie eine höhere Reichweite und könnten so für die notwendige Anbindung in Kellerräumen sorgen. Unter Berücksichtigung des gezeigten geringen Gesamtkapazitätsbedarfs der SMGW-Anwendungen werden die von diesen Technologien gebotenen Datenraten bei einem vergleichsweise geringen MCL von 144 dB als ausreichend eingeschätzt, um eine begrenzte Anzahl von Endgeräten in Randbereichen bestehender Mobilfunkzellen zu bedienen. Für beide Technologien gilt, dass für einen flächendeckenden Einsatz die spektrale Effizienz im Zellverbund zunächst empirisch zu evaluieren ist. Ebenso ist fallweise, solange die Verfügbarkeit gegeben ist, eine Anbindung mittels EDGE denkbar.
- Verdichtung mittels PLC: In Randbereich von Mobilfunkzellen können dedizierte PLC Infrastrukturen aufgebaut werden. Insbesondere bei Kombination mit einem neu aufzubauenden LTE-Netz bei 450 MHz scheint dies eine interessante Option darzustellen, da so das abdeckungsgetriebene Mengengerüst ggf. deutlich reduziert werden kann. In Verbindung mit einem bestehenden öffentlichen Mobilfunknetz zeigt sich diese Variante – insbesondere angesichts des Potenzials von National Roaming – als deutlich weniger relevant, da durch National Roaming bereits eine nahezu vollständige Erreichbarkeit hergestellt werden kann.

Abbildung 2-26 illustriert in einem Vergleich die unterschiedlichen Realisierungsmöglichkeiten zur Erzielung einer flächendeckenden Erreichbarkeit von SMGWs bei Einsatz von LTE als Basistechnologie.

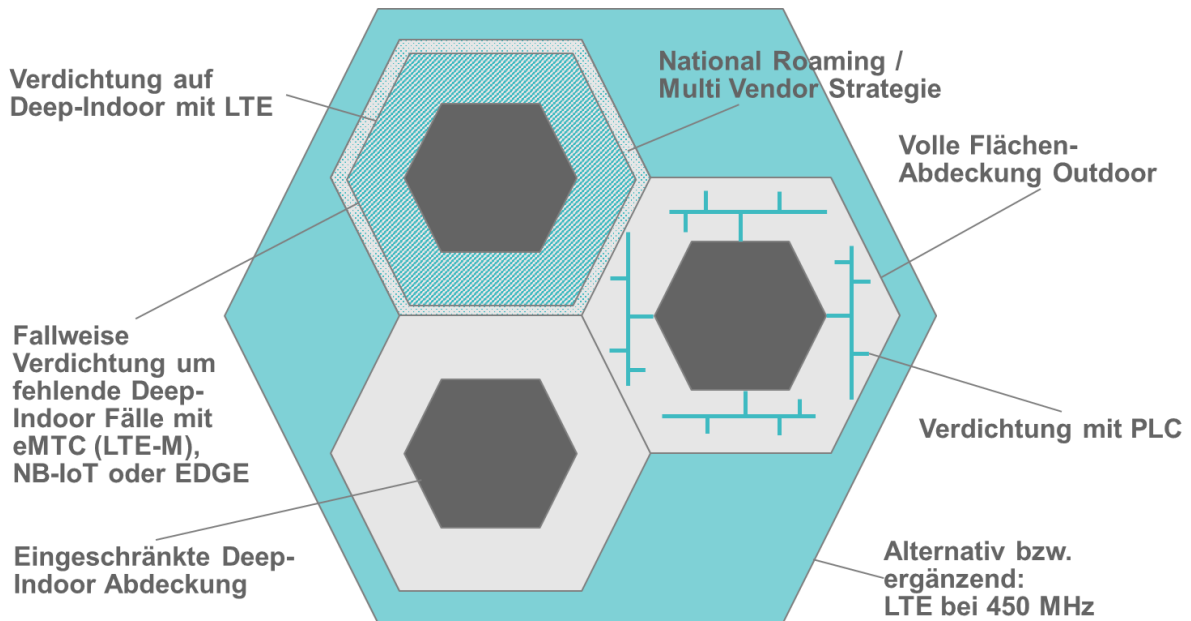


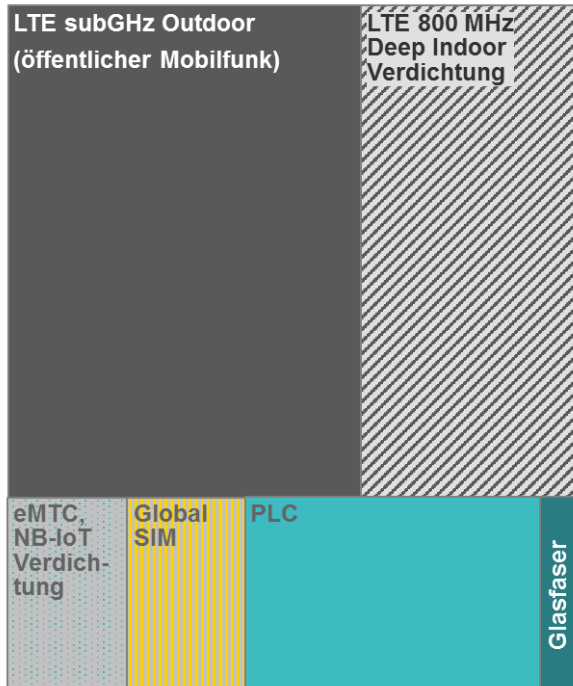
Abbildung 2-26: Gegenüberstellung unterschiedlicher Verdichtungsoptionen zur Erhöhung der flächendeckenden Erreichbarkeit von SMGWs bei Nutzung von LTE als Haupttechnologie

2.5 Zwischenfazit

Unterschiedliche verfügbare TK-Infrastrukturen sind grundsätzlich geeignet, die für die flächendeckende Einführung von SMGWs, gemäß der aus dem Gesetz zur Digitalisierung der Energiewende abgeleiteten technischen Anforderungen, zu erfüllen. Jedoch müssen alle hierfür betrachteten Kommunikationstechnologien und -netze mit weiteren Technologien zusammen betrachtet werden. So deckt der öffentliche Mobilfunk nicht alle SMGW örtlich ab, so dass es entweder eine Netzverdichtung geben muss oder eine zusätzliche Technologie (wie Breitbandpowerline) kommt zum Einsatz. Die Nutzung einiger technisch geeigneter TK-Infrastrukturen unterliegt aus rechtlichen, regulatorischen oder organisatorischen Gründen gewissen Einschränkungen.

Im Ergebnis zeigt die technische Analyse, dass mehrere Kommunikationstechnologien und -netze zur Verfügung stehen, die dann in einem Technologiemix genutzt werden können, um einzelne energiewirtschaftliche Anwendungen anzubinden.

Fokus SMGW



Synergetische Nutzung SMGW und Verteilernetz

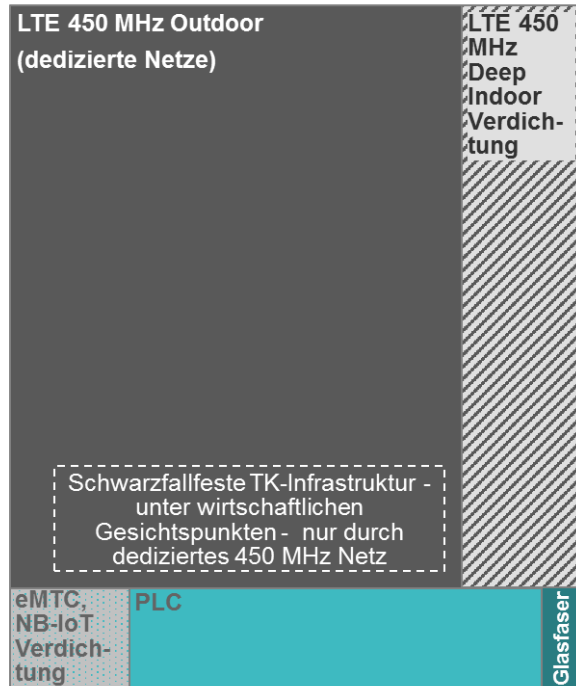
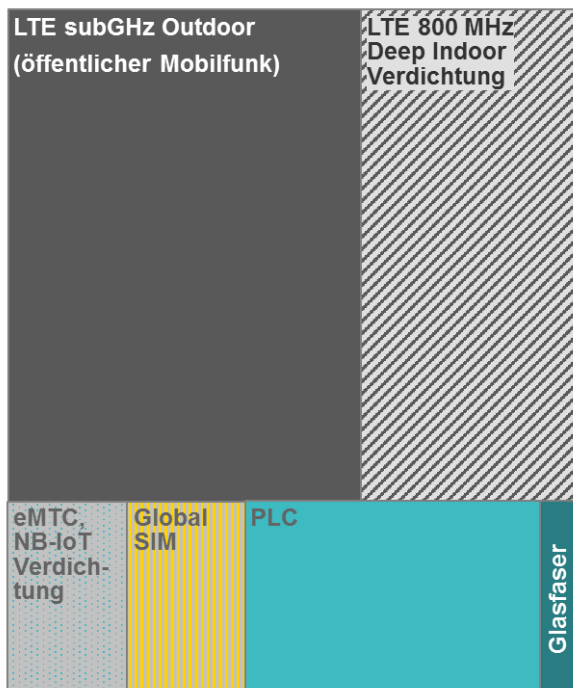


Abbildung 2-27 zeigt qualitativ gewichtete, hybride Lösungskonzepte zur flächendeckenden Versorgung, unterschieden nach Anwendungen des Energiesektors. Die Anforderungen von Verteilernetzen an Notfall-Kommunikation und Schwarzfallfestigkeit können auf der Basis eines dedizierten Mobilfunknetzes bei 450 MHz am wirtschaftlichsten realisiert werden. Dies bedeutet auch, dass ein 450-MHz-Mobilfunknetz in einer Hybridlösung für eine synergetische Nutzung von Anwendungen, die eine Steuerung und Kontrolle von Betriebsmitteln und eine sichere Integration von EEG-Anlagen parallel mit den Anwendungen, die auf das Smart-Meter-Gateway zugreifen, erfordern, geeignet ist (siehe

Fokus SMGW

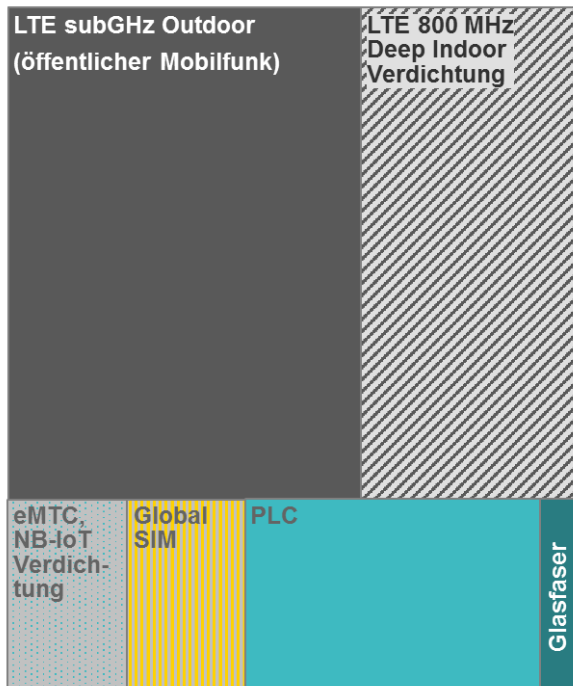


Synergetische Nutzung SMGW und Verteilernetz



Abbildung 2-27, rechts).

Fokus SMGW



Synergetische Nutzung SMGW und Verteilernetz



Abbildung 2-27: Qualitativer Technologiemix bei Fokus auf SMGW-Vernetzung (links) bzw. bei synergetischer Nutzung von SMGWs und Verteilernetz Anwendungen.

Im Einzelnen heißt dies:

- **Kabelgebundene Infrastrukturen** (DSL, Breitbandkabel, Glasfaser) sind – wenn diese bereits in den Haushalten vorhanden sind – aus technischer Sicht sehr gut geeignet, die Anforderungen zu erfüllen; jedoch ist kein wirtschaftlich und technisch tragfähiges Betriebskonzept zu sehen, das beispielsweise eine vom Internetverkehr des Endkunden entkoppelte Anbindung des SMGWs zulässt. Gleichzeitig muss im Gebäude entweder eine Leitung vom Zugangsrouten zum SMGW geführt werden, was mit Aufwand verbunden ist und ggf. auch nicht auf die Akzeptanz des Endkunden stößt. Auch bei Neubauten ist eine solche Infrastruktur nicht zwingend vorhanden, weil es keine Einbauverpflichtung mehr gibt. Alternativ erfolgt die Anbindung über Funk oder Powerline. Wird ein Mehr-Sparten-Ansatz verfolgt, wird eine leitungsgebundene Lösung mit hohen Aufwendungen verbunden sein.
- **Die Power Line Communication (PLC)-Technik** bietet in der breitbandigen Variante (BB-PLC) grundsätzlich Potential für die Anbindung von SMGWs. Eine Anwendung in anderen Bereichen des Verteilernetzes (z. B. Notfall-/Krisenkommunikation) scheidet aus technischen (keine Unterstützung von Sprachdiensten) und wirtschaftlichen Gründen (hohe Anzahl aktiver Komponenten für eine Notstromversorgung) allerdings aus. Expertengespräche bezüglich der durchgeführten Pilotversuche zur Anbindung von SMGWs ergeben ein sehr uneinheitliches Bild. Die Leistungsfähigkeit der Lösung scheint im Wesentlichen vom eingesetzten Standard abhängig zu sein. Aufgrund von begrenzten Reichweiten kommt die PLC-Technik vor allem für die Überbrückung der Strecke zwischen Unterstationen und SMGWs in urbanen oder suburbanen Räumen in Frage. Für die Verbindung zwischen Unterstationen und dem SMGW-Administrator muss jedoch eine weitere (Weitverkehrs-) Technologie – typischerweise Mobilfunk, DSL, künftig Glasfa-

ser – zum Einsatz kommen, da Unterstationen heute typischerweise noch nicht an Kernnetz-Infrastrukturen angebunden sind. Auch wenn das Problem der Erreichbarkeit von Kellern mit Hilfe von BB-PLC ohne aufwändige Installationsmaßnahmen beim Endkunden gelöst werden könnte, so besteht weiterhin eine Abhängigkeit zu einer Mobilfunkinfrastruktur oder anderen öffentlich betriebenen TK-Infrastrukturen: Einerseits sind weit abgelegene SMGW-Standorte nur mit sehr viel Aufwand (Einsatz von Repeatern) zu erreichen oder über andere Technologien zu erschließen und andererseits müssen die Unterstationen vernetzt werden. Es bestehen im Vergleich zu alternativen Lösungen deutlich mehr aktive Komponenten als bei anderen Kommunikationstechnologien, die angreifbar, schwarzfallfähig oder geschützt werden müssten. Sollen beispielsweise um eine hohe Verfügbarkeit der Netzstatusüberwachung zu gewährleisten die entsprechenden Stränge in Ortsnetzstationen schwarzfallfähig gemacht werden, so sind die entsprechenden Ortsnetzstationen mit Batterien oder Notstromversorgung auszustatten. Dies kann je nach Netzgröße eine dreistellige Anzahl sein. Im Vergleich dazu müssen bei Funklösungen die relevanten Basisstationen und Elemente des Kernnetzes mit Batterien (oder Notstromaggregaten) ausgestattet werden, wodurch weniger aktive Elemente „gehärtet“ werden müssten. Der Aufbau und Betrieb einer spezifischen PLC-Infrastruktur ist vor diesem Hintergrund immer nur als Teil einer komplexeren Gesamtlösung denkbar. Sie erscheint nur für jene Fälle attraktiv, in denen die unten näher erläuterten, rein mobilfunkgestützten Varianten aus technischen, ökonomischen oder regulatorischen Gründen nicht umsetzbar sind.

- **Mobilfunk-Infrastrukturen** (z. B. LTE) sind geeignet, eine direkte Verbindung zwischen SMGW-Administrator und den SMGWs ohne Eingriff in die Infrastruktur des Endkunden zu realisieren. Die Herausforderung beim Einsatz öffentlicher Mobilfunknetze besteht hier jedoch in der nachträglichen Abdeckung im Gebäude (bis in den Keller als häufigem Standort der SMGWs). Die mobilfunktechnische Erschließung von Gebäuden bis in Kellerräume ist mit der notwendigen Abdeckung von 95 % technisch möglich, jedoch mit unterschiedlichem, zum Teil hohem Aufwand verbunden. In den detaillierten Untersuchungen zur möglichen Ausgestaltung entsprechender Infrastrukturen sind drei Varianten betrachtet worden:
 - a. Die Nutzung einer **bestehenden LTE-Infrastruktur eines einzelnen Netzbetreibers** erfordert jeweils eine deutliche Verdichtung der Basisstationen (ca. 10.000), um das Abdeckungsziel von 95 % der möglichen SMGW-Standorte zu erreichen. Ob die Anbindung von SMGWs entsprechende Investitionen auslöst, ist mehr als fraglich. Kapazitätsengpässe sind hingegen nicht zu befürchten, insbesondere wenn durch eine Priorisierung bzw. exklusive Ressourcenzuweisung eine Wechselwirkung mit anderen Diensten ausgeschlossen wird.
 - b. Der Einsatz von **globalen SIM-Karten** und der weitere Ausbau der LTE-Netze im Zuge der Erfüllung von Versorgungsaufgaben werden in Kombination dazu führen, dass sich die Deep-Indoor-Verfügbarkeit erhöhen kann. Sofern bei der Netzverdichtung Kapazitätsfrequenzen oberhalb von 1 GHz eingesetzt werden, werden die Effekte aber begrenzt sein. Damit können bestimmte Anwendungsfälle, die den Aspekt der Schwarzfallfestigkeit ausklammern, realisiert werden. Jedoch ist heute noch nicht absehbar, wie sich die Deep-Indoor-Versorgung verbessern wird. Ebenso ist noch offen, ob in den öffentlichen Mobilfunknetzen vor der Einführung von 5G eine Priorisierung des spezifischen Datenverkehrs eingeführt wird. Die entsprechenden Kosten dafür sind ebenfalls unbekannt.

- c. Neben der Nutzung bereits existierender LTE-Infrastrukturen wurde auch der Ansatz des Aufbaus einer **Mobilfunk-Infrastruktur für die Energiewirtschaft im Bereich 450 MHz** untersucht. Die günstigeren Dämpfungseigenschaften führen zu einem geringeren Mengengerüst. In einem dedizierten Funknetz in diesem Frequenzband kann zudem den spezifischen Eigenheiten der jeweiligen Verteilernetze entsprechend Rechnung getragen werden. Synergetische Nutzung mit Smart-Grid-Anwendungen und der Betriebskommunikation, die beide nach Expertenauffassung Schwarzfallfähigkeit beanspruchen, sind hier zudem gegeben. Aus Sicht der Engpassanalyse wäre ein auf Deep-Indoor-Abdeckung geplantes Netz bereits mit einer Bandbreite von 1,4 MHz mit ausreichender Kapazität ausgestattet. Hier ist aber zu beachten, dass bereits bestehende CDMA-Nutzungen (z. B. bei EWE) auf LTE migriert werden müssten. Stünde nur ein 1,4-MHz-Träger zur Verfügung, könnte eine Migration nicht vorgenommen werden. In diesem Fall wäre der zweite Träger (3 MHz) notwendig. Ebenso bedingt eine spätere Migration auf 5G voraussichtlich mehr als einen 1,4-MHz-Träger. Zu prüfen ist ebenso, ob die Kapazität eines 1,4-MHz-Trägers in den nächsten Jahren ausreicht.

3 TK-Regulierung

Kapitel auf einen Blick

Die technische Analyse hat ergeben, dass es seitens der Telekommunikationsinfrastruktur Engpässe bzw. Restriktionen gibt, wenn es gilt, synergetisch Telekommunikationsdienste zu nutzen, die sowohl netzkritische, betriebsnotwendige als auch nicht netzkritische Anwendungen parallel unterstützen. Hier ist die Frequenzregulierung für den Bereich 450 MHz in Deutschland angesprochen. Hinsichtlich leitungsgebundener TK-Infrastrukturen ist für einen Teil der relevanten Anwendungen eine Glasfaseranbindung relevant. Wir betrachten ebenfalls noch die Frage, ob die Netzneutralität eine Restriktion für die energiewirtschaftlichen Anwendungen darstellt sowie welche Erfahrungen es in einzelnen europäischen Ländern im Zusammenhang mit dem Rollout von Smart Metern gibt.

Im Ergebnis zeigt sich, dass die Frequenzregulierung bei 450 MHz nachhaltig die Digitalisierung der Energiewende beeinflussen kann. Wenn die Frequenzen über das Jahr 2020 weiterhin für energiewirtschaftliche Anwendungen zur Verfügung stehen, besteht die Option, dass Telekommunikationsdienste sowohl für Smart-Grid- als auch Smart-Market-Anwendungen synergetisch zur Verfügung stehen. Alternative Technologien erfüllen nicht sämtliche energiewirtschaftliche Anforderungen. Die Regulierung im Bereich der Netzneutralität steht einer Digitalisierung von energiewirtschaftlichen Prozessen nicht im Wege. Es können Spezialdienste mit einer Priorisierung der Datenübertragung (Abweichung vom Best-Effort-Prinzip) angeboten werden, die den Anforderungen der Energiewirtschaft entsprechen. Im Hinblick auf die Nutzung von Glasfaser kann die Regulierung mittelbar die Digitalisierung der Energiewende unterstützen, indem der Ausbau von FTTB/H-Netzen weiter angereizt wird und die symmetrische Regulierung nicht Investitionsanreize nimmt. Die asymmetrische Regulierung im TK-Markt ist hier nicht einschlägig, da grundsätzlich und überwiegend Endkundenprodukte auf Märkten nachgefragt werden, die nicht der Marktregulierung unterfallen (z. B. Endkundenmärkte im Mobilfunk).

3.1 Einleitung

Im ersten Teil des Gutachtens haben wir eine im Wesentlichen auf technische Aspekte abhebende Analyse von Kommunikationstechnologien und -infrastrukturen vorgenommen. Das Ergebnis hierbei ist, dass leitungsgebundene und Funktechnologien (LTE, CDMA, 5G), die auf exklusiv zugeteiltes Frequenzspektrum zurückgreifen, grundsätzlich die technischen Leistungsanforderungen erfüllen. Telekommunikationsdienste, die auf Basis dieser Technologien am Markt von Telekommunikationsnetzbetreibern angeboten werden, sind somit für die Nachfrager, Verteilernetzbetreiber (VNB) und Messstellenbetreiber (MSB) relevant. Insbesondere zeigt die Analyse, dass eine Frequenznutzung bei 450 MHz für VNB und MSB eine Option ist, die breite Nachfrage nach Konnektivität abzudecken, die sowohl im Verteilernetz als auch rund um das SMGW besteht. Dort lassen sich die notwendige Schwarzfallfähigkeit und die Priorisierung der Datenübertragung (Quality of Service) vergleichsweise einfach und kostengünstig realisieren, so dass eine synergetische Nutzung über relevante energiewirtschaftliche Anwendungen möglich ist. Wesentliches Hindernis für die Umsetzung dieser Option sind die frequenzregulatorischen Rahmenbedingungen. Auf die Frequenzregulierung wird deshalb in diesem Teil des Gutachtens eingegangen.

Des Weiteren zeigt die technische Analyse, dass auch drahtgebundene Telekommunikationsinfrastrukturen entsprechend leistungsfähig im Hinblick auf die hier betrachteten Anwendungsfälle sind. Von besonderer Bedeutung ist hier die Option, Glasfaserzugangsnetze für die Anbindung von SMGW zu nutzen. DSL- und Breitbandkabel-Infrastrukturen spielen in der Praxis keine sichtbare Rolle im Zusammenhang mit der hier betrachteten Fragestellung. Glasfaserzugänge sind dagegen insbesondere für die Verteilernetzbetreiber, die auch im Telekommunikationsmarkt mit eigenen Glasfasernetzen aktiv sind,

eine interessante Option. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, ob die TK-Regulierung in diesem Bereich Impulse für die Digitalisierung der Energiewende leisten kann.

Zusammenfassend wird der Fragestellung nachgegangen, ob die regulatorischen Vorschriften für Telekommunikationsnetze und -betreiber, Einfluss auf das Angebot von Telekommunikationsdiensten für die Energiewirtschaft, auf die Technologieauswahl der Verteilnetzbetreiber / Messstellenbetreiber haben oder Geschäftsmodelle der Energienetzebetreiber beeinflussen. Somit stellt sich wie auch im Topthema 2 die Frage, ob der regulatorische Rahmen für den TK-Sektor hinsichtlich einer Unterstützung der Energiewende angepasst werden müsste. Es sei dabei noch erwähnt, dass in der Regel VNB und MSB Telekommunikationsdienste bei funkbasierten Technologien in öffentlichen TK-Netzen Telekommunikationsdienste nachfragen („buy“), während sie beispielsweise bei Glasfaser oder Breitbandpowerline auch eigene TK-Infrastrukturen aufbauen und betreiben können („make“).

3.2 Verfügbarkeit von Telekommunikationsinfrastrukturen und Kosten

Als Ausgangs- und Orientierungspunkt wird an dieser Stelle die Verfügbarkeit der relevanten Technologien dargestellt und entsprechenden Telekommunikationsdiensten. Die Technologien sind dabei an verschiedenen Punkten ihres Lebenszyklus. So wird EDGE beispielsweise nur dort eingesetzt, wo LTE noch nicht verfügbar ist. Des Weiteren befinden sich einzelne Technologien erst im Aufbau (CDMA 450, Powerline). Die derzeitige Verfügbarkeit der verschiedenen Technologien ist in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** dargestellt:

Tabelle 3-1: Verfügbarkeit verschiedener Technologien in Bezug auf Haushalte

	EDGE	LTE	xDSL	Koaxial	FTTH
Verfügbarkeit in %	99%	96%	96,7	62,8	9,5

Quellen: Statista (<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/442057/umfrage/verfuegbarkeit-von-verschiedenen-breitbandtechnologien-nach-bundesland/>), Breitbandatlas des Bundes (2017), teletarif (2017).

Bezüglich LTE ist weiterhin festzuhalten, dass es keine gesicherten Angaben über die Verfügbarkeit in der Fläche gibt. Expertenschätzungen gehen davon aus, dass aktuell eine Größenordnung zwischen 80 und 90 % der Fläche mit LTE versorgt werden. Mit der Erfüllung von Versorgungsaufgaben, die im Rahmen der Frequenzvergaben 2015 und 2019 auferlegt wurden, wird sich die Verfügbarkeit von mobilen Datendiensten in der Fläche verbessern.

Hinsichtlich der Bewertung der Kosten ist es zweckmäßig, die Gesamtkosten, also die Kosten über den gesamten Lebenszyklus der Technologie, zu betrachten. Es sollte dabei aber stets bedacht werden, dass die Kosten verschiedener Technologien oftmals nicht direkt verglichen werden können, da sie unterschiedliche und spezifische technische Parameter besitzen. So sind öffentliche Mobilfunknetze beispielsweise nicht schwarzfallfest und aufgrund der nicht eingerichteten Priorisierung von Datenverkehr nicht für netzdienliche bzw. netzkritische Anwendungen geeignet. Im Vergleich dazu ist die bereits im Markt befindliche Lösung im Bereich 450 MHz schwarzfallfähig.

Grundsätzlich ist zwischen der Errichtung einer dedizierten, eigenen Infrastruktur und der Nutzung öffentlicher Infrastruktur zu unterscheiden. Bei ersterer fallen durch Investitionsaufwand naturgemäß hohe Kosten zu Beginn des Lebenszyklus an. Bei letzterer fallen zunächst niedrigere Kosten an, abhängig von der Abdeckung des Netzgebiets und des Datenvolumens. Steigt das Verkehrsaufkommen im Netz, insbesondere durch die erhöhte Anzahl von Gateways, einer im Zeitverlauf zunehmend wichtigeren Netzzustandsüberwachung, weil die Anzahl von E-Mobilen anwächst, und der Einbindung externer

Marktteilnehmer, steigen mit höherem Datenvolumen die Kosten insgesamt und je SMGW entsprechend an. Im Bereich 450 MHz ist aktuell ein von öffentlichen Mobilfunknetzbetreibern abweichendes Geschäftsmodell erkennbar, das auf die Bereitstellung von Kapazitäten ausgelegt ist. In einem solchen Modell kann eine Kostensteigerung durch steigendes Datenvolumen ausbleiben. Abbildung 3-1 verdeutlicht diesen Zusammenhang **schematisch** für öffentlichen Mobilfunk, Powerline und ein eigenes, dediziertes 450-MHz-Funknetz. Hierbei ist ein Musternetzbetreiber unterstellt sowie netzdienliche als auch nicht netzdienliche Anwendungen. Das Datenvolumen hängt dabei von einer Reihe von Faktoren ab, unter anderem je nachdem, welches Szenario (Interims- oder Zielmodell) betrachtet oder bei wie vielen SMGWs die Netzzustandsüberwachung durchgeführt wird. Im Vergleich zu heute ist dabei zu konstatieren, dass es zu einem signifikanten Wachstum des Datenvolumens kommen wird. Die Kosten für einen Verteilnetzbetreiber oder Messstellenbetreiber hängen wiederum davon ab, welches Geschäftsmodell heute und in Zukunft beispielsweise die Mobilfunknetzbetreiber verfolgen. Stand heute steigen mit dem Datenvolumen die Kosten für Konnektivität. Etablieren sich dagegen kapazitätsorientierte Geschäftsmodelle insbesondere im Mobilfunk, ändern sich die Kostenkurven entsprechend. Die nachfolgende Darstellung basiert auf Preisen für relevante TK-Dienste von unterschiedlichen Telekommunikationsanbietern bzw. Stückkosten, die sich aus dem Aufbau und Betrieb von BPLC und CDMA ergeben könnten.

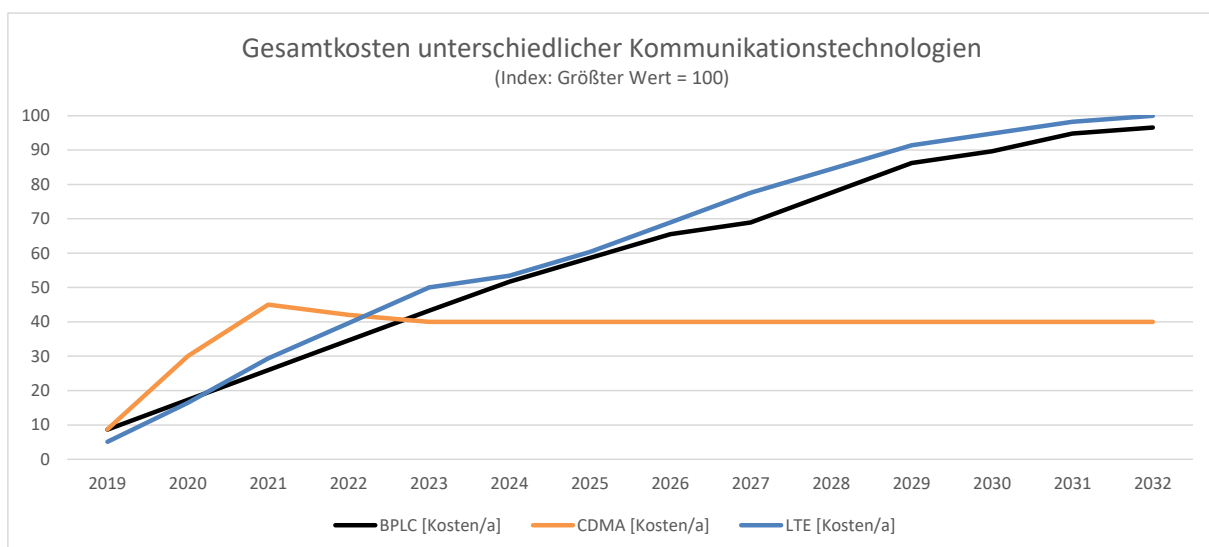


Abbildung 3-1: Schematische Kostenverläufe verschiedener Technologien im Zeitablauf

3.3 Regulatorische Klassifizierung der Nachfrage nach Konnektivität

Kapitel auf einen Blick

Ob die Marktregulierung im TK-Bereich die Digitalisierung der Energiewende unterstützen kann, hängt davon ab, ob sie hier überhaupt einschlägig ist. Deshalb muss die Nachfrage identifiziert werden.

In diesem Kapitel wird dargelegt, dass die VNB und MSB in der Regel ihre Telekommunikationsdienste auf Endkundenmärkten (z. B. im Mobilfunk) einkaufen. Diese Märkte sind nicht reguliert und insoweit müssen hier die Anbieter in diesen Märkten auf die Nachfrage der VNB und MSB reagieren. Eine regulatorische Unterstützung kann es insoweit nicht geben. Hinsichtlich leitungsgebundener Technologien ist dann eine Ausnahme vorhanden, wenn VNB und MSB Breitbandpowerline oder Glasfaser-Technologie

selbst einsetzen, d. h. die entsprechenden Telekommunikationsnetze in Eigenregie aufbauen und betreiben.

Bevor wir in eine detaillierte Prüfung des Rechtsrahmens in Bezug auf seine Geeignetheit zur Unterstützung der Energiewende eingehen, ist zu klären, wie die Nachfrage nach Konnektivität seitens der VNB und / oder MSB regulatorisch einzuordnen ist.

Die bisherigen Aktivitäten der VNB und / oder MSB zeigen, dass sie bis auf drei technologische Ausnahmen Telekommunikationsdienste als „reine“ Endkunden (Geschäftskunden) nachfragen. Sie fragen beispielsweise bei Mobilfunknetzbetreibern Dienste nach, um die bidirektionale Anbindung von SMGWs zu ermöglichen. Die dortigen Dienste und Endkundenpreise unterliegen nicht der Regulierung. Es gibt auch keine Anzeichen dafür, dass der Wettbewerb auf den Mobilfunkendkundenmärkten nicht funktionsfähig ist, sodass sich eine Vertiefung der Reichweite und den Voraussetzungen der Marktregulierung an dieser Stelle erübrigt.

Die eingangs erwähnten Ausnahmen, also die Realisierung über eigene Infrastrukturen, befinden sich im Bereich Glasfaser (LWL), Breitbandpowerline und im Rahmen einer Anbindung von SMGWs über 450-MHz-Frequenzen. Im Einzelnen sieht dies wie folgt aus:

- **Glasfaser:** Einzelne VNB sind mit der Realisierung von Glasfaserzugangsnetzen (Fibre-To-The-Home, Fibre-To-The-Building) auch in Telekommunikationsmärkten aktiv. Sie haben dann den Anreiz und die Option, SMGWs über den Glasfaseranschluss des Gebäudes zu erreichen. Die konkreten Realisierungen im Haus fallen dabei sehr unterschiedlich aus. Da häufig im eigenwirtschaftlichen Ausbau heute pro Gebäude eine Faser verlegt wird, erfolgt die Anbindung des SMGWs über ein anderes Medium. Von einem Medienwandler kann eine Verbindung zum SMGW über Draht oder Funk erfolgen. Beispielsweise kann hier Powerline-Technologie eingesetzt werden, zumal dann, wenn ein Mehr-Sparten-Ansatz verfolgt wird, da die Strom-, Wasser- und Gaszähler räumlich verteilt sein können. Werden mehrere Fasern in ein Gebäude verlegt, könnte das SMGW auch mit Glasfaser direkt angebunden werden. Dann muss der Medienwandel im SMGW stattfinden.
- Für unsere Fragestellung ist nun von Bedeutung, dass beim Glasfaserausbau keine regulierten Vorleistungen vom in Deutschland regulierten TK-Netzbetreiber, der Telekom Deutschland, eingekauft werden. Die entsprechende asymmetrische Regulierung von TK-Vorleistungen, die als Grundlage das Vorhandensein von beträchtlicher Marktmacht voraussetzen, ist somit nicht einschlägig und muss nicht weiter betrachtet werden.
- Sofern einzelne Gebäude oder Haushalte nicht mit einer eigenen Glasfaserinfrastruktur erreicht werden, fragen die dort agierenden VNB dann Endkundenprodukte, in der Regel bei Funkanbietern, zur Anbindung von SMGWs nach. Somit ist auch in dieser Option die sektorspezifische Regulierung nicht einschlägig und relevant.
- Jedoch könnte der regulatorische Rahmen, der sich auf Glasfaserinvestitionen auswirkt, entsprechende Investitionen beeinflussen, wenn es sich hierbei um eine Regulierung handelt, deren Tatbestandsmerkmal nicht beträchtliche Marktmacht ist. Es handelt sich dann um eine symmetrische Regulierung. Darauf werden wir weiter unten eingehen.
- **Breitbandpowerline:** In dieser Option kaufen die VNB und/oder MSB die entsprechende Netzwerktechnik bei Herstellern ein und bauen und betreiben das Netz selbst. Die Aktivitäten un-

terliegen nicht der asymmetrischen Marktregulierung, da hier keine beträchtliche Marktmacht vorliegt bzw. unterstellt werden kann. Einschlägig ist hier dann, dass durch den Einsatz von Breitbandpowerline keine Störungen von sonstigen Funkanwendungen ausgehen. Dies sei nach Herstellerangaben nicht der Fall, weil entsprechende Vorgaben eingehalten werden. Sofern ein VNB die Powerline-Lösung in anderen Verteilernetzen einsetzt und insoweit als Dienstleister für andere VNB und/oder MSB auftritt, stellt sich die Frage, ob er dann ein öffentliches Telekommunikationsnetz betreibt und damit die für Netzbetreiber einschlägigen Vorgaben des TKG beachten muss. Sofern es ein rein privates, geschlossenes Netz ist, ist kein Anwendungsfall des TKG gegeben. Sofern jedoch Dienste für die Öffentlichkeit angeboten werden (Mehrwertdienste), liegt der Fall anders. Dann sind die Vorgaben des TKG einschlägig.

- **Privates Funknetz bei 450 MHz:** Hier bietet einer der beiden aktuellen Frequenzzuteilungsnehmer zwei Optionen für VNB und MSB an: entweder kauft der VNB / MSB eine Funkdienstleistung analog zum öffentlichen Mobilfunknetzbetreiber ein oder er investiert in eigene, passive Netzinfrastruktur, die dann zum Aufbau des Funknetzes genutzt werden kann. Hierbei ist der Betreiber des Funknetzes aber immer der Frequenzzuteilungsnehmer, sodass für den Nutzer die für Netzbetreiber einschlägigen Regelungen des TKG nicht gelten. Regulierte Vorleistungen werden in diesem Modell ebenfalls nicht nachgefragt.

Im Ergebnis ist festzuhalten, dass es sich im Wesentlichen um eine Endkundennachfrage handelt. Ein Bezug von regulierten Vorleistungen ist nicht sichtbar. Allein aus der Veränderung des Rechtsrahmens, der die symmetrische Regulierung betrifft, kann indirekt Einfluss auf die Anbindung von SMGWs ausgehen.

3.4 Symmetrische Marktregulierung

Kapitel auf einen Blick

Neben der asymmetrischen Regulierung ist die symmetrische Regulierung zu betrachten. Hierbei kommt es nicht auf den Tatbestand der beträchtlichen Marktmacht an. In den letzten Jahren wurden entsprechende Regelungen (z. B. im DigiNetzG auf Basis der Kostensenkungsrichtlinie der EU) ausgeweitet. Auch der European Electronic Communications Code¹⁰⁵, der mittlerweile in Kraft getreten ist und innerhalb von zwei Jahren in nationales Recht umgesetzt werden muss, enthält entsprechende Regelungen.

Verteilernetzbetreiber und/oder Messstellenbetreiber, die mit einer eigenen Telekommunikationsinfrastruktur auch auf den TK-Endkundenmärkten aktiv sind, verfolgen teilweise das Ziel, SMGWs über die Glasfaserzugangsnetze anzuschließen. Diese Anbieter verfügen heute nicht über beträchtliche Marktmacht, sodass sie von der asymmetrischen Marktregulierung nicht betroffen sind. Sie werden Stand heute nur dann von Regulierungsmaßnahmen betroffen sein, wenn die Regulierung symmetrisch ausfällt, d. h. beträchtliche Marktmacht nicht der Auslöser für die Regulierung ist. In diesem Zusammenhang wirken sich beispielsweise Vorgaben zur Öffnung von passiven Infrastrukturen (Mitnutzung von Infrastrukturen bzw. Mitverlegung) auf den Glasfaserausbau aus. Mittelbar ist dann auch die Fähigkeit, SMGWs an entsprechende Netze anzubinden, davon betroffen.

Die kontinuierlich voranschreitende Digitalisierung von Wirtschaft und Gesellschaft erhöht beständig die Anforderungen an Telekommunikationsinfrastrukturen. Während in weiten Teilen Deutschlands die

¹⁰⁵ https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=comnat:COM_2016_0590_FIN.

bestehende kupferbasierte Festnetzinfrastruktur dahingehend ausgebaut wird, dass Übertragungsgeschwindigkeiten von mindestens 50 Mbit/s möglich sind, werden bislang in Deutschland im internationalen Vergleich nur sehr wenige Gebäude und Haushalte mit Glasfaser direkt angeschlossen. Zudem verläuft der Ausbau der Glasfaserinfrastruktur räumlich sehr unterschiedlich. Eine besondere Rolle beim Glasfaserausbau nehmen auch Energieversorger oder mit ihnen gesellschaftsrechtlich verbundene Unternehmen ein. Sie haben ein Interesse, über ihre eigenen TK-Netzinfrastrukturen auch energiewirtschaftliche Anwendungen zu realisieren.

Angesichts der sehr unterschiedlichen Ausbaustrategien der im Markt befindlichen TK-Netzbetreiber ist ein Ausbauszenario von Breitbandinfrastrukturen nicht unwahrscheinlich, in dem der Glasfaserausbau (FTTB/H) regional sehr unterschiedlich erfolgt, sodass eine Vielzahl regionaler Netzbetreiber in „NGA-Märkten“ aktiv sind, und dort in eine marktbeherrschende Stellung hineinwachsen könnten. Dies setzt die Abgrenzung von regionalen Märkten voraus; eine Regulierungspraxis, die bisher in Deutschland in diesem Bereich noch keine Anwendung gefunden hat. Sofern jedoch Unternehmen mit beträchtlicher Marktmacht identifiziert werden, wird ein weites Spektrum an Regulierungsmaßnahmen diskutiert, um negative Auswirkungen auf den Glasfaserausbau zu vermeiden bzw. zu verringern. Beispielsweise wird eine Abkehr von der kostenorientierten Entgeltregulierung zugunsten eines Nachbildbarkeitsansatzes diskutiert.

Weiterhin wird alternativ zu einer Flexibilisierung der asymmetrischen Regulierung zunehmend eine symmetrische Regulierung diskutiert. Symmetrische Regulierung, die nicht an das Vorhandensein beträchtlicher Marktmacht anknüpft, könnte zu einem Anspruch eines Dritten gegenüber dem Netzbetreiber auf aktiven und / oder passiven Zugang bedeuten. Ein Beispiel dafür ist das DigiNetzG, welches die Kostensenkungsrichtlinie (2014/61) der EU in nationales Recht umsetzt. Ziel der Richtlinie ist es, „den Ausbau von Hochgeschwindigkeitsnetzen für die elektronische Kommunikation [zu] erleichtern und entsprechende Anreize [zu] schaffen, indem die gemeinsame Nutzung bestehender physischer Infrastrukturen gefördert und ein effizienterer Ausbau neuer physischer Infrastrukturen ermöglicht wird, damit solche Netze zu geringeren Kosten errichtet werden können.“¹⁰⁶ Die vier wesentlichen Säulen sind dabei:

1. Zugang zu bestehender Infrastruktur wie Kanälen (Artikel 3 und 4),
2. Mechanismen zur Verbesserung der Koordinierung der Bauarbeiten (Artikel 5 und 6),
3. Straffung der Genehmigungsverfahren (Artikel 7) und
4. Zugang zu hausinterner Verkabelung (Artikel 9).

Die Bundesnetzagentur agiert hierbei als Streitschlichtungsstelle, wobei bisher ca. 20 Eingaben von TK-Unternehmen vorliegen. Ein wesentlicher Parameter, der Punkt 1 betrifft, ist die Frage, welche Kosten bei der Mitbenutzung bzw. dem Aufbau gemeinsamer Infrastruktur angesetzt werden dürfen. Um den Ausbau von Hochgeschwindigkeitsnetzen zu forcieren, wird dem Erstausbauenden neben den *zusätzlichen Kosten*, die sich für den Eigentümer oder Betreiber des öffentlichen Versorgungsnetzes durch die Ermöglichung der Mitnutzung seiner passiven Netzinfrastrukturen ergeben auch ein *angemessener Aufschlag* als Anreiz für Eigentümer oder Betreiber öffentlicher Versorgungsnetze zur Gewährung der Mitnutzung zugestanden. Die BNetzA hat zur hierzu eine Konsultation durchgeführt, um über die angemessenen

¹⁰⁶ Europäisches Parlament und Europäischer Rat: Richtlinie 2014/61/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 15. Mai 2014 über die Maßnahmen zur Reduzierung der Kosten des Ausbaus von Hochgeschwindigkeitsnetzen für die elektronische Kommunikation“, Amtsblatt der Europäischen Union, S. 1, Artikel 1, 2014, online verfügbar: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014L0061&from=DE>.

sene Höhe der Mitnutzungsentgelte zu beurteilen¹⁰⁷. Eine eindeutige Regelung kann an dieser Stelle für schnellere Entscheidungen sorgen.

Daneben ist die Klage von Stadtwerken zu vernehmen, dass beim Ausrollen von Breitbandinfrastruktur durch eben diese oft ein Anspruch auf Mitverlegung durch TK-Unternehmen gestellt werde. Bei öffentlicher (Teil-)Finanzierung müsse somit Wettbewerbern eine Mitverlegung von Breitbandinfrastruktur gestattet werden, was zu Überbau führen könne und das Geschäftsmodell gefährde bzw. gänzlich zunichtemache. Hier ist zu überlegen, ob ein Schutz des Erstausbauenden bei gleichzeitiger Open-Access-Verpflichtung nicht Fehlanreize beseitigen würde.

Insgesamt befürchten Unternehmen, dass sich eine symmetrische Regulierung negativ auf Investitionsentscheidungen gerade bei FTTB/H-Anschlüssen auswirkt. Um den eigenwirtschaftlichen Ausbau von Glasfaserinfrastrukturen (für FTTB/H) anzureizen, wird, wie oben exemplarisch beschrieben, aktuell durchaus kontrovers diskutiert, wie die Regulierung künftig ausgestaltet sein soll. Nun würde es den Rahmen dieses Gutachtens sprengen, die Facetten dieser Diskussion gänzlich nachzuzeichnen. Festzuhalten ist jedoch, dass gerade vor dem Hintergrund der Neufassung des Telekommunikationsgesetzes, mit dem der „European Electronic Communication Code“ (EECC) in nationales Recht umgesetzt werden wird, die gesetzlichen und regulatorischen Rahmenbedingungen auch aus Sicht der Energiewirtschaft investitionsfreundlich ausgestaltet werden sollten. Davon werden indirekt auch positive Impulse für die Glasfaseranbindung von SMGWs ausgehen und die leitungsgebundene Anbindung von Betriebsmitteln kann ebenfalls profitieren. Damit verbleiben dann immer noch die technischen und ökonomischen Herausforderungen hinsichtlich der Schwarzfallfähigkeit entsprechend angebotener Telekommunikationsdienste.¹⁰⁸

3.5 Frequenzregulierung

Kapitel auf einen Blick

Die technischen Ausführungen haben gezeigt, dass Funktechnologien im exklusiv nutzbaren Frequenzspektrum einen Beitrag zur Digitalisierung der Energiewende leisten können. Telekommunikationsdienste im 450-MHz-Band sind die valideste Option, die Bedarfe an Konnektivität im Bereich der Verteilernetze und des Messwesens synergetisch zu erschließen.

Wir zeigen in diesem Kapitel, dass die Bundesregierung aktuell einen Interessenkonflikt mit BOS und Bundeswehr auflösen muss, um diese Frequenzen für energiewirtschaftliche Anwendungen weiter zu erhalten. Nur so kann es gezielt und „maßgeschneidert“ zu einer Synchronität von Digitalisierung der Energiewende und TK-Infrastruktur in diesem Frequenzband kommen. Zum besseren Verständnis des bestehenden Interessenkonflikts arbeiten wir in diesem Kapitel zunächst die grundsätzlichen Aspekte der Frequenzregulierung auf. Nachfolgend wird auf eine künftige Nutzung der Frequenzen eingegangen.

¹⁰⁷ Bundesnetzagentur: Fragen der Entgeltbestimmung im Hinblick auf die Mitnutzung öffentlicher Versorgungsnetze und die Koordinierung von Bauarbeiten auf Grundlage des DigiNetzG“, Konsultationsdokument, Bonn, 06.02.2018, verfügbar: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Breitband/Entgeltmassstaebe_DigiNetzG/Konsultationsdokument_Entgeltmassstaebe_DigiNetzG.pdf?jsessionid=5D3B3D2FCB235A6EC3C9784AB49CDBF7?__blob=publicationFile&v=6.

¹⁰⁸ So haben beispielsweise die Stadtwerke Düsseldorf im Rahmen der Frequenzabfrage der Bundesnetzagentur ausgeführt, dass es keine adäquate Alternativ zum zeitlichen Aufbau eines 450-MHz-Funknetzes gäbe, da aus Sicht der VNB die Verfügbarkeit eines weltweit standardisierten Bandes sowie die gute Durchdringung von Gebäuden mit Funksignalen und die Bandbreite eines 450-MHz-Netzes in keinem anderen Frequenzband oder leitungsgebundenen Technologie möglich wäre. Die vertrauliche Stellungnahme der Stadtwerke liegen den Autoren der Studie vor.

Im Ergebnis zeigen wir deshalb auch, unter welchen Bedingungen und mit welchen Nebenbestimmungen die Frequenzen weiter für die Energiewirtschaft und andere Betreiber kritischer Infrastrukturen genutzt werden können. Hier besteht Handlungsbedarf seitens der Bundesregierung. Im Ergebnis zeigen wir, dass es ratsam ist, durch geeignete Vergabebedingungen eine nationale Nutzung der Frequenzen anzureizen.

Bereits in den Ausführungen zur technischen Analyse von TK-Technologien und Diensten haben wir darauf hingewiesen, dass ein für die Energiewende relevanter Regulierungsaspekt im Bereich der Frequenzregulierung liegt: die Nutzung von TK-Diensten in einem 450-MHz-Netz. Angesichts der weitreichenden gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Bedeutung der Energiewende und dem daraus resultierenden Bedarf an Frequenzen stellt sich zunächst und eher grundsätzlich die Frage, ob dieser Bedeutung auf frequenzregulatorischer Ebene entsprochen ist. Zum Vergleich wurden für Bedarfsträger, die ebenfalls über kritische Anwendungen verfügen, wie Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS), dedizierte Frequenzbereiche identifiziert und entsprechend auf einer Planungsebene gewidmet (2 x 8 MHz im 700-MHz-Band). Aktuell verfügen einzelne Verteilernetzbetreiber über Frequenzuteilungen im Bereich des Betriebs- und Bündelfunks. Diese Frequenzen können jedoch wegen ihrer Kanalbandbreiten und der Standardisierung zellulärer Mobilfunktechnologien nicht für die weitere Digitalisierung von Niederspannungsnetzen oder zur Anbindung von SMGWs eingesetzt werden. Wir werden deshalb analysieren, ob und unter welchen Voraussetzungen auf Ebene des Frequenzplans die Digitalisierung der Energiewende in Deutschland unterstützt werden kann.

Im Weiteren stellt sich die Frage, wie Frequenzen für die hier in Rede stehenden Anwendungen zugeteilt werden können und ob angesichts der Vielzahl von Verteilernetzbetreibern und / oder Messstellenbetreibern eine gemeinsame Frequenznutzung möglich ist. Hier ist zu beachten, dass nationale Frequenznutzungen grundsätzlich effizienter als regionale Zuteilungen sind, weil bei national nutzbaren Frequenzen keine Schutzabstände eingerichtet werden müssen. In diesem Zusammenhang wird im Markt über Betreibermodelle diskutiert, bei denen der Frequenzzuteilungsnehmer auf unterschiedlichen Wegen Zugänge zu den Frequenzen für Verteilernetzbetreiber und/oder Messstellenbetreiber einräumt. Um im Folgenden diese grundsätzlichen Fragen nachvollziehbar beantworten zu können, werden wir jeweils einleitend die relevanten Grundzüge der Frequenzregulierung darstellen.

3.5.1 Ausgangslage

Bevor wir auf die obigen Fragen eingehen, wollen wir an dieser Stelle die Relevanz dieses Themas für die aktuelle Phase der Digitalisierung darstellen.

Im Markt wird die Frage der Nutzung von Frequenzen im Frequenzbereich 451,00–455,74 MHz / 461,00–465,74 MHz (2 x 4,74 MHz) diskutiert. Die fraglichen Frequenzen sind aktuell zwei Unternehmen (450connect und Telekom Deutschland) zugeteilt. Die Frequenzen sind für den drahtlosen Netzzugang zum Angebot von Telekommunikationsdienstleistungen gewidmet. Somit können mit diesen Frequenzen grundsätzlich mobile Dienste angeboten werden, wie sie aus dem Massenmarkt bekannt sind. Die zugeteilten Frequenznutzungsrechte sind bis zum 31. Dezember 2020 befristet. Das Unternehmen 450connect bietet auf Basis dieser Nutzungsbestimmungen Funkdienste an, die u. a. die im ersten Teil des Gutachtens genannten Anwendungsfälle unterstützen.¹⁰⁹

¹⁰⁹ Aktuell baut und betreibt 450connect bereits mit Partnern regionale 450 MHz-Funknetze, unter anderem bei der EWE Netz GmbH, der NetAachen GmbH für die Regionetz GmbH (Tochter der Stadtwerke Aachen AG (STAWAG AG) und EWV Energie- und Wasser-Versorgung GmbH), der Netzgesellschaft Düsseldorf mbH (Tochter der Stadtwerke Düsseldorf AG), der TEN Thüringer Energienetze GmbH & Co. KG (Tochter der TEAG Thü-

Im Vorfeld der Entscheidung über die Frequenznutzungsrechte ab 2021 hat die Bundesnetzagentur eine Frequenzbedarfsabfrage durchgeführt. Diese wurde im Zusammenhang mit einer geplanten Frequenzplanänderung gesetzt (siehe Amtsblatt 13/2017 vom 12.07.2017, Vfg. Nr. 60/2017). Die BNetzA hat darin vorgeschlagen, die fraglichen Frequenzen für Betriebs- und Bündelfunk sowie für Anwendungen von BOS vorzusehen, um die Digitalisierung kritischer Infrastrukturen zu ermöglichen. Als kritische Infrastrukturen werden Infrastrukturen zur Versorgung der Allgemeinheit angesehen, deren Ausfall oder Beeinträchtigung zu erheblichen Versorgungsengpässen oder zur Gefährdung des Gemeinwohls führen würden. Die Bundesnetzagentur konstatiert, dass angesichts der essentiellen Bedeutung kritischer Infrastrukturen für das Gemeinwohl dem Staat und den privatwirtschaftlich organisierten Betreibern kritischer Infrastrukturen in einer dynamischen Gefährdungslage eine besondere Verantwortung zukommt, die Anlagen vor Ausfällen und Beeinträchtigungen zu schützen. Der Energiesektor ist nach der KRITIS-Verordnung Teil der kritischen Infrastrukturen in Deutschland.

Hinsichtlich des Frequenzbereiches vertritt die Bundesnetzagentur die Auffassung, dass der Frequenzbereich 450 MHz geeignet ist, den besonderen Anforderungen für Anwendungen kritischer Infrastruktur Rechnung zu tragen. Insbesondere seien die physikalischen Ausbreitungsbedingungen dieser Frequenzen geeignet, eine weitgehende Abdeckung der Fläche und der Gebäudeversorgung sicherzustellen.

Die bisherige Anhörung von Marktteilnehmern und staatlichen Stellen hat nun hinsichtlich der weiteren Nutzung kein eindeutiges Bild ergeben. Zum einen gibt es zwar eine große Unterstützung insbesondere für die Nutzung kritischer Infrastrukturen (im Energiemarkt) auf Basis eines nationalen Betreibermodells, teilweise aber auch Bedarf an regionalen Zuteilungen. Zum anderen wird die Forderung seitens der BOS und dem Bundesministerium der Verteidigung (BMVg) nach exklusiver Nutzung der fraglichen Frequenzen artikuliert. Ferner haben auch die Mobilfunkunternehmen kommentiert, die eine Nutzung der Frequenzen für 5G bzw. eine Nutzungseinschränkung fordern.

3.5.2 Frequenzen und Digitalisierung der Energiewende: relevante grundsätzliche Fragestellungen

Viele IoT-Anwendungen, die im Zuge der Digitalisierung der Energiewende implementiert werden, basieren auf einer drahtlosen Kommunikation. Hierzu bedarf es der Nutzung der Frequenzen, über die die Daten der jeweiligen Anwendungen übermittelt werden können. Der Nutzer benötigt hierzu Frequenznutzungsrechte, die von Seiten der Bundesnetzagentur erteilt werden. Aktuell sind Anwendungen auf dem Bereich des Internets-der-Dinge (IoT) oder der Maschine-zu-Maschine (M2M)-Kommunikation primär schmalbandig, d. h. es werden Anschlussdatenraten von weniger als 1 Mbit/s benötigt. Dazu können beispielsweise Frequenzen, die in Deutschland allgemein zugeteilt sind, eingesetzt werden (z. B. 886 MHz). Andere Anwendungen greifen auf Betriebs- und Bündelfunkfrequenzen zurück, die auf Antrag zugeteilt werden.

Zukünftig steigen die Anforderungen an die Übertragungstechnologien beispielsweise mit Blick auf Leistungsfähigkeit (Systemdatenraten), Latenzzeit, Indoor-Versorgung und Schwarzfallfähigkeit. Bei besonders kritischen Anwendungen, wie dies auch bei der Digitalisierung der Energiewende der Fall ist, werden angesichts der regional verteilten Verbreitung, der Häufigkeit der Anwendungen und Messpunkte sowie der Örtlichkeiten des Dienstes (Keller) Frequenzen unterhalb von 1 GHz benötigt, für die Exklusivität bzw. die Priorisierung des Nutzungsrechtes im Bedarfsfall besteht, um einerseits Investitions- und Planungssicherheit zu haben und andererseits die erforderlichen Eigenschaften für die jeweiligen Anwendungen im relevanten Fall garantieren zu können. Eine Netzzustandsüberwachung über nicht exklu-

ringer Energie AG), der WEMAG Netz GmbH und der Westfalen Weser Netz GmbH. (Quelle: 450connect: Ausbau", 2018, online verfügbar : <https://www.450connect.de/loesung/#ausbau>.)

siv nutzbare Frequenzen wird hinsichtlich der Zuverlässigkeit deutlich anders ausfallen, als wenn exklusiv nutzbare Frequenzen zum Einsatz kommen. Dies gilt für Frequenzen unterhalb von 1 GHz deshalb, weil diese im Vergleich zu Frequenzen oberhalb von 1 GHz deutlich bessere Ausbreitungseigenschaften haben.

Andere IoT-Anwendungen im Energiesektor, die nur zeitweise und räumlich begrenzt aktiv sind und weniger hohe technische Anforderungen haben, können ggf. auch im Rahmen eines Frequenz-Sharing-Regimes in mittleren Frequenzlagen ihren Frequenzbedarf abdecken.

Die Herausforderung für die Frequenzmanagementbehörden auf nationaler und europäischer Ebene bestehen somit darin, Frequenzbereiche zu identifizieren, in denen IoT-Anwendungen, insbesondere auch diejenigen, die für die Digitalisierung der Energiewende benötigt werden, zulässig sein sollen und hierfür adäquate Frequenznutzungsbestimmungen sowie effektive Frequenzzuteilungsregime festzulegen. Angesichts einer Fülle von technischen Standards, die zum Teil noch in der Entwicklung sind, einer Vielzahl von möglichen Anwendungen mit unterschiedlichem Anforderungsprofil und einer hohen Unsicherheit in Bezug auf die Entwicklung der tatsächlichen Nachfrage sind die Rahmenbedingungen hierzu sehr komplex. Die Komplexität wird noch dadurch erhöht, wenn die Nachfrage nach Kommunikationsdiensten und -technologien uneinheitlich ausfällt bzw. sich erst langsam in Richtung einer Standardlösung entwickelt.

Abschließend ist festzuhalten, dass es für energiewirtschaftliche Anwendungen aktuell keine frequenzregulatorischen Vorgaben bzw. Vorkehrungen im Frequenzplan gibt, die eine Nutzung von zellularen Funktechnologien ermöglichen.

3.5.3 Der Ordnungsrahmen von Frequenznutzungsrechten

Frequenzen sind der essentielle Input für die Bereitstellung von drahtlosen IoT-Diensten. Die Nutzungsrechte für Frequenzen werden von den nationalen Frequenzbehörden (*Spectrum Management Agencies*, SMAs) zugeteilt. Die SMAs legen hierbei insbesondere das Vergabeverfahren fest sowie die detaillierten Nutzungsbestimmungen. Diese Nutzungsbestimmungen regeln, für welche Anwendungen und wie die Frequenzen alleine oder gemeinsam mit anderen genutzt werden können.

Diese umfassen die folgenden Elemente, die in der nachfolgenden Tabelle 3-2 angeführt sind:

Tabelle 3-2: Zu definierende Elemente für die Frequenznutzung

Elemente	Ausgestaltung
Charakter des Nutzungsrechtes der Frequenzen	Festlegung der Handelbarkeit mit Blick auf das Frequenzspektrum, geografische Abgrenzung und Feldstärke; Veränderung der Nutzung im Rahmen der ITU-Bestimmungen; Möglichkeit Leasing-Verträge abzuschließen.
Art der Lizenz	Festlegungen hinsichtlich der möglichen Teilung des zugeteilten Frequenzspektrums in handelbare Einheiten; Handelbarkeit von Frequenzen, die staatlichen Institutionen zugeteilt wurden.
Bestimmung der Methode der Übertragung	Die Frequenzregulierungsbehörde legt den Mechanismus der Übertragung fest; Beantragung eines intendierten Handels, der von der Bundesnetzagentur zu genehmigen ist; freie Übertragbarkeit mit Erklärung, dass alle Bedingungen eingehalten wurden.
Übertragung der Nutzung	Registrierung der aktuellen Frequenznutzung in einer zentralen Datenbank der Frequenzregulierungsbehörde.
Aggregation/Zerlegung	Ist eine solche erlaubt oder nicht? Ein Verbot kann beispielsweise für den Fall vorliegen, dass sie für eine bestimmte Art

	der öffentlichen Nutzung (z. B. militärische Nutzung) ausschließlich reserviert ist.
Dauer	Festlegung, wie lange das Frequenzspektrum genutzt werden kann; Festlegung des Zeitraums innerhalb dessen Handel möglich ist.
Technische Parameter	Setzung von Rahmenbedingungen, ab denen mit Nutzern benachbarter Frequenzbänder Verhandlungen über den Umgang mit Interferenzen geführt werden müssen.
Methode zur Veränderung der Interferenzparameter	Maßstäbe über Verhandlungen unter den Frequenznutzern und Festlegung der Rolle der Frequenzregulierungsbehörden als Schiedsrichter.
Beschränkung mit Blick auf die anwendbare Technologie bzw. Service	Veränderungen der Nutzung im Rahmen von ITU-Vereinbarungen und Übereinkommen auf europäischer Ebene.
Einhaltung der Frequenznutzungsbedingungen	Sicherstellung, dass die Frequenznutzungsbedingungen und die damit einhergehenden Verpflichtungen eingehalten werden.
Prozess, um Interferenzprobleme zu lösen	Primat der privaten Verhandlungslösungen in Abweichung von gesetzten Normen und Standards mit Blick auf Interferenzen.

Quelle: M.Cave, „Review of Radio Spectrum Management“, 2002, S. 116; WIK-Consult.

Die dort im Detail festgelegten Bestimmungen müssen in Einklang mit europäischen und international getroffenen Vereinbarungen sein, hier insbesondere dem Frequenzbereichszuweisungsplan, der auf der Weltfunkkonferenz (WRC) in periodischen Abständen überarbeitet und aktualisiert wird. Die letzte WRC fand im Jahr 2015 statt, die wird im Jahr 2019 sein.

Auf nationaler Ebene werden zunächst in einer Frequenzverordnung (§ 53 TKG) den Funkdiensten und anderen Anwendungen die Frequenzbereiche zugewiesen. Diese Festlegungen nimmt die Bundesregierung durch eine Rechtsverordnung vor. Der Frequenzbereichszuweisungsplan intendiert im Wesentlichen die Umsetzung der internationalen Vereinbarungen auf der Ebene der ITU (WRC), der CEPT und der EU¹¹⁰. Für die Änderung dieses Plans ist die Zustimmung des Bundesrates erforderlich.

Die Bundesnetzagentur erstellt nach Maßgabe der Frequenzverordnung den Frequenzplan (§ 54 TKG). Er enthält die nähere Aufteilung der Frequenzbereiche auf die einzelnen Frequenznutzungen sowie die zur Sicherstellung einer effizienten und störungsfreien Frequenznutzung erforderlichen zusätzlichen Parameter und die erforderlichen zusätzlichen Bestimmungen über die Frequenznutzung in und längs von Leitern. Dies umfasst beispielsweise maximal zulässige äquivalente Strahlungsleistungen, Kanalabstände, Kanalbreiten und Kanalraster, abweichende Zuteilungen sind jedoch nach § 58 TKG in begründeten Einzelfällen – z. B. bei kurzfristiger Frequenznachfrage bzw. zum Test von innovativen Technologien – möglich. Soll beispielsweise LTE im Bereich 450 MHz eingesetzt werden, sind beispielsweise die Kanalraster im aktuell gültigen Frequenzplan zu ändern. Änderungen des Frequenzplans, soweit sie Belange der öffentlichen Sicherheit und des Rundfunks betreffen, können nur im Einvernehmen mit den zuständigen Landesbehörden durchgeführt werden.

¹¹⁰ Auf nationaler Ebene besteht nur begrenzt die Möglichkeit, von den internationalen Frequenznutzungsbestimmungen abzuweichen. Eine Zuteilung von Frequenzen, die vom Frequenzbereichszuweisungsplan der ITU abweicht, ist lediglich zulässig „on the express condition that such a station, when using such a frequency assignment, shall not cause harmful interference to, and shall not claim protection from harmful interference caused by station operating in accordance with the provisions of the Constitution, the Convention and these Regulations“ (S4.4 ITU Radio Regulations). Demgegenüber erfolgt eine Teilnahme an den Vereinbarungen der CEPT auf freiwilliger Basis. Hat sich der Staat allerdings den Vereinbarungen der CEPT angeschlossen, so ist er in seiner Frequenzplanung daran gebunden.

Jede Frequenznutzung bedarf i. d. R. einer vorherigen Frequenzzuteilung auf Grundlage des Frequenzplans im Rahmen eines nachvollziehbaren und objektiven Verfahrens (§ 55 TKG). Möglich sind Einzelzuteilungen und Allgemeinzuteilungen. Vorrangig soll eine Allgemeinzuteilung erfolgen. Eine Einzelzuteilung wird vorgenommen, sofern eine Gefahr von funktechnischen Störungen nicht anders ausgeschlossen werden kann oder wenn dies zur Sicherstellung einer effizienten Frequenznutzung notwendig ist. Nur für den Fall, dass Knappheit vorliegt, erfolgt eine Zuteilung über ein besonderes Vergabeverfahren nach § 55 Abs. 10 TKG in Verbindung mit § 61 TKG. In der Frequenzzuteilung sind insbesondere die Art und der Umfang der Frequenznutzung festgelegt, soweit dies zur Sicherstellung einer effizienten und störungsfreien Nutzung der Frequenzen erforderlich ist. Darüber hinaus können noch weitere Nebenbestimmungen festgelegt werden (siehe dazu auch **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Frequenzen werden unbegrenzt oder für eine bestimmte Laufzeit zugeteilt. Frequenznutzungsrechte sind ebenfalls räumlich fixiert, entweder für das gesamte Gebiet der Bundesrepublik Deutschland oder aber auch regional.

Festzuhalten ist somit, sofern Frequenzen für kritische Anwendungen im Energiemarkt mittels Festlegung im Frequenzplan vorgesehen sind, sind weitere Rahmenbedingungen, wie Nutzungskonzepte, Vergabeverfahren und die Festlegungen von Nebenbestimmungen, abzufassen.

3.5.4 Möglichkeiten der gemeinsamen Frequenznutzung: Sharing von Frequenznutzungsrechten

Autorisierungsregime legen fest, wer die Frequenzen wann, wo und wie nutzen darf. Auf diese Weise wird ebenfalls bestimmt, wer Frequenzen möglicherweise für IoT-Anwendungen nutzen kann. Dies kann gerade im Zusammenhang mit Betreibermodellen relevant werden. Es gibt verschiedene Autorisierungsregime für die Nutzung von Frequenzen. CEPT und RSPG bzw. RTR¹¹¹ haben hierbei die folgende Charakterisierung vorgenommen:

- 1) **Unlizenzierte Nutzung bzw. Allgemeinzuteilung:** In diesem Fall ist der Zugang zur Nutzung der Frequenzen offen. Wechselseitige Beeinträchtigungen der Nutzung müssen in Kauf genommen werden. Allgemeinzuteilungen können jedoch wie nachfolgend weiter unterteilt werden:
 - *Lizenzfreie Nutzung bzw. Allgemeinzuteilung:* In diesem Fall können die Frequenzen frei von zertifizierten Geräten genutzt werden. Beispiele hierfür sind Wi-Fi (Wireless Fidelity) mit geringer Leistung, Bluetooth, Short Range Devices sowie Satellitenempfänger und -sender für satellitengestützte Kommunikation. In diesem Fall werden die Nutzer von Seiten der Frequenzbehörde nicht benachrichtigt.
 - *Light Licensing:* Dieses Lizenzierungsregime unterscheidet sich von der Allgemeinzuteilung darin, dass die Frequenznutzer sich anmelden müssen, bzw. eine Lizenz haben müssen. Im simplifizierten Fall bedeutet dies, dass lediglich eine Online-Registrierung notwendig ist. Beispiele hierfür sind PMSE¹¹²-Anwendungen, Amateurfunk, Wi-Fi mit hoher Feldstärke außerhalb Haus.

¹¹¹ Rundfunk und Telekom Regulierungs-GmbH (RTR): Konsultation zum Vergabeverfahren 3,4 – 3,8 GHz“, S. 28-29, Vienna, 13.07.2017, online verfügbar: https://www.rtr.at/de/inf/Konsult5GAuktion2018/Konsultation_Vergabe_3400-3800_MHz.pdf.

¹¹² Funkanwendungen des Durchsagefunks und Reportagefunks, Drahtlose Mikrofone, Drahtlose Kameras.

- *Light Licensing (mit Einschränkung)*: Auch hier handelt es sich um eine Allgmeinzuteilung, wobei es in Einzelfällen der Frequenzkoordinierung bedarf und die Anzahl der Nutzer beschränkt sein kann. Beispiele hierfür sind einige SAP-Dienste und die Nutzung des 1.800-MHz-DECT (Digital Enhanced Cordless Telecommunications) -Schutzbandes.
 - *Private Commons*: In diesem Fall gewährt der Frequenznutzungsrechtsinhaber einen Allgmeinzugang zu seinen Frequenzen nach spezifizierten Konditionen.
- 2) **Spectrum-Sharing**: Dieser Fall beschreibt eine ausgewählte gemeinsame Nutzung der Frequenzen. Der Frequenznutzungsrechtsinhaber gewährt anderen den Zugang zur Nutzung seiner Frequenzen.
- *Mietmodell auf kommerzieller Basis (Licensed Shared Access)*: In diesem Fall vermietet der Inhaber der Nutzungsrechte Spektrum an einen Sekundärnutzer für bestimmte Zeit (Leasing). Es handelt sich somit um eine Überlassung des Frequenznutzungsrechts von Seiten des Inhabers des Frequenznutzungsrechts unter spezifischen Bedingungen. Der Vorteil dieses Sharing-Regimes ist ein klar spezifizierter Interferenzrahmen, Investitionssicherheit für Sekundärnutzer und keine Regulierungskosten. Allerdings stellt sich die Frage, ob derartige Überlassungen des Frequenznutzungsrechts zustande kommen. Beispielsweise kann der Inhaber des Frequenznutzungsrechts eine längerfristige Bindung des Nutzungsrechts scheuen (Holdup-Problem).
 - *Tier-Modell (Primär- und Sekundär-Nutzer)*: In diesem Fall würde es Sekundärnutzern immer dann gestattet sein, Frequenzen zu nutzen, wenn sie den Inhaber der Nutzungsrechte nicht stören. Je nach Sekundärnutzung sind unterschiedlich aufwendige Koordinationsverfahren seitens der Frequenzbehörde erforderlich, die ggf. auch zu Verzögerungen bei der Nutzung der Frequenzen (einige Monate) durch den Inhaber der Nutzungsrechte führen können. Diese allfälligen temporären Einschränkungen wären jedenfalls bereits bei den Auflagen zu berücksichtigen und müssen zum Zeitpunkt der Vergabe der Frequenznutzungsrechte bekannt sein. Dieses Modell hat neben den Regulierungskosten vor allem den Nachteil, dass die Investitionssicherheit für eine längerfristige Sekundärnutzung nicht gegeben ist. Eine Reihe von Frequenzbehörden und die Industrie unternehmen Anstrengungen, Sharing-Modelle und Technologien zu entwickeln, die eine gemeinsame Nutzung ohne wechselseitige Störungen erlauben.
 - *Verpflichtendes Spectrum-Sharing zugunsten Dritter*: In diesem Fall erfolgen verpflichtende Auflage mit verpflichtendem Zugang zum Spektrum zugunsten regionaler Breitbandanbieter, um damit eine regionale Stückelung zu vermeiden. Eine solche Auflage ist mit hohen Regulierungskosten verbunden (Preisfestlegung, Entscheidung, welcher Nutzer im Konfliktfall Vorrang hat, etc.). Eine solche Auflage wird gemeinhin dann gerechtfertigt, wenn damit ein erhebliches Wettbewerbsproblem beseitigt wird.

Neben der exklusiven Nutzung von Frequenzen durch einen Frequenznutzungsrechtsinhaber gibt es noch weitere Modelle, in denen die Frequenzen auch durch Dritte genutzt werden können. Abgesehen von der Allgmeinzuteilung findet ein Spectrum-Sharing traditionell dort statt, wo Frequenzen vom Inhaber lediglich geografisch beschränkt genutzt werden (wie beispielsweise vom Militär) oder wo die Nutzung von

White Spaces, d. h. kurzfristig ungenutzter Frequenzen in der Lücke zwischen zwei aktiven Kanälen in Frage kommt.

Mittlerweile werden „Geo-Location“-Datenbanken entwickelt, in denen erfasst wird, wie die zugeteilten Frequenzen aktuell mit Blick auf Frequenzkanal, Feldstärke und die räumliche Ausbreitung genutzt werden. Auf diese Weise ist identifizierbar, wann Frequenzen ungenutzt sind und somit potentiell alternativ nutzbar wären. Mit Blick auf Europa hat Ofcom im Vereinigten Königreich bereits eine derartige geolokale Datenbasis implementiert, andere Mitgliedstaaten sind hier zurückhaltender. Es gibt vergleichbare Pilotstudien in Finnland, Frankreich, Italien und den Niederlanden. Mit der Weiterentwicklung von Techniken (Cognitive Radio und Software-Defined-Radio) könnte hier eine flexible Nutzung von Frequenzen durch verschiedene Nutzer erfolgen.

Die nachfolgende Tabelle gibt Auskunft darüber, wie Stakeholder in Abhängigkeit zu den Anwendungseigenschaften die Vergabeverfahren bzw. die Notwendigkeit exklusiv zugeteilter Frequenzen einschätzen.

Tabelle 3-3: IoT-Anwendungen und das von Seiten der Anwender präferierte Autorisierungsregime für Frequenzen

Anwendungen	Eigenschaften	Präferiertes Autorisierungsregime der Interessengruppen
Ultra-reliable low latency communications (URLLC): Anwendungen zur Aufrechterhaltung von Netzsystemen nach dem Auftreten eines Fehlers im Stromnetz	Fernverbindungen zu Versorgungsnetzen erforderlich	Private Allgemeinzuteilungen machbar, um Fernverbindungen dieser Art zum Versorgungsnetz herzustellen. Der Inhaber des exklusiven Frequenznutzungsrechtes gewährt Zugang zu seinen Frequenzen für den Zeitraum, der zur Aufrechterhaltung notwendig ist
URLLC: Kritische Infrastruktur (d. h. Hochspannungsversorgungsnetze)	Sind auf eine Ende-zu-Ende Dienst-Garantie angewiesen (unabhängig von der Netzbelastung)	Individuelle exklusive Frequenznutzungsrechte erforderlich
URLLC: Anwendung zur Fabrikautomatisierung	Benötigen eine Ende-zu-Ende Dienst-Garantie	Individuelle exklusive Frequenznutzungsrechte erforderlich
URLLC: Fehlerlokalisierung	Hoher Qualitätsstandard und gering Latenzzeit erforderlich	Individuelle exklusive Frequenznutzungsrechte
URLLC: Identifikationen in Versorgungsnetzen	Hohe Qualitätsanforderungen	Individuelle exklusive Frequenznutzungsrechte
Massive machine type communication (mMTC): Smart metering	Datensammlung von Messpunkten mit Latenzanforderungen, die zwischen ein und mehreren Sekunden angegeben werden. Die Frequenzen werden dazu genutzt, um Informationen von entfernten Sensoren zu einem zentralen Punkt zu transferieren.	Derartige System können ohne deziert zugewiesene Frequenzen funktionieren. Shared Spectrum wäre wünschenswert. Solange kein Ausfall über mehrere Stunden besteht könnten auch allgemein zugeteilte Frequenzen genutzt werden.
URLLC: Transmission system operators (TSOs)	Der Frequenzbedarf ist nicht genau vorhersehbar. Dieser ist abhängig von Hochspannungsspitzen und den differenzierten Qualitätsanforderungen	Individuelle exklusive Frequenzen
URLLC: Zugkontrolle	Die Überwachung und Kontrolle von	Individuelle exklusive Frequenzen

Anwendungen	Eigenschaften	Präferiertes Autorisierungsregime der Interessengruppen
	Zugbewegungen. Strenge Verfügbarkeits- und Qualitätsanforderungen, Interoperabilitätsanforderungen	
Enhanced mobile broadband (eMBB): Hoher Datendurchlauf und Kapazität an lokalen Hotspots und überfüllten Regionen	Improved peak/average/cell-edge data rates, Kapazität und Flächendeckung	Individuelle exklusive Frequenzen, in Verbindung mit allgemein zugeteilten Lizenzen bzw. LSA in bestimmten Regionen
URLLC: andere Fälle wie ärztliche Fernberatung, intelligente Transportsysteme, Infrastrukturschutzsysteme	Neue kritische Anwendungen haben stringente Anforderungen an das Leistungsvermögen wie Latenz, Verfügbarkeit und Datendurchlauf	Individuelle exklusive Frequenzen

Quelle: Policy Tracker/VWA/LS telecom (2017)

Die Aussagen der Stakeholder können demnach dahingehend verdichtet werden, dass für kritische Anwendungen die Nutzung von exklusiv zugeteilten Frequenzen favorisiert wird. Insoweit werden intermodale Sharing-Konzepte als schwierig zu implementieren eingestuft.

Allerdings wurde von den befragten Nachfragern (Geschäftskunden) ausdrücklich darauf hingewiesen, dass Allgemeinzuteilungen generell dann kein Problem sind, wenn aufgrund technischer Lösungen und bei der tatsächlichen parallelen Nutzung die Zuverlässigkeit und die erforderliche Qualität des Dienstes garantiert ist.

Im Ergebnis sollten diese Überlegungen in die konkrete Ausgestaltung der Frequenzpolitik für kritische Anwendungen einfließen.

3.5.5 Änderung des Frequenzplans in Deutschland im Zusammenhang mit der Digitalisierung der Energiewende

Vor dem Hintergrund der obigen Ausführungen sowie den gesetzlichen Vorgaben im EnWG und GDEW, die auf die Sicherstellung einer stabilen Stromversorgung hinauslaufen und insoweit für die davon betroffenen Verteilernetzbetreiber bindend sind, halten wir das Vorgehen der Bundesnetzagentur zur Umwidmung des Frequenzplans zweckmäßig und angebracht. Bisher sind im Frequenzplan keine Frequenzen für die hier betrachteten Anwendungen, ganz zu schweigen von weiteren Smart-Grid-Anwendungen, hinterlegt. Eine Widmung von Frequenzen könnte einen langfristigen Einsatz dieser Frequenzen für energiewirtschaftliche Anwendungen anreizen. Die Bundesnetzagentur setzt damit konsequent Überlegungen aus der Vergangenheit fort. Bereits in dem Papier „Strategische Aspekte zur Verfügbarkeit von Frequenzen für den Breitbandausbau in Deutschland“¹¹³ hat die Bundesnetzagentur mit Blick auf diese Frequenzen ausgeführt, dass für die Zuteilung von Frequenzen im Bereich 380–470 MHz die derzeit bestehenden Planungen für Smart-Metering-/Grid-Projekte der Energieversorgungsunternehmen zu beachten sind.

Ebenso erscheint auf den ersten Blick ein Spectrum-Sharing über Sektorgrenzen hinweg, wie von der Bundesnetzagentur in ihrem Vorschlag vorgesehen, zweckmäßig zu sein. Nach Ansicht der Stellung-

¹¹³ Bundesnetzagentur: Strategische Aspekte zur Verfügbarkeit von Frequenzen für den Breitbandausbau in Deutschland, 2016, online verfügbar: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/Entscheidungen/Strategiepapier2016.pdf?__blob=publicationFile&v=2.

nehmenden zur Änderung des Frequenzplanes¹¹⁴ sei es möglich, primär für ein digitales Energienetz genutzte Frequenzen auch zeitlich und räumlich mit anderen artverwandten Anwendungen im Bereich BOS/Militär zu teilen. Im Vorfeld wäre jedoch zunächst zu prüfen, inwieweit anderweitig verfügbare Frequenzen (z. B. im 700 MHz) für die BOS-Anwendungen hinreichend sind, bzw. inwieweit die 450-MHz-Frequenzen für die BOS-Anwendungen überhaupt geeignet sind, zumal der Spektrumsbedarf von BOS mit mindestens 2 x 10 MHz angegeben wird und im Frequenzband bei 450 MHz lediglich 2 x 4,74 MHz vorhanden sind.¹¹⁵

Im Übrigen wäre im Vorfeld zu prüfen, wie die Datenvolumina sich in intelligenten Energienetzen künftig entwickeln werden. Im ersten Teil des Gutachtens wurde dargelegt, dass die Kapazität mit einem 1,4 MHz LTE-Träger ausreichend ist. Zusätzlich kann in diesem Frequenzband ein 3-MHz-Träger zum Einsatz kommen. Sofern das Datenvolumen, das bis zum Endausbau beim Verteilernetzbetreiber und/oder Messstellenbetreiber entsteht, weiter ansteigt, wovon auszugehen ist, ist zu bezweifeln, ob ein Spectrum-Sharing dann mit BOS überhaupt möglich ist. Es wäre aber auch zu prüfen, ob es ein Spectrum-Sharing mit öffentlichen Mobilfunknetzbetreibern geben könnte. Beispielsweise könnte es eine hybride Frequenznutzung dahingehend geben, dass, sofern öffentliche Mobilfunknetze verfügbar sind, die weniger kritischen Daten über ein öffentliches Netz geroutet werden, um die Kapazitäten in einem 450-MHz-Netz für kritische Anwendungen nicht einzuschränken. Dazu müssten sämtliche Verkehrsvolumina abgeschätzt werden, was nicht Gegenstand dieses Gutachtens ist. Fraglich ist dann, in welcher Form und mit welchen Nebenbestimmungen die Frequenzen zugeteilt werden sollten.

Abschließend sei noch erwähnt, dass ein Spectrum-Sharing innerhalb der Energiebranche sehr sinnvoll ist. Diese Fragen können im Rahmen eines Vergabeverfahrens adressiert werden.

3.6 Konzept einer Nutzung von 450-MHz-Frequenzen

3.6.1 Frequenzuteilungsmechanismen (Auktionen versus Beauty-Contest) bei vorliegender Knappheit von Frequenznutzungsrechten)

Sofern Frequenzen nicht knapp sind, sind sie entweder allgemein verfügbar oder werden auf Antrag zugeteilt. In letzterem Fall erhalten qualifizierte Nutzer Frequenznutzungsrechte in dem beantragten Bereich. Ein Recht auf eine konkrete Frequenzlage besteht nicht. Im Fall von Knappheit sind die Frequenzen vorrangig zu versteigern, alternativ ist ein Ausschreibungsverfahren möglich (vgl. §61 TKG). Letzteres wäre zu begründen.

Mit Blick auf Auktionen lässt sich anfügen, dass Auktionsdesigns objektiv, nachvollziehbar, transparent und diskriminierungsfrei sein sollten. Darüber hinaus sollten sie dazu führen, dass diejenigen, die Frequenznutzungsrechte erhalten, diese am effizientesten nutzen können. Ferner sollte das Verfahren einfach verständlich, also möglichst wenig komplex sein. Auktionsergebnisse – mit Blick darauf, wer wel-

¹¹⁴ Stellungnahmen zum Entwurf Vfg Nr. 60/2017 Aufstellung des Frequenzplans gemäß § 54 Telekommunikationsgesetz (TKG); Aktualisierung des Frequenzplans bei 700 MHz (drahtloser Netzzugang, BOS, BMVg), 450 MHz (BOS, BMVg, KRITIS) sowie 1350 und 1500 MHz (Funkmikrofone) Zusammenfassung der Stellungnahmen zum Konsultationspapier der Bundesnetzagentur, online verfügbar: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/Firmennetze/Bündelfunk/20180419_Frequenzbedarfsabfrage_ZusammenfassungDerBedarfe_PDF.pdf?__blob=publicationFile&v=1.

¹¹⁵ Siehe dazu Stratey& / Accenture: Vorschlag eines Strategiekonzepts für den breitbandigen Datenfunk der Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS), 2014.

che welche Frequenznutzungsrechte erwirbt und welchen Preis dafür zahlt – sollten allen Auktionsteilnehmern bekannt sein, bevor sie entscheiden, keine neuen Gebote mehr abzugeben. Auktionen sollten als ein effizienter Verhandlungsmechanismus ausgestaltet sein. Im Sinne des Coase Theorems bedingt dies, dass die Auktion dadurch gekennzeichnet ist, dass die Eigentumsrechte in mehrstufigen Auktionen in jeder Runde klar definiert sind und allen anderen bekannt. Auf diese Weise werden bei vollständiger Information dieser Aspekte in dem Verhandlungsmechanismus der Auktion sämtliche externen Effekte internalisiert und ein effizientes Verhandlungsergebnis generiert. Die transparente Traditionelle-Simultan-Mehrstufige-Auktion (TSMA) wie sie in Deutschland angewendet wurde, hat diese Eigenschaften.¹¹⁶

Im Fall von Frequenzen, die in kritischen Infrastrukturen, wie beispielsweise zur Ermöglichung der Energiewende, zum Einsatz kommen, bestehen nachvollziehbare Gründe für ein Ausschreibungsverfahren als geeignetes Auswahlverfahren. Hier geht es dann weniger darum, den wirtschaftlichen Wert der Frequenznutzung im Wege einer Versteigerung quasi zu ermitteln, was sich im Ergebnis negativ auf die Nutzungsentgelte widerspiegeln würde. Ein weiterer Grund für die Präferenz einer Ausschreibung könnte darin bestehen, dass die Bundesnetzagentur erhebliche Unsicherheit mit Blick auf mögliche Netzausbaupläne und damit einhergehend adäquate Versorgungsverpflichtungen hat. Während im Fall von Auktionen Versorgungsverpflichtungen ex ante exogen festgesetzt werden müssen, könnten diese in einem Ausschreibungsverfahren endogen bestimmt werden. Insoweit bestehen gute Gründe dafür, die 450-MHz-Frequenzen, soweit sie für energiewirtschaftliche Anwendungen zur Verfügung stehen, mittels einer Ausschreibung zu vergeben. Im Rahmen von Nebenbestimmungen sollte dabei geregelt werden, dass die entsprechenden Anwendungen, die bereits vor der Neuvergabe bestehen, fortzuführen sind.

Die Überlegungen im Markt, eine Betreiberplattform zu errichten, zeigt im Übrigen, dass im Gegensatz zu den Frequenzen, die öffentlichen Mobilfunknetzbetreibern zugeteilt wurden, hier nicht der Wettbewerb im Vordergrund steht. Vielmehr erscheint es zweckmäßig zu sein, ein Konzept regulatorisch vorzugeben oder anzureizen, wonach eine „Funknetzplattform“ entsteht, die diskriminierungsfrei entsprechende Dienste Verteilernetzbetreibern und / oder Messstellenbetreibern anbietet.

3.6.2 Frequenznutzungsdauern

Frequenznutzungsdauern sollten so gestaltet sein, dass effiziente Investitionszyklen generiert werden. Hierbei sollten die Techniken und Anwendungen beachtet werden, die voraussichtlich mittels dieser Frequenzen genutzt werden sollten. Insbesondere sollten sie hinreichend lange sein, damit eine Amortisierung der Netzinvestitionen möglich ist. Mit Blick auf IoT ist zudem zu beachten, dass für einige Technologien noch keine Standardisierung vorliegt und erhebliche Unsicherheit mit Blick auf die Netzinvestitionen besteht. Zudem mag die anfängliche Adaption der Dienste gering sein, sodass die Erlösgenerierung erst nach einiger Zeit möglich ist, andererseits aber Netzinvestitionen in hohem Maße quasi vorab getätigt werden müssen.

In diesem Zusammenhang wurde von der Europäischen Kommission zunächst vorgeschlagen, dass die Mindestlaufzeit für versteigerte Frequenznutzungsrechte bei elektronischen Kommunikationsdiensten 25 Jahre sein sollte. Alternative Ansätze sehen eine unbefristete Zuteilung vor, wobei jährlich eine Form der Überprüfung mit Blick auf die effiziente Nutzung der Frequenzen stattfindet, sodass in begründeten Fällen eine Verlängerung des Nutzungsrechtes untersagt werden kann.

¹¹⁶ Zur detaillierten Erörterung dieser Thematik siehe WIK-Consult: Sinnvolle Prinzipien bei der Ausgestaltung eines Frequenzauktionsdesigns, Policy Paper, Bad Honnef, 30.05.2017, online verfügbar: http://www.wik.org/fileadmin/Studien/2017/Prinzipien_Frequenzauktionen_A1.pdf.

Da sich die Innovationszyklen zwischen dem TK- und Energiebereich aktuell noch deutlich unterscheiden, ist eine lange Nutzungsdauer für die 450-MHz-Frequenzen grundsätzlich zu begrüßen.

3.6.3 Mindestgebote bzw. Frequenzzuteilungsgebühren

Finale Frequenzzuteilungspreise werden in einer Frequenzauktion durch die tatsächlichen Gebote der Auktionsteilnehmer bestimmt. Die Start- oder Mindestpreise in Auktionen, soweit dieses Verfahren zur Vergabe gewählt wird, können einen Einfluss auf die Endpreise in einer Auktion haben. Endet die Auktion in einer effizienten Frequenzzuteilung, so ist aus regulierungspolitischer Sicht das primäre Ziel der Frequenzzuteilung erreicht. Sofern hohe Auktionspreise eine negative Implikation auf Netzinvestitionen und den Netzausbau haben, so sind diese aus regulierungspolitischer Sicht zu vermeiden. Von daher gibt es ein starkes Argument dafür, möglichst geringe Mindestgebote zu setzen, die sich an den administrativen Kosten der Frequenzzuteilung bzw. den minimalen Gebühren der Frequenzgebührenordnung orientieren. Dieser Grundsatz gilt insbesondere mit Blick auf den Ausbau kritischer Infrastrukturen und hier mit besonderem Blick für die Ermöglichung der drahtlosen Kommunikation im Rahmen der Digitalisierung der Energiewende. Eine unnötige Verteuerung der Netzinfrastruktur sollte vermieden werden.

Nicht nur im Fall von Auktionen, sondern auch bei Frequenzzuteilungen im Wege einer Ausschreibung oder eines Antrags sollten die Frequenzzuteilungsgebühren mit Blick auf kritische Infrastrukturen moderat ausfallen. Negative Implikationen auf die Netzausbaukosten und das Investitionsverhalten würden somit vermieden werden.

3.6.4 Spezifische Frequenznutzungsbedingungen: Versorgungsauflagen

Versorgungsauflagen in Verbindung mit der Vergabe von Frequenznutzungsrechten können als ein Instrument von Seiten des Staates genutzt werden, volkswirtschaftlich wünschenswerte Netzabdeckungen zu realisieren. Auf diese Weise wird eine (volkswirtschaftlich) effiziente Nutzung der Frequenzen aus Sicht des Staates insbesondere in der Fläche implementiert. Aufgrund auferlegter bindender Verpflichtungen können Unternehmen dazu veranlasst werden, Netzversorgungen zu realisieren, die andernfalls aufgrund eines reinen unternehmerischen Kalküls nicht erfolgen würden. Dies wird dann ohne einen komplexen mit hohem administrativen Aufwand verbundenen Fördermechanismus erreicht. Sofern die Frequenzen versteigert werden, haben die Auktionsteilnehmer die Möglichkeit, Wertminderungen der Frequenznutzungsrechte aufgrund der Versorgungsauflagen in ihre Gebote einzupreisen. Derartige Wertminderungen werden dann in den finalen Auktionspreisen reflektiert. De facto entstehen den erfolgreichen Bietern / Frequenznutzern somit keine finanziellen Nachteile, sofern der verbleibende Wert der Frequenzen die Höhe der Mindestgebote übersteigt. Im Fall einer Ausschreibung können Versorgungsverpflichtungen durch die verbindlichen Zusagen der Bewerber um die Frequenznutzungsrechte endogen, durch die vom Bewerber selbst gewählten Netzaufbaupläne bestimmt werden.

Bei der Festsetzung von Versorgungsauflagen sind folgende Aspekte zu beachten:

- Eine administrative Festsetzung der Versorgungsauflagen sollte transparent, nachvollziehbar und vor dem Hintergrund belastbarer Fakten ausformuliert werden. Um diese Kriterien zu erfüllen, sind die Versorgungsauflagen in der Fläche und bezüglich der technischen Parameter möglichst exakt zu definieren.
- Versorgungsauflagen sollten nicht übermäßig sein, sodass nicht erforderliche Investitionen unterbleiben.
- Eine Festlegung von Versorgungsauflagen ist dann nicht erforderlich, wenn zu erwarten ist, dass die volkswirtschaftlich effiziente Versorgung im Wege der Marktmechanismen realisiert wird.

Zusammenfassend sollte sichergestellt sein, dass eine Netzinfrastruktur dort aufgebaut wird, wo es eine entsprechende Nachfrage gibt.

3.6.5 Fazit zur Frequenzregulierung

Das Vorgehen der Bundesnetzagentur reflektiert, dass es eine neue Art der Nachfrage aus der Energiewirtschaft in diesem Frequenzbereich heute gibt und auch zukünftig weiter geben wird. Die Frequenzen sollten deshalb über 2020 hinaus für energiewirtschaftliche Anwendungen zur Verfügung stehen. Damit würde die Möglichkeit eröffnet werden, eine Netzinfrastruktur zu errichten, die sowohl Anwendungen in Smart Grids – einschließlich der Notfall- und Betriebskommunikation – als auch Anwendungen im Bereich SMGW gleichermaßen unterstützt. In diesem Frequenzbereich können die Anforderungen der Digitalisierung der Energiewende technisch und wirtschaftlich sehr gut umgesetzt werden. Ebenso erscheint es sinnvoll zu sein, regulatorische Anreize zu geben, sodass eine Funknetzplattform entsteht, die diskriminierungsfrei entsprechende Angebote im Markt unterbreitet.

3.7 Netzneutralität

Kapitel auf einen Blick

Energiewirtschaftliche Anwendungen wie die Netzzustandsüberwachung sind darauf angewiesen, dass die Daten mit einer sehr hohen Zuverlässigkeit übertragen werden. Das im Internet grundlegende Best-Effort-Prinzip könnte hier eine Restriktion für die Digitalisierung der Energiewende darstellen, da eine Reihe von Anwendungen eine Priorisierung bei der Datenübermittlung bedarf. Insoweit ist die Netzneutralität angesprochen.

Es wird gezeigt, dass Spezialdienste mit einem entsprechenden „Quality-of-Service“ in öffentlichen Netzen zulässig sind, wenn von diesen Spezialdiensten die Anwendungen von anderen Endkunden nicht verdrängt werden. Die Kapazitätsberechnungen zeigen hier an, dass es bei einer Durchschnittsbetrachtung diesbezüglich keine Probleme geben wird. In einem dedizierten Funknetz bei 450 MHz greift die Netzneutralität dagegen nicht, sodass sich hier überhaupt keine Problemstellungen ergeben. Im Ergebnis besteht hier kein Handlungsbedarf. Die Digitalisierung der Energiewende wird nicht beeinträchtigt.

Sowohl in öffentlichen leitungsgebundenen als auch in öffentlichen Mobilfunknetzen kann um die verfügbare Kapazität zu einem bestimmten Zeitpunkt konkurriert werden. Hinsichtlich der Datenübertragung in einem öffentlichen Netz stellt sich die Problematik, dass dort grundsätzlich keine „Vorfahrtsregeln“ für die Übertragung bestimmter Daten existieren. Vielmehr werden alle Daten in dem Sinne gleichbehandelt, als dass keine Priorisierungen stattfinden, die einen bestimmten Vorrang für bestimmte Daten vorsehen würden. Selbst wenn die technische Analyse ergeben hat, dass keine Kapazitätsengpässe zu erwarten sind, so sind solche Engpässe in einzelnen Netzabschnitten öffentlicher TK-Netze nicht auszuschließen.

3.7.1 Einordnung

Möchte ein Energienetzbetreiber *öffentliche TK-Netze*¹¹⁷ für den Aufbau und Betrieb eines Smart Grids oder zur Anbindung von SMGWs nutzen, so hat er die Netzneutralität zu beachten. Diese fußt zunächst auf der Netzneutralitätsverordnung der EU (Verordnung (EU) 2015/2120). In Artikel 3(3) heißt es dort:

„Anbieter von Internetzugangsdiensten behandeln den gesamten Verkehr bei der Erbringung von Internetzugangsdiensten gleich, ohne Diskriminierung, Beschränkung oder Störung, sowie unabhängig von Sender und Empfänger, den abgerufenen oder verbreiteten Inhalten, den genutzten oder bereitgestellten Anwendungen oder Diensten oder den verwendeten Endgeräten.“ Und weiter: „Anbieter von Internetzugangsdiensten wenden keine Verkehrsmanagementmaßnahmen an, [...]; insbesondere dürfen sie nicht bestimmte Inhalte, Anwendungen oder Dienste – oder bestimmte Kategorien von diesen – blockieren, verlangsamen, verändern, einschränken, stören, verschlechtern oder diskriminieren, außer soweit und solange es erforderlich ist, um:

- a) *Gesetzgebungsakten* der Union oder mit dem Unionsrecht im Einklang stehenden nationalen Rechtsvorschriften, denen der Internetzugangsanbieter unterliegt, oder mit dem Unionsrecht im Einklang stehenden Maßnahmen zur Umsetzung dieser Gesetzgebungsakte der Union oder dieser nationalen Rechtsvorschriften zu entsprechen, einschließlich Verfügungen von Gerichten oder Behörden, die über die entsprechenden Befugnisse verfügen;
- b) *die Integrität und Sicherheit des Netzes*, der über dieses Netz erbrachten Dienste und der Endgeräte der Endnutzer zu wahren;
- c) eine drohende *Netzüberlastung* zu verhindern oder die Auswirkungen einer außergewöhnlichen oder vorübergehenden Netzüberlastung abzumildern, sofern gleichwertige Verkehrsarten gleich behandelt werden.“

Es gilt also das „Best-Effort-Prinzip“ bei der Internetübertragung, d. h. die Gleichbehandlung des über das Internet übertragenen Datenverkehrs. Es erfolgt somit eine Trennung zwischen der Anwendungs- und der Transportebene des Internets. Dies soll Innovationen von Anwendungen unabhängig vom Anbieter des Internetzugangsdienstes sowie eine verbesserte Auswahl für den Endkunden gewährleisten.

Die Verordnung schützt sowohl einzelne Verbraucher als auch Firmen (Inhalte- und Anwendungsanbieter), die Internetzugangsdienste nutzen. Sie legt auch gemeinsame Regeln „zur Wahrung der gleichberechtigten und nichtdiskriminierenden Behandlung des Verkehrs“ fest.

Unter die Verordnung fallen *Internetzugangsdienste*, also öffentlich zugängliche elektronische Kommunikationsdienste, die unabhängig von der verwendeten Netztechnologie (z. B. Glasfaser, Kabel, Mobilfunk) und unabhängig von den verwendeten Endgeräten (z. B. Handy, Tablet, Laptop) Zugang zum Internet und somit Verbindungen zu praktisch allen Abschlusspunkten des Internets bieten. Nicht unter die Verordnung fallen Dienste, die von Cafés, Restaurants sowie durch unternehmensinterne Netze bereitgestellt werden, da diese nicht öffentlich zugänglich sind, sowie Dienste, bei denen der Zugang zum Internet durch die Eigenschaften des Endgeräts begrenzt ist, z. B. M2M-Geräte wie SMGW.

3.7.2 Spezialdienste

Die EU-Verordnung lässt allerdings die Möglichkeit offen, bestimmte Dienste als Spezialdienste zu definieren. Wiederum in Artikel 3 (5) heißt es dazu: „Den Anbietern öffentlicher elektronischer Kommunika-

¹¹⁷ Baut der Energienetzbetreiber ein privates, dediziertes TK-Netz auf, ist die Frage der Netzneutralität irrelevant (siehe Abschnitt 3.7.3).

tion, einschließlich der Internetzugangsanbieter und der Anbieter von Inhalten, Anwendungen und Diensten, steht es frei, andere Dienste, die *keine Internetzugangsdienste* sind, anzubieten, die für bestimmte Inhalte, Anwendungen oder Dienste oder eine Kombination derselben optimiert sind, wenn die Optimierung erforderlich ist, um den Anforderungen der Inhalte, Anwendungen oder Dienste an ein bestimmtes Qualitätsniveau zu genügen. Die Anbieter öffentlicher elektronischer Kommunikation einschließlich der Internetzugangsanbieter dürfen diese anderen Dienste nur dann anbieten oder ermöglichen, wenn die *Netzkapazität ausreicht*, um sie zusätzlich zu den bereitgestellten Internetzugangsdiensten zu erbringen. Diese anderen Dienste dürfen nicht als Ersatz für Internetzugangsdienste nutzbar sein oder angeboten werden und dürfen *nicht zu Nachteilen bei der Verfügbarkeit oder der allgemeinen Qualität der Internetzugangsdienste* für Endnutzer führen.“

Hier besteht also theoretisch eine Möglichkeit, auch öffentliche Netze für den Zweck der Kommunikation in Energienetzen zu nutzen und eine gewisse Qualität zu gewährleisten. Spezialdienste ermöglichen es demnach Internet Providern, einzelne Onlinedienste wie beispielsweise IPTV oder Telefonie in besonderer Qualität gegen gesondertes Entgelt anzubieten. Bisher wird dies z. B. auch bei Mobilfunkverträgen praktiziert: Zusätzlich zur volumenbeschränkten Flatrate können Kunden bei manchen Providern unbeschränkte Zugänge zu Diensten wie Spotify oder Facebook buchen.

Allerdings besteht keine klare Definition, was genau Spezialdienste sind. Die derzeitige Definition erlaubt es Providern beispielsweise, auch Dienste, Anwendungen und Inhalte des offenen Internets als Spezialdienste anzubieten, wenn der Dienst als Ersatz für den Internetzugang „weder vermarktet noch breit genutzt“ wird.

In der Verordnungsbegründung wird die Verantwortung an die nationalen Regulierungsbehörden weitergegeben: „Den Anbietern öffentlicher elektronischer Kommunikation, einschließlich der Internetzugangsanbieter und der Anbieter von Inhalten, Anwendungen und Diensten, sollte es freistehen, Dienste anzubieten, bei denen es sich nicht um Internetzugangsdienste handelt und die für bestimmte Inhalte, Anwendungen oder Dienste oder eine Kombination derselben optimiert sind, wenn die Optimierung erforderlich ist, um den Anforderungen der Inhalte, Anwendungen oder Dienste an ein *spezifisches Qualitätsniveau* zu genügen. Anstatt einfach generell die Priorität vor vergleichbaren Inhalten, Anwendungen oder Diensten, die über die Internetzugangsdienste verfügbar sind, einzuräumen und damit die für die Internetzugangsdienste geltenden Bestimmungen über das Verkehrsmanagement zu umgehen, sollten die *nationalen Regulierungsbehörden* vielmehr prüfen, ob und inwieweit diese *Optimierung objektiv erforderlich* ist, um ein oder mehrere spezifische und grundlegende Merkmale der Inhalte, Anwendungen oder Dienste zu gewährleisten und eine entsprechende Qualitätsgarantie zugunsten der Endnutzer zu ermöglichen.“

Die Regulierungsbehörden sollten „die Auswirkungen auf die Verfügbarkeit und allgemeine Qualität der Internetzugangsdienste dadurch bewerten, dass sie unter anderem die Dienstqualitätsparameter (wie etwa Verzögerung, Verzögerungsschwankung, Paketverlust), das Maß und die Auswirkungen von Netzüberlastungen, die tatsächlichen gegenüber den beworbenen Geschwindigkeiten, die Leistungsfähigkeit der Internetzugangsdienste im Vergleich zu den anderen Diensten, die keine Internetzugangsdienste sind, und die von den Endnutzern wahrgenommene Qualität analysieren.“

BEREC (2016)¹¹⁸ weist in entsprechenden Leitlinien zur Netzneutralität darauf hin, dass „Internetzugangsdienste und Spezialdienste [...] zwar direkt um den Teil der Kapazität [konkurrieren], der dem einzelnen Endnutzer zugehörig ist, *jedoch kann der Endnutzer über die Verwendung dieser Kapazität selbst*

¹¹⁸ Body of European Regulators for Electronic Communications (BEREC): Guidelines on the Implementation by National Regulators of European Net Neutrality Rules, S.29, 2016, Übersetzung aus dem Englischen.

bestimmen. Wenn es technisch nicht möglich ist, den Spezialdienst neben dem Internetzugangsdienst bereitzustellen, ohne dass die Qualität des Internetzugangsdienstes des Endnutzers darunter leidet, sollten die nationalen Regulierungsbehörden diese Konkurrenz um Kapazität nicht als Verstoß gegen Artikel 3 Abs. 5 Unterabs. 2 ansehen, sofern der Endnutzer gemäß Artikel 4 Abs. 1 Buchstabe c über die Auswirkungen auf seinen Internetzugangsdienst informiert wurde und mit einem eventuell parallel genutzten Internetzugangsdienst die vertraglich vereinbarten Geschwindigkeiten erzielen kann. Die nationalen Regulierungsbehörden sollten nicht befinden, dass es zum Nachteil der allgemeinen Qualität des Internetzugangsdienstes ist, wenn von der Aktivierung des Spezialdienstes eines einzelnen Endnutzers nur sein eigener Internetzugangsdienst betroffen ist. In den Teilen des Netzes, in denen sich verschiedene Endnutzer die Kapazität teilen, sollten jedoch keine nachteiligen Auswirkungen auftreten.“

3.7.3 Netzneutralität und intelligente Energienetze

Falls öffentliche TK-Netze zum Aufbau und Betrieb eines intelligenten Energienetzes genutzt werden sollen, sollten also im Hinblick auf die Netzneutralität verschiedene Prüfungen erfolgen. Zunächst muss festgestellt werden, ob es sich um ein öffentliches oder privates Netz handelt bzw. der Energienetzbetreiber diese strategische Entscheidung treffen. Im Ergebnis kann auch die Nutzung verschiedener (öffentlicher und privater) TK-Netze für verschiedene Anwendungen erfolgen.

Falls es sich um ein privates Netz handelt, ist die Netzneutralität nicht einschlägig (s.o.). Handelt es sich dagegen um ein öffentliches TK-Netz, muss geprüft werden, ob ein Spezialdienst genutzt werden kann. Hierzu wären dann die o.g. Bedingungen zu erfüllen:

- eine ausreichende Netzkapazität, die es ermöglicht, den Spezialdienst zusätzlich zu den bereitgestellten Internetzugangsdiensten zu erbringen;
- dass die Spezialdienste nicht als Ersatz für Internetzugangsdienste nutzbar sind oder angeboten werden;
- dass die Spezialdienste nicht zu Nachteilen bei der Verfügbarkeit oder der allgemeinen Qualität der Internetzugangsdienste für Endnutzer führen.

Denkbar wäre es dann, dass ein Energienetzbetreiber für kritische Anwendungen (z. B. Netzüberwachung, Netzsteuerung) einen Spezialdienst anmeldet, während unkritische Anwendungen wie z. B. die Übertragung von Daten aus dem intelligenten Messsystem für Abrechnungszwecke der Netzneutralität unterliegen.

Ist von der Aktivierung eines Spezialdienstes tatsächlich nur der (eigene) Zugang des Endkunden beeinflusst, wäre es aus wohlfahrtstheoretischer Sicht wünschenswert, den Kunden die letzte Entscheidung treffen zu lassen. Allerdings ist es zum einen fraglich, ob der Kunde bereit ist z. B. für die Netzzustandsüberwachung eine Einschränkung seiner Bandbreite hinzunehmen. Zum andern müsste dies durch die Energieversorger einzeln abgefragt werden, was zu erheblichen Transaktionskosten führen würde.

Im Ergebnis können öffentliche Netze aus Sicht des Gebots der Netzneutralität also für Smart Grids grundsätzlich verwendet werden. Das Angebot von Spezialdiensten ist möglich, kann aber die fehlende Schwarzfallfähigkeit, die bei Smart-Grid-Anwendungen essentiell ist, nicht kompensieren. Hinsichtlich des zukünftigen Einsatzes von 5G, das im Rahmen des Network-Slicings eine Priorisierung von Daten ermöglicht, gehen die europäischen Regulierungsbehörden heute davon aus, dass diese Form der Priorisierung mit den Vorgaben der Netzneutralität vereinbar ist. Es besteht somit kein Handlungsbedarf. Der TK-Rahmen beeinträchtigt nicht die Digitalisierung der Energiewende.

3.8 Internationale Erfahrungen

Kapitel auf einen Blick

In diesem Kapitel zeigen wir auf, welche Wege in einigen europäischen Ländern gegangen werden, um beispielsweise SMGWs anzuschließen. Der internationale Vergleich zeigt, dass es in den Ländern, in denen die 450-MHz-Frequenz für die Energiewirtschaft verfügbar ist, entsprechende Funknetze aufgebaut worden sind bzw. aufgebaut werden. Die Länder, die bereits eine Vielzahl von SMGWs seit Jahren im Feld haben und dabei geringere sicherheitstechnische Auflagen haben, greifen sehr häufig auf die Powerline-Technologie zurück.

Im Ergebnis zeigt der Vergleich eine Diversität bei der Auswahl von Kommunikationstechnologien und -netzen, die auch von regulatorischen oder gesetzlichen Anforderungen beeinflusst wird. Ableitungen für Deutschland können angesichts unterschiedlicher Rahmenbedingungen nicht getroffen werden.

Die Anforderungen an Verteilernetzbetreiber haben sich auch in vielen anderen Ländern geändert. Die Einspeisung erneuerbarer Energie und die damit gestiegene Komplexität des Netzmanagements oder die Pflicht zum Rollout von Smart Metern zwingt die Netzbetreiber zur Installation bzw. zum Ausbau von IKT-Infrastruktur.

Bereits im Jahr 2013 hat die EUTC¹¹⁹ darauf hingewiesen, dass die Anforderungen an die Netze aufgrund spezifischer Gegebenheiten sehr unterschiedlich sein können, für kritische Kommunikationsfälle aber eine sichere Infrastruktur zur Verfügung stehen sollte.¹²⁰ Eine eigene drahtlose Kommunikationsinfrastruktur mache die Zuteilung von Frequenzen, insbesondere im Bereich 450 MHz, notwendig. Eine europäische Harmonisierung in diesem Bereich senke die Kosten und erhöhe die Versorgungssicherheit. Aktuell gibt es hierzu allerdings keine Bestrebungen innerhalb der EU, weil die Frequenznutzung in diesem Band in den Mitgliedstaaten sehr unterschiedlich ist.

In der Tat nutzen auch im europäischen Ausland einige Unternehmen bereits die 450-MHz-Frequenz zum Zwecke der Digitalisierung der Energienetze. Nachfolgend werden verschiedene Ansätze vorgestellt, um Einblicke in die spezifischen Hintergründe der entsprechenden Lösungen und die regulatorischen Rahmenbedingungen zu geben. Hieraus lassen sich ggf. Rückschlüsse für den deutschen Markt ziehen.

3.8.1 Niederlande

Die Niederlande verfügen mit acht Verteilernetzbetreibern eine relativ überschaubare Anzahl an Akteuren. Die gewählten Ansätze für den Auf-/Ausbau der IKT-Infrastruktur für Smart Grids und Smart Metering fallen dennoch unterschiedlich aus.

3.8.2 Fallbeispiel 1: Alliander

Alliander ist der größte niederländische Netzbetreiber. Er versorgt 3 Millionen Strom- und 2,9 Millionen Gaskunden.¹²¹ Darüber hinaus werden durch Alliander über 650.000 intelligente Zähler bewirtschaftet. Im Rahmen der zunehmenden Flexibilisierung des Energiesystems war es notwendig, in Smart Grids zu investieren. Für deren Aufbau standen verschiedene Technologien zur Verfügung, aus denen eine Auswahl für eine zweckmäßige Implementierung der IKT-Infrastruktur getroffen werden musste.

¹¹⁹ Europe Utility Technology Council

¹²⁰ European Utilities Telecom Council (EUTC): "Spectrum needs for Utilities", EUTC position paper, 2013, online verfügbar: <http://eutc.org/wp-content/uploads/2016/04/EUTC-Spectrum-Position-Paper.pdf>.

¹²¹ Vgl. im Folgenden: E. Moll: Strategic aspects of communication infrastructure of energy grid operator Alliander, ENERGISE Workshop - March, 2016.

Um eine Entscheidung treffen zu können, wurden – vergleichbar zum Vorgehen in dieser Studie – verschiedene Ansprüche an die Technologie definiert:

- Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit (Redundanz, Energieautonomie usw.)
- Bandbreite
- Durchschnittliches Datenvolumen
- Latenz
- Abdeckung (im Gebäude)
- Häufigkeit der Kommunikation

Auf der anderen Seite existierten strategische Überlegungen und Anforderungen, da Alliander ein hohes Maß an Kontrolle über die IKT-Infrastruktur behalten wollte:

- Gesamtkosten der Lösung (Gesamtdesign)
- Lock-in-Effekte
- Lebenszyklus und Ecosystem der Technologie
- Zukunftssicherheit
- Standardisierte und bewährte Technologie
- Privatsphäre & Sicherheit

Im Spannungsfeld dieser beiden übergeordneten Kriterien (Anforderungen an die Technologie und Maß an Kontrolle) bewegen sich aus Sicht von Alliander die verschiedenen technischen Lösungen, wie Abbildung 3-2 verdeutlicht.

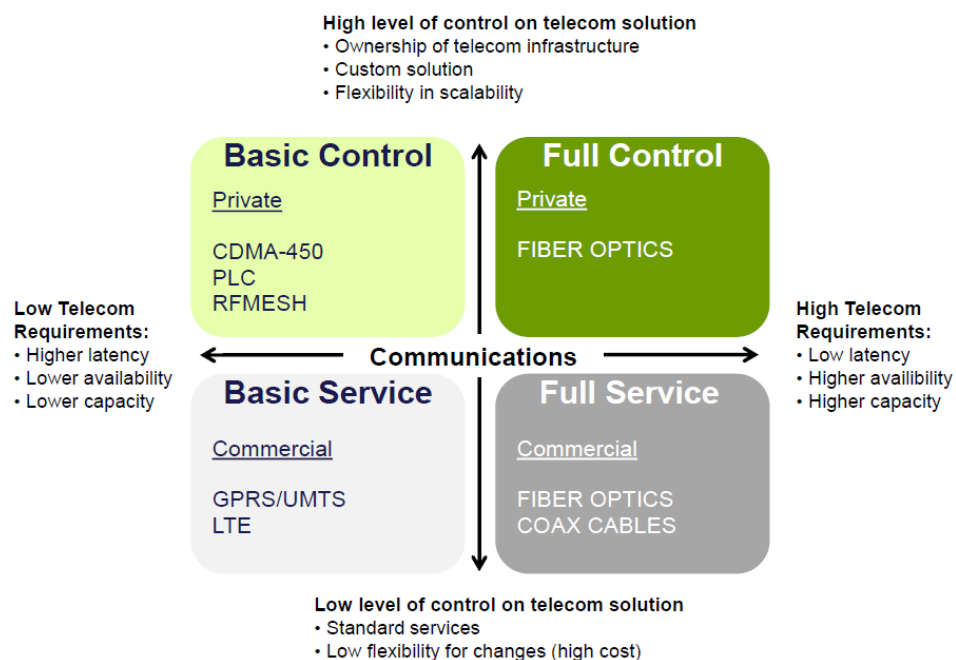


Abbildung 3-2: Technische Anforderungen an die TK-Infrastruktur und Maß an Kontrolle am Fallbeispiel Alliander (Niederlande)

Quelle: Alliander (2016)

Während des Entscheidungsprozesses wurde deutlich, dass sich die kommerziellen Angebote der TK-Unternehmen nicht vollständig mit den Anforderungen von Alliander deckten. Erstere bieten Standardprodukte und Dienstleistungen für den Massenmarkt an; Energieversorger sind für sie nur ein relativ kleiner Kundenkreis. Auf der anderen Seite verlangen Energienetzbetreiber eine garantierte Langlebigkeit der technischen Lösung und die (TK-) Versorgung über einen langen Zeitraum, niedrige Kosten pro Anlage sowie ein hohes Maß an Kontrolle über Qualitäts- und Sicherheitsanwendungen. Entscheidend ist, dass die IKT-Infrastruktur aus Sicht von Alliander geschäftskritisch ist. Aus diesem Grund entschied man sich für eine private, dedizierte Lösung.

Die Wahl fiel dabei auf zwei verschiedene Technologien: Während für das eigentliche Smart Grid (also die reine Netzinfrastruktur) inklusive der Ortsnetzstationen auf ein privates Glasfasernetz zurückgegriffen wurde, entschied man sich bei der Anbindung verschiedener Einheiten (im erweiterten Umfeld) der Endkunden auf Niederspannungsebene (Smart Meter, Straßenbeleuchtung) für die drahtlose CDMA-450-Technologie.

Alle Trafostationen und Kontrollräume sind somit durch Glasfaser verbunden. Dies geschieht sowohl über gemietete Leitungen (Dark Fiber) als auch durch den Aufbau eigener Leitungen auf der letzten Meile zum jeweiligen Standort. Die genutzte IKT-Infrastruktur ist somit nicht öffentlich, die Überwachung und Kontrolle des Netzwerks erfolgt betriebsintern.

Der Aufbau des Funknetzes erfolgte gemeinsam mit einem weiteren Verteilernetzbetreiber (Stedin) im Rahmen eines Joint Ventures. Als Grundlage diente der Erwerb der Lizenz für die 450-MHz-Frequenzen. Dadurch konnte erreicht werden, dass die diesem Netz immanente Infrastruktur (Antennen, Masten usw.) im vollständigen Besitz des Energieversorgers ist. Der Betrieb des Netzes wird vom niederländischen TK-Unternehmen KPN durchgeführt.

Für Alliander steht die Erkenntnis im Vordergrund, dass eine zuverlässige Datenkommunikation die Grundlage für Smart Grids und Smart Metering darstellt. Die IKT-Infrastruktur bildet einen Kernbestandteil der Aufgabe der Energieverteilung. Die Kontrolle über diese Infrastruktur ist für Alliander wesentlich, wobei sich Alliander ausdrücklich nicht als Telekommunikationsunternehmen versteht.

Die gewählten Lösungen im Bereich der Festnetz- und Drahtlosverbindungen erfüllen dabei die Anforderungen an das gewünschte Kontrollniveau, das angestrebte Eigentum an der Infrastruktur sowie an die notwendige Auslagerung von Aufgaben an das Telekommunikationsunternehmen.

3.8.2.1 Fallbeispiel 2: Enexis

Auch Enexis ist ein Verteilnetzbetreiber in den Niederlanden. Durch verschiedene Entwicklungen im Energiesystem hat sich Enexis entschieden, eine aktive Rolle bei der Transformation einzunehmen. Es gilt insbesondere auf die zunehmende Einspeisung erneuerbarer Energien zu reagieren, die eine Dezentralisierung der Erzeugung, neue Energiedienstleistungen, gestiegene Ansprüche an die Flexibilität und eine zunehmende Datenmenge impliziert.¹²² Insbesondere die Datenkommunikation wird als entscheidender Wegbereiter für die Zukunft als „digitaler Verteilnetzbetreiber“ angesehen. Ein Smart Grid soll durch die Implementierung einer geeigneten Kombination aus Daten, Technologien und Algorithmen aufgebaut werden. Bis Ende 2020 sollen 1,9 Mio. Smart Meter eingebaut werden.

Enexis möchte dabei nicht Eigentümer der neu aufzubauenden Datenkommunikations-Infrastruktur sein, es sei denn, dies wäre aus Gründen der Corporate Identity, der funktionalen Anforderungen oder der Marktsituation notwendig.

¹²² Vgl. im Folgenden: P. Westbroek: Enexis telecommunications strategy, ENERGISE workshop - March, 2017.

Grundsätzlich wird der Ansatz einer geteilten Infrastrukturnutzung verfolgt. Die Kundenanschluss- und MS- / NS-Netz-Domänen verwenden die gleiche Infrastruktur, es sei denn, dies verursacht höhere Gesamtkosten oder inakzeptable Auswirkungen auf den Kunden. Wenn dies zu Kostensenkungen führt, strebt Enexis eine Zusammenarbeit mit anderen Netzbetreibern an. Weiterhin wird eine Zusammenarbeit mit kommerziellen Partnern nicht von vornherein ausgeschlossen.

Die Datenkommunikationsstrategie von Enexis wird regelmäßig aktualisiert. Projekte werden evaluiert, um zu verifizieren, dass sie dieser Strategie entsprechen. Die angestrebte technische Lösung sollte auf Basis standardisierter Technologien erfolgen, ausgereift sein und nicht am Ende ihres erwarteten Lebenszyklus stehen. Weiterhin sollte sie in großem Umfang in Europa eingesetzt werden. Es ist nicht das Ziel von Enexis, ein Innovator oder früher Anwender einer Kommunikationstechnologie zu sein.

Enexis bewertete schließlich verschiedene in Frage kommende Technologien anhand 14 unterschiedlicher Kriterien. Man favorisierte im Bereich Smart Meter zunächst eine G3-PLC-Lösung. Nach Schwierigkeiten mit der PLC-Technologie entschied man sich aber schließlich für eine vollständige LTE-Lösung. Als Gründe wurden aufgeführt:

- Bessere Abdeckung, besonders in den Grenzgebieten;
- Enexis will mit LTE agiler sein und sich leichter an zukünftige Entwicklungen anpassen;
- Profitieren von weltweiten Innovationen im Bereich LTE (große installierte Basis);
- Bessere Anpassung an die Datenkommunikationsstrategie, keine eigenen Anlagen;
- Geringere Komplexität beim Rollout;
- Niedrigere Kommunikationsgesamtkosten.

Bezüglich der Organisationsstruktur entschied man sich insbesondere aus Kostengründen für die Lösung mittels eines privaten Mobile-Virtual-Network-Operators (MVNO). Enexis setzt dabei eigene SIM-Karten ein, die primär ein Mobilfunknetz nutzen, sich jedoch auch in andere Mobilfunknetze einbuchen können. Eine CDMA-Lösung, wie sie Alliander verfolgt, wurde nicht ausgewählt, weil es im Grenzgebiet zu Interferenzproblemen kommen könnte. Über die technische Lösung sollen keine netzbetrieblichen Anwendungen realisiert werden.

3.8.2.2 Regulierung

Grundsätzlich haben die Niederlande eine Anreizregulierung (Revenue Cap) mit Anleihen aus der Yardstickregulierung implementiert. Zur Bestimmung der statischen Effizienz von DSOs setzt die Regulierungsbehörde (ACM) das Instrument des Yardsticks ein.¹²³ Das bedeutet, dass die Einnahmen der DSOs nach dem gleichen Effizienzmaßstab festgelegt werden. Der Effizienzmaßstab wird gleich den effizienten Kosten pro Produktionseinheit gesetzt, die anhand der durchschnittlichen Kosten der VNBs berechnet werden. Die effizienten Stückkosten sind die Kosten pro Produktionseinheit (einschließlich einer angemessenen Rendite), die nach Ansicht von ACM einem Netzbetreiber zur Erfüllung seiner gesetzlichen Aufgaben pro Produktionseinheit entstehen sollten. Wenn ein Anlagenbetreiber höhere Kosten als die Durchschnittskosten hat, muss er die Kosten senken oder einen Verlust hinnehmen.

¹²³ Autoriteit Consument & Markt (ACM): Incentive regulation of the gas and electricity networks in the Netherlands, 2017, online verfügbar: https://www.acm.nl/sites/default/files/old_publication/publicaties/17231_incentive-regulation-of-the-gas-and-elektricity-networks-in-the-netherlands-2017-05-17.pdf.

Die gewählte Kostenbasis unterscheidet dabei nicht zwischen verschiedenen Kostenbestandteilen (TOTEX-Regulierung). Wie in der vorangegangenen Regulierungsperiode stützt sich die Regulierungsbehörde aktuell auf die drei letzten Jahre. Wie die aufgeführten Beispiele zeigen, verhindert ein solches Regulierungsregime Investitionen in Smart Grids bzw. eine entsprechende IKT-Infrastruktur nicht. Durch das Yardstick-Element können Investitionen in Smart Grids entsprechend so gesteuert werden, dass sie effizient sind.

3.8.3 Irland

ESB, der einzige und somit landesweit agierende Verteilernetzbetreiber in Irland, richtet seine Strategie aufgrund folgender Entwicklungen aus:¹²⁴

- 40 % der elektrischen Energie sollen bis 2020 aus erneuerbaren Quellen stammen;
- Implementierung des Smart-Metering-Programms (Smart Meter Rollout);
- 10 % des gesamten inländischen Verkehrs sollen bis 2020 strombasiert betrieben werden.

Bis zum Jahr 2027 soll die Kommunikationsinfrastruktur daher umfangreich ausgebaut werden. Dies umfasst das bestehende sowie das neue operationelle Glasfasernetz im Verteilernetz, Mikrowelle und ein 4G-Funknetz.

Die Herausforderung besteht für ESB darin, die optimalen Medien auszuwählen, die die spezifischen betrieblichen Anforderungen an Sicherheit, Geschwindigkeit, Kapazität und Verfügbarkeit erfüllen.¹²⁵

Im Vorlauf zu dieser Strategie analysierte ESB im Jahr 2010 die Situation in Irland bezüglich der bestehenden Infrastruktur (einschließlich der Telekommunikationsinfrastruktur), um zu prüfen, ob Verbesserungsbedarf existiert. ESB hatte bereits Glasfasern in seinem Hochspannungsnetz eingesetzt, sodass sich die Frage stellte, ob das Mittel- / Niederspannungsverteilstromnetz verwendet werden könnte, um Glasfaser zu den Endkunden zu bringen.

ESB führte technische Versuche für Kanäle und Masten durch, um die Machbarkeit zu prüfen. Nach erfolgreichen Versuchen startete ESB im September 2012 einen Ausschreibungsprozess, um einen Partner in einem Joint-Venture-Unternehmen zu finden, um ein FTTH-Netzwerk auf der bestehenden Strominfrastruktur als Teil seiner Innovationsstrategie zu implementieren.

Im Dezember 2013 kündigte die Regierung ein Gesetz an, das ESB ermöglicht, seine Infrastruktur für die Einführung von Glasfaser zu nutzen. Vodafone Ireland war der beste Bieter. Die Vereinbarung zur Gründung der neuen Joint-Venture-Gesellschaft wurde im Juli 2014 unterzeichnet und im Oktober 2014 von der Europäischen Kommission genehmigt. Das Ergebnis war SIRO, eine eigene Infrastrukturgesellschaft.

SIRO baut ein GPON-Netzwerk, dessen Eigentümer es selbst ist. Es greift auf das Verteilungsnetzwerk von ESB an HV-Stationen zu, die die Points-of-Presence (PoP) darstellen und verwendet die Niederspannungsmasten, um die Glasfasern möglichst nahe zu den Endkunden zu bringen.

ESB hat kostenlos Zugang zu zwei Faserkernen für eigene Zwecke (Smart Grid, Smart Metering etc.). Das Stromnetz hat stets Vorrang vor dem Glasfasernetz. Dies war eine der Bedingungen der Regulierungsbe-

¹²⁴ Vgl. ESB Networks: ESB Networks 2027: Lighting the way to a better energy future“, 2012, online verfügbar: http://europe.nextbook.com/nxteu/zahra/esb_networks2027/index.php#/1.

¹²⁵ Ebenda.

hörde für die Genehmigung der Kooperation. Darüber hinaus müssen die Sicherheitsstandards des Stromnetzes eingehalten werden. Wenn gleichzeitig zwei Fehler auftreten, wird das Stromnetz zuerst repariert, da das Glasfasernetz aufgrund des Strombedarfs beim Kunden sonst nicht funktionieren kann.

3.8.4 Großbritannien

In Großbritannien ist der bereits begonnene Smart Meter Rollout ein wesentlicher Treiber des Aufbaus einer digitalen Energieinfrastruktur. Die dafür verwendete IKT-Infrastruktur soll grundsätzlich auch als Grundlage für die Implementierung eines Smart Grids dienen können.¹²⁶ Aus diesem Grund wird an dieser Stelle hauptsächlich auf die Kommunikationstechnologien eingegangen, die zur Anbindung der Smart Meter verwendet werden.

Großbritannien hat einen anderen Ansatz gewählt als die meisten anderen Länder, die intelligente Zähler einsetzen, indem es den Rollout zwischen intelligenten Zählern auf der einen Seite und den Kommunikationsnetzen, die sie verbinden, auf der anderen Seite klar teilt.

Der Smart-Meter-Rollout sieht eine Ausbringung von 53 Millionen neuen Zählern bis Ende des Jahres 2020 vor. Die Errichtung der entsprechenden IKT-Infrastruktur erfolgt in drei verschiedenen Gebieten durch unterschiedliche Unternehmen. Diese wurden im Rahmen einer Ausschreibung ausgewählt.

Für Schottland und Nordengland erhielt das britische Kommunikationsinfrastrukturunternehmen Arqiva den Zuschlag. Es setzt eine Datenkommunikations- und -verarbeitungsplattform (FlexNet) ein, die speziell für Smart-Metering- und Smart-Grid-Anwendungen optimiert wurde.

FlexNet verwendet Radiowellen, um Daten von einem Punkt zum anderen zu übertragen. Dies geschieht auch auf lizenziertem 400-MHz-Spektrum, was bedeutet, dass es nicht anfällig für Interferenzen der verschiedenen anderen Netzwerke ist, die in vernetzten Häusern und Bürogebäuden vorhanden sind.

Diese Nutzung von lizenziertem Funkspektrum bedeutet auch, dass FlexNet skaliert werden kann, um eine bidirektionale Echtzeit-Datenübertragung für eine beliebige Anzahl von intelligenten Geräten zu ermöglichen.¹²⁷

Für die zentralen und südlichen Regionen Großbritanniens erhielt Telefónica den Zuschlag. Telefónica (O2) setzt das eigene Mobilfunknetz (2G + 3G) ein. Zusätzlich wird auf „Mesh“-Technologien für Verbindungen in schwer zugänglichen Bereichen zurückgegriffen. Mit der Kombination von bestehender Abdeckung, zusätzlichen Antennen und Mesh-Radio hat Telefónica zum 1.1.2017 die geforderten 97,75 % Abdeckung geliefert. Weitere 1,5 % Abdeckung sind geplant, 0,75 % bleiben unerreichbar.

Die Schmalband-RF-Mesh-Technologie verwendet Funkfrequenzen mit geringerer Bandbreite. Die Vorteile sind, dass Schmalbandanwendungen erheblich weniger Strom verbrauchen und weniger spektral-

¹²⁶ In Großbritannien sind die Vertriebsunternehmen für den Einbau der Zähler verantwortlich. Siehe DECC und Ofgem: Smart Grid Vision and Routemap, 2014, online verfügbar: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/285417/Smart_Grid_Vision_and_RoutemapFINAL.pdf.

¹²⁷ FlexNet: Homes and businesses across the UK are already benefitting from the latest smart metering solutions, and the network is growing rapidly., o.D., online verfügbar: <https://www.arqiva.com/overviews/smart-metering/flexnet/>.

intensiv sind als solche mit höheren Frequenzen. Schmalband-Netzwerke bieten daher mehr Kapazität für verbundene Geräte¹²⁸.

3.8.5 Spanien

Spanien war eines der ersten europäischen Länder, das Vorschriften für Smart Metering erlassen und angewendet hat. Die Gesetzgebung sah vor, dass alle neuen Stromzähler ab 2007 mit Fernablese- und Time-of-Use-Funktionen ausgestattet werden mussten.

Darüber hinaus müssen alle Energieversorger seit Anfang 2014 über ein AMM-System verfügen und bis Dezember 2018 müssten alle 27 Millionen Stromzähler durch intelligente Zähler ersetzt werden.

In der Regel sind alle Zähler unterhalb der Trafostation über einen einzigen Datenkonzentrator über das PLC-PRIME-Netzwerk verbunden. PRIME ist eine Schmalband-Powerline-Lösung. Die Datenkonzentratoren sind mit den Kontrolleinheiten am HeadEnd des Versorgers über VPN entweder mit Festnetz-ASL oder über GPRS verbunden.

3.8.6 Österreich

In Österreich findet ein technologieoffener Smart-Meter-Rollout statt. (Vorgabe: „bidirektionale Kommunikationsanbindung“). Als Beispiele können hier aufgeführt werden:

- Netz Burgenland und Kärnten Netz: Die Verteilnetzbetreiber setzen G3-PLC (Protokoll für die niederfrequente Schmalband-Powerline-Kommunikation (NB-PLC)) ein.
- Tinetz (Tirol), Salzburgnetz, Innsbrucker Kommunalbetrieb und das Vorarlberger Energienetz, sowie 26 weitere Energieversorger, haben eine Kooperation „Smart Meter West“ ins Leben gerufen und gemeinsam 1,2 Millionen Stromzähler ausgeschrieben. A1 erhielt den Zuschlag. Sie setzen ebenfalls auf eine Powerline-Kommunikation, der den globalen Protokollstandard G3-PLC benutzt¹²⁹.
- Wiener Netze und EVN, Niederösterreichs Energieversorger, haben eine Bedenkpause eingelegt und den Smart-Meter-Rollout verschoben, da Rahmenbedingungen des „Opt-outs“ nicht geklärt sind. Die „Opt-out“-Regelung gibt den Kunden das Recht, auf einen intelligenten Stromzähler zu verzichten und auch die Möglichkeit bei Umzug den Stromzähler auf Kosten des Unternehmens zurückrüsten zu lassen. Auch in der Steiermark gab es noch keine flächendeckende Ausschreibung für Smart Meters¹³⁰.
- Telekom Austria Group M2M bietet End-to-End Smart Metering an – mit unterschiedlichen Zählerherstellern und unterschiedlichen Kommunikationstechnologien (GPRS, EDGE, UMTS, LTE, Mesh Radio), eingesetzt z. B. in Graz.

¹²⁸ CyanConnode: Solutions: Narrowband RF mesh, o.D., online verfügbar: <http://cyanconnode.com/solutions/narrowband-rf-mesh/>.

¹²⁹ A1: A1 und A1 Digital statten Westösterreich mit Smart Metering Lösung der nächsten Generation aus, Meldung, 10.10.2017, 2017, online verfügbar: <https://www.a1.net/newsroom/2017/10/a1-und-a1-digital-statten-westoesterreich-mit-smart-metering-loesung-der-naechsten-generation-aus/>.

¹³⁰ B. Wimmer: Smarter Zähler wird bei Opt Out 'unintelligent' gemacht, futurezone, 28.05.2015, online verfügbar: <https://futurezone.at/b2b/evn-will-weniger-smart-meter-einfuehren-als-vorgeschrieben/133.183.055>.

- Nur der Verteilernetzbetreiber Oberösterreichs traf schon 2014, nach dem niederländischen Verteilernetzbetreiber Alliander, die Entscheidung für ein dediziertes Funknetz im 450-MHz-Bereich. Dabei wird die CDMA-450-Technologie eingesetzt. Das vorhandene Glasfasernetz dient als Datenüberträger zwischen den Umspannungsanlagen. Die AMIS Endgeräte kommunizieren via Powerline mit den Datenkonzentratoren, welche wiederum mit dem Head-End-System (Zentrale) über ein privates Funknetz verbunden werden.¹³¹ 2013 ersteigerte das Unternehmen Kapsch, das Kommunikationsdienste und Mobilitätslösungen anbietet, die 450-MHz-Lizenz mit der Ankündigung, diese für die Anwendung des Smart Meterings einzusetzen. Die Ausbreitungseigenschaft dieser Frequenz ermöglicht eine große Abdeckung. Bis 2029 kann das Unternehmen die Frequenz nutzen, welches die nötige Investitionssicherheit garantiert.¹³² Ein großer Vorteil dieser Lösung ist dabei die hohe Resilienz und Schwarzstartfähigkeit, da die Technik dem Versorgungsunternehmen gehört und Notstromaggregate besser als in einem öffentlichen TK-Netz wegen der geringeren Anzahl aktiver Komponenten installiert werden können.

Es existiert im Bereich der energieseitigen Netzregulierung keine spezifische Regulierung für Smart Grids. Im Bereich Smart Metering werden die Mehrkosten über einen Investitionsfaktor (CAPEX), einen Betriebskostenfaktor (OPEX, unabhängig von der Zählertechnologie) und ein separates Kosten-Plus-System zur Abgeltung der operativen Mehrkosten aus der Einführung von Smart Metern abgedeckt. Dies soll Technologieneutralität bzw. die Neutralität der Umsetzungsentscheidung (Make or buy) garantieren.

3.8.7 Frankreich

Auch in Frankreich wurde ein flächendeckender Smart-Meter-Rollout bis 2020 beschlossen. Das Unternehmen Enedis, das 95 % des Verteilernetzes in Frankreich betreibt, setzt dabei weitgehend auf drahtgebundene Lösungen.

Für die drahtgebundene Kommunikation verlässt sich Enedis auf kommerzielle Betreiber. Ausnahmen bilden zum einen die Kommunikation zwischen den Smart Metern der Endkunden und den MS / NS-Unterstationen. Hier erfolgt die Kommunikation via PLC. Zum anderen wird in Paris ein Kupfer- / Glasfasernetz von Enedis betrieben. Es bestehen allerdings keine Pläne (auch langfristig), ein Glasfasernetz zu implementieren. Allerdings gewährt Enedis laut eigener Aussage Zugang auf Masten und Leerrohre und erleichtert so den Einsatz von Glasfaser durch Dritte.

Im Bereich der drahtlosen Kommunikation betreibt Enedis ein 70-MHz-Funknetz. Es unterstützt auch die Steuerung von mehr als 20.000 Alt-Fernbedienungsterminalen (RTUs). Allerdings kann es die neuen Geräte / RTUs nicht aufnehmen (IP-basierte Protokolle, kontinuierliche Datenflüsse).

3.8.8 Dänemark

Der nationale Rollout von Smart Metern soll bis Ende 2020 abgeschlossen sein. Dong Energy bringt beispielsweise in Kopenhagen die intelligenten Zähler aus. Als Kooperationspartner fungiert dabei der Anbieter intelligenter Energie- und Wassermesslösungen Kampstrup. In Kopenhagen sollen so 1 Mio. Zähler bis 2020 (ca. 1.500 Stromkunden täglich) ausgebracht werden.

¹³¹ J. Kaltenleithner: Sichere Vernetzung der Datenkonzentratoren für Smart Meter, Amisblog, 26.04.2016. online verfügbar: <http://amis.energieagtelekom.at/2016/04/26/sichere-vernetzung-der-datenkonzentratoren-fuer-smart-meter/>.

¹³² Kapsch CarrierCom: Kapsch wins bid for 450 MHz frequency band, Press release, 21.08.2013, online verfügbar: http://www.kapsch.net/kcc/press/pressitems/kcc_130821_pr.

Als Kommunikationsweg wurde die Funktechnologie Radio-Mesh gewählt. Sie ist ausschließlich auf Zählern und Konzentratoren aufgebaut, eine zusätzliche Infrastruktur ist nicht erforderlich. Die Elektrizitätszähler verfügen über eine integrierte Funkeinheit, die mit anderen Zählern und Datenkonzentratoren kommunizieren kann.

Hinsichtlich der Regulierung existiert in Dänemark eine Erlösbergrenze für Verteilernetzbetreiber. Die Regulierungsbehörde (DERA) hat ein Modell genehmigt, das die Netzgesellschaften zur Finanzierung des Einsatzes von Smart Metern nutzen können. Dieses Modell führt zu einer Steigerung der Preise der Netzgesellschaften. In der Praxis bedeutet das, dass zunächst die Netzgesellschaften die Kosten für den Einbau neuer Geräte zu tragen haben. Verbraucher können anschließend für alle zusätzlichen mit der Investition verbundenen Kosten belastet werden.

3.8.9 Zwischenfazit

In den betrachteten Ländern gibt es sehr unterschiedliche technische Lösungen. Die gesetzlichen Anforderungen an die bidirektionale Anbindung von SMGW sind in Deutschland am höchsten. Aus diesem Grund können bestimmte Technologien im europäischen Ausland eingesetzt werden, die in Deutschland nicht die Anforderungen des BSI-Schutzprofils erfüllen. In einer Vielzahl von Ländern wird eine Funklösung im Bereich 450 MHz angestrebt, wobei die Kommunikation im Krisenfall im Vordergrund steht oder die Weitverkehrsanbindung von PLC realisiert wird.

4 Fazit und Handlungsempfehlungen

Die durchgeführten *technischen Analysen* zeigen, dass unterschiedliche, in Deutschland verfügbare TK-Infrastrukturen grundsätzlich geeignet sind, die Digitalisierung der Energiewende zu unterstützen.

Wir haben herausgearbeitet, dass in Bezug auf netzbetrieblich kritische Anwendungen im Verteilernetz und rund um das SMGW eine Funklösung im Bereich 450 MHz eine zentrale Rolle einnehmen kann. Betrachtet man dagegen nur die Anwendungen, die auf die SMGW-Infrastruktur zurückgreifen, zeichnet sich eine Kombination mehrerer TK-Infrastrukturen (z. B. zur Erfüllung von Abdeckungszielen im öffentlichen Mobilfunk) oder aber die Aufrüstung der Infrastruktur (z. B. zur Schließung von Abdeckungslücken oder zur Herstellung der Schwarzfallfestigkeit) ab. Hierbei ist jedoch zu bedenken, dass der Gesetzgeber mit dem SMGW eine Infrastruktur vorsieht, die sowohl für netzkritische als auch marktliche Anwendungen genutzt werden soll. Insofern ist eine synergetische Betrachtung beim Einsatz von Telekommunikationsdiensten angezeigt.

Die Nutzung einiger technisch geeigneter TK-Infrastrukturen unterliegt aus rechtlichen, regulatorischen oder organisatorischen Gründen gewissen Einschränkungen. So sind kabelgebundene Infrastrukturen (DSL, Breitbandkabel, Glasfaser) technisch grundsätzlich sehr gut geeignet, jedoch ergeben sich hohe Hürden bei der konkreten Umsetzung in den Gebäuden, da ein vom Endkundenanschluss entkoppelter Betrieb notwendig ist, der jedoch bei Breitbandkabel und DSL nicht besteht. Die Power Line Communications (PLC)-Technik bietet in der breitbandigen Variante (BB-PLC) grundsätzlich Potential für die Anbindung von SMGWs. Jedoch ist der Aufbau und Betrieb einer spezifischen PLC-Infrastruktur vor dem Hintergrund verschiedener im Gutachten benannter Einschränkungen nur als Teil einer Gesamtlösung denkbar. Hier ist die Etablierung eines Ecosystems mit mehreren Herstellern aktuell fraglich.¹³³

Den auf *Mobilfunk* aufbauenden Varianten kommt eine besondere Bedeutung zu, da hier die Ergebnisse der ausführlichen Betrachtungen (insbesondere Engpassanalysen) aufzeigen, dass die Herausforderungen in Bezug auf Abdeckung und Kapazität je nach Lösungsvariante mit (vertretbar erscheinendem) Aufwand lösbar sind. Hierfür sind verschiedene Ausgestaltungsvarianten denkbar und auch praktisch umsetzbar. Für den öffentlichen Mobilfunk ist eine Verdichtung des existierenden Netzes zur Erfüllung der Abdeckungsziele in Kombination mit dem Einsatz einer globalen SIM-Karte notwendig. Es ist aber fraglich, ob die potentiellen Umsätze, die aus der Anbindung von SMGWs oder Netzelementen für Mobilfunknetzbetreiber entstehen, diese Verdichtung von Basisstationen initiieren. Weiterhin sind neue Angebote für priorisierte Datendienste erforderlich. Schwarzfallfähige TK-Dienste wird es hier aber voraussichtlich nicht geben. Somit ist der öffentliche Mobilfunk im Ergebnis nur zur punktuellen Unterstützung der Energiewende (in Bezug auf bestimmte Anwendungen) geeignet.

Im Ergebnis gibt es nur eine Option, die die Digitalisierung der Energiewende vollständig unterstützen kann: TK-Dienste, die in einem bei 450-MHz-Netz angeboten werden.

Die seitens Tophema 2 vorgeschlagene Netzzustandsüberwachung führt, insbesondere in Uplink-Übertragungsrichtung, zu einer zusätzlichen Verkehrslast. Hierdurch entsteht je nach Szenario ein erhöhter Bandbreitenbedarf gegenüber den bisher betrachteten „reinen“ SMGW-Anwendungen gemäß VDE FNN. Ebenso kann durch diesen Dienst ein sehr hohes Datenvolumen entstehen.

¹³³ Auf diesen Umstand weist bereits Ernst & Young: Kosten-Nutzen-Analyse für einen flächendeckenden Einsatz intelligenter Zähler, 2013, online verfügbar: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/kosten-nutzen-analyse-fuer-flaechendeckenden-einsatz-intelligenterzaehler.pdf?__blob=publicationFile&v=5, hin.

Aufgrund verschiedener Entwicklungen werden sich die Leistungsmerkmale des Mobilfunks in den kommenden Jahren günstig für die Umsetzung von SMGW-Anwendungen entwickeln. Hierbei sind zu nennen: der *fortschreitende LTE-Netzausbau* in Bezug auf Netzabdeckung und Kapazität, die *mögliche Vergabe weiterer Funkbänder* (insbesondere 450 MHz), sowie die *Weiterentwicklung der LTE-Technik in Richtung 5G* mit der Möglichkeit der Bereitstellung garantierter Netzressourcen (Network-Slicing). Ein mit diesen schnell fortschreitenden technischen Entwicklungen synchronisierter, schrittweiser Aufbau der SMGW-Infrastruktur erscheint hier empfehlenswert.

Hinsichtlich der TK-Regulierung ist festzustellen, dass VNB und MSB im Regelfall Endkundenprodukte zur Anbindung von Betriebsmitteln oder von SMGW auf den relevanten TK-Märkten nachfragen. Die klassische sektorspezifische (asymmetrischen) Regulierung, die auf die Regulierung von Vorleistungsprodukten abstellt, ist hier nicht einschlägig und relevant. Jedoch zeigt sich, dass bei der künftigen Ausgestaltung der symmetrischen Regulierung, die nicht auf das Vorliegen von beträchtlicher Marktmacht abstellt, indirekt Einfluss auf die Anbindung von SMGW mit Glasfaser ausgeübt werden kann. Hier geht es darum, Anreize für einen weiteren Glasfaserausbau zu geben, von dem auch die Energiewirtschaft profitieren kann. Hinsichtlich der Netzneutralität zeigt sich, dass diese dem Angebot von Spezialdiensten für VNB und MSB nicht im Wege steht. Hinsichtlich der Frequenzregulierung bleibt zusammenfassend festzustellen, dass sie einen erheblichen Beitrag zur Digitalisierung der Energiewende leisten kann, wenn künftig Frequenzen im Bereich 450 MHz weiterhin für energiewirtschaftliche Anwendungen zur Verfügung stehen. International werden sowohl technisch als auch regulatorisch unterschiedliche Wege beschritten. Die Lösungen sind somit stark von den nationalen Gegebenheiten geprägt. Hierzu zählen unterschiedliche Ziele der Digitalisierung der Energiewirtschaft, die Frage der Marktstruktur sowie unterschiedliche Unternehmensphilosophien. Eine (optimale) TK-Infrastruktur hängt also von den Charakteristika des Landes (z. B. auch Verfügbarkeit von entsprechenden Frequenzressourcen, Vorgaben im Bereich SMGW) bzw. den handelnden Akteuren ab.

Folgende Herausforderungen lassen sich noch feststellen:

Das Gutachten hat gezeigt, dass an verschiedenen Stellen das Anforderungsprofil für SMGWs noch nachgeschärft werden kann, z. B. hinsichtlich der Anforderungen an sicherheitskritische Softwareupdates, die Schwarzfallfestigkeit und den konkreten Einbausituationen der SMGWs. Die Weiterentwicklung der BSI-Standards für weitere Einsatzbereiche und den daraus resultierenden Anforderungen für das SMGW sind bereits Bestandteile der weiteren Arbeiten des BSI.

Im Bereich des *Mobilfunks* besteht die Herausforderung für die Frequenzmanagementbehörden auf nationaler Ebene darin, Frequenzbereiche zu identifizieren, in denen IoT-Anwendungen, insbesondere auch diejenigen, die für die Digitalisierung der Energiewende benötigt werden, zulässig sein sollen und hierfür adäquate Frequenznutzungsbestimmungen sowie effektive Frequenzuteilungsregime festzulegen. Um zweifelsfrei sicher zu gehen, dass alle technischen und regulatorischen Anforderungen, die aus der Digitalisierung der Energiewende entstehen, in einem Funknetz realisiert werden könne, erscheint es erforderlich, dass in niedrigen Frequenzlagen (unterhalb von 1 GHz) exklusive Frequenzen für eine priorisierte Nutzung kritischer Infrastrukturen und hier insbesondere auch mit Blick auf den Energiesektor zur Verfügung stehen. Im Vergleich zu anderen kritischen Infrastrukturen (BOS) gibt es auf Ebene noch keine exklusiv für energiewirtschaftliche Anwendungen zugewiesenen Frequenzen, mit denen digitale zellulare Funktechnologien genutzt werden könnten. Daher sollte kurzfristig über die weitere Verwendung der 450-MHz-Frequenzen entschieden werden.

Literaturverzeichnis

- Accenture Consulting / Fraunhofer ESK: Smart Grid = Connected Grid, Kommunikationstechnologien als Grundlage des Smart Grid, Whitepaper, 2017.
- Akpakwu, G. A., Silva, B. J. Hancke, G. P. und A. M. Abu-Mahfouz: A Survey on 5G Networks for the Internet of Things: Communication Technologies and Challenges, IEEE Access, vol. 6, no. c, S. 3619–3647, 2017.
- Amin, M.: Toward Self-healing Energy Infrastructure Systems, in: IEEE Computer Applications in Power, January 2001, S. 20 – 28, 2001.
- Andres-Maldonado, P., Ameigeiras, P., Prados-Garzon, J., Ramos-Munoz, J. J. und J. M. Lopez-Soler: Reduced M2M signaling communications in 3GPP LTE and future 5G cellular networks, IFIP Wirel. Days, vol. 2016–April, S. 3–5, 2016.
- Auer, G. und O. Blume: EARTH Project D2.3 - Energy efficiency analysis of the reference systems, areas of improvements and target breakdown, Energy Aware Radio Netw. Technol. (EARTH), INFSO-ICT-247733, ver. 2.0., 2012, online verfügbar: <http://www.ict-earth.eu/>.
- Autoriteit Consument & Markt (ACM): Incentive regulation of the gas and electricity networks in the Netherlands”, 2017, online verfügbar: https://www.acm.nl/sites/default/files/old_publication/publicaties/17231_incentive-regulation-of-the-gas-and-elektricity-networks-in-the-netherlands-2017-05-17.pdf.
- Black, P. J. und Q. Wn: Link Budget of CDMA 2000 hEV-DO Wireless Internet Access System, S. 1847–1852, 2002.
- Body of European Regulators for Electronic Communications (BEREC): Guidelines on the Implementation by National Regulators of European Net Neutrality Rules, S.29, 2016.
- Breitband NRW: Breitbandtechnologien und Ausbauszenarien Überblick über die Technologien, 2016.
- Büning, H. und G. Trenkler: Nichtparametrische statistische Methoden“, De Gruyter, 2013.
- Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI): Technische Richtlinie BSI TR-03109-1 Anforderungen an die Interoperabilität der Kommunikationseinheit eines intelligenten Messsystems, 2013.
- Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI): Technische Richtlinie BSI TR-03109-1: Anlage VI: Betriebsprozesse, S. 43, 2013.
- Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI): Technische Richtlinie BSI TR-03109-6: Smart Meter Gateway Administration, S. 1–107, 2015.
- Bundesnetzagentur: Frequenzen im Bereich 450MHz, 2009.
- Bundesnetzagentur: Vfg 45/2016 - Allgemeinzuteilung von Frequenzen im Frequenzbereich 868 – 870 MHz für nichtöffentliche Funkanwendungen für Alarmierungszwecke, 2016.
- Bundesnetzagentur: Strategische Aspekte zur Verfügbarkeit von Frequenzen für den Breitbandausbau in Deutschland, 2016, online verfügbar: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/Entscheidungen/Strategiepapier2016.pdf?__blob=publicationFile&v=2.
- Bundesnetzagentur: Frequenzbedarfsabfrage für die zukünftige Nutzung der Frequenzen im Frequenzbereich 450MHz, 2017.

- Bundesnetzagentur: Orientierungspunkte zur Bereitstellung von Frequenzen für den Ausbau digitaler Infrastrukturen, 2017.
- Bundesnetzagentur: Frequenzplan, 2018.
- Bundesnetzagentur: Mobiles Breitband - Frequenzen für 5G, 2018, online verfügbar: https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/OeffentlicheNetze/Mobilfunknetze/mobilfunknetze-node.html.
- Bundesnetzagentur: Fragen der Entgeltbestimmung im Hinblick auf die Mitnutzung öffentlicher Versorgungsnetze und die Koordinierung von Bauarbeiten auf Grundlage des DigiNetzG, Konsultationsdokument, Bonn, 06.02.2018, online verfügbar: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Breitband/Entgeltmassstaebe_DigiNetzG/Konsultationsdokument_Entgeltmassstaebe_DigiNetzG.pdf;jsessionid=5D3B3D2FCB235A6EC3C9784AB49CDBF7?__blob=publicationFile&v=6.
- Bundesnetzagentur: Frequenzspektrum in den Bereichen 700 MHz, 800 MHz, 900 MHz, 1,5 GHz, 1,8 GHz, 2 GHz, 2,6 GHz und 3,5 GHz 700, S. 3600, 2018.
- Bundesregierung: Gesetz zur Digitalisierung der Energiewende, Bundesgesetzblatt, Nr. 43, S. 2034-2064, 2016.
- Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW): Betreibermodell für ein Mobilfunknetz in der Energiewirtschaft, Positionspapier, Berlin, 2. Oktober 2015.
- CableLabs: Data-Over-Cable Service Interface Specifications DOCSIS® 3.1 - MAC and Upper Layer Protocols Interface Specification, 2013.
- Cave, M.: Review of Radio Spectrum Management, An independent review for Department of Trade and Industry and HM Treasury, 2002.
- CyanConnode: Solutions: Narrowband RF mesh, o.D., online verfügbar: <http://cyanconnode.com/solutions/narrowband-rf-mesh/>.
- Dahlmann, E.: 3G Evolution: HSPA and LTE for Mobile Broadband, Academic Press, 2010.
- Damosso, E. et al.: COST 231 Final Report: Digital Mobile Radio Towards Future Generation Systems, COST 231 Final Rep., 1996.
- DECC und Ofgem: Smart Grid Vision and Routemap, 2014, online verfügbar: https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/285417/Smart_Grid_Vision_and_RoutemapFINAL.pdf.
- devolo AG: G3-PLC Modem 500k Handbuch, no. 1.1, 2016.
- devolo AG: Fünf Gründe für Breitbandpowerline im intelligenten Messsystem, 2018. online verfügbar: <https://www.devolo.com/products/Smart/devolo-BPL-Headend-and-Repeater/data/Produktinformation-devolo-BPL-Headend-and-Repeater-de.pdf>.
- Dorsch, N., Kurtz, F. und C. Wietfeld: Enabling Hard Service Guarantees in Software-Defined Smart Grid Infrastructures, in: Computer Networks, Elsevier, vol. 147, S. 112-131, Dezember 2018.
- Ernst & Young, „Kosten-Nutzen-Analyse für einen flächendeckenden Einsatz intelligenter Zähler“, 2013, online verfügbar: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/kosten-nutzen-analyse-fuer-flaechendeckenden-einsatz-intelligenterzaehler.pdf?__blob=publicationFile&v=5.
- ESB Networks: ESB Networks 2027: Lighting the way to a better energy future, 2012, online verfügbar: http://europe.nextbook.com/nxteu/zahra/esb_networks2027/index.php#/1.

- Europäisches Parlament und Europäischer Rat: Richtlinie 2014/61/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 15. Mai 2014 über die Maßnahmen zur Reduzierung der Kosten des Ausbaus von Hochgeschwindigkeitsnetzen für die elektronische Kommunikation, Amtsblatt der Europäischen Union, S. 1, Artikel 1, 2014, online verfügbar: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014L0061&from=DE>.
- European Telecommunications Standards Institute (ETSI): GSM 05.05 V 5.0.0: Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Radio transmission and reception (GSM 05.05), 1996.
- European Telecommunications Standards Institute (ETSI): Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Wideband transmission systems; Data transmission equipment operating in the 2,4 GHz ISM band and using wide band modulation techniques; Harmonized EN covering the essent, EN 300 328 - V1.9.1 , 2015.
- European Utilities Telecom Council (EUTC): Spectrum needs for Utilities, EUTC position paper, 2013, online verfügbar: <http://eutc.org/wp-content/uploads/2016/04/EUTC-Spectrum-Position-Paper.pdf>.
- Feltrin, L., Buratti, C., Vinciarelli, E., De Bonis, R. und R. Verdone: LoRaWAN: Evaluation of Link- and System-Level Performance, IEEE Internet Things J., vol. 5, no. 3, S. 2249–2258, 2018.
- FlexNet: Homes and businesses across the UK are already benefitting from the latest smart metering solutions, and the network is growing rapidly, o.D., online verfügbar: <https://www.arqiva.com/overviews/smart-metering/flexnet/>.
- Forum Netztechnik/Netzbetrieb (FNN) im VDE [Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik]: FNN-Hinweis Anforderungen an TK-Einrichtungen für den Betrieb von Messsystemen (Version 1), 2014.
- Forum Netztechnik/Netzbetrieb (FNN) im VDE [Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik]: FNN-Hinweis Anforderungen an TK-Einrichtungen für den Betrieb von Messsystemen (Version 2), 2017.
- Forum Netztechnik/Netzbetrieb (FNN) im VDE [Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik]: 5G fitmachen für den Stromnetzbetrieb, Positionspapier, 2017.
- Gao, Y., Zhang, X., Jiang, Y. und J.-W. Cho: System Spectral Efficiency and Stability of 3G Networks: A Comparative Study, IEEE Int. Conf. Commun., S. 1–6, 2009.
- Ghosh, A., Ratasuk, R., Mondal, B., Mangalvedhe, N. und T. Thomas: LTE-Advanced: Next-Generation Wireless Broadband Technology, IEEE Wireless Communications, no. 3, S. 10–22, 2010.
- Gorbil, G., Abdelrahman, O. H. und E. Gelenbe: Storms in mobile networks, Proc. 10th ACM Symp. QoS Secur. Wirel. Mob. networks - Q2SWinet '14, S. 119–126, 2014.
- Hägerling, C., Ide, C. und C. Wietfeld: Coverage and capacity analysis of wireless M2M technologies for smart distribution grid services, IEEE Int. Conf. Smart Grid Commun., S. 368–373, 2014.
- Hata, M.: Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services, IEEE Trans. Veh. Technol., vol. V, no. 3, S. 317–325, 1980.
- Heinlein, B.: Rechtsrahmen von Smart Grids und Smart Markets, in: Aichele, C. und O. D. Doleski, (Hrsg.): Smart Market: Vom Smart Grid zum intelligenten Energiemarkt, S. 53 – 79.
- Heino, P. et al.: WINNER+ Project Deliverable 5.3: Final Channel Models, Deliv. 5.3 Tech. Rep., vol. 1, no. 107, S. 107, 2010.
- Himmels, M. (devolo AG): dLAN Real World Field Test Results, 2011.

- HomePlug Alliance: HomePlug AV White Paper, Architecture, S. 1–11, 2005.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE): Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications IEEE Computer Society, IEEE Std 802.11-2007, 2007.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), IEEE Standard for Information technology – Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks – Specific requirements Part 11: Sub 1 GHz, 2016.
- Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Computer Society: 1901-2010 - IEEE standard for broadband over power line networks: medium access control and physical layer specifications, 2010.
- International Electrotechnical Commission (IEC): Communication networks and systems for power utility automation, IEC 61850, 2018.
- International Telecommunication Union (ITU): G.993.2 Very high speed digital subscriber line transceivers 2 (VDSL2)", 2007.
- International Telecommunication Union (ITU): G.984.1 Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics, 2008.
- International Telecommunication Union (ITU): Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-Advanced, Rep. ITU-R M.2135-1, 2009.
- International Telecommunication Union (ITU): Guidelines for evaluation of radio interface technologies for IMT-2020, Rep. ITU-R M.2412-0, 2017.
- International Telecommunication Union (ITU): Compilation of measurement data relating to building entry loss, Report ITU-R P.2346-2, 2017.
- International Telecommunication Union (ITU): Prediction of building entry loss, Recommendation ITU-R P.2109-0, 2017.
- Johnson, C.: Long Term Evolution in Bullets, 2nd ed., 2012.
- Jones, V. und H. Sampath: Emerging Technologies for WLAN, no. 53(3), March 2015, S. 141–149, 2015.
- Kaltenleithner, J.: Sichere Vernetzung der Datenkonzentratoren für Smart Meter, Amisblog, 26.04.2016. online verfügbar: <http://amis.energieagtelekom.at/2016/04/26/sichere-vernetzung-der-datenkonzentratoren-fuer-smart-meter/>.
- Kapsch CarrierCom: Kapsch wins bid for 450 MHz frequency band, Press release, 21.08.2013, online verfügbar: http://www.kapsch.net/kcc/press/pressitems/kcc_130821_pr.
- Kloepfer, M. (Hrsg.): Schutz kritischer Infrastrukturen, Schriften zum Katastrophenrecht, Band 3, 2010.
- Kyösti, P. T., Meirilä, J., Hentilä, L., Zhao, X., Jämsä, A., Schneider, C., Narandzić, M., Milojević, M., Hong, R., Ylitalo, J., Holappa, V.-M., Alatossava, M., Bultitude, T.R. und Y. de Jong: WINNER II Project Deliverable 1.1.2 Channel Models, Deliv. 1.1.2 Tech. Rep., vol. 1, no. 82, S. 82, 2008.
- Kurtz, F., Bektas, C., Dorsch, N. und C. Wietfeld: Network Slicing for Critical Communications in Shared 5G Infrastructures - An Empirical Evaluation", In 4th IEEE International Conference on Network Softwarization (NetSoft 2018), Canada, Juni 2018.
- Kurtz, F., Laukhin, I., Bektas, C. und C. Wietfeld: Evaluating Software-Defined Networking-Driven Edge Clouds for 5G Critical Communications, in: International Conference on ICT Convergence (ICTC),

- IEEE, Jeju-si, Republic of Korea, Oktober 2018.
- Lauridsen, M., Nguyen, H., Vejlgard, B., Kovacs, I. Z., Mogensen, P. und M. Sorensen: Coverage Comparison of GPRS, NB-IoT, LoRa, and SigFox in a 7800 km Area, IEEE Veh. Technol. Conf., vol. 2017-June, S. 2–6, 2017.
- LoRaTM Alliance: LoRaWAN TM Specification, S. 1–91, 2016.
- LoRaTM Alliance: LoRaWAN Regional Parameters v1.0, S. 7–11, 2016.
- Lüders, C., Lange, L. und B. Sörries: Überlegungen zum Einsatz von Mobilfunksystemen für Smart-Metering- und Smart-Grid-Anwendungen: CDMA450 versus LTE450, ITG-Fachbericht 258, VDE Verlag, 2015.
- Lüders, C. und B. Sörries: Eignung von Funktechnologien für die Digitalisierung der Energiewende, 2017.
- Mansmann, U.: Die Deutsche Telekom und die UMTS-Abschaltung, in: Heise online, 2017, <https://www.heise.de/newsticker/meldung/Die-Deutsche-Telekom-und-die-UMTS-Abschaltung-3606384.html>.
- Mansmann, U.: Telekom startet LTE auf 900 MHz, in: Heise Online, 2017, online verfügbar: <https://www.heise.de/newsticker/meldung/Telekom-startet-LTE-auf-900-MHz-3657557.html>.
- Marcus, S. et al.: Flexibilisierung der Frequenzregulierung, WIK-Consult, Studie für die Bundesnetzagentur, S. 284, 2005.
- Marger, D., Riedl, J., Tusch, J., Wietfeld, C., Wolff, I. und W. Zeitler: VDE-Positionspaper: Kommunikationsnetz für das Smart Grid, 2015.
- Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F. und F. Meyer: A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment, ICT Express, 2018.
- Meloni, A. und L. Atzori: The Role of Satellite Communications in the Smart Grid, IEEE Wirel. Commun., vol. 24, no. 2, S. 50–56, 2017.
- Mikhaylov, K., Petäjärvi, J., und T. Hänninen: Analysis of Capacity and Scalability of the LoRa Low Power Wide Area Network Technology, European Wireless, S. 119–124, 2016.
- Moll, E.: Strategic aspects of communication infrastructure of energy grid operator Alliander, ENERGISE Workshop - March, 2016.
- Monhof, S., Böcker, S., Tiemann, J. und C. Wietfeld: Cellular Network Coverage Analysis and Optimization in Challenging Smart Grid Environments, IEEE International Conference on Communications, Control, and Computing Technologies for Smart Grids (SmartGridComm), (im Review), 2018.
- Moslehi, K. et al.: Framework for a Self-Healing power Grid, in: IEEE Power Engineering Society General Meeting, S. 3027 - 3034, 2005.
- Newman, R., Yonge, L., Gavette, S., und R. Anderson: HomePlug AV security mechanisms, 2007 IEEE Int. Symp. Power Line Commun. Its Appl. ISPLC'07, S. 366–371, 2007.
- NGA-Forum AG Interoperabilität: Grundsatzdokument Technische und operationelle Aspekte des Zugangs zu Glasfasernetzen und anderen NGA-Netzen, 2011.
- Offner, G. (devolo AG): Smarte Lösung für die letzte Meile, in: BWK - Das Energie-Fachmagazin, Nr. 03, S. 5–8, 2018.
- Olof, L., Sundberg, M., Wang, E., Bergmann, J. und J. Sachs: Cellular Internet of Things, Academic Press, 2018.

- Papilaya, V. N., Vinck, a J. H. und K. Ouahada: Analysis of the devolo's 500 kHz G3-PLC Access Technology based on Smart Grid Field Trials, S. 138–143, 2014.
- Petermann, T. et al.: Was bei einem Blackout geschieht. Folgen eines langandauernden und großräumigen Stromausfalls, Studien des Büros für Technikabfolgenschätzung beim Deutschen Bundestag - 33, 2011.
- Physikalisch-Technische Bundesanstalt Braunschweig: Smart Metering – Digitale Kommunikation für Elektrizitäts- und andere Verbrauchsmessgeräte, Amts- und Mitteilungsblatt Nr. 3, S. 19–23, 2015.
- PPC AG: BPL stellt WAN-Tauglichkeit erneut unter Beweis, 2018, online verfügbar: <https://www.energiefachmagazin.de/2018/Ausgabe-1-2/Special-E-world-energy-water/BPL-stellt-WAN-Tauglichkeit-erneut-unter-Beweis>.
- PPC AG: Eine Generation weiter, Das bewährte G4 Breitbandpowerline-System, 2017, online verfügbar: <https://www.ppc-ag.de/wp-content/uploads/2017/08/PPC-Flyer-BPL-PPC-17-2057-5D.pdf>.
- P3 Connect: Der große Mobilfunknetztest 2018, 2018.
- Ruffini M., et al.: DISCUS: An end-to-end solution for ubiquitous broadband optical access, IEEE Commun. Mag., vol. 52, no. 2, S. 24–32, 2014.
- Rundfunk und Telekom Regulierungs-GmbH (RTR): Konsultation zum Vergabeverfahren 3,4 – 3,8 GHz, S. 28-29, Vienna, 13.07.2017, online verfügbar: https://www.rtr.at/de/inf/Konsult5GAuktion2018/Konsultation_Vergabe_3400-3800_MHz.pdf.
- Schirmacher, D.: Details zur KRACK-Attack, in: Heise Online, 2017, online verfügbar: <https://www.heise.de/security/meldung/Details-zur-KRACK-Attacke-WPA2-ist-angeschlagen-aber-nicht-gaenzlich-geknackt-3862571.html>.
- Schra, P. et al.: Radio Interface Performance of EDGE: A Proposal for Data Rates in Existing Digital Cellular Systems, S. 1064–1068, 1998.
- Semtech: Datasheet: SX1272/73 - 860 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver, 2017.
- Sharma, K. und L. M. Saini: Power-line communications for smart grid: Progress, challenges, opportunities and status, Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 67, S. 704–751, 2017.
- SigFox Q&A: <https://ask.sigfox.com/questions/1213/time-between-message-sent-and-message-recvied-at.htm>.
- Šljivo, A. et al.: Performance evaluation of IEEE 802.11ah networks with high-throughput bidirectional traffic, Sensors (Switzerland), vol. 18, no. 2, S. 1–28, 2018.
- Song, L. und J. Shen: Evolved Cellular Network Planning and Optimization for UMTS and LTE, CRC Press Taylor & Francis Group, 2011.
- Statista: Anzahl der LTE-Basisstationen in Deutschland in den Jahren 2012 bis 2017, online verfügbar: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/793776/umfrage/anzahl-der-lte-basisstationen-in-deutschland/>.
- Statistisches Bundesamt: Alle politisch selbständigen Gemeinden mit ausgewählten Merkmalen am 30.06.2018 (2. Quartal 2018) , online verfügbar : <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/LaenderRegionen/Regionales/Gemeindeverzeichnis/Administrativ/Archiv/GVAuszugQ/AuszugGV2QAktuell.html>.
- Strategy& / Accenture: Vorschlag eines Strategiekonzepts für den breitbandigen Datenfunk der Behör-

den und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS), 2014.

Straube, K. et al.: Strategische Empfehlungen zur Umsetzung intelligenter Energienetze in Deutschland, Projektgruppe Intelligente Energienetze, Arbeitsgruppe 2, Digitale Infrastrukturen als Enabler für innovative Anwendungen, Nationaler IT Gipfel Essen, 2012.

Subik, S., Bok, P. B., Kaulbars, D. und C. Wietfeld: ADeM: Active Delay Management for critical group communication over heterogeneous public cellular networks, IEEE Int. Conf. Comm. Work, 2014

Telefónica: Kampf den blinden Flecken in der Netzabdeckung, 2018, online verfügbar: <https://www.energiefachmagazin.de/2018/Ausgabe-03/Special-Smart-Metering/Kampf-den-blinden-Flecken-in-der-Netzabdeckung>.

Welotec: Smart-Meter-Gateway Antennen Starter Kits, o.D., online abrufbar: <https://www.welotec.com/files/welotec/dokumente/smart-meter-gateway-antennen.pdf>.

Westbroek, P.: Enexis telecommunications strategy, ENERGISE workshop - March, 2017.

WIK-Consult: Sinnvolle Prinzipien bei der Ausgestaltung eines Frequenzauktionsdesigns, Policy Paper, Bad Honnef, 30.05.2017, online verfügbar: http://www.wik.org/fileadmin/Studien/2017/Prinzipien_Frequenzauktionen_A1.pdf.

Wimmer, B.: Smarter Zähler wird bei Opt Out 'unintelligent' gemacht, futurezone, 28.05.2015, online verfügbar: <https://futurezone.at/b2b/evn-will-weniger-smart-meter-einfuehren-als-vorgeschrieben/133.183.055>.

450connect: Ausbau, 2018, online verfügbar : <https://www.450connect.de/loesung/#ausbau>.

Anhang A: Datenaufkommen von SMGW-Anwendungen

Eine detaillierte Aufstellung aller im FNN-Hinweisdokument definierten Anwendungsfälle (WAF) findet sich in Tabelle A-0-1. Die im Original gegebenen Einzeldatenraten wurden hier – wo zutreffend – um Flottendaten für eine Flotte von 100 SMGWs ergänzt. Außerdem wird eine Hauptverkehrsstunde (HVSt)-Datenrate ebenfalls für 100 SMGWs gezeigt. Die Hauptkenntnisse dieser Tabelle werden in Abbildung A-1, Abbildung A-2 und Abbildung A-3 illustriert. Abbildung A-1 zeigt die Flottendatenraten für alle Anwendungsfälle mit entsprechender Anforderung, sortiert nach der Höhe der Downlink-Datenrate. Demgegenüber fokussieren sich Abbildung A-2 und Abbildung A-3 auf die HVSt-Datenrate und zeigen die Anteile der dominantesten Dienste am gesamten Verkehrsaufkommen in Uplink- bzw. Downlink-Richtung.

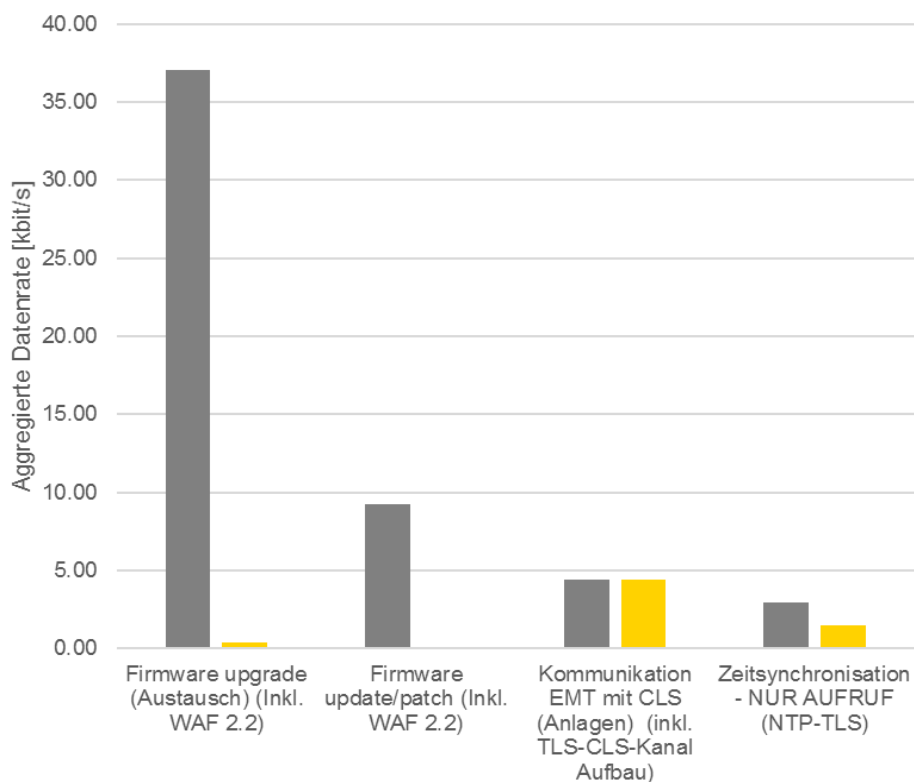


Abbildung A-1: Vergleich der Treiberanwendungsfälle für eine aggregierte Datenrate mit einer Beispielflotte von 100 SMGWs

Tabelle A-0-1: Übersicht von SMGW-Anwendungsfällen mit Angabe von minimalen Anschlussdatenraten, Flottendatenraten und HVSt-Datenraten

WAF	Nummer	Beschreibung	min. DL-Anschluss-Datenrate [bps]	min. UL-Anschluss-Datenrate [bps]	Flotten-datenrate DL [bps] Prio	Flotten-datenrate UL [bps] Prio	Flotten-datenrate DL [bps] NON-Prio	Flotten-datenrate UL [bps] NON-Prio	HVSt Datenrate DL [bps]	HVSt Datenrate UL [bps]
WAF1	1.1	Geräteverwaltung	1,066.67	10.67	-	-	-	-	<0.01	<0.01
WAF1	1.2	Mandantenverwaltung	1,066.67	10.67	-	-	-	-	<0.01	<0.01
WAF1	1.3-1	Profilverwaltung (Zähler)	1,066.67	10.67	-	-	-	-	<0.01	<0.01
WAF1	1.3-2	Profilverwaltung (Kommunikationsprofile)	1,086.67	10.87	-	-	-	-	13.24	0.13
WAF1	1.3-3	Profilverwaltung (Auswertungsprofile z. B. Tarifierung und Netzzustandsmeldung aktivieren löschen)	1,086.67	10.87	-	-	-	-	6.54	0.07
WAF1	1.4	Schlüssel-/Zertifikats -Mgt.	533.33	533.33	-	-	-	-	0.05	0.05
WAF1	1.5-1	Firmware upgrade (Austausch) (Inkl. WAF 2.2)	8,888.89	88.89	-	-	37,037.04	370.37	18.26	0.18
WAF1	1.5-2	Firmware update/patch (Inkl. WAF 2.2)	2,222.22	22.22	-	-	9,259.26	92.59	3.04	0.03
WAF1	1.6	Wake-up Konfig.	1,066.67	10.67	-	-	-	-	<0.01	<0.01
WAF1	1.7-1	Monitoring (Zustands Log)	2.13	213.33	-	-	-	-	<0.01	0.01
WAF1	1.7-2	Monitoring (Eich Log)	2.67	266.67	-	-	-	-	<0.01	0.02
WAF1	1.7-3	Monitoring (System Log)	26.67	2,666.67	-	-	-	-	<0.01	0.15
WAF2	2.1-1	Zeitsynchronisation - NUR AUFRUF (NTP-TLS)	2,962.96	1,481.48	2,962.96	1,481.48	-	-	15.47	7.74
WAF3	3.1	Alarmierung - Ereignis und Fehlermeld.	0.03	2.67	-	-	-	-	>0.01	0.03

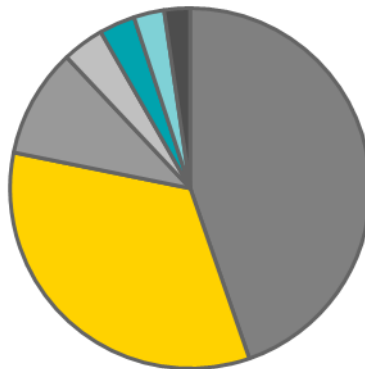
WAF	Nummer	Beschreibung	min. DL-Anschluss-Datenrate [bps]	min. UL-Anschluss-Datenrate [bps]	Flotten-datenrate DL [bps] PRIO	Flotten-datenrate UL [bps] PRIO	Flotten-datenrate DL [bps] NON-Prio	Flotten-datenrate UL [bps] NON-Prio	HVSt Datenrate DL [bps]	HVSt Datenrate UL [bps]
WAF3	3.2	Alarmierung - Alive Meldungen	0.01	0.79	-	-	-	-	0.79	79.31
WAF4	4.1	Übertragung an GWAdmin - kein Inforeport (admin): 1. Informationen über den tatsächlichen Energieverbrauch sowie über die tatsächliche Nutzungszeit	0.09	9.26	-	-	-	-	-	-
WAF4	4.2	2. abrechnungsrelevante Tarifinformationen und zugehörige abrechnungsrelevante Messwerte zur Überprüfung der Abrechnung	0.09	9.26	-	-	-	-	-	-
WAF4	4.3	3. historische Energieverbrauchswerte entsprechend den Zeiträumen der Abrechnung und Verbrauchsinformationen nach § 40 Absatz 3 des EnWG für die drei vorangegangenen Jahre	0.09	9.26	-	-	-	-	-	-
WAF4	4.4	4. historische Tages-, wochen-, monats- und jahresbezogene Energieverbrauchswerte sowie soweit vorhanden Zählerstandsgänge für die letzten 24 Monate	0.09	9.26	-	-	-	-	-	-
WAF4	4.5	5. die Informationen aus § 53 Absatz 1 Nummer 1 (Ansicht der gespeicherten Daten)	0.09	9.26	-	-	-	-	-	-
WAF5	5.1-1	turnusm. Übertragung an EMT - Einzelwerte	0.19	0.74	-	-	-	-	-	-
WAF5	5.1-2	turnusm. Übertragung an EMT - Last- und Zählerstandsgänge	0.19	0.74	-	-	-	-	55.56	222.22

WAF	Nummer	Beschreibung	min. DL-Anschluss-Datenrate [bps]	min. UL-Anschluss-Datenrate [bps]	Flotten-datenrate DL [bps] Prio	Flotten-datenrate UL [bps] Prio	Flotten-datenrate DL [bps] NON-Prio	Flotten-datenrate UL [bps] NON-Prio	HVSt Datenrate DL [bps]	HVSt Datenrate UL [bps]
WAF5	5.2	turnusm. Übertragung an EMT (Netzzustände)	266.67	1,066.67	-	-	-	-	<0.01	<0.01
WAF5	5.3-1	spontane Messwertauslesung (Einzelwerte) (inkl. WAF 1.3-2)	266.67	1,066.67	-	-	-	-	<0.01	<0.01
WAF5	5.3-2	spontane Messwertauslesung (Last- und Zählerstandsgänge) (inkl. WAF 1.3-2)	26.67	106.67	-	-	-	-	<0.01	<0.01
WAF5	5.3-3	spontane Messwertauslesung (Netzzustände) (inkl. WAF 1.3-3 Pseud. und Anonym.)	266.67	1,066.67	-	-	-	-	1.11	4.44
WAF6	6.1	Kommunikation EMT mit CLS (§14a) (inkl. TLS-CLS-Kanal Aufbau)	66.67	66.67	444.44	444.44	-	-	253.68	253.68
WAF6	6.2	Kommunikation EMT mit CLS (Anlagen) (inkl. TLS-CLS-Kanal Aufbau)	666.67	666.67	4,444.44	4,444.44	-	-	190.26	190.26
WAF7	7	Wake-up	36.27	0.36	-	-	-	-	21.30	0.21



- Kommunikation EMT mit CLS (§14a) (inkl. TLS-CLS-Kanal Aufbau)
- turnusm. Übertragung an EMT - Last- und Zählerstandsgänge
- Kommunikation EMT mit CLS (Anlagen) (inkl. TLS-CLS-Kanal Aufbau)
- Alarmierung - Alive Meldungen

Abbildung A-2: Anteile der Treiberanwendungsfälle in der HVSt für den Uplink



- Kommunikation EMT mit CLS (§14a) (inkl. TLS-CLS-Kanal Aufbau)
- Kommunikation EMT mit CLS (Anlagen) (inkl. TLS-CLS-Kanal Aufbau)
- turnusm. Übertragung an EMT - Last- und Zählerstandsgänge
- Wake-up
- Firmware upgrade (Austausch) (Inkl. WAF 2.2)
- Zeitsynchronisation - NUR AUFRUF (NTP-TLS)
- Profilverwaltung (Kommunikationsprofile)

Abbildung A-3: Anteile der Treiberanwendungsfälle in der HVSt für den Downlink

Anhang B: Potential von Multi-Vendor und National-Roaming-Strategien in Abhängigkeit der Komplementarität der Netze

Nachfolgend wird anhand eines Beispiels die unterschiedliche Komplementarität von Mobilfunknetzen illustriert. Hierbei wird mit einer vereinfachten Abschätzung gearbeitet. Es werden jeweils die Abstände der Basisstationen des Netzes A zu den nächsten Basisstationen des Netzes B oder C bestimmt. Ist der über alle Basisstationen gemittelte Abstand klein, ist nicht damit zu rechnen, dass das alternative Netz die Abdeckung des Netzes A ergänzt. Der mittlere Abstand wird vor allem dann niedrig sein, wenn die Basisstationsstandorte gemeinsam genutzt werden. Ist der mittlere Abstand zu den Basisstationen des anderen Netzes hingegen vergleichsweise groß, so ist von diesem Netz eine bessere Ergänzung der Abdeckung zu erwarten. Diese Zusammenhänge sind zur Illustration beispielhaft für einen realen Netzabschnitt bestimmt worden (siehe Abbildung B-1). Anhand der beispielhaften Kurzanalyse ist zu erwarten, dass das Netz B, das Netz A deutlich besser zu ergänzen vermag als das Netz C. Dies liegt darin begründet, dass das Netz C in dem betrachteten Ausschnitt viele Basisstationsstandorte gemeinsam mit Netz A nutzt.

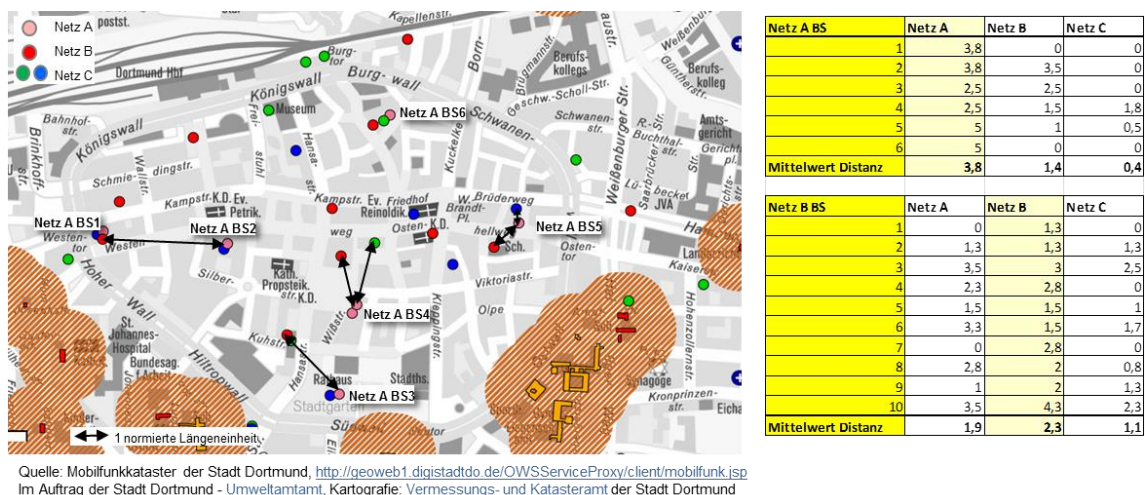


Abbildung B-1: Illustration der unterschiedlichen Komplementarität anhand eines Beispiels (unter Berücksichtigung der Abstände zur jeweils nächsten Basisstation des komplementären Netzes)

Die Ergebnisse können keinesfalls verallgemeinert werden. Die Komplementarität muss jeweils spezifisch analysiert werden

Anhang C: Technische TK-Technologieübersicht

Funktechnologien im lizenzierten Frequenzband

Enhanced Data Rates for GSM Evolution (EGDE)

Technologieparameter		Einheit	Wert	Kommentar
Technologieeigenschaften	Betrachteter Standard	-	EDGE	3GPP Release 99
	Max. Datenrate pro Gerät, Downlink	Mbit/s	0,384	3GPP Release 99
	Max. pro Gerät, Uplink	Mbit/s	0,384	3GPP Release 99
	Frequenz (Deutschland)	MHz	900, 1800	
	Max. zulässige Dämpfung	dB	136.5 ¹³⁴	
Basisparameter	Deep-Indoor-Abdeckung	-	Moderater Aufwand	GSM-subGHz-Frequenzen unterstützen gute Durchdringungseigenschaften.
	Reichweite	km	1,9	Nach Okumura-Hata, Suburban (NLOS), Indoor (für 900 MHz)
	Systemdatenrate Downlink	Mbit/s	0,15 ¹³⁵	
	Systemdatenrate Uplink	Mbit/s	0,05	
	Übertragungsverzögerung	ms	208 ¹³⁶	
Erweiterte Systemparameter	Redundante Topologie	-	Mittlerer Aufwand	Im Falle eines BS-Ausfalls stehen in der Regel innerhalb des eigenen Netzes überlappende BS zur Verfügung, welche den Ausfall ganz oder teilweise kompensieren können. Über National Roaming können weitere Netze einbezogen und somit die Redundanz deutlich verbessert werden.
	Schwarzfallfestigkeit	-	Sehr hoher Aufwand	Aufgrund der großen Anzahl der Basisstationsstandorte ist eine USV-Nachrüstung mit hohem Aufwand verbunden.

¹³⁴ European Telecommunications Standards Institute (ETSI): GSM 05.05 V 5.0.0: Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Radio transmission and reception (GSM 05.05), S. 48, 1996.

¹³⁵ P. Schra et al.: Radio Interface Performance of EDGE: A Proposal for Data Rates in Existing Digital Cellular Systems, S. 1064–1068, 1998.

¹³⁶ S. Subik, P. B. Bok, D. Kaulbars, and C. Wietfeld: ADeM: Active Delay Management for critical group communication over heterogeneous public cellular networks, IEEE Int. Conf. Comm. Work, 2014.

Technologieparameter		Einheit	Wert	Kommentar
	Differenzierte Priorisierung von Datendiensten	-	Eingeschränkt verfügbar	Über Scheduling-Verfahren können einzelnen Nutzern oder Nutzergruppen Prioritäten zugewiesen werden. Dabei werden jedoch in der Regel keine Dienstgütegarantien umgesetzt.
	Exklusive Ressourcen ohne Wechselwirkung mit Dritten	-	Priorisierung von Nutzergruppen	Im öffentlichen Zellularfunknetz konkurrieren verschiedenste Anwendungen unterschiedlicher Nutzergruppen im gleichen Frequenzbereich. Über die Priorisierung von Diensten einzelner Nutzergruppen kann die Wechselwirkung durch den Netzbetreiber gesteuert werden.
	Schutz gegenüber Angriffen	-	Hohes Schutzniveau mit bekannten Lücken	Generell hohes Sicherheitsniveau durch SIM-Karte, aber auch bekannte Sicherheitslücken (IMSI-Catcher durch fehlende Authentifizierung der Basisstation)
	Langer Lebenszyklus	-	5-10 Jahre	Die Vergabe der GSM-Frequenzen wurde in Deutschland bis 2033 verlängert. Aufgrund der Migration der Sprachdienste in 4G Netze verbleiben in GSM-Netzen vor allem etablierte M2M-Dienste, deren Innovationszyklen langfristiger sind (z. B. eCall). Während in anderen europäischen Ländern der Abkündigungstermin für GSM-Netze bereits angekündigt wurde, ist in Deutschland aktuell nicht abzusehen, wann eine Abkündigung erfolgt. Das GSM-Spektrum kann in der Übergangsphase bereits heute auch für LTE genutzt werden, z. B. für NB-IoT.
	Kosten für Aufbau und Betrieb	-	Kosteneffizient	GSM verfügt über ein vollausgebautes Funknetz, sodass kein Aufbau notwendig ist. Datendienste sind über preisgünstige M2M-Verträge umsetzbar. Die Modems sind günstig.

Universal Mobile Telecommunications System (UMTS)

Technologieparameter		Einheit	Wert	Kommentar
Technologieeigenschaften	Betrachteter Standard	-	UMTS (HSPA)	3GPP Release 5-7
	Max. Datenrate pro Gerät, Downlink	Mbit/s	14,4	HSPA+: 42,2 MBit/s ¹³⁷
	Max. pro Gerät, Uplink	Mbit/s	5,76	HSPA+: 21,6 MBit/s
	Frequenz (Deutschland)	MHz	1900, 2100	
	Max. zulässige Dämpfung	dB	140 ¹³⁸	
Basisparameter	Deep-Indoor-Abdeckung	-	Hoher Aufwand oder gar nicht realisierbar	Schlechte Frequenzeigenschaften gepaart mit geringe Empfängerempfindlichkeit resultieren in überhöhtem Aufwand zur Umsetzung der Kellerdurchdringung.
	Reichweite	km	1,55	Okumura-Hata, Suburban (NLOS), Indoor, 1900 MHz
	Systemdatenrate Downlink	Mbit/s	8,5	Für eine Kanalbandbreite 10 MHz bei einer spektralen Effizienz 0,85 bit/s/Hz ¹³⁹
	Systemdatenrate Uplink	Mbit/s	4,8	Für eine Kanalbandbreite 20 MHz bei einer spektralen Effizienz 0,48 bit/s/Hz
	Übertragungsverzögerung	ms	85 ¹⁴⁰	Urbanes Szenario
Erweiterte Systemparameter	Redundante Topologie	-	Mittlerer Aufwand	Im Falle eines BS-Ausfalls stehen in der Regel innerhalb des eigenen Netzes überlappende BS zur Verfügung, welche den Ausfall ganz oder teilweise kompensieren können. Über National Roaming können weitere Netze einbezogen und somit die Redundanz deutlich verbessert werden.
	Schwarzfallfestigkeit	-	Sehr hoher Aufwand	Aufgrund der großen Anzahl der Basisstationsstandorte ist eine USV-Nachrüstung mit hohem Aufwand verbunden.

¹³⁷ E. Dahlmann: 3G Evolution: HSPA and LTE for Mobile Broadband”, Academic Press, 2010.

¹³⁸ L. Song und J. Shen: Evolved Cellular Network Planning and Optimization for UMTS and LTE”, CRC Press Taylor & Francis Group, 2011.

¹³⁹ Y. Gao, X. Zhang, Y. Jiang, and J.-W. Cho: System Spectral Efficiency and Stability of 3G Networks: A Comparative Study, IEEE Int. Conf. Commun., S. 1–6, 2009.

¹⁴⁰ S. Subik, P. B. Bok, D. Kaulbars, und C. Wietfeld: ADeM: Active Delay Management for critical group communication over heterogeneous public cellular networks, IEEE Int. Conf. Comm. Work, 2014.

Technologieparameter		Einheit	Wert	Kommentar
	Differenzierte Priorisierung von Datendiensten	-	Eingeschränkt verfügbar	Über Scheduling-Verfahren können einzelnen Nutzern oder Nutzergruppen Prioritäten zugewiesen werden. Dabei werden jedoch in der Regel keine Dienstgüteggarantien umgesetzt.
	Exklusive Ressourcen ohne Wechselwirkung mit Dritten	-	Priorisierung von Nutzergruppen	Im öffentlichen Zellularfunknetz konkurrieren verschiedenste Anwendungen unterschiedlicher Nutzergruppen im gleichen Frequenzbereich. Über die Priorisierung von Diensten einzelner Nutzergruppen kann die Wechselwirkung durch den Netzbetreiber gesteuert werden.
	Schutz gegenüber Angriffen	-	Hohes Schutzniveau mit bekannten Lücken	Generell hohes Sicherheitsniveau durch SIM-Karte, aber auch bekannte Sicherheitslücken (IMSI-Catcher durch fehlende Authentifizierung der Basisstation)
	Langer Lebenszyklus	-	Langfristige Verfügbarkeit unsicher	Aktuell betriebene UMTS Netze werden zu LTE Lösungen migriert. Insofern ist UMTS eine Brückentechnologie in Richtung LTE.
	Kosten für Aufbau und Betrieb	-	Kosteneffizient	UMTS verfügt über ein vollausgebautes Funknetz, sodass kein Aufbau notwendig ist. Datendienste sind über preisgünstige M2M Verträge umsetzbar. Die Modems sind günstig.

Long Term Evolution (LTE)

Technologieparameter		Einheit	Wert	Kommentar
Technologieeigenschaften	Betrachteter Standard	-	LTE Advanced	3GPP Release 10&11
	Max. Datenrate pro Gerät, Downlink	Mbit/s	300	3GPP Release 10, Gerätekategorie CAT 7
	Max. pro Gerät, Uplink	Mbit/s	100	3GPP Release 10, Gerätekategorie CAT 7
	Frequenz (Deutschland)	MHz	700, 800, 900, 1800, 2600, (450) ¹⁴¹	(in Deutschland nur für dedizierte M2M-Netze im Einsatz)
	Max. zulässige Dämpfung	dB	141,9 ¹⁴²	
Basisparameter	Deep-Indoor-Abdeckung	-	Moderater Aufwand	GSM-subGHz-Frequenzen unterstützen gute Durchdringungseigenschaften.
	Reichweite	km	2,9	Nach Okumura-Hata, Suburban (NLOS), Indoor (für 800 MHz)
	Systemdatenrate Downlink	Mbit/s	27 ¹⁴³	Spektrale Effizienz Suburban für 10 MHz Kanalbandbreite
	Systemdatenrate Uplink	Mbit/s	14,5	Spektrale Effizienz Suburban für 10 MHz Kanalbandbreite
	Übertragungsverzögerung	ms	37	Open Signal Status Report Deutschland ¹⁴⁴
Erweiterte Systemparameter	Redundante Topologie	-	Mittlerer Aufwand	Im Falle eines BS-Ausfalls stehen in der Regel innerhalb des eigenen Netzes überlappende BS zur Verfügung, welche den Ausfall ganz oder teilweise kompensieren können. Über National Roaming können weitere Netze einbezogen und somit die Redundanz deutlich verbessert werden.
	Schwarzfallfestigkeit	-	Sehr hoher Aufwand	Aufgrund der großen Anzahl der Basisstationsstandorte ist eine USV Nachrüstung mit hohem Aufwand verbunden.

¹⁴¹ Bundesnetzagentur: Frequenzspektrum in den Bereichen 700 MHz, 800 MHz, 900 MHz, 1,5 GHz, 1,8 GHz, 2 GHz, 2,6 GHz und 3,5 GHz 700", S. 3600, 2018.

¹⁴² C. Johnson: Long Term Evolution in Bullets, 2nd ed., 2012.

¹⁴³ A. Ghosh, R. Ratasuk, B. Mondal, N. Mangalvedhe, and T. Thomas: LTE-Advanced: Next-Generation Wireless Broadband Technology, IEEE Wireless Communications, no. 3, pp. 10–22, 2010.

¹⁴⁴ <https://opensignal.com/reports/2018/05/germany/state-of-the-mobile-network>.

Technologieparameter		Einheit	Wert	Kommentar
Erweiterte Systemparameter	Differenzierte Priorisierung von Datendiensten	-	Verfügbar, Zugriff durch Netzbetreiber	LTE unterstützt die Priorisierung von Datenströmen über sogenannte Quality-of-Service-Classes, die z. B. bei VoLTE zum Einsatz kommen und deren Funktionalität bestätigt wurde ¹⁴⁵ .
	Exklusive Ressourcen ohne Wechselwirkung mit Dritten	-	Priorisierung von Nutzergruppen	Im öffentlichen Zellularfunknetz konkurrieren kommerzielle und gewerbliche Anwendungen im gleichen Frequenzbereich. Über die Priorisierung von Nutzergruppen kann die Wechselwirkung durch den Netzbetreiber gesteuert werden. In zukünftigen Versionen von LTE werden fortgeschrittene Funktionen verfügbar werden (Network Slicing).
	Schutz gegenüber Angriffen	-	Hohes Schutzniveau mit bekannten Lücken	Generell hohes Sicherheitsniveau durch SIM-Karte, aber auch bekannte Sicherheitslücken (https://alter-attack.net/)
	Langer Lebenszyklus	-	15+ Jahre	LTE ist der derzeit aktuellste Mobilfunkstandard wird aber langfristig nahtlos in zukünftige 5G Netze migriert.
	Kosten für Aufbau und Betrieb	-	Kosteneffizient	LTE verfügt über ein vollausgebautes Funketz, sodass kein Aufbau notwendig ist. Datendienste sind über preisgünstige M2M-Verträge umsetzbar. Bei einer Betriebsfrequenz von 450 MHz kommen erhöhte Aufwände für die Installation der größeren Empfangs- und Sendantennen hinzu (vgl. frequenzabhängiger Formfaktor).

¹⁴⁵ P3 Connect: Der große Mobilfunknetztest 2018, 2018.

eMTC (LTE)

Technologieparameter		Einheit	Wert	Kommentar
Technologieeigenschaften	Betrachteter Standard	-	3GPP Release 13	3GPP Release 13
	Max. Datenrate pro Gerät, Downlink	Mbit/s	0,3 ¹⁴⁶	
	Max. pro Gerät, Uplink	Mbit/s	0,375	
	Frequenz (Deutschland)	MHz	700, 800, 900, 1800, 2600	Analog zu LTE
	Max. zulässige Dämpfung	dB	155,7	MCL
Basisparameter	Deep-Indoor-Abdeckung	-	Geringer Aufwand	Gute Frequenzeigenschaften gepaart mit robuster Empfängerempfindlichkeit bieten gute Voraussetzungen für Kellerdurchdringung.
	Reichweite	km	7,4	Okumura-Hata Suburban (NLOS), Indoor, für 800 MHz
	Systemdatenrate Downlink	Mbit/s	0,076 / 0,01	Für 144 dB MCL / 154 dB MCL
	Systemdatenrate Uplink	Mbit/s	0,04 / 0,003	Für 144 dB MCL / 154 dB MCL
	Übertragungsverzögerung	ms	200 / 600	Für 144 dB MCL / 154 dB MCL
Erweiterte Systemparameter	Redundante Topologie	-	Mittlerer Aufwand	Im Falle eines BS-Ausfalls stehen in der Regel innerhalb des eigenen Netzes überlappende BS zur Verfügung, welche den Ausfall ganz oder teilweise kompensieren können. Über National Roaming können weitere Netze einbezogen und somit die Redundanz deutlich verbessert werden.
	Schwarzfallfestigkeit	-	Sehr hoher Aufwand	Aufgrund der großen Anzahl der Basisstationsstandorte ist eine USV-Nachrüstung mit hohem Aufwand verbunden.
	Differenzierte Priorisierung von Datendiensten	-	Verfügbar, Zugriff durch Netzbetreiber	LTE unterstützt die Priorisierung von Datenströmen über sogenannte Quality-of-Service-Classes, die z. B. bei VoLTE zum Einsatz kommen und deren Funktionalität bestätigt wurde ¹⁴⁷ .

¹⁴⁶ L. Olof, M. Sundberg, E. Wang, J. Bergmann, und J. Sachs: Cellular Internet of Things, Academic Press, 2018.

¹⁴⁷ P3 Connect: Der große Mobilfunknetztest 2018, 2018.

Technologieparameter		Einheit	Wert	Kommentar
	Exklusive Ressourcen ohne Wechselwirkung mit Dritten	-	Priorisierung von Nutzergruppen	Im öffentlichen Zellularfunknetz konkurrieren verschiedenste Anwendungen unterschiedlicher Nutzergruppen im gleichen Frequenzbereich. Über die Priorisierung von Diensten einzelner Nutzergruppen kann die Wechselwirkung durch den Netzbetreiber gesteuert werden.
	Schutz gegenüber Angriffen	-	Hohes Schutzniveau mit bekannten Lücken	Generell hohes Sicherheitsniveau durch SIM-Karte, aber auch bekannte Sicherheitslücken (https://alter-attack.net/)
	Langer Lebenszyklus	-	Langfristige Verfügbarkeit unsicher	In Deutschland setzen Mobilfunkprovider auf die NB-IoT-Technologie, sodass die zukünftige Verfügbarkeit von eMTC in Deutschland unsicher ist.
	Kosten für Aufbau und Betrieb	-	Kosteneffizient	eMTC wird auf Basis bestehender LTE-Infrastruktur betrieben. Es ist zu erwarten, dass die Datendienste über preisgünstige M2M-Verträge angeboten würden.

Narrowband-IoT (NB-IoT)

Technologieparameter		Einheit	Wert	Kommentar
Technologeeigenschaften	Betrachteter Standard	-	3GPP Rel. 13	
	Max. Datenrate pro Gerät, Downlink	Mbit/s	0,023 ¹⁴⁸	
	Max. pro Gerät, Uplink	Mbit/s	0,063	
	Frequenz (Deutschland)	MHz	a + b): analog LTE c): ISM und SRD Frequenzen	a) In-Band, b) Guard-Band c) Standalone
	Max. zulässige Dämpfung	dB	164	MCL
Basisparameter	Deep-Indoor-Abdeckung	-	Geringer Aufwand	Gute Frequenzeigenschaften gepaart mit robuster Empfängerempfindlichkeit bieten gute Voraussetzungen für Kellerdurchdringung
	Reichweite	km	12,8	Okumura-Hata, Suburban (NLOS), Indoor, 800 MHz
	Systemdatenrate Downlink	Mbit/s	0,015 / 0,0004	In-Band für 144 dB MCL / 164 dB MCL
	Systemdatenrate Uplink	Mbit/s	0,019 / 0,0004	In-Band für 144 dB MCL / 164 dB MCL
	Übertragungsverzögerung	ms	1100 / 8300	Für 144 dB MCL / 164 dB MCL
Erweiterte Systemparameter	Redundante Topologie	-	Mittlerer Aufwand	Im Falle eines BS-Ausfalls stehen in der Regel innerhalb des eigenen Netzes überlappende BS zur Verfügung, welche den Ausfall ganz oder teilweise kompensieren können. Über National Roaming können weitere Netze einbezogen und somit die Redundanz deutlich verbessert werden.
	Schwarzfallfestigkeit	-	Sehr hoher Aufwand	Aufgrund der großen Anzahl der Basisstationsstandorte ist eine USV-Nachrüstung mit hohem Aufwand verbunden.

¹⁴⁸ L. Olof, M. Sundberg, E. Wang, J. Bergmann, und J. Sachs: Cellular Internet of Things, Academic Press, 2018.

Erweiterte Systemparameter	Differenzierte Priorisierung von Datendiensten	-	Verfügbar, Zugriff durch Netzbetreiber	LTE unterstützt die Priorisierung von Datenströmen über sogenannte Quality-of-Service-Classes, die z. B. bei VoLTE zum Einsatz kommen und deren Funktionalität bestätigt wurde ¹⁴⁹ .
	Exklusive Ressourcen ohne Wechselwirkung mit Dritten	-	Priorisierung von Nutzergruppen	Im öffentlichen Zellularfunknetz konkurrieren kommerzielle und gewerbliche Anwendungen im gleichen Frequenzbereich. Über die Priorisierung von Nutzergruppen kann die Wechselwirkung durch den Netzbetreiber gesteuert werden. In zukünftigen Versionen von LTE werden fortgeschrittene Funktionen verfügbar werden (Network Slicing).
	Schutz gegenüber Angriffen	-	Hohes Schutzniveau mit bekannten Lücken	<i>User Plane Data Transfer Method</i> : analog LTE <i>Control Plane Data Transfer Method</i> : geringer Schutz, dafür Energie-effizienter ¹⁵⁰
	Langer Lebenszyklus	-	15+ Jahre	NB-IoT wird als zukunftssträchtiger LTE Ableger für Sensornetzanwendungen diskutiert
	Kosten für Aufbau und Betrieb	-	Kosteneffizient	NB-IoT wird auf Basis bestehender LTE Infrastruktur betrieben. Datendienste sind über preisgünstige M2M Verträge umsetzbar.

¹⁴⁹ P3 Connect: Der große Mobilfunknetztest 2018, 2018.

¹⁵⁰ L. Olof, M. Sundberg, E. Wang, J. Bergmann, und J. Sachs: Cellular Internet of Things, Academic Press, 2018.

CDMA 450

Technologieparameter		Einheit	Wert	Kommentar
Technologieeigenschaften	Betrachteter Standard	-	CDMA EV-DO Rev. B	
	Max. Datenrate pro Gerät, Downlink	Mbit/s	3 ¹⁵¹	
	Max. pro Gerät, Uplink	Mbit/s	1,5	
	Frequenz (Deutschland)	MHz	450	
	Max. zulässige Dämpfung	dB	147 ¹⁵²	
Basisparameter	Deep-Indoor-Abdeckung	-	Geringer Aufwand	Gute Frequenzeigenschaften gepaart mit robuster Empfängerempfindlichkeit bieten gute Voraussetzungen für Kellerdurchdringung.
	Reichweite	km	6,7	Okumura-Hata, Suburban (NLOS), Indoor, 450 MHz
	Systemdatenrate Downlink	Mbit/s	1,19 ¹⁵³	Für eine Kanalbandbreite 1,4 MHz bei einer spektralen Effizienz 0,85 bit/s/Hz
	Systemdatenrate Uplink	Mbit/s	0,48 ¹⁵³	Für eine Kanalbandbreite 1,4 MHz bei einer spektralen Effizienz 0,48 bit/s/Hz
	Übertragungsverzögerung	ms	500 ¹⁵¹	Im Bereich von 100 ms und 1 s
Erweiterte Systemparameter	Redundante Topologie	-	Erhöhter Aufwand	Im Betrieb einer dedizierten Infrastruktur ist die Verfügbarkeit überlappender Zellen unwahrscheinlich. Roaming ist für reine CDMA-450 Infrastrukturen anders als bei LTE-Netzen keine Option.
	Schwarzfallfestigkeit	-	Hoher Aufwand	Aufgrund der bei der Betriebsfrequenz 450 MHz verhältnismäßig großen Funkzellen ist der Aufwand für USV Nachrüstungen moderater im Vergleich zu bspw. LTE

¹⁵¹ D. Marger, J. Riedl, J. Tusch, C. Wietfeld, I. Wolff, and W. Zeitler: VDE-Positionspaper: Kommunikationsnetz für das Smart Grid, 2015.

¹⁵² P. J. Black und Q. Wn: Link Budget of CDMA 2000 hEV-DO Wireless Internet Access System", S. 1847–1852, 2002.

¹⁵³ Y. Gao, X. Zhang, Y. Jiang, and J.-W. Cho: System Spectral Efficiency and Stability of 3G Networks: A Comparative Study, IEEE Int. Conf. Commun., S. 1–6, 2009.

Technologieparameter		Einheit	Wert	Kommentar
Erweiterte Systemparameter	Differenzierte Priorisierung von Datendiensten	-	Verfügbar, Zugriff durch Netzbetreiber	Der Netzbetreiber kann Datendienste über QoS-Profile priorisieren.
	Exklusive Ressourcen ohne Wechselwirkung mit Dritten	-	Priorisierung von Nutzergruppen	Der Netzbetreiber kann einzelne Nutzergruppen bzw. deren Dienste über QoS-Klassen priorisieren.
	Schutz gegenüber Angriffen	-	Mittleres Schutzniveau (State-of-the-Art)	CDMA bietet ein Sicherheitsniveau gemäß dem State-of-the-Art.
	Langer Lebenszyklus	-	Langfristige Verfügbarkeit unsicher	Aktuell betriebene CDMA-450-Netze werden zu LTE-450-Lösungen migriert. Insofern ist CDMA450 eine Brückentechnologie in Richtung LTE.
	Kosten für Aufbau und Betrieb	-	Eingeschränkt kosteneffizient	Der Aufbau und Betrieb dedizierter Infrastruktur ist mit hohen Kosten verbunden (z. B. Lizenz). Im Falle eines externen Netzbetriebs fallen vergleichbar zu z. B. NB-IoT geringe Kosten für M2M-Datendienste an. Hinzu kommen erhöhte Aufwände für die Installation der größeren Empfangs- und Sendeantennen (vgl. frequenzabhängiger Formfaktor).

Satellitenkommunikation

Technologieparameter		Einheit	Wert	Kommentar
Technologieeigenschaften	Betrachteter Standard	-	Inmarsat ¹⁵⁴	
	Max. Datenrate pro Gerät, Downlink	Mbit/s	0,5	
	Max. pro Gerät, Uplink	Mbit/s	0,5	
	Frequenz (Deutschland)	MHz	1500 - 1600	L-Band
	Max. zulässige Dämpfung	dB	-	
Basisparameter	Deep-Indoor-Abdeckung	-	Hoher Aufwand oder gar nicht realisierbar	Bedingt durch verwendete Frequenzbereiche sind Durchdringungseigenschaften sehr schlecht. Sichtverbindungen werden in jedem Fall empfohlen.
	Reichweite	km	36	Geostationäre Umlaufbahn
	Systemdatenrate Downlink	Mbit/s	0,5	
	Systemdatenrate Uplink	Mbit/s	0,5	
	Übertragungsverzögerung	ms	1000	
Erweiterte Systemparameter	Redundante Topologie	-	Erhöhter Aufwand	Bei dem hier als Referenz betrachtete Satellitensystem mit geostationären Satelliten überlappen die Ausleuchtungszonen nur leicht. Bei einem Ausfall ins Satelliten steht nicht unmittelbar ein Ersatz zur Verfügung. Bei alternativen Ansätzen (LEO-Satelliten) ist hingegen durch die hohe Anzahl der verfügbaren Satelliten und deren hoher Dynamik eine hohe Redundanz möglich.
	Schwarzfallfestigkeit	-	Geringer Aufwand	Satellitensysteme verfügen über eine vollkommen autarke Energieversorgung und sind nicht von einem Schwarzfall betroffen. Die wenigen Bodenstationen können über eine unabhängige Stromversorgung versorgt werden.

¹⁵⁴ A. Meloni and L. Atzori: The Role of Satellite Communications in the Smart Grid, IEEE Wirel. Commun., vol. 24, no. 2, S. 50–56, 2017.

Erweiterte Systemparameter	Differenzierte Priorisierung von Datendiensten	-	Eingeschränkt verfügbar	Die Umsetzung von Priorisierungsfunktionen liegt in der Verantwortung des Anwenders.
	Exklusive Ressourcen ohne Wechselwirkung mit Dritten	-	Priorisierung von Nutzergruppen	Die Satellitensysteme verfügen über exklusive Frequenzbänder mit geringer Störwahrscheinlichkeit.
	Schutz gegenüber Angriffen	-	Mittleres Schutzniveau (State-of-the-Art)	Es werden gängige VPN und Verschlüsselungsfunktionen unterstützt.
	Langer Lebenszyklus	-	10-15 Jahre	Der Lebenszyklus von geostationären Satellitensystemen ist als sehr hoch einzuschätzen.
	Kosten für Aufbau und Betrieb	-	Sehr kostenintensiv	Es kann auf vollständig aufgebaute Infrastruktur zurückgegriffen werden, wobei Datendienste im Vergleich zu mobilfunkbasierten M2M-Diensten teurer sind.

Funktechnologien im unlizenzierten Frequenzband

WLAN (Wireless Local Area Networks, IEEE 802.11n)

Technologieparameter		Einheit	Wert	Kommentar
Technologieeigenschaften	Betrachteter Standard	-	IEEE 802.11n ¹⁵⁵	
	Max. Datenrate pro Gerät, Downlink	Mbit/s	150 (600)	
	Max. pro Gerät, Uplink	Mbit/s	150 (600) ¹⁵⁵	40 MHz Kanalbandbreite, 1x1 MIMO (40 MHz 4x4 MIMO)
	Frequenz (Deutschland)	MHz	2400, 5000	
	Max. zulässige Dämpfung	dB	82	
Basisparameter	Deep-Indoor-Abdeckung	-	Kaum oder gar nicht realisierbar	Schlechte Frequenzeigenschaften gepaart mit geringer Empfängerempfindlichkeit
	Reichweite	km	0,1 ¹⁵⁶	
	Systemdatenrate Downlink	Mbit/s	45 ¹⁵⁷	
	Systemdatenrate Uplink	Mbit/s	45	
	Übertragungsverzögerung	ms	20	
Erweiterte Systemparameter	Redundante Topologie	-	Erhöhter Aufwand	Insofern WLAN im vollvermaschten Netz betrieben wird können einzelne Ausfälle sehr gut kompensiert werden.
	Schwarzfallfestigkeit	-	Sehr hoher Aufwand	Aufgrund geringer Systemreichweiten ist der Aufwand für eine schwarzfallfeste Ausstattung aller Netzknoten sehr hoch.
	Differenzierte Priorisierung von Datendiensten	-	Eingeschränkt verfügbar	WLAN unterstützt die Implementierung von Dienst-bezogenen priorisierten Kanalzugriffskategorien

¹⁵⁵ Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE): Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications IEEE Computer Society", IEEE Std 802.11-2007, 2007.

¹⁵⁶ G. A. Akpakwu, B. J. Silva, G. P. Hancke, and A. M. Abu-Mahfouz: A Survey on 5G Networks for the Internet of Things: Communication Technologies and Challenges, IEEE Access, vol. 6, no. c, S. 3619–3647, 2017.

¹⁵⁷ V. Jones and H. Sampath: Emerging Technologies for WLAN, no. 53(3), March 2015, S. 141–149, 2015.

Erweiterte Systemparameter	Exklusive Ressourcen ohne Wechselwirkung mit Dritten	-	Einschränkung der Wechselwirkung mittels DC oder LBT	WLAN wird in unlizenziierten ISM Bändern betrieben, weswegen die Konkurrenzsituation unbestimmt ist und als sehr hoch angesehen werden muss.
	Schutz gegenüber Angriffen	-	Hohes Schutzniveau mit bekannten Lücken	WLAN unterstützt das auf AES basierende WPA2 Protokoll. Jüngst aufgedeckte Sicherheitslücken konnten durch Patches behoben werden ¹⁵⁸ , sodass WLAN weiterhin als sicher gilt. Jedoch kann WLAN durch den Betrieb im unlizenziierten Frequenzband leicht gestört werden (Jamming).
	Langer Lebenszyklus	-	15+ Jahre	WLAN Systeme werden seit Jahren kontinuierlich weiterentwickelt, aktuelle und zukünftige Versionen werden zudem für die Verzahnung in 5G Netzen diskutiert.
	Kosten für Aufbau und Betrieb	-	Kosteneffizient	Geringe Kosten für Kommunikationsmodule und keine Beschaffung von Lizenzen notwendig.

¹⁵⁸ D. Schirmacher: Details zur KRACK-Attacke, in: Heise Online, 2017, online verfügbar: <https://www.heise.de/security/meldung/Details-zur-KRACK-Attacke-WPA2-ist-angeschlagen-aber-nicht-gaenzlich-geknackt-3862571.html>.

WLAN-IoT (Wireless Local Area Networks für das Internet der Dinge, IEEE 802.11ah)

Technologieparameter		Einheit	Wert	Kommentar
Technologieeigenschaften	Betrachteter Standard	-	IEEE 802.11ah ¹⁵⁹	
	Max. Datenrate pro Gerät, Downlink	Mbit/s	1,3	MCS0, 1 MHz Kanalbandbreite, 4x4 MIMO (bei 16 MHz Kanalbandbreite)
	Max. pro Gerät, Uplink	Mbit/s	1,3	MCS0, 1 MHz Kanalbandbreite, 4x4 MIMO (bei 16 MHz Kanalbandbreite)
	Frequenz (Deutschland)	MHz	868	
	Max. zulässige Dämpfung	dB	98	
Basisparameter	Deep-Indoor-Abdeckung	-	Erhöhter Aufwand	Gute Frequenzeigenschaften bei limitierter Empfängerempfindlichkeit
	Reichweite	km	1 ¹⁶⁰	
	Systemdatenrate Downlink	Mbit/s	0,16	Messung bei 20 parallelen, kontinuierlichen Datenströmen
	Systemdatenrate Uplink	Mbit/s	0,16	Messung bei 20 parallelen, kontinuierlichen Datenströmen
	Übertragungsverzögerung	ms	60	
Erweiterte Systemparameter	Redundante Topologie	-	Erhöhter Aufwand	Wird WLAN im vollvermaschten Netz betrieben, können einzelne Ausfälle sehr gut kompensiert werden.
	Schwarzfallfestigkeit	-	Hoher Aufwand	Aufgrund mittlerer Systemreichweiten ist der Aufwand für eine schwarzfallfeste Ausstattung aller Netzknoten mit erhöhtem, aber moderaten Aufwand verbunden.
	Differenzierte Priorisierung von Datendiensten	-	Eingeschränkt verfügbar	WLAN unterstützt die Implementierung von dienstbezogenen priorisierten Kanalzugriffskategorien

¹⁵⁹ Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE): IEEE Standard for Information technology — Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks — Specific requirements Part 11: Sub 1 GHz, 2016.

¹⁶⁰ A. Šljivo et al.: Performance evaluation of IEEE 802.11ah networks with high-throughput bidirectional traffic", Sensors (Switzerland), vol. 18, no. 2, S. 1–28, 2018.

Technologieparameter		Einheit	Wert	Kommentar
Erweiterte Systemparameter	Exklusive Ressourcen ohne Wechselwirkung mit Dritten	-	Einschränkung der Wechselwirkung mittels DC oder LBT	WLAN wird in unlicenzierten ISM-Bändern betrieben, weswegen die Konkurrenzsituation unbestimmt ist und die Interferenzwahrscheinlichkeit sehr hoch angesehen werden muss.
	Schutz gegenüber Angriffen	-	Mittleres Schutzniveau (State-of-the-Art)	Es werden zwei Authentifizierungsalgorithmen und AES-Verschlüsselung unterstützt.
	Langer Lebenszyklus	-	Langfristige Verfügbarkeit unsicher	Der WLAN-IoT-Standard ist bereits 2016 spezifiziert worden, eine Marktdurchdringung vergleichbar zu LPWAN-Systemen ist bisher nicht zu erkennen.
	Kosten für Aufbau und Betrieb	-	Kosteneffizient	Geringe Kosten für Kommunikationsmodule und keine Beschaffung von Lizenzen notwendig.

LoRaWAN

Technologieparameter		Einheit	Wert	Kommentar
Technologieeigenschaften	Betrachteter Standard	-	LoRaWAN Spec. V1.0.2. ¹⁶¹	
	Max. Datenrate pro Gerät, Downlink	Mbit/s	0,05	
	Max. pro Gerät, Uplink	Mbit/s	0,05	
	Frequenz (Deutschland)	MHz	433/868 ¹⁶²	
	Max. zulässige Dämpfung	dB	151 ¹⁶³	
Basisparameter	Deep-Indoor-Abdeckung	-	Geringer Aufwand	Gute Frequenzeigenschaften gepaart mit robuster Empfängerempfindlichkeit bieten gute Voraussetzungen für Kellerdurchdringung
	Reichweite	km	11 ¹⁶⁴	
	Systemdatenrate Downlink	Mbit/s	0,0003	Physikalische Datenrate bei Spreading Factor 12, Bandbreite 125 kHz
	Systemdatenrate Uplink	Mbit/s	0,0003	Physikalische Datenrate bei Spreading Factor 12, Bandbreite 125 kHz
	Übertragungsverzögerung	ms	1000	Kann je nach Konfiguration auch >1s werden
Erweiterte Systemparameter	Redundante Topologie	-	Erhöhter Aufwand	Im Betrieb einer dedizierten Infrastruktur ist die Verfügbarkeit überlappender Zellen unwahrscheinlich. Einzelne BS-Ausfälle betreffen große Flächenbereiche. Anders als bei LTE-Netzen ist eine rein LoRaWAN-basierte Roaming-Strategie kein Lösungsansatz.

¹⁶¹ LoRaTM Alliance: LoRaWAN TM Specification”, S. 1–91, 2016.

¹⁶² LoRaTM Alliance: LoRaWAN Regional Parameters v1.0, S. 7–11, 2016.

¹⁶³ Semtech: Datasheet: SX1272/73 - 860 MHz to 1020 MHz Low Power Long Range Transceiver, 2017.

¹⁶⁴ L. Feltrin, C. Buratti, E. Vinciarelli, R. De Bonis, and R. Verdone: LoRaWAN: Evaluation of Link- and System-Level Performance, IEEE Internet Things J., vol. 5, no. 3, S. 2249–2258, 2018..

Erweiterte Systemparameter	Schwarzfallfestigkeit	-	Mittlerer Aufwand	LoRaWAN basiert auf einem TK-Netzbetrieb sehr geringer BS-Dichte. Schwarzfallfeste Infrastruktur kann einfach nachgerüstet werden.
	Differenzierte Priorisierung von Datendiensten	-	Nicht verfügbar	LoRaWAN erlaubt keine Nutzer- oder Dienst-bezogene Priorisierung ¹⁶⁵ .
	Exklusive Ressourcen ohne Wechselwirkung mit Dritten	-	Einschränkung der Wechselwirkung mittels DC oder LBT	LoRaWAN wird im unlizenzieren SRD-Band betrieben, weswegen die Konkurrenzsituation unbestimmt ist und als sehr hoch angesehen werden muss.
	Schutz gegenüber Angriffen	-	Basisschutz (leichte Verschlüsselung)	Authentizität des Geräts im Netzwerk wird sichergestellt (Schlüsselaustausch) ¹⁶⁶ . Bedingt durch den Betrieb im unlizenzieren SRD-Band kann eine Verfügbarkeit nicht garantiert werden (hohes Störpotential).
	Langer Lebenszyklus	-	10-15 Jahre	LoRaWAN ist ein aktueller IoT-Standard mit einer Vielzahl am Markt verfügbarer Systeme. Ein Ende des Lebenszyklus kann derzeit nicht abgeschätzt werden.
	Kosten für Aufbau und Betrieb	-	Kosteneffizient	Geringe Kosten für Kommunikationsmodule und keine Beschaffung von Lizenzen notwendig.

¹⁶⁵ <https://www.funke.de/mobile-solutions/artikel/134782/1/>

¹⁶⁶ LoRaTM Alliance: LoRaWAN TM Specification", pp. 1–91, 2016.

SigFox

Technologieparameter		Einheit	Wert	Kommentar
Technologieeigenschaften	Betrachteter Standard	-	Sigfox	
	Max. Datenrate pro Gerät, Downlink	Mbit/s	0,001 ¹⁶⁷	
	Max. pro Gerät, Uplink	Mbit/s	0,001	
	Frequenz (Deutschland)	MHz	868	
	Max. zulässige Dämpfung	dB	160 ¹⁶⁸	
Basisparameter	Deep-Indoor-Abdeckung	-	Geringer Aufwand	Bei SigFox handelt es sich um einen TK-Netzbetrieb sehr geringer BS-Dichte. Einzelne BS-Ausfälle betreffen große Flächenbereiche. Aufgrund geringer Sensorkosten jedoch einfach nachzurüsten.
	Reichweite	km	10 ¹⁶⁹	
	Systemdatenrate Downlink	Mbit/s	0,001 ¹⁶⁹	
	Systemdatenrate Uplink	Mbit/s	0,001 ¹⁶⁹	
	Übertragungsverzögerung	ms	bis zu 6s	SigFox Q&A, https://ask.sigfox.com/questions/1213/time-between-message-sent-and-message-recvied-at.html
Erweiterte Systemparameter	Redundante Topologie	-	Erhöhter Aufwand	Bei SigFox handelt es sich um einen TK-Netzbetrieb sehr geringer BS-Dichte. Einzelne BS-Ausfälle betreffen große Flächenbereiche. Anders als bei LTE-Netzen ist eine rein auf SigFox basierende Roaming-Strategie kein Lösungsansatz.
	Schwarzfallfestigkeit	-	Mittlerer Aufwand	SigFox basiert auf einem TK-Netzbetrieb sehr geringer BS-Dichte. Schwarzfallfeste Infrastruktur kann einfach nachgerüstet werden.

¹⁶⁷ G. A. Akpakwu, B. J. Silva, G. P. Hancke, and A. M. Abu-Mahfouz: A Survey on 5G Networks for the Internet of Things: Communication Technologies and Challenges, IEEE Access, vol. 6, no. c, S. 3619–3647, 2017.

¹⁶⁸ M. Lauridsen, H. Nguyen, B. Vejlgaard, I. Z. Kovacs, P. Mogensen, und M. Sorensen: Coverage Comparison of GPRS, NB-IoT, LoRa, and SigFox in a 7800 km Area, IEEE Veh. Technol. Conf., vol. 2017–June, S. 2–6, 2017.

¹⁶⁹ K. Mekki, E. Bajic, F. Chaxel, und F. Meyer: A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment, ICT Express, 2018.

Technologieparameter		Einheit	Wert	Kommentar
Erweiterte Systemparameter	Differenzierte Priorisierung von Datendiensten	-	Nicht verfügbar	Sigfox erlaubt keine Nutzer- oder Dienstbezogene Priorisierung.
	Exklusive Ressourcen ohne Wechselwirkung mit Dritten	-	Einschränkung der Wechselwirkung mittels DC oder LBT	Im öffentlichen Zellularfunknetz konkurrieren verschiedenste Anwendungen unterschiedlicher Nutzergruppen im gleichen Frequenzbereich. Über die Priorisierung von Diensten einzelner Nutzergruppen kann die Wechselwirkung durch den Netzbetreiber gesteuert werden.
	Schutz gegenüber Angriffen	-	Mittleres Schutzniveau (State-of-the-Art)	Sigfox implementiert Authentifizierungsfunktionen und eine interne Firewall als Schutz ggü. dem Zugriff Dritter ¹⁷⁰ . Bedingt durch den Betrieb im unlizenzierten SRD Band kann eine Verfügbarkeit nicht garantiert werden (hohes Störpotential).
	Langer Lebenszyklus	-	5-10 Jahre	Sigfox ist ein proprietärer Mobilfunkstandard aktuellster Generation und arbeitet im unlizenzierten SRD-Band. Auch wenn sich ausgehend von Frankreich weltweit Netze aktuell im Aufbau befindlich sind, kann nicht bewertet werden, ob das Geschäftsmodell nachhaltig ist, vor allem angesichts der direkten Konkurrenz durch NB-IoT (LTE)-Technik. Insofern erscheint eine Verfügbarkeit im Zeitfenster 5-10 Jahre abgesichert.
	Kosten für Aufbau und Betrieb	-	Sehr kosteneffizient	Geringe Kosten für Kommunikationsmodule und keine Beschaffung von Lizenzen notwendig.

¹⁷⁰ Bundesnetzagentur: Vfg 45/2016 - "Allgemeinzuteilung von Frequenzen im Frequenzbereich 868 – 870 MHz für nichtöffentliche Funkanwendungen für Alarmierungszwecke", 2016.

PLC (PLC)

Narrowband PLC (NB-PLC)

Technologieparameter		Einheit	Wert	Kommentar
Technologieeigenschaften	Betrachteter Standard	-	G3-PLC ¹⁷¹	
	Max. Datenrate pro Gerät, Downlink	Mbit/s	0,08	
	Max. pro Gerät, Uplink	Mbit/s	0,08	
	Frequenz (Deutschland)	MHz	3-500 kHz	
	Max. zulässige Dämpfung	dB	-	
Basisparameter	Deep-Indoor-Abdeckung	-	Geringer Aufwand	Anschluss direkt bis an Zählerkasten möglich.
	Reichweite	km	8 ¹⁷²	
	Systemdatenrate Downlink	Mbit/s	0,04 ¹⁷³	
	Systemdatenrate Uplink	Mbit/s	0,04	
	Übertragungsverzögerung	ms	450 ¹⁷⁴	Im Mittel 450 ms aber mit Ausreißern bis 1260 ms
Erweiterte Systemparameter	Redundante Topologie	-	Erhöhter Aufwand	Keine Redundanz des Hausanschlusses. Ausfallsicherheit durch Mesh-Strukturen nur im hingelagerten Netz.
	Schwarzfallfestigkeit	-	Hoher Aufwand	Aufgrund mittlerer Systemreichweiten ist der Aufwand für eine schwarzfallfeste Ausstattung aller Netzknoten mit erhöhtem, aber moderaten Aufwand verbunden.
	Differenzierte Priorisierung von Datendiensten	-	Eingeschränkt verfügbar	Die genutzten Frequenzen im unteren kHz-Bereich stehen NB-PLC exklusiv zur Verfügung, die Wahrscheinlichkeit für Gleichkanalstörer ist gering.

¹⁷¹ devolo AG: G3-PLC Modem 500k Handbuch, no. 1.1, 2016.

¹⁷² K. Sharma and L. M. Saini: Power-line communications for smart grid: Progress, challenges, opportunities and status", Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 67, S. 704–751, 2017.

¹⁷³ V. N. Papilaya, a J. H. Vinck und K. Ouahada: Analysis of the devolo ' s 500 kHz G3-PLC Access Technology based on Smart Grid Field Trials", S. 138–143, 2014.

¹⁷⁴ V. N. Papilaya, a J. H. Vinck und K. Ouahada: Analysis of the devolo ' s 500 kHz G3-PLC Access Technology based on Smart Grid Field Trials", S. 138–143, 2014.

Technologieparameter		Einheit	Wert	Kommentar
Erweiterte Systemparameter	Exklusive Ressourcen ohne Wechselwirkung mit Dritten	-	Priorisierung von Nutzergruppen	Die genutzten Frequenzen im unteren kHz-Bereich stehen NB-PLC exklusiv zur Verfügung, die Wahrscheinlichkeit für Gleichkanalstörer ist gering.
	Schutz gegenüber Angriffen	-	Mittleres Schutzniveau (State-of-the-Art)	AES-128-Bit-Verschlüsselung (http://www.g3-plc.com/what-is-g3-plc/g3-plc-benefits/). Ein Angriff auf den Übertragungsweg ist analog zu kabelgebundenen Techniken nur mit größerem Aufwand möglich.
	Langer Lebenszyklus	-	Langfristige Verfügbarkeit unsicher	Als Alternative für die schmalbandige PLC-Variante werden vermehrt breitbandige PLC-Systeme diskutiert. Das Marktpotential erscheint begrenzt.
	Kosten für Aufbau und Betrieb	-	Eingeschränkt kosteneffizient	Geringe Kosten für Kommunikationsmodule und keine Beschaffung von Lizenzen notwendig. PLC-Konzentratoren müssen aufgebaut und betrieben werden.

Broadband PLC (BB-PLC)

Technologieparameter		Einheit	Wert	Kommentar
Technologieeigenschaften	Betrachteter Standard	-	Home Plug AV2 / IEEE 1901 ¹⁷⁵	
	Max. Datenrate pro Gerät, Downlink	Mbit/s	200 ¹⁷⁶	
	Max. pro Gerät, Uplink	Mbit/s	200	
	Frequenz (Deutschland)	MHz	1 -30 MHz ¹⁷⁷	
	Max. zulässige Dämpfung	dB	-	
Basisparameter	Deep-Indoor-Abdeckung	-	Geringer Aufwand	Anschluss direkt bis an Zählerkasten möglich.
	Reichweite	km	1,5	Maximale Reichweite ¹⁷⁸ , insb. Indoor sind geringere Reichweiten die Regel.
	Systemdatenrate Downlink	Mbit/s	7,8 ¹⁷⁹	BPL Netz aus 107 BPL-Modems, 25 Repeatern und 4 Headends
	Systemdatenrate Uplink	Mbit/s	7	BPL Netz aus 107 BPL-Modems, 25 Repeatern und 4 Headends
	Übertragungsverzögerung	ms	50	
Erweiterte Systemparameter	Redundante Topologie	-	Erhöhter Aufwand	Keine Redundanz des Hausanschlusses. Ausfallsicherheit durch Mesh-Strukturen nur im hingelagerten Netz.
	Schwarzfallfestigkeit	-	Sehr hoher Aufwand	Aufgrund geringer typischer Systemreichweiten ist der Aufwand für eine schwarzfallfeste Ausstattung aller Netzknoten sehr hoch.

¹⁷⁵ Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Computer Society: 1901-2010 - IEEE standard for broadband over power line networks: medium access control and physical layer specifications, 2010.

¹⁷⁶ HomePlug Alliance: HomePlug AV White Paper, Architecture, S. 1–11, 2005.

¹⁷⁷ PPC AG: Eine Generation weiter, Das bewährte G4 Breitband-Powerline-System, 2017, online verfügbar: <https://www.ppc-ag.de/wp-content/uploads/2017/08/PPC-Flyer-BPL-PPC-17-2057-5D.pdf>.

¹⁷⁸ <https://www.heise.de/newsticker/meldung/Powerline-Standard-IEEE-1901-veroeffentlicht-1181650.html>

¹⁷⁹ PPC AG: BPL stellt WAN-Tauglichkeit erneut unter Beweis“, 2018, online verfügbar: <https://www.energiefachmagazin.de/2018/Ausgabe-1-2/Special-E-world-energy-water/BPL-stellt-WAN-Tauglichkeit-erneut-unter-Beweis>.

Erweiterte Systemparameter	Differenzierte Priorisierung von Datendiensten	-	Verfügbar, Zugriff durch Netzbetreiber	Reservierung interner Kommunikationskanäle möglich.
	Exklusive Ressourcen ohne Wechselwirkung mit Dritten	-	Priorisierung von Nutzergruppen	Die genutzten Frequenzen im unteren MHz-Bereich stehen BB-PLC exklusiv zur Verfügung, die Wahrscheinlichkeit für Gleichkanalstörer ist gering.
	Schutz gegenüber Angriffen	-	Hohes Schutzniveau mit bekannten Lücken	HomePlug AV stellt Authentifizierung und Verschlüsselungsmechanismen zur Verfügung ¹⁸⁰ . Ein Angriff auf den Übertragungsweg ist analog zu kabelgebundenen Techniken nur mit größerem Aufwand möglich.
	Langer Lebenszyklus	-	10-15 Jahre	BB-PLC-Systeme haben insbesondere in Heimvernetzung und zunehmend auch in der lokalen Prozessvernetzung ein breites Anwendungsfeld. Der Markt wächst moderat ¹⁸¹ . Die Standards werden kontinuierlich weiterentwickelt, sodass zu erwarten ist, dass die Technik langfristig verfügbar ist. Der Markt für BB-PLC für den Einsatz im öffentlichen Bereich erscheint allerdings begrenzt, sodass nur wenige Anbieter am Markt aktiv sind. Zwei wesentliche Anbieter stammen dabei aus Deutschland (PPC, devolo).
	Kosten für Aufbau und Betrieb	-	Eingeschränkt kosteneffizient	Kostengünstige Kommunikationslösung für den Rollout im Regelfall ab einer Anschlussquote von 10 % der Messstellen ¹⁸² .

¹⁸⁰ R. Newman, L. Yonge, S. Gavette, and R. Anderson: HomePlug AV security mechanisms, 2007 IEEE Int. Symp. Power Line Commun. Its Appl. ISPLC'07, S. 366–371, 2007.

¹⁸¹ <https://technology.ihs.com/584279/global-plc-market-returns-to-growth-in-2017-after-two-year-contraction>

¹⁸² PPC AG: Eine Generation weiter, Das bewährte G4 Breitband-Powerline-System, 2017, online verfügbar: <https://www.ppc-ag.de/wp-content/uploads/2017/08/PPC-Flyer-BPL-PPC-17-2057-5D.pdf>.

Drahtgebundene Technologien

Digital Subscriber Line (xDSL)

Technologieparameter		Einheit	Wert	Kommentar
Technologieeigenschaften	Betrachteter Standard	-	VDSL2 ¹⁸³	
	Max. Datenrate pro Gerät, Downlink	Mbit/s	100 ¹⁸⁴	
	Max. pro Gerät, Uplink	Mbit/s	100	
	Frequenz (Deutschland)	MHz	-	
	Max. zulässige Dämpfung	dB	-	
Basisparameter	Deep-Indoor-Abdeckung	-	Geringer Aufwand	Anschluss bis in den Keller des Hauses, allerdings nicht bis zum Zählerkasten.
	Reichweite	km	1 ¹⁸⁵	
	Systemdatenrate Downlink	Mbit/s	25	
	Systemdatenrate Uplink	Mbit/s	25	
	Übertragungsverzögerung	ms	10	
Erweiterte Systemparameter	Redundante Topologie	-	Stark erhöhter Aufwand	Keine Redundanz des Hausanschlusses. Ausfallsicherheit durch Ringstrukturen nur im hinterlagerten Netz.
	Schwarzfallfestigkeit	-	Sehr hoher Aufwand	Aufgrund geringer typischer Systemreichweiten ist der Aufwand für eine schwarzfallfeste Ausstattung aller Netzknoten mit erhöhtem, aber moderaten Aufwand verbunden.
Erweiterte Systemparameter	Differenzierte Priorisierung von Datendiensten	-	Verfügbar, Zugriff durch Netzbetreiber	Priorisierung nur durch höhere Schichten des ISO/OSI-Modells (z. B. MPLS).
	Exklusive Ressourcen ohne Wechselwirkung mit Dritten	-	Exklusive Ressourcen, nur Netzbetreiber administriert	Durch die Verfügbarkeit einzelner Leitungen ist die Steuerbarkeit der Ressourcenvergabe - bis zu einem gewissen Punkt - möglich.

¹⁸³ International Telecommunication Union (ITU): G.993.2 Very high speed digital subscriber line transceivers 2 (VDSL2)", 2007.

¹⁸⁴ NGA-Forum AG Interoperabilität: Grundsatzdokument Technische und operationelle Aspekte des Zugangs zu Glasfasernetzen und anderen NGA-Netzen, 2011.

¹⁸⁵ Breitband NRW: Breitbandtechnologien und Ausbauszenarien Überblick über die Technologien, 2016.

Technologieparameter		Einheit	Wert	Kommentar
Erweiterte Systemparameter	Schutz gegenüber Angriffen	-	Hohes Schutzniveau mit bekannten Lücken	Der Schutz vor Angriffen hängt im Wesentlichen von den Sicherheitsmaßnahmen am Router ab (technologieunabhängig). Ein Angriff auf den Übertragungsweg ist nur mit größerem Aufwand möglich.
	Langer Lebenszyklus	-	10-15 Jahre	Trotz weiterer Kapazitätsverbesserungen (Super-Vectoring) ist davon auszugehen, dass DSL-Netze langfristig durch Glasfaser-Infrastrukturen abgelöst werden.
	Kosten für Aufbau und Betrieb	-	Eingeschränkt kosteneffizient	Bei Mitnutzung bestehender Infrastrukturen moderate Kosten für den Betrieb. Wird die Verlegung neuer Kabelstränge erforderlich ggf. hohe Kosten für Tiefbauarbeiten.

Koaxial-Kabel

Technologieparameter		Einheit	Wert	Kommentar
Technologieeigenschaften	Betrachteter Standard	-	DOCSIS 3.1 ¹⁸⁶	
	Max. Datenrate pro Gerät, Downlink	Mbit/s	10.000 ¹⁸⁷	
	Max. pro Gerät, Uplink	Mbit/s	1.000	
	Frequenz (Deutschland)	MHz	-	
	Max. zulässige Dämpfung	dB	-	
Basisparameter	Deep-Indoor-Abdeckung	-	Geringer Aufwand	Anschluss bis in den Keller des Hauses, allerdings nicht bis zum Zählerkasten.
	Reichweite	km	60 ¹⁸⁸	
	Systemdatenrate Downlink	Mbit/s	12	
	Systemdatenrate Uplink	Mbit/s	3	
	Übertragungsverzögerung	ms	20	
Erweiterte Systemparameter	Redundante Topologie	-	Stark erhöhter Aufwand	Keine Redundanz des Hausanschlusses. Ausfallsicherheit durch Ringstrukturen nur im hinterlagerten Netz.
	Schwarzfallfestigkeit	-	Sehr hoher Aufwand	Aufgrund geringer typischer Systemreichweiten ist der Aufwand für eine schwarzfallfeste Ausstattung aller Netzknoten mit erhöhtem, aber moderaten Aufwand verbunden.
	Differenzierte Priorisierung von Datendiensten	-	Verfügbar, Zugriff durch Netzbetreiber	Priorisierung nur durch höhere Schichten des ISO-/OSI-Modells (z. B. MPLS).

¹⁸⁶ CableLabs: Data-Over-Cable Service Interface Specifications DOCSIS® 3.1 - MAC and Upper Layer Protocols Interface Specification, 2013.

¹⁸⁷ Breitband NRW: Breitbandtechnologien und Ausbauszenarien Überblick über die Technologien“, 2016.

¹⁸⁸ NGA-Forum AG Interoperabilität: Grundsatzdokument Technische und operationelle Aspekte des Zugangs zu Glasfasernetzen und anderen NGA-Netzen“, 2011.

Erweiterte Systemparameter	Exklusive Ressourcen ohne Wechselwirkung mit Dritten	-	Exklusive Ressourcen, nur Netzbetreiber administriert	Auch wenn das Koaxial-Kabel durch mehrere Teilnehmer gleichzeitig genutzt werden kann, ergibt sich durch die gute Abschirmung eine hohe Kapazität und verbundene Planbarkeit der Ressourcennutzung.
	Schutz gegenüber Angriffen	-	Hohes Schutzniveau mit bekannten Lücken	Der Schutz vor Angriffen hängt im Wesentlichen von den Sicherheitsmaßnahmen am Router ab (technologieunabhängig). Ein Angriff auf den Übertragungsweg ist nur mit größerem Aufwand möglich.
	Langer Lebenszyklus	-	15+ Jahre	Koaxialnetze besitzen einen kontinuierlich wachsenden Anteil an Glasfaserinfrastruktur (Hybrid-Fibre-Coax), womit die Leistungsfähigkeit des zunehmend nur für die letzte Meile eingesetzten Koaxialkabels weiter verbessert wird.
	Kosten für Aufbau und Betrieb	-	Eingeschränkt kosteneffizient	Bei Mitnutzung bestehender Infrastrukturen moderate Kosten für den Betrieb. Wird die Verlegung neuer Kabelstränge erforderlich ggf. hohe Kosten für Tiefbauarbeiten.

Fiber-To-The-Home (FTTH)

Technologieparameter		Einheit	Wert	Kommentar
Technologieeigenschaften	Betrachteter Standard	-	GPON ¹⁸⁹	
	Max. Datenrate pro Gerät, Downlink	Mbit/s	10.000 ¹⁹⁰	
	Max. pro Gerät, Uplink	Mbit/s	2.500	
	Frequenz (Deutschland)	MHz	-	
	Max. zulässige Dämpfung	dB	-	
Basisparameter	Deep-Indoor-Abdeckung	-	Geringer Aufwand	Anschluss bis in den Keller des Hauses, allerdings nicht bis zum Zählerkasten.
	Reichweite	km	100	
	Systemdatenrate Downlink	Mbit/s	156	
	Systemdatenrate Uplink	Mbit/s	39	
	Übertragungsverzögerung	ms	2 ¹⁹¹	
Erweiterte Systemparameter	Redundante Topologie	-	Stark erhöhter Aufwand	Keine Redundanz des Hausanschlusses. Ausfallsicherheit durch Ringstrukturen nur im hinterlagerten Netz.
	Schwarzfallfestigkeit	-	Sehr hoher Aufwand	Aufgrund geringer typischer Systemreichweiten ist der Aufwand für eine schwarzfallfeste Ausstattung aller Netzknoten mit erhöhtem, aber moderaten Aufwand verbunden.
	Differenzierte Priorisierung von Datendiensten	-	Verfügbar, Zugriff durch Netzbetreiber	Verwendung von OLT-Service-Schedulers in Kombination mit Priorisierung durch höhere Schichten des ISO-/OSI-Modells (z. B. IEEE 802.1p, DiffServ, MPLS).

¹⁸⁹ International Telecommunication Union (ITU): G.984.1 Gigabit-capable passive optical networks (GPON): General characteristics", 2008.

¹⁹⁰ NGA-Forum AG Interoperabilität: Grundsatzdokument Technische und operationelle Aspekte des Zugangs zu Glasfasernetzen und anderen NGA-Netzen", 2011.

¹⁹¹ M. Ruffini et al.: DISCUS: An end-to-end solution for ubiquitous broadband optical access, IEEE Commun. Mag., vol. 52, no. 2, S. 24–32, 2014.

Technologieparameter		Einheit	Wert	Kommentar
Erweiterte Systemparameter	Exklusive Ressourcen ohne Wechselwirkung mit Dritten	-	Exklusive Ressourcen, nur Netzbetreiber administriert	Einsatz unterschiedlicher Farben der Glasfaser ermöglicht – statische – Aufteilung von Ressourcen.
	Schutz gegenüber Angriffen	-	Hohes Schutzniveau mit bekannten Lücken	Der Schutz vor Angriffen hängt im Wesentlichen von den Sicherheitsmaßnahmen am Router ab (Technologie-unabhängig). Ein Angriff auf den Übertragungsweg ist nur mit größerem Aufwand möglich.
	Langer Lebenszyklus	-	15+ Jahre	Bei Glasfaser handelt es sich derzeit um die Kommunikationstechnologie mit der höchsten verfügbaren Datenrate, sodass auch langfristig noch keine Abkündigung dieser Technologie in Aussicht steht.
	Kosten für Aufbau und Betrieb	-	Kostenintensiv	Bei Mitnutzung bestehender Infrastrukturen moderate Kosten für den Betrieb. Derzeit bestehen jedoch noch keine flächendeckenden Glasfasernetze, weshalb hohe Kosten für den Ausbau zu berücksichtigen sind.

Anhang D: Validierung der Netzplanung

Modellierung des öffentlichen Mobilfunknetzes (subGHz) am Beispiel der Stadt Dortmund

In Ergänzung zu den Betrachtungen in Abschnitt 2.4 werden hier Daten zur Stadt Dortmund als weiteres Validierungsszenario genutzt. Dieses Szenario ist insbesondere deshalb für einen Abgleich zwischen Modell und Realität geeignet, da das Katasteramt der Stadt Dortmund unter dem Begriff des Mobilfunkkatasters¹⁹² sehr detaillierte Daten zu Mobilfunkstandorten öffentlich zur Verfügung stellt. Diese umfassen unter anderem Informationen zu Betreibern sowie eingesetzten Technologien an den verschiedenen Standorten und übersteigt damit den Detailgrad des entsprechenden Verzeichnisses der Bundesnetzagentur¹⁹³. Abbildung D-1 zeigt eine Karte der Stadt Dortmund, unterteilt nach Postleitzahlbereichen, in welcher entsprechend der Informationen des Mobilfunkkatasters die LTE-Basisstationsstandorte der Deutschen Telekom verzeichnet sind. Insgesamt konnte auf diesem Weg eine Anzahl von 116 Standorten bestimmt werden.

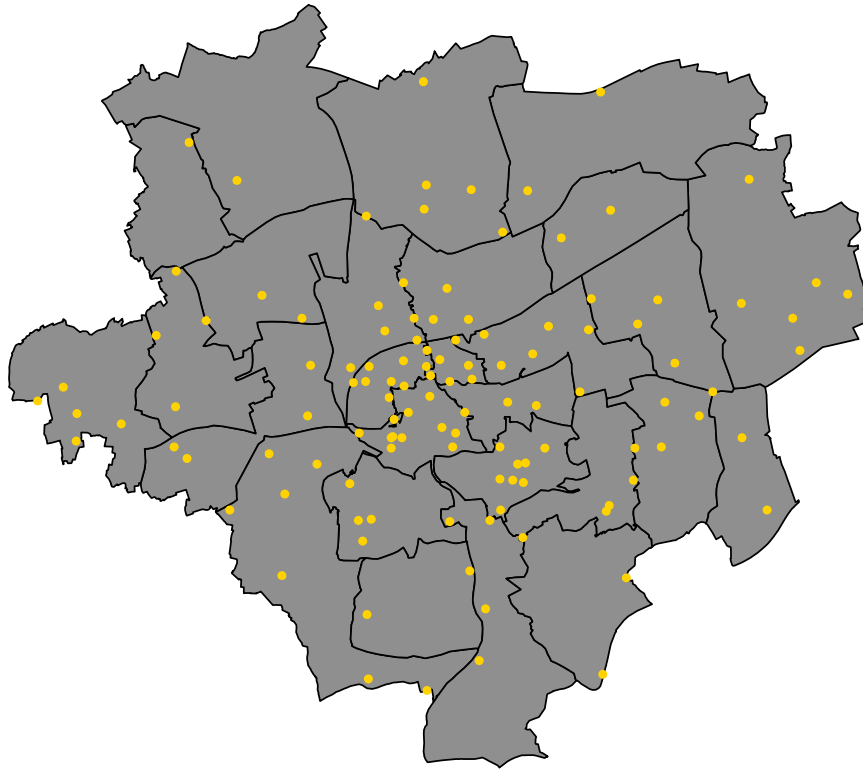


Abbildung D-1: Karte der Stadt Dortmund mit PLZ-Bereichen und LTE-Basisstationsstandorten der Deutschen Telekom

Abbildung D-2 zeigt einen Vergleich dieser realen Netzdaten der Deutschen Telekom (äußerste rechte Säule in gelber Farbe) mit der korrespondierenden Netzmodellierung. Es zeigt sich, dass entsprechend der abdeckungsorientierten, statistischen Netzplanung für eine flächendeckende Erreichbarkeit von Mobilfunkteilnehmern in Dortmund ca. 35 Basisstationen ausreichend wären. Da hier die Nachbildung eines öffentlichen Mobilfunknetzes für Endkonsumenten angestrebt wird, wird von einem Indoor-Abdeckungsziel ausgegangen. Weiterhin ist zu beachten, dass entsprechend der Regionsklassifizierung

¹⁹² <http://geoweb1.digistadtdo.de/OWSServiceProxy/client/mobilfunk.jsp>.

¹⁹³ <https://emf3.bundesnetzagentur.de/karte/default.aspx>.

nach Vorgaben des Statistischen Bundesamtes¹⁹⁴ die gesamte Fläche von Dortmund als urban klassifiziert wird. Dies spiegelt sich in dem vergleichsweise hohen abdeckungsbezogenen Basisstationsbedarf wider. Wird der Endkonsumenten-Verkehrsbedarf betrachtet, ergibt sich ein statistisches Basisstations-Mengengerüst von 120. Somit bestimmt hier die kapazitätsorientierte Netzplanung die Gesamtdimensionierung. Weiterhin lässt sich feststellen, dass auch im Dortmund-Szenario eine hinreichend gute Übereinstimmung zwischen Netzmodellierung und realen Netzdaten erzielt wird, mit einer Abweichung von ungefähr 4 Basisstationen.

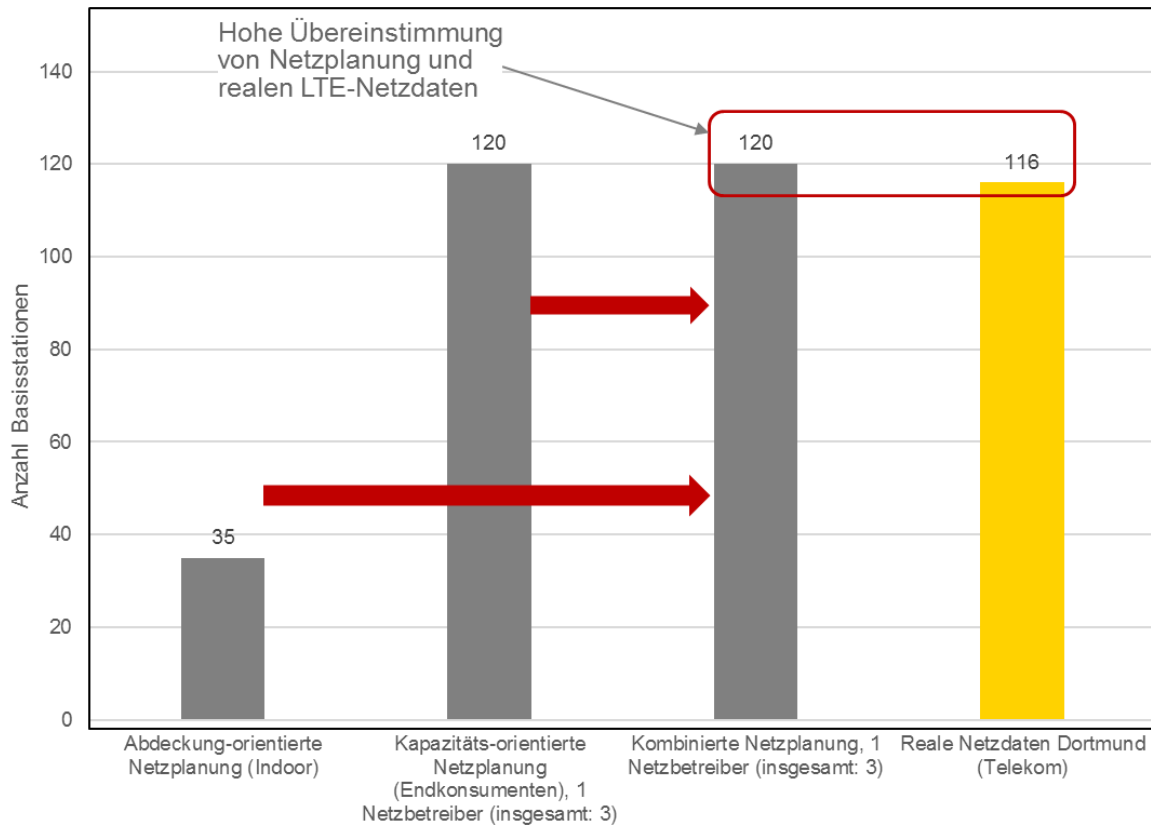


Abbildung D-2: Vergleich von Netzplanung und realen LTE-Netzdaten im öffentlichen Mobilfunk für die Stadt Dortmund

Modellierung eines dedizierten Mobilfunknetzes bei 450 MHz am Beispiel der Stadt Düsseldorf

Abbildung D-3 zeigt einen Vergleich der Netzplanung für ein dediziertes 450-MHz-LTE-Netz am Beispiel der Stadt Düsseldorf mit den Daten, welche in Expertengesprächen genannt wurden. Hierbei ist eine gute Deckung zwischen Indoor-Planung und der Experteneinschätzung zu erkennen. Demgegenüber würde die gesetzliche Abdeckungsanforderung von 95 % aller SMGWs laut statistischer Planung zu einem Gesamtbedarf von 34 Basisstationen führen.

¹⁹⁴ Statistisches Bundesamt: Alle politisch selbständigen Gemeinden mit ausgewählten Merkmalen am 30.06.2018 (2. Quartal 2018), online verfügbar : <https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/LaenderRegionen/Regionales/Gemeindeverzeichnis/Administrativ/Archiv/GVAuszugQ/AuszugGV2QAktuell.html>.

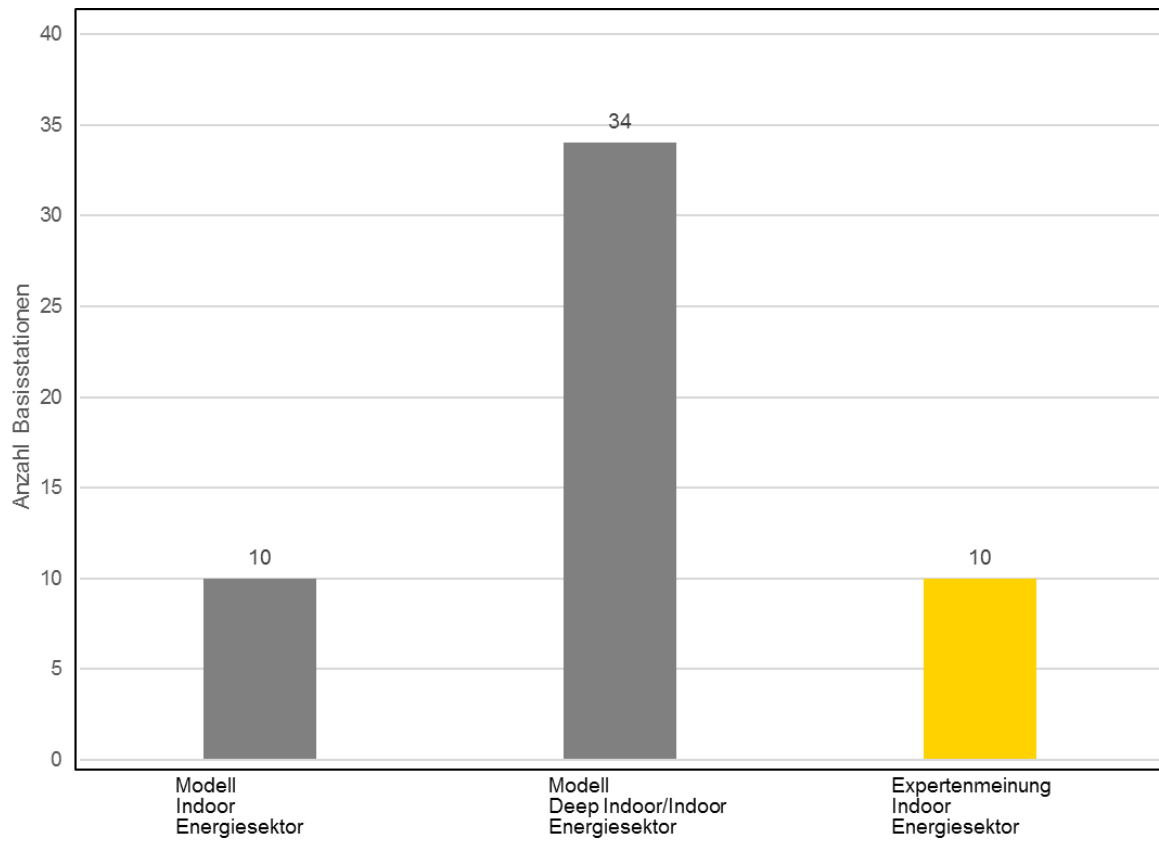


Abbildung D-3: Vergleich von Netzplanung und Expertenansichten zum Aufbau eines dedizierten 450-MHz-LTE-Netzes in der Stadt Düsseldorf

Anhang E: Sensitivitätsanalyse zum Einfluss des SMGW-Anteils in Deep-Indoor-Umgebungen

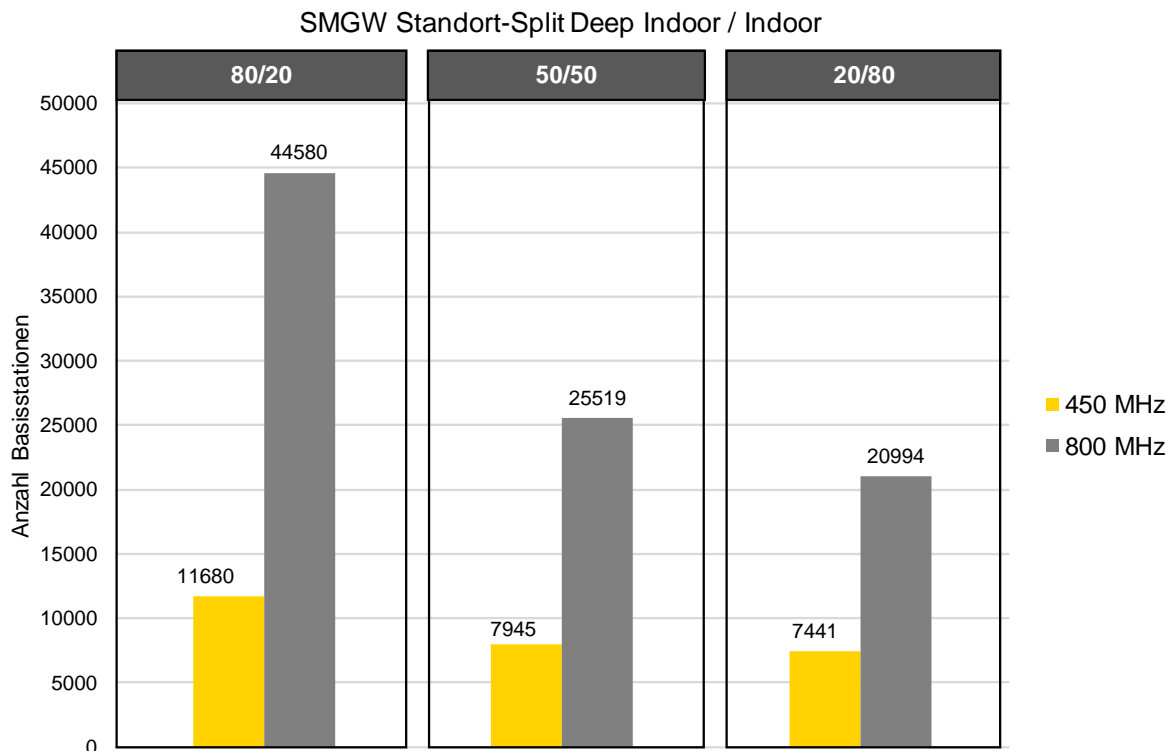


Abbildung E-1: Basisstationsbedarf in Abhängigkeit des SMGW-Standort-Splits

Ergänzend zu den Betrachtungen in Kapitel 2.4.2 zeigt Abbildung E-1 den Einfluss unterschiedlicher SMGW-Standort-Aufteilungen. Während sich zwischen 80/20 und 50/50 Deep-Indoor / Indoor eine deutliche Reduktion des Mengengerüsts ergibt, ist der Rückgang gegenüber dem 20/80 Szenario geringer.

Anhang F: Einfluss der Netzzustandsüberwachung auf die LTE-Netzplanung

Im Rahmen von TT2 werden die Netztypen „Innenstadt“, „Gewerbegebiet“, „Streusiedlung 1“ und „Streusiedlung 2“ als relevante Netztypen für die NZÜ definiert. Diese werden abgebildet auf unterschiedliche Regionstypen, welche für die Mobilfunknetzplanung zum Einsatz kommen. Unter Berücksichtigung typischer Flächen der Energienetztypen, ergeben sich durchschnittliche Anzahlen von Netzgebieten, welcher durch eine LTE-Zelle abgedeckt werden können. Diese stehen in Abhängigkeit von der gewählten LTE-Betriebsfrequenz sowie der angenommenen SMGW-Standortverteilung (Keller / Indoor). Eine entsprechende Darstellung bietet Abbildung F-1.

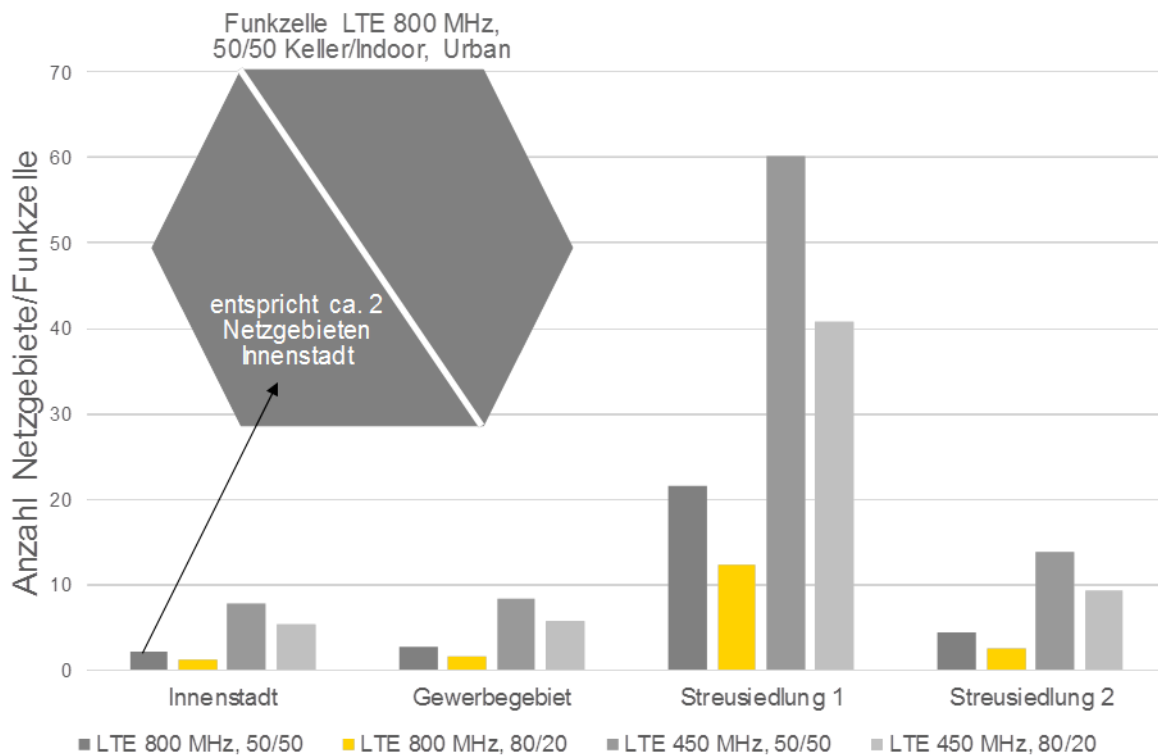


Abbildung F-1: Skalierung von Energienetzgebieten auf abdeckungsbedingte Größe der Funkzellen

Wie zuvor gezeigt (vgl. Kapitel 2.1.3.2), ergibt sich durch den Einsatz der NZÜ ein erhöhter aggregierter Datenratenbedarf insbesondere in Uplink-Richtung. Diese Betrachtung lässt sich für die verschiedenen Netzgebiete aus TT2 konkretisieren. Abbildung F-2 zeigt eine entsprechende Gegenüberstellung der aggregierten Uplink-Datenraten mit und ohne NZÜ. Dabei zeigt sich insbesondere in den Räumen „Gewerbegebiet“ und „Streusiedlung 1“ ein relevanter Anstieg der Anforderungen von bis zu 150%.

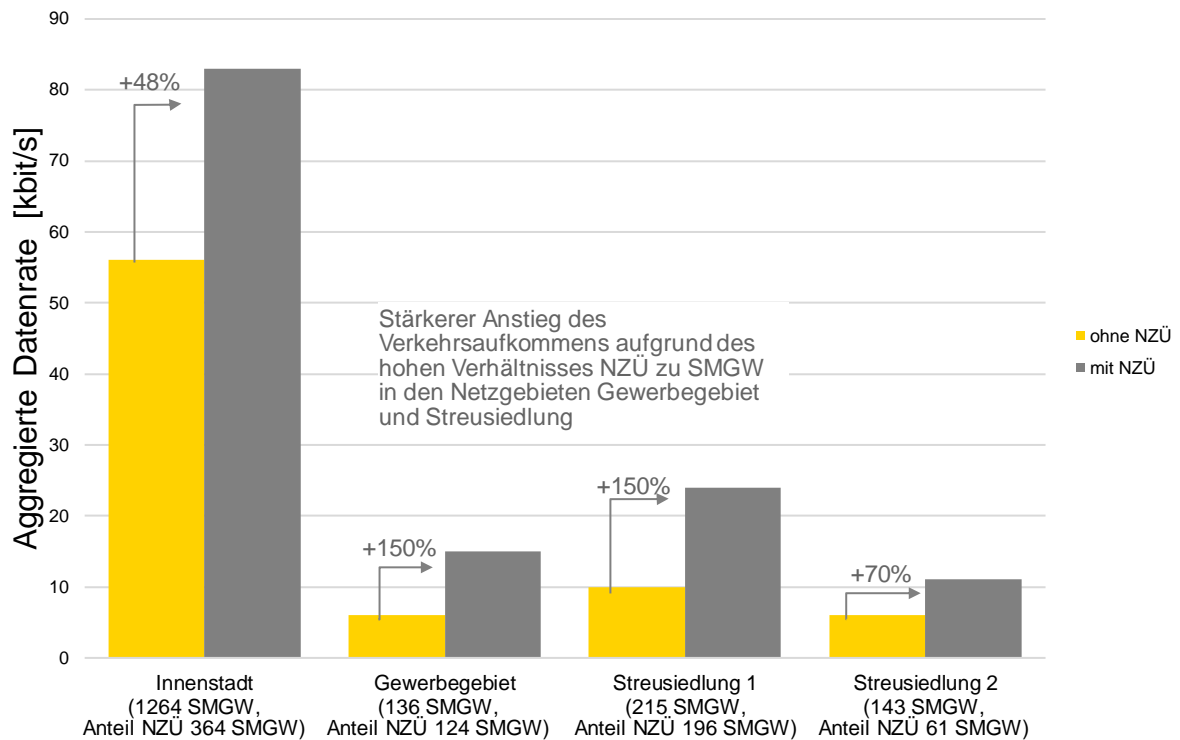


Abbildung F-2: Datenratenbedarf durch NZÜ in Uplink-Richtung

Demgegenüber unterstreicht Abbildung F-3 abermals die minimale Auswirkung der NZÜ auf die aggregierte Datenrate in Downlink-Richtung.

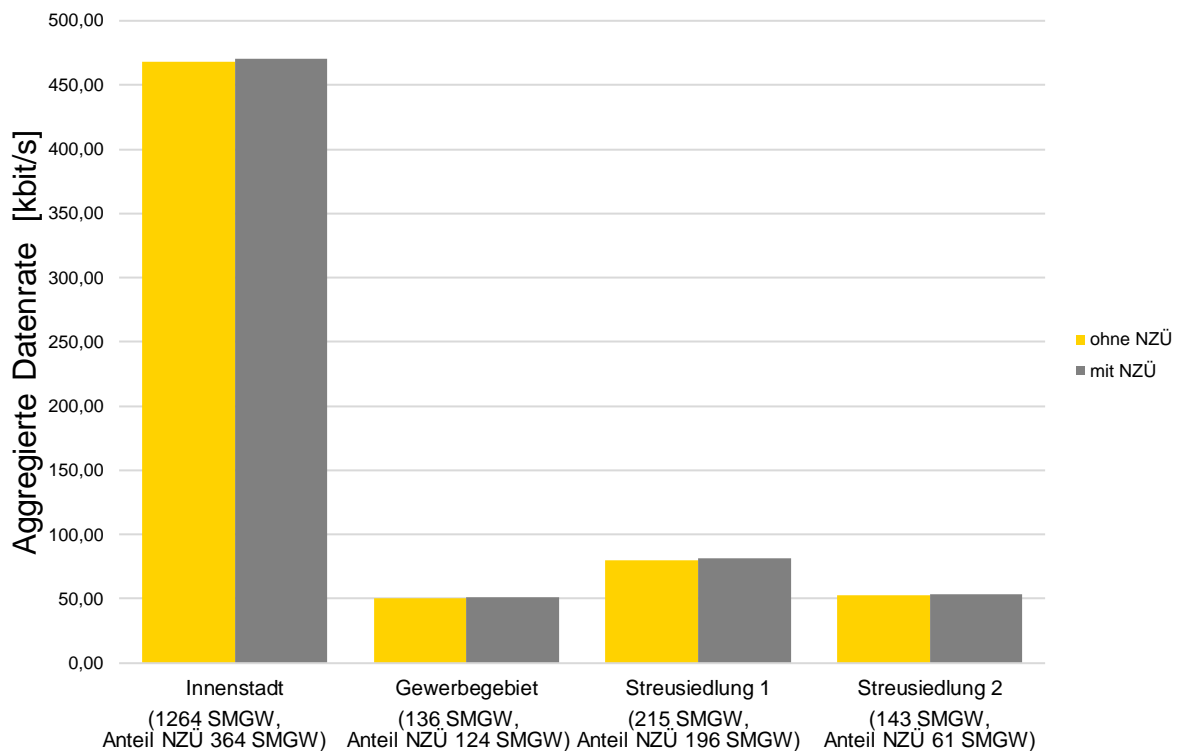


Abbildung F- 3: Datenratenbedarf durch NZÜ in Downlink-Richtung

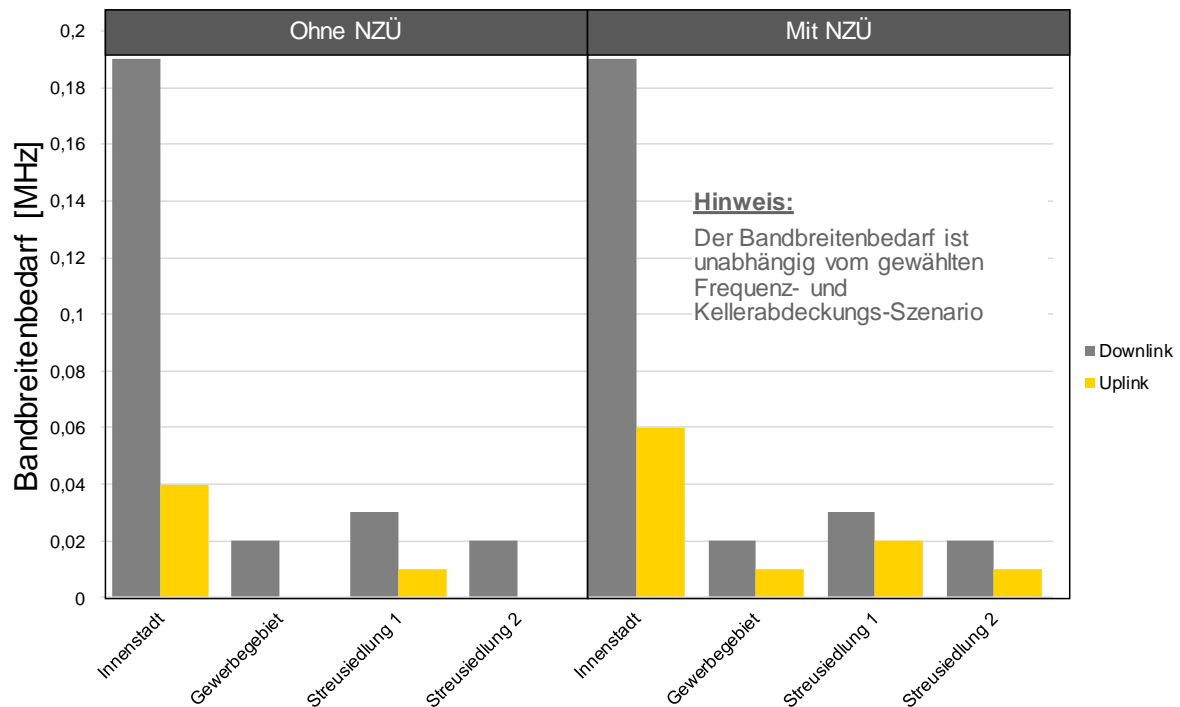


Abbildung F- 4: Bandbreitenbedarf in Abhängigkeit des NZÜ-Verkehrs

Auf Grundlage dieser Betrachtungen lassen sich zudem die Auswirkungen auf den Bandbreitenbedarf im Mobilfunknetz ableiten. Abbildung F-4 stellt hierzu den Bandbreitenbedarf mit und ohne NZÜ gegenüber, unterteilt nach Netzgebiet-Typen und Übertragungsrichtung. Entsprechend der nur wenig erhöhten Datenratenanforderung in Downlink-Richtung ergibt sich hier nahezu keine Veränderung des Bandbreitenbedarfs. Im Gegensatz hierzu zeigt sich in Uplink-Richtung – entsprechend des gesteigerten aggregierten Datenratenbedarfs – auch eine Zunahme der Bandbreitenanforderung für alle vier Netzgebiets-typen.

Anhang G: Szenario-Parameter der Engpassanalyse

Tabelle G-0-1: Szenario-Daten für Abbildung 2-18

Parameter	Wert
Szenario	Deutschland
SMGW-Durchdringung 2020	1 %
SMGW-Durchdringung 2025	10 %
SMGW-Durchdringung 2030	50 %
Verkehrsmodell	Flotten-Datenrate
Verkehrstyp	Endkonsumenten
Frequenz	800 MHz
Bandbreite	10 MHz
SMGW-Standort	50 % Keller, 50 % oberhalb
NZÜ-Anteil	0 %
Grenzpunkt Indoor	75 %
Grenzpunkt Deep Indoor	95 %

Tabelle G-0-2: Szenario-Daten für Abbildung 2-18, Abbildung 2-21, Abbildung 2-24

Parameter	Wert	
Szenario	Deutschland	
SMGW-Durchdringung 2020	1 %	
SMGW-Durchdringung 2025	10 %	
SMGW-Durchdringung 2030	50 %	
Verkehrsmodell	Flotten Datenrate	
Verkehrstyp	Endkonsumenten, SMGW	SMGW
Frequenz	800 MHz	450 MHz
Bandbreite	10 MHz	1,4 MHz
SMGW-Standort	50 % Keller, 50 % oberhalb	
NZÜ Anteil	0 %	
Grenzpunkt Indoor	75 %	
Grenzpunkt Deep Indoor	95 %	

Tabelle G-0-3: Szenario-Daten für
Abbildung 2-19, Abbildung 2-24

Parameter	Wert
Szenario	Deutschland
SMGW-Durchdringung 2020	1 %
SMGW-Durchdringung 2025	10 %
SMGW-Durchdringung 2030	50 %
Verkehrsmodell	Flotten-Datenrate
Verkehrstyp	Endkonsumenten, SMGW
Frequenz	800 MHz
Bandbreite	10 MHz
SMGW-Standort	50 % Keller, 50 % oberhalb
NZÜ-Anteil	0 %
Grenzpunkt Deep Indoor	95 %

Tabelle G-0-4: Szenario-Daten für Abbildung 2-26

Parameter	Wert	
Szenario	Deutschland	
SMGW-Durchdringung 2020	1 %	
SMGW-Durchdringung 2025	10 %	
SMGW-Durchdringung 2030	50 %	
Verkehrsmodell	Flotten-Datenrate	
Verkehrstyp	Endkonsumenten, SMGW	SMGW
Frequenz	800 MHz	450 MHz
Bandbreite	10 MHz	1,4 MHz
SMGW-Standort	50 % Keller, 50 % oberhalb	
NZÜ-Anteil	{0 %;10 %;20 %;30 %}	
Grenzpunkt Deep Indoor	95 %	

Tabelle G-0-5: Szenario-Daten für Anhang E: Sensitivitätsanalyse zum Einfluss des SMGW-Anteils in Deep-Indoor-Umgebungen

Parameter	Wert
Szenario	Dortmund
SMGW-Durchdringung 2020	1 %
SMGW-Durchdringung 2025	10 %
SMGW-Durchdringung 2030	50 %
Verkehrsmodell	Flotten Datenrate
Verkehrstyp	Endkonsumenten
Frequenz	800 MHz
Bandbreite	10 MHz
SMGW-Standort	50 % Keller, 50 % oberhalb
NZÜ-Anteil	0 %
Grenzpunkt Deep Indoor	95 %

Anhang H: Eckpunkte für hinreichende Frequenzen für drahtlose IoT-Anwendungen zur Ermöglichung der Energiewende in Deutschland

Nachfolgend präsentieren wir die wesentlichen frequenzpolitischen Erkenntnisse zur Ermöglichung der drahtlosen IoT-Kommunikation im Rahmen der Digitalisierung der Energiewende.

1. Hochwertige Frequenzen mit herausragenden Ausbreitungseigenschaften zur Realisierung einer kostengünstigen Indoor-Versorgung sind für die Umsetzung der Digitalen Energiewende mit Blick auf die Realisierung von drahtloser Kommunikation essentiell. Derartige Frequenzen sind priorisiert (exklusives Frequenznutzungsrecht mit Frequenz-Sharing-Optionen) für kritische Anwendungen und insbesondere für Anwendungen zur Ermöglichung der Energiewende von der Bundesnetzagentur zur Verfügung zu stellen. Derartige Frequenzen sind in einem hinreichenden Umfang, um den Kapazitätsanforderungen zu genügen, bereitzustellen.
2. Die ab 2020 in Deutschland verfügbaren 450-MHz-Frequenzen sind aktuell die am besten geeigneten Frequenzen für kritische Anwendungen mit hohen Qualitätsanforderungen in Deutschland. Die hervorragenden Ausbreitungseigenschaften, die bestehenden und erforderlichen technischen Standardisierungen, die verfügbaren Endgeräte sowie die Tatsache, dass bereits ein Unternehmen Erfahrung mit derartigen Netzstrukturen hat und auch im Markt betreibt sind wichtige Gründe für diese Einschätzung.
3. Die Bundesnetzagentur hat einen Entwurf zur Änderung der Frequenznutzungsbedingungen der 450-MHz-Frequenzen veröffentlicht. Die dort fixierten Nutzungsmöglichkeiten, insbesondere die für kritische Anwendungen, bilden den ersten erforderlichen und essentiellen Schritt, damit diese Frequenzen für drahtlose Kommunikation für kritische Anwendungen auch im Bereich des Energiesektors eingesetzt werden können.
4. Die Bundesnetzagentur hat eine Bedarfsabfrage für die 450-MHz-Frequenzen durchgeführt. Es wurde ein Bedarf für kritische Anwendungen insbesondere auch mit Blick auf kritische Kommunikation im Energiesektor angemeldet. Liegt keine Knappheit vor, wäre damit die Möglichkeit für die Nutzung für kritische Anwendungen im Wege einer Einzelzuteilung gegeben. Sofern Knappheit vorliegt, wird die Bundesnetzagentur ein Vergabeverfahren (Frequenzauktion oder Ausschreibungsverfahren) durchführen. Das Vergabeverfahren sollte so ausgestaltet sein, dass ein Anbieter für kritische Infrastruktur einen hinreichenden Umfang an Frequenznutzungsrechten erwerben kann. Spezifische Vergabebedingungen für die 450-MHz-Frequenzen, beispielsweise Mindestgebote bei einer Frequenzauktion, Versorgungsaufgaben und Zugangsbedingungen bzw. Frequenz-Sharing-Optionen sollten so ausgestaltet sein, dass Investitionen in ein national verfügbares Netz für kritische Infrastruktur gefördert werden.
5. Frequenzen, die für den drahtlosen Netzzugang für öffentliche Mobilfunkdienste zugeteilt wurden und von den Mobilfunknetzbetreibern genutzt werden, erfüllen nicht die erforderlichen Qualitätsstandards, die für kritische Anwendungen im Rahmen der Digitalen Energiewende einzuhalten sind.
6. Auch die historisch für Betriebs- und Bündelfunk genutzten Frequenzen, die lokal zugeteilt wurden bzw. werden, können allenfalls komplementär zu den äußerst kritischen Anwendungen mit hohen Qualitätsanforderungen für spezifische IoT-Dienste genutzt werden.
7. Allgemein zugeteilte Frequenzen, die aktuell häufig für Wi-Fi oder Bluetooth genutzt werden, genießen keinen Interferenzschutz und sind insofern allenfalls für unkritische Anwendungen geeignet.

8. Die RSPG hat Frequenzbereiche für IoT-Anwendungen identifiziert. Damit diese auch de facto für die (zukünftig) verfügbaren Technologien genutzt werden können, sind die Standardisierung in den europäischen Gremien voranzutreiben und nationale Frequenznutzungspläne gemäß der sich daraus ergebenden Anforderungen in Deutschland durch die Bundesnetzagentur zeitnah zu ändern. Dies betrifft insbesondere die Änderung der Kanalraster zur Ermöglichung von digitalen Anwendungen. Damit werden weitere Anwendungen für drahtlose IoT-Kommunikation im Bereich der Digitalisierung der Energiewende ermöglicht. Frequenzpolitisch würde damit ein adäquates Ecosystem für drahtlose IoT-Anwendungen geschaffen werden. Es bleibt dann abzuwarten, welche Technologien für welche Anwendungen sich am Markt durchsetzen und etablieren werden.
9. Parallel dazu sollte die Bundesnetzagentur geeignete Frequenz-Sharing-Systeme, insbesondere für IoT-relevante Frequenzbereiche entwickeln, damit vielfältiger Zugang zu Frequenznutzungsrechten besteht und kostengünstig eine effiziente Nutzung der Frequenzen ermöglicht wird.

Tabelle H-1: Allgemeine Anforderungen an ein Mobilfunknetz

Sicherstellung der priorisierten Ende-zu-Ende-Übertragung der Kommunikationsdienste
 Sichere Verfügbarkeit der Kommunikation bei Stromausfällen, Notfall- und Krisensituationen
 Bedarfsorientierte Funknetzabdeckung zur sicheren Erreichung der Anlagen der Energiewirtschaft,
 Ausreichende Funktonalität bzw. Skalierbarkeit, um große regionale und überregionale Gruppen von Anlagen zu steuern
 Gute Durchdringung von Gebäuden, insbesondere zur Erreichbarkeit der innenliegenden Gateways in den Kellern
 Geringe Latenz- und Verbindungsaufbauzeiten, insbesondere für Smart-Grid-Anwendungen
 Hohe Stabilität und Verfügbarkeit der Kommunikationsdienste
 Geringe Bitfehlerraten, insbesondere im Uplink für Smart-Meter-Anwendungen

Technische Anforderungen

Art der Anforderung	NS	MS
Min Verfügbarkeit (Jahresmittel bezogen auf Einzelverbindungen)	99 %	
Max. Wiederherstellungszeit (bezogen auf Basisstation)	12 h	
Gleichzeitiges Schalten für Gruppen: 10.000 Anlagen/3 Min.	ja	nein
Max. Antwortzeit TK	<<1s	
Max. Übertragungsverzögerung (z.B: Sicherheits-Updates GW)	24 h	
Min. Datenrate pro Gerät (netto)	64 kBit/s	
Bidirektionalität ¹² h	ja	
Schutzbedarf/IT-Sicherheit	hoch	
Monitoring Anlage/Fernwartung	ja	
IPv4-Abwärtskompatibilität	ja	
Min. Verfügbarkeit (räumlich, realisiert über diese Technologie)	95 %	99 % outdoor
IPv6	ja	
Verkehrsklassen und QoS	ja	

Quelle: BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V.¹⁹⁵

¹⁹⁵ Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft (BDEW): Betreibermodell für ein Mobilfunknetz in der Energiewirtschaft, Positionspapier, Berlin 2. Oktober 2015.

Abkürzungsverzeichnis

3GPP	3rd Generation Partnership Project
AFH	Adaptive Frequency Hopping
BB-PLC	Broadband-PLC
BET	Büro für Energiewirtschaft und technische Planung GmbH
BGAN	Broadband Global Area Network
BNetzA	Bundesnetzagentur
BOS	Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben
BSI	Bundesamt für die Sicherheit in der IT
CATV	Cable TV
CDMA	Code Division Multiple Access
CLS	Controllable Local System
CSE	Cell Spectral Efficiency
CSMA/CA	Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance
DER	Distributed Energy Resource
DL	Downlink
DSL	Digital Subscriber Line
DVB-T	Digital Video Broadcasting – Terrestrial
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
EIRP	Equivalent Isotropically Radiated Power
EMT	Externe Marktteilnehmer
eMTC	enhanced Machine-type Communications
EN	Europäische Norm
ERP	Effective Radiated Power
FNN	Forum Netztechnik/Netzbetrieb
FNN	Forum Netztechnik/Netzbetrieb
FTTB	Fibre-To-The-Building
FTTH	Fibre-To-The-Home
GBR	Guaranteed Bit Rate
GSM	Global System for Mobile Communications
HVSt	Hauptverkehrsstunde

IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IoT	Internet-of-Things
ISM	Industrial, Scientific and Medical
IT	Informationstechnik
ITU	International Telecommunication Union
LBT	Listen-Before-Talk
LoRaWAN	Long-Range-Wide-Area-Network
LPWAN	Low-Power-Wide-Area-Networks
LTE	Long-Term-Evolution
M2M	Machine-to-Machine
MCL	Maximum-Coupling-Loss
MPL	Maximum-Path-Loss
MsbG	Messstellenbetriebsgesetz
NB-IoT	Narrowband-IoT
NB-PLC	Narrowband-PLC
NEA	Netzersatzanlagen
NTP	Network Time Protocol
NZÜ	Netzzustandsüberwachung
PLC	Power-Line-Communication
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
QoS	Quality-of-Service
RTT	Round-Trip-Time
Satcom	Satellitenkommunikation
SIM	Subscriber-Identity-Module
SMGW	Smart-Meter-Gateway
SRD	Short-Range-Devices
TK	Telekommunikation
TLS	Transport-Layer-Security
TR	Technische Richtlinie
UL	Uplink
UMTS	Universal-Mobile-Telecommunications-System

USV	Unterbrechungsfreie Stromversorgung
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik
VDSL	Very High Speed Digital Subscriber Line
VoLTE	Voice-over-LTE
WAF	WAN-Anwendungsfall
WAN	Wide-Area-Network
WIK	Wissenschaftliches Institut für Infrastruktur und Kommunikationsdienste
WLAN	Wireless Local Area Networks