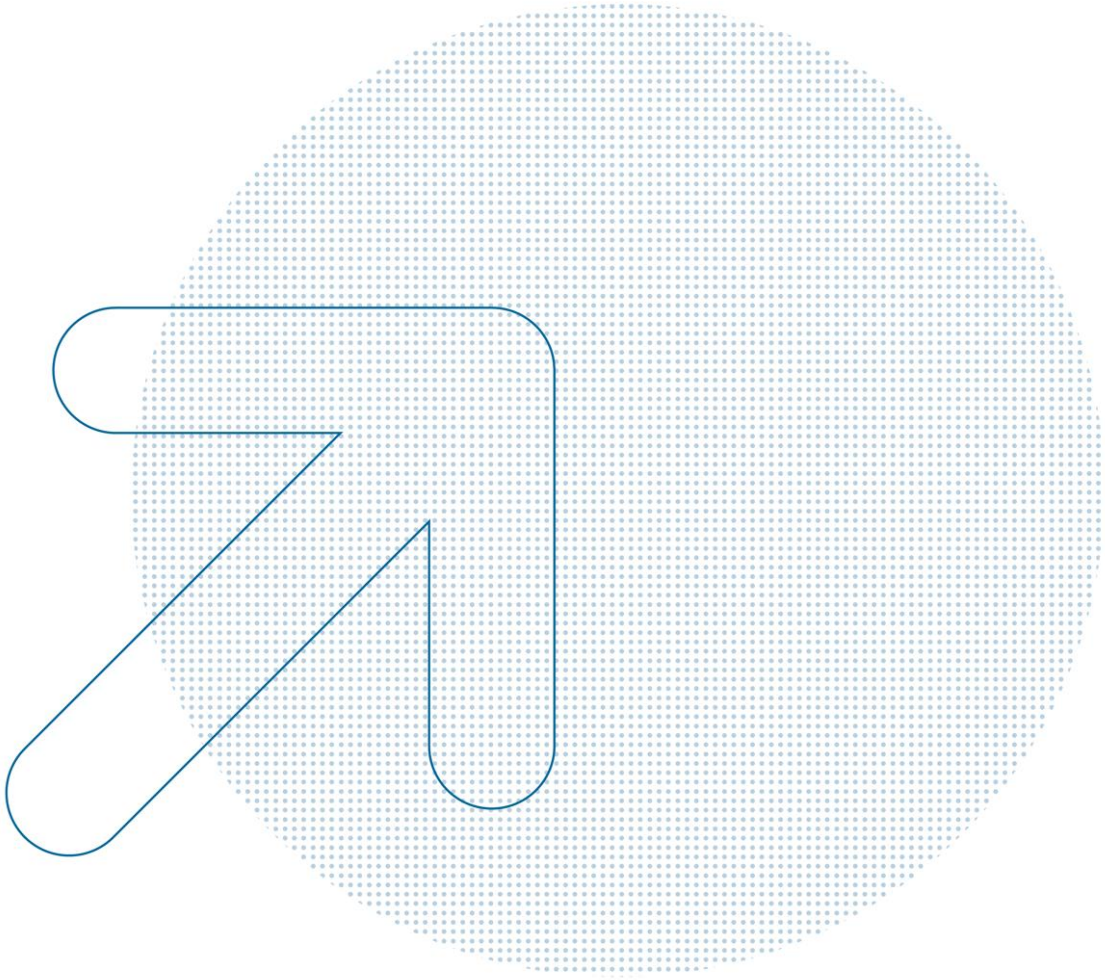
WIK-Consult • Bericht

Studie für 450connect GmbH



Resilienz öffentlicher Mobilfunknetze – eine Analyse von Stromausfällen

Autoren:
Prof. Dr. Bernd Sörries
Matthias Wissner

Bad Honnef, Juli 2026

WIK CONSULT

Impressum

WIK-Consult GmbH
Rhöndorfer Str. 68
53604 Bad Honnef
Deutschland
Tel.: +49 2224 9225-0
Fax: +49 2224 9225-63
E-Mail: info@wik-consult.com
www.wik-consult.com

Vertretungs- und zeichnungsberechtigte Personen

Geschäftsführung	Dr. Cara Schwarz-Schilling (Vorsitzende der Geschäftsführung)
	Alex Kalevi Dieke (Kaufmännischer Geschäftsführer)
Prokuristen	Prof. Dr. Bernd Sörries
	Dr. Christian Wernick
	Dr. Lukas Wiewiorra
Vorsitzender des Aufsichtsrates	Dr. Thomas Solbach
Handelsregister	Amtsgericht Siegburg, HRB 7043
Steuer-Nr.	222/5751/0926
Umsatzsteueridentifikations-Nr.	DE 329 763 261

Stand: Juli 2026

Inhaltsverzeichnis

Abbildungen II

Tabellen II

1 Einleitung 1

2 Netzarchitektur der öffentlichen Mobilfunknetze 2

2.1 Technische Aspekte 2

2.1.1 Kernnetz 3

2.1.2 Backhaul 4

2.1.3 Radio Access Network (RAN) 4

2.2 Mobilfunkstandorte in Deutschland 6

3 Stromausfall und Maßnahmen der Mobilfunknetzbetreiber 7

3.1 Grundsätzliche Maßnahmen 7

3.2 Stromausfall in Spanien 9

3.3 Stromausfall in Berlin 10

4 Lessons learned 12

4.1 Für die öffentlichen Mobilfunknetze 12

4.2 Für kritische Anwendungen wie in der Energiewirtschaft 14

5 Fazit 17

Abbildungen

Abbildung 2-1:	Netzstruktur eines Mobilfunknetzes	3
Abbildung 2-2:	Wesentliche Elemente einer Mobilfunksendeanlage	5
Abbildung 3-1:	Stromverbrauch eines Mobilfunknetzes	8
Abbildung 3-2:	Ausfall von Basisstationen in Spanien	10
Abbildung 3-3:	Mobilfunkstandorte im Gebiet des Stromausfalls	11
Abbildung 4-1:	Maximale Leistungsaufnahme eines Mobilfunkstandorts	13
Abbildung 4-2:	Gegenseitige Abhängigkeiten verschiedener Teilsektoren	15

Tabellen

Tabelle 2-1:	Anzahl der Mobilfunkstandorte der Netzbetreiber in Deutschland	6
Tabelle 4-1:	Jährliche Kosten der Pufferung von drei Funkzugangsnetzen bei einer Einsatzdauer der Batterien von 15 Jahren und einem WACC von 5 %	13

1 Einleitung

Vom 3. bis 7. Januar 2026 führte ein Brand auf einer Kabelbrücke in Berlin-Lichterfelde zu Ausfällen des Stromnetzes im Südwesten Berlins. Vom Stromausfall waren über 100.000 Personen sowie kritische Einrichtungen wie Krankenhäuser, Schulen und Pflege- und Seniorenheime sowie Gewerbebetriebe betroffen.[1]

Nach dem Stromausfall begann eine Diskussion über die Resilienz nicht nur der Stromnetze, sondern ebenfalls der öffentlichen Mobilfunknetze. Die Mobilfunknetze rückten in den Fokus, weil der Anschlag auf das Stromnetz in Berlin deren Funktionsfähigkeit unmittelbar traf: Sie waren entweder sofort oder nach kurzer Zeit nicht mehr verfügbar. Nach 24 Stunden griffen die Notfallmaßnahmen der drei etablierten Mobilfunknetzbetreiber dahingehend, dass in Teilen des vom Stromausfall betroffenen Gebiets eine Grundversorgung mit mobilen Diensten realisiert werden konnte.

Bei der Versorgungswiederherstellung mit Strom kam den öffentlichen Mobilfunknetzen die Aufgabe zu, über Cell Broadcasting die Bevölkerung darüber zu informieren, starke Stromverbraucher nicht unmittelbar nach Spannungswiederkehr zu nutzen, um einen erneuten Stromausfall aufgrund von Spannungsschwankungen zu vermeiden.[2] Diesen Hinweis konnten nur die Haushalte wahrnehmen, die von der nach dem Stromausfall etablierten Grundversorgung der Mobilfunknetzbetreiber profitierten.

Die vorliegende Studie greift den Stromausfall in Berlin auf, um Aussagen über die Resilienz der öffentlichen Mobilfunknetze zu treffen. Unter Resilienz wird die Widerstandsfähigkeit des jeweiligen Netzes gegen innere und äußere Störfaktoren verstanden, damit trotz Einwirkungen die Verfügbarkeit der über das Netz angebotenen Dienste bestehen bleibt.[3] Der Fokus der Analyse liegt dabei auf dem Störfaktor einer fehlenden Stromversorgung.

Die Studie ist wie folgt gegliedert: Zunächst wird die Netzarchitektur eines Mobilfunknetzes erläutert, um die Auswirkungen eines Stromausfalls einschätzen zu können. In Kapitel 3 werden Maßnahmen der Mobilfunknetzbetreiber für das Szenario eines Stromausfalls betrachtet. In diesem Kapitel wird auf Vorfälle in Berlin und in Spanien eingegangen. Im 4. Kapitel wird analysiert, welche Ableitungen aus den Vorfällen gezogen werden können.

---

1 Broemme et al. (2026).
2 https://www.tagesspiegel.de/berlin/kurioser-handyalarm-per-cell-broadcast-strom-kommt-ab-11-uhr-zuruck--warum-warnt-berlin-vor-extremer-gefahr-15110472.html, Abruf 27.4.2026.
3 BNetzA (2022), S. 5.

2 Netzarchitektur der öffentlichen Mobilfunknetze

2.1 Technische Aspekte

Um zu verstehen, welche Auswirkungen ein Stromausfall auf öffentliche Mobilfunknetze und somit deren Resilienz hat, ist zunächst die Netzarchitektur eines Mobilfunknetzes zu betrachten.

Ein Mobilfunknetz besteht aus einer hierarchischen Struktur, die das Kernnetz, das Funkzugangsnetz (Radio Access Network, RAN) und das Transportnetz umfasst (vgl. Abbildung 2-1).[4] Während die aktiven Netzkomponenten des Kernnetzes auf wenige Standorte konzentriert sind, sind die aktiven Netzkomponenten des Funkzugangs- und Transportnetzes in der Fläche verteilt.

Des Weiteren unterscheiden sich die Netzelemente hinsichtlich ihrer Kritikalität: Die Netzelemente des Kernnetzes werden aufgrund ihrer zentralen Bedeutung für die Bereitstellung der Telekommunikationsdienste in Gänze als kritisch eingestuft.[5] Störungen im Kernnetz haben weitreichende Folgen für die nachgelagerten Netzhierarchien. Störungen im Funkzugangsnetz wirken sich dagegen nicht auf das gesamte Mobilfunknetz aus.

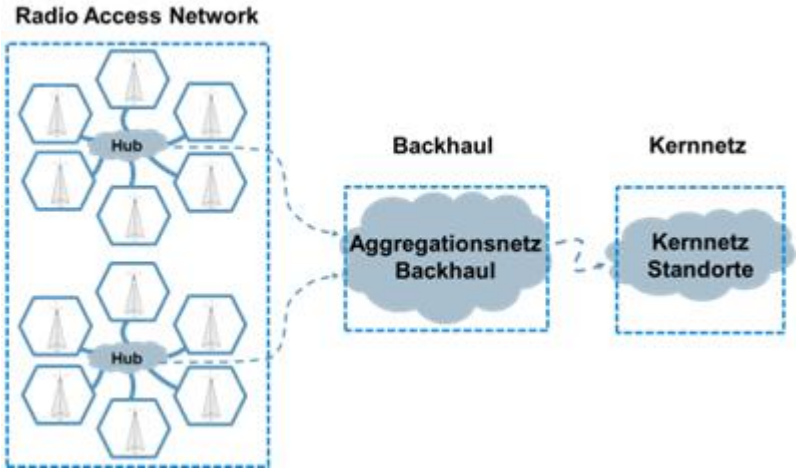
Die Kritikalität des Kernnetzes ist auch der Grund dafür, wieso seine wesentlichen Netzelemente redundant ausgelegt sind und hinsichtlich der hier bestehenden Leitfrage vor Stromausfällen mittels einer unterbrechungsfreien Stromversorgung besonders geschützt sind (siehe unten).

---

4 Vgl. Wissner et al. (2021), S. 4ff.

5 Vgl. dazu https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/kurzmeldungen/DE/2024/07/5g.html, zuletzt abgerufen am 27.4.2026.

Abbildung 2-1: Netzstruktur eines Mobilfunknetzes



Quelle: WIK-Consult

2.1.1 Kernnetz

Das Kernnetz ist der zentrale Steuerungsbereich eines Mobilfunknetzes und verbindet das Funkzugangsnetz mit Diensten, anderen Netzen und dem Internet.[6] Es prüft Nutzer und Endgeräte, verwaltet Verbindungen und leitet Datenverkehr weiter. Außerdem steuert es den Netzzugang und die Mobilität, also etwa die Verbindung beim Wechsel zwischen Funkzellen. Das Kernnetz verwaltet zudem Datensitzungen, also die Einrichtung und Steuerung mobiler Datenverbindungen. Der Nutzdatenverkehr wird über Kernnetzfunktionen weitergeleitet, die Datenpakete routen, weiterleiten und prüfen. Weitere Funktionen betreffen Roaming, Network Slicing und Teilnehmerdaten. Insgesamt bündelt das Kernnetz damit zentrale Steuerungs-, Sicherheits- und Weiterleitungsfunktionen des Mobilfunknetzes.[7]

Die wesentlichen Stromverbraucher des Mobilfunkkernnetzes sind Server, auf denen Kernnetzfunktionen wie Authentifizierung, Mobilitätsmanagement, Sitzungsmanagement und Datenweiterleitung laufen. Weitere stromverbrauchende Elemente des Transport- und Kernnetzes sind vor allem Komponenten der Vermittlungstechnik, der optischen Transporttechnik sowie der Netzsteuerungs- und Verwaltungstechnik. Dazu zählen Netzwerkverteiler, Router und Übergangsknoten, außerdem optische Netzabschlüsse, Leitungsabschlüsse und Bündelungstechnik. Ergänzend werden Datenspeicher als Komponenten der Netzsteuerungs- und Verwaltungstechnik genannt. Der Strombedarf entsteht damit nicht nur bei der Weiterleitung des Datenverkehrs, sondern auch bei dessen Bündelung, optischem Transport sowie bei Steuerungs- und

6 ETSI (2025), S.75.
7 Giambartolomei et al. (2024) S. 702ff.

Verwaltungsfunktionen des Netzes. Zusätzlich sind Kühlung und Klimatisierung relevant.[8]

Die Ausfallwahrscheinlichkeit des Kernnetzes durch Probleme in der Stromversorgung gilt grundsätzlich als gering. Voraussetzung dafür ist eine redundante Auslegung der Rechenzentren, etwa durch mehrere Stromquellen, Notstromaggregate und geografisch verteilte Standorte. Fällt ein lokales Stromnetz aus, kann der Betrieb über alternative Einspeisungen oder Notstromgeneratoren für eine begrenzte Zeit fortgesetzt werden. Durch Rechenzentren in verschiedenen Regionen sinkt zudem das Risiko, dass ein einzelnes regionales Ereignis das gesamte Kernnetz außer Betrieb setzt.[9]

2.1.2 Backhaul

Das Backhaul-Netz verbindet die Basisstationen beziehungsweise das Funkzugangsnetz mit den übergeordneten Netzelementen und dem Kernnetz des Mobilfunknetzbetreibers.[10] Es ermöglicht dadurch die Übertragung von Informationen zwischen den räumlich getrennten Netzelementen.[11] Für diese Verbindungen werden insbesondere Glasfaserleitungen und drahtlose Festverbindungen eingesetzt, wobei drahtlose Lösungen vor allem dort genutzt werden können, wo Glasfaser technisch oder wirtschaftlich nicht verfügbar ist.[12]

Aggregations- und Backhaul-Netze unterscheiden sich in mehreren Punkten sowohl vom Kernnetz als auch vom Funkzugangsnetz. Im Vergleich zum Kernnetz umfassen sie deutlich mehr Standorte und erstrecken sich über ein wesentlich größeres geografisches Gebiet. Typischerweise ist die Zahl der Standorte dort etwa 100- bis 1.000-mal höher als im Kernnetz. Aufgrund dieser größeren räumlichen Ausdehnung und Standortzahl kann die physische Redundanz der Verbindungen geringer ausfallen als im Kernnetz.[13]

2.1.3 Radio Access Network (RAN)

Das RAN bildet den funkbasierten Zugangsbereich eines Mobilfunknetzes und stellt die Funkverbindung zu mobilen Endgeräten wie Smartphones, Tablets oder Internet-der-Dinge-Anschlüsse her. Es umfasst insbesondere Basisstationen mit Funktechnik zum Senden und Empfangen von Signalen sowie Verarbeitungseinheiten für Funkmanagement und Ressourcensteuerung.[14] Damit prägt das RAN wesentlich die

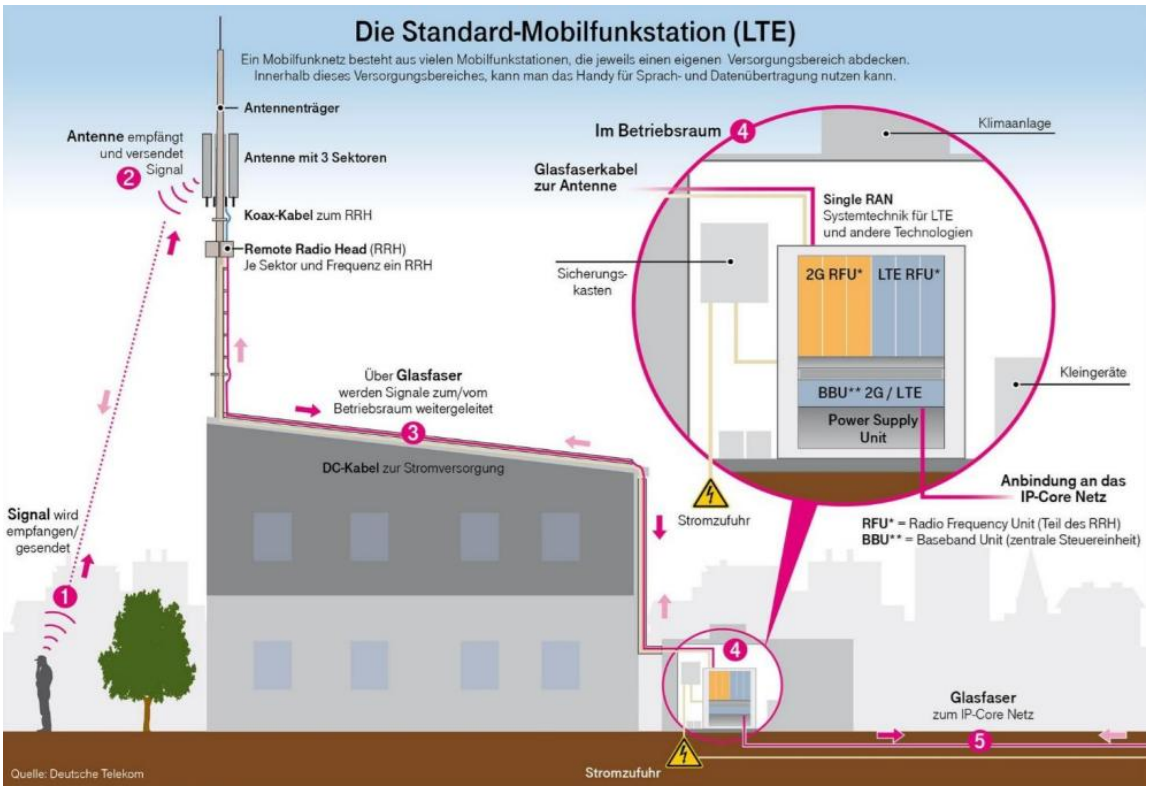
---

8 UBA (2023), S. 61 ff., S. 114 ff.
9 BSI (2025), S. 27.
10 ETSI (2018), S. 11 u. 13.
11 ITU-R (2016), S. 4.
12 ITU-R (2016), S. 1.
13 Ofcom (2026), S. 19.
14 Wani et al. (2025), S. 15.

praktische Leistungsfähigkeit eines Mobilfunknetzes, etwa bei Abdeckung, Kapazität, Durchsatz und Latenz.[15]

Ein Antennenstandort im RAN besteht aus verschiedenen Elementen, wie in Abbildung 2-2 zu erkennen ist.

Abbildung 2-2: Wesentliche Elemente einer Mobilfunksendeanlage



Quelle:https://www.bundestag.de/resource/blob/908164/8124058f9c68d93c9e7292baf133537b/Stellungnahme-Thomas-Tschersich-Deutsche-Telekom-data.pdf, zuletzt abgerufen am 27.04.2026.

Im Zusammenhang mit einem Stromausfall ist wesentlich, welche Komponenten aktive Stromverbraucher sind.[16] Zu diesen zählen vor allem die Funkeinheiten, die Base Band Unit (BBU) sowie die technische Standortausrüstung. Die Funkeinheit, etwa Radio Unit oder Remote Radio Head (RRH), benötigt Strom für das Senden, Empfangen, Verstärken und Umwandeln von Funksignalen.[17] Besonders die Leistungsverstärker verursachen einen wesentlichen Teil des Energieverbrauchs der Funktechnik.[18] Die BBU ist ebenfalls ein stromverbrauchender Bestandteil der Mobilfunksendeanlage; in aktuellen Modellen zum Energieverbrauch von 5G-Basisstationen wird die BBU neben der Antenneneinheit

15 Chernogorov und Inca (2021), S. 5.
16 Zu Varianten der im Folgenden beschriebenen Architektur, insbesondere im OPEN-RAN, siehe z. B. Wissner et al. (2021),
17 Piovesan et al. (2022), S. 58.
18 Larsen et al. (2020), S. 21.

ausdrücklich als wesentliche Verbrauchskomponente berücksichtigt.[19] Daneben benötigen weitere Standortkomponenten elektrische Energie. Dazu zählen insbesondere Kühl- und Klimasysteme, Überwachungs- und Sicherheitstechnik sowie Backhaul-Komponenten für die Anbindung der Basisstation an das übrige Netz.[20]

2.2 Mobilfunkstandorte in Deutschland

Vor dem Hintergrund der in Abbildung 2.1 illustrierten Netzkomponenten im RAN sind für diese Analyse vor allem Daten über Mobilfunkstandorte von Interesse (und öffentlich verfügbar).

In Deutschland gab es nach der Standortstatistik der Bundesnetzagentur zum 1. Januar 2025 insgesamt 73.095 standortbescheinigungspflichtige Funkanlagenstandorte. Die Zahl ist nicht identisch mit der Zahl einzelner Antennen oder Funkzellen, weil mehrere Anlagen an einem Standort gemeinsam betrieben werden können.[21]

In Deutschland betreiben die drei etablierten Mobilfunknetzbetreiber Deutsche Telekom, Telefónica und Vodafone jeweils mehr als 27.000 Sendeanlagen. Die nachfolgende Tabelle 2-1 gibt einen Überblick.

Tabelle 2-1: Anzahl der Mobilfunkstandorte der Netzbetreiber in Deutschland

Betreiber	Anzahl Standorte
Deutsche Telekom[22]	36.450
Vodafone[22]	mehr als 27.000
O2 Telefónica[22]	29.000
1&1[23]	mehr als 2.000

Mobilfunknetze werden je nach räumlichen und nachfrageseitigen Bedingungen unterschiedlich dimensioniert. In dicht bebauten Städten sind die Funkzellen meist kleiner und die Standorte enger gesetzt, während in dünn besiedelten ländlichen Räumen größere Versorgungsbereiche pro Standort (teilweise größer als 20 qkm) möglich sind. Die Fläche, die eine Funkzelle versorgt, hängt maßgeblich vom am Standort genutzten

19 ITU (2022), S. 3.
20 ETSI (2018), S. 13.
21 https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/Telekommunikation/Technik/EMF/Standortbescheinigung/_functions/statistiken_table.html, zuletzt abgerufen am 28.04.2026.
22 https://www.inside-digital.de/news/neue-zahlen-decken-auf-so-lief-der-netzausbau-von-telekom-vodafone-o2-wirklich?utm_source=chatgpt.com, zuletzt abgerufen am 29.04.2026.
23 https://www.inside-digital.de/news/1und1-kein-verkauf-aber-nachstes-netz-ziel-ist-gesetzt#:~:text=1%261%20hat%20nach%20Angaben%20von,über%20der%20Vorgabe%20der%20Bundesnetzagentur, zuletzt abgerufen am 29.04.2026.

Frequenzbereich ab und ist daher keine feste technische Größe. Wie viele Funkzellen beziehungsweise Basisstationen mindestens zur Versorgung von Haushalten und Verkehrswegen benötigt werden, richtet sich vor allem nach der Siedlungsdichte, dem Verkehrsaufkommen und der Zahl der gleichzeitig aktiven Nutzer sowie dem Qualitätsversprechen (Übertragungsgeschwindigkeiten im Up- und Downlink) des jeweiligen Mobilfunknetzbetreibers. Gerade in urbanen Gebieten erfordert die hohe Nachfrage nach mobiler Datenübertragung ein dichteres Netz mit einem größeren Umfang an eingesetzten Frequenzen, damit sowohl die Flächen- (Indoor-) als auch eine ausreichende Kapazitätsversorgung sichergestellt werden können.[24] Die Versorgung durch die Funkzellen erfolgt dabei nicht redundant, d. h. bei einer Auswahl einzelner Funkzellen können benachbarte Funkzellen nicht oder nur deutlich eingeschränkt die wegfallende Versorgung kompensieren.

Abschließend ist noch zu erwähnen, dass in besiedelten Flächen die Versorgung maßgeblich über Dachstandorte erfolgt.

3 Stromausfall und Maßnahmen der Mobilfunknetzbetreiber

In diesem Abschnitt werden Maßnahmen der Mobilfunknetzbetreiber für das Szenario eines Stromausfalls betrachtet. Ebenso wird auf die Vorfälle in Berlin und in Spanien eingegangen.

3.1 Grundsätzliche Maßnahmen

Um Telekommunikationsdienste in öffentlichen Mobilfunknetzen auch bei einem Stromausfall nutzen zu können, bestehen grundsätzlich folgende Optionen:

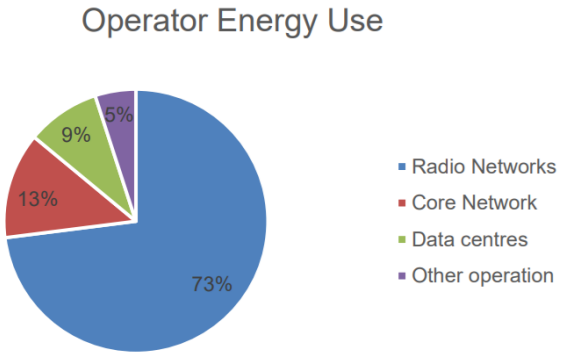
- Notstromversorgung über batteriegestützte unterbrechungsfreie Stromversorgung (USV) an den Sendestandorten,
- Netzersatzanlagen (NEA) auf Basis von Brennstoffzellentechnologie oder Dieselgeneratoren,
- Aufbau von mobilen Antennenanlagen und Richtfunkanbindungen dieser mobilen Einheiten.

Die Analyse des Stromverbrauchs eines Mobilfunknetzes zeigt, wo und in welchem Umfang Maßnahmen zum Aufbau einer Notstromversorgung bestünden. Wenig überraschend müssten eine USV oder NEA maßgeblich im Zugangsnetz, d. h. an jedem Standort sowie an den Netzkoppelpunkten im Backhaul- und Transportnetz errichtet werden. Abbildung 3-1 zeigt, dass 73 % des Stromverbrauchs im RAN anfällt.

---

24 https://www.informationszentrum-mobilfunk.de/2025/05/23/wie-ist-eine-mobilfunksendeanlage-aufgebaut/, zuletzt abgerufen am 27.04.2026.

Abbildung 3-1: Stromverbrauch eines Mobilfunknetzes



Quelle: NGMN (2021), S.14.

Die bisher geringen Ausfallzeiten der Stromnetze in Deutschland[25] haben die Mobilfunknetzbetreiber veranlasst, dass nur an zentralen Netzkomponenten und ausgewählten Stellen im RAN und im Kernnetz eine USV implementiert wurde bzw. Dieselgeneratoren eine längere Ausfallzeit im jeweiligen Stromnetz kompensieren können.

Ein wesentlicher Grund für die begrenzte Notstromversorgung sind die hohen Kosten sowie die baulichen Einschränkungen vieler Mobilfunkstandorte. In der Vergangenheit standen vor allem lokal begrenzte Störungen bei der Stromversorgung im Vordergrund, während heute zunehmend auch das Risiko großflächiger Stromausfälle berücksichtigt werden muss. Problematisch ist zudem, dass an manchen Standorten nicht nur Batteriespeicher fehlen, sondern auch geeignete externe Stromanschlüsse, über die mobile Netzersatzanlagen angeschlossen werden könnten. Aggregationsstandorte haben darüber hinaus einen deutlich höheren Leistungsbedarf und benötigen entsprechend leistungsfähige Notstromaggregate, was bei der Planung zusätzlich berücksichtigt werden muss.

Sofern Batterien an Netzknoten in der Fläche eingesetzt werden, können diese nur wenige Stunden (z. B. 3 Stunden) eines Stromausfalls kompensieren. Bei den in der Fläche verteilten Standorten für Mobilfunksendeanlagen ist in der Regel keine USV vorhanden, weil neben wirtschaftlichen Erwägungen des Aufbaus und Betriebs solcher Komponenten vor allem bei Dachstandorten kaum Flächen vorhanden sind, um eine entsprechende Notstromversorgung vorzuhalten. Die Knappheit an Flächen bei

25 Deutschland hat bisher eine außerordentlich hohe Versorgungszuverlässigkeit erreicht. Die durchschnittliche Dauer einer Versorgungsunterbrechung für Verbraucher (Nieder- und Mittelspannungsebene) liegt bei 11,7 Minuten im Jahr (2024) wobei die Stromausfälle weit überwiegend kleinräumig durch netzseitige Störungen ausgelöst werden.(vgl. https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/Versorgungssicherheit/Versorgungsunterbrechungen/Auswertung_Strom/start.html, zuletzt abgerufen am 29.04.2026.

Dachstandorten ist neben dem Investitionsaufwand von mehreren Milliarden Euro (siehe unten) auch der limitierende Faktor, sofern eine Nachrüstung mit USV beabsichtigt ist.

Je größer die Fläche ist, die von einem Stromausfall betroffen ist (Stadtteile, Städte, Landkreise, Bundesländer, etc.), desto mehr Netzkomponenten im Funkzugangsnetz und im Transportnetz der jeweiligen Mobilfunknetze fallen sofort oder nach wenigen Minuten bzw. Stunden aus.

Bei einem unkontrollierten Stromausfall können zudem einzelne Netzkomponenten in einen fehlerhaften Zustand geraten, sodass auch die anschließende Wiederinbetriebnahme nicht immer störungsfrei verläuft. Nach der Wiederherstellung der Stromversorgung müssen sich die beteiligten Systeme zunächst synchronisieren und erneut im Netz registrieren. Anschließend werden die Transport- und Signalisierungsebenen schrittweise wieder aufgebaut und die erforderlichen Netzrouten neu etabliert. Erst danach können sich die Endgeräte erneut im Mobilfunknetz anmelden. Der vollständige Dienst, insbesondere die IP-Verbindung des Kunden, steht daher erst nach Abschluss dieser Wiederanlaufprozesse wieder zur Verfügung.

Vor dem Hintergrund der Komplexität eines Mobilfunknetzes und der Anzahl von aktiven Komponenten unterschiedlichster Hersteller und Schnittstellen würde es bei einem Blackout im gesamten Bundesgebiet voraussichtlich Tage dauern, bis die öffentlichen Mobilfunknetze wieder vollumfänglich nutzbar wären.

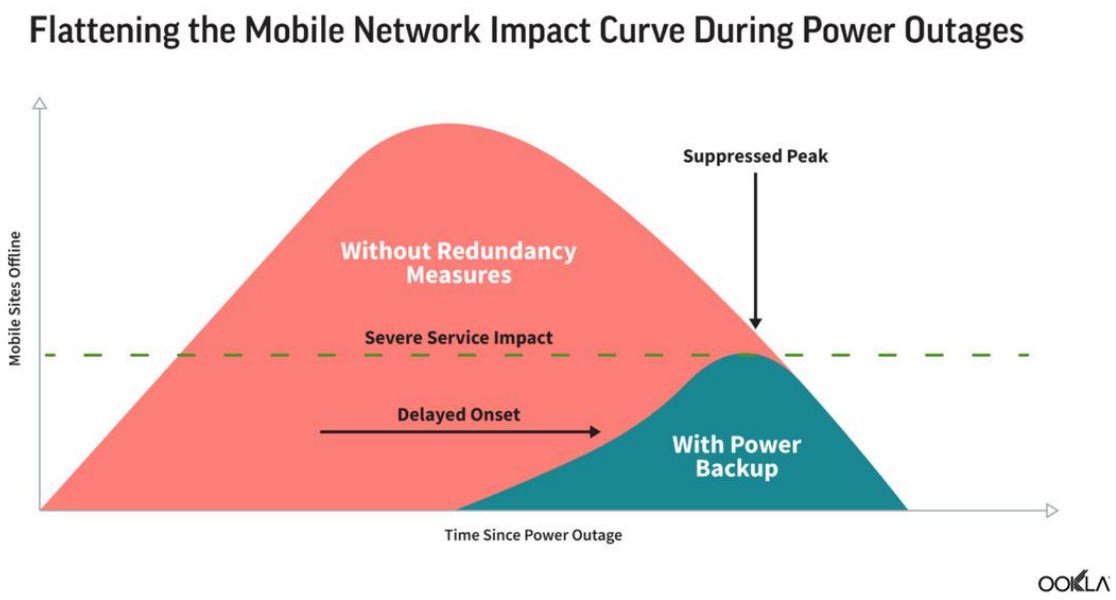
3.2 Stromausfall in Spanien

Am 28. April 2025 kam es in Spanien zu einem flächendeckenden Stromausfall. Für Spanien gibt es eine Auswertung, die indiziert, wie sich öffentliche Mobilfunknetze nach einem Stromausfall verhalten.[26]

Der zeitliche Verlauf und die Verteilung der Ausfälle in den spanischen Mobilfunknetzen folgten dabei weitgehend dem Ausfall der Stromnetze. Innerhalb von 30 Minuten nach dem Stromausfall stieg der Anteil der Nutzer ohne Empfang sprunghaft an, da Small Cells und Standorte mit keiner oder minimaler Notstromversorgung offline gingen.

26 Siehe dazu https://www.ookla.com/articles/network-resilience-iberian-blackout, zuletzt abgerufen am 22.05.2026.

Abbildung 3-2: Ausfall von Basisstationen in Spanien



Quelle: https://www.ookla.com/articles/network-resilience-iberian-blackout, zuletzt abgerufen am 26.05.2026.

Die obige Abbildung zeigt, dass ein Großteil der Basisstationen unmittelbar nach dem Stromausfall nicht mehr verfügbar war. Ein kleinerer Teil der Basisstationen verfügte über Batterien, so dass eine Grundversorgung über diese Standorte beibehalten werden konnte. Eine Grundversorgung deshalb, weil in einem solchen Fall nur noch wenige Frequenzen am Standort eingesetzt werden. In der Spitze waren nach dieser Auswertung mehr als 50 Prozent der Mobilfunknutzer vom Netz getrennt.[27]

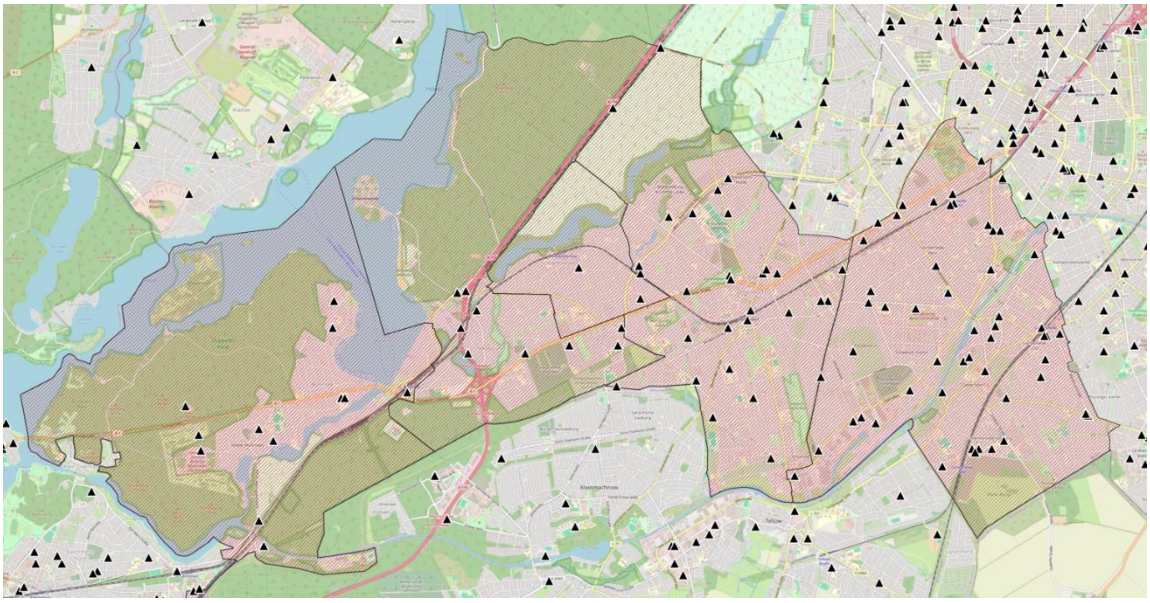
Die Auswertung zeigt des Weiteren, dass nach Wiederherstellung der Stromversorgung es bei der Wiederherstellung der Mobilfunkversorgung unter den Netzbetreibern Unterschiede von bis zu eineinhalb Tagen (vom schnellsten bis zum langsamsten) gab.

3.3 Stromausfall in Berlin

Vom Stromausfall in Berlin waren ca. 100 Mobilfunkstandorte betroffen (vgl. Abbildung 3-3).

27 https://www.ookla.com/articles/network-resilience-iberian-blackout, zuletzt abgerufen am 22.05.2026.

Abbildung 3-3: Mobilfunkstandorte im Gebiet des Stromausfalls



Quelle: EMF-Datenbank Bundesnetzagentur

Nach dem Stromausfall wurden durch mobile NEA bei ungefähr zwei Dritteln der 100 Mobilfunkmasten eine Grundversorgung ermöglicht. Dies geschah innerhalb von 24 Stunden. Grundversorgung bedeutet, dass nur Frequenzen bei 800 MHz wieder aktiv geschaltet wurden. Kapazitätsfrequenzen oberhalb von 1 GHz, die typischerweise in Städten wie Berlin nahezu flächendeckend im Einsatz sind, waren nicht Teil der Grundversorgung. Somit standen allen Nutzern in den wieder versorgten Gebieten nur eingeschränkte Übertragungskapazitäten zur Verfügung. Das Aufschalten von nur 800-MHz-Frequenzen diente dazu, den Stromverbrauch den Kapazitäten der NEA anzupassen. Je geringer der Umfang an sendenden Frequenzen ist, desto geringer ist die Leistungsaufnahme und damit der Stromverbrauch.

Mobile Antennenanlagen wurden nicht eingesetzt. Bei diesen Anlagen ist zu berücksichtigen, dass für deren Einsatz erst entsprechende Genehmigungen eingeholt werden müssen. Zudem muss der vorgesehene Standort ausreichend Platz bieten, ohne Flucht- oder Rettungswege zu beeinträchtigen. Auch der Zugang zum Standort und eine geeignete externe Einspeisemöglichkeit müssen gewährleistet sein.

Eine weitere Maßnahme der Mobilfunknetzbetreiber bestand darin, die Funkausbreitung an Anlagen, die an die betroffenen Bezirke angrenzen und nicht vom Stromausfall betroffen waren, dahingehend zu verändern, dass die durch den Stromausfall betroffenen Flächen teilweise mitversorgt werden konnten. An einzelnen Standorten, die innerhalb von 24 Stunden wieder eingeschränkt in Betrieb gingen, wurde der Neigungswinkel der Antennen so verändert, dass eine größere Fläche ausgeleuchtet werden konnte.

4 Lessons learned

4.1 Für die öffentlichen Mobilfunknetze

Die Resilienz der öffentlichen Mobilfunknetze hängt maßgeblich von einer zuverlässigen Energieversorgung ab, da ein Ausfall der Energieversorgung die größte Bedrohung für die Netze darstellt.[28] Die Mobilfunknetze sind grundsätzlich nicht dafür ausgelegt, einen (mehrstündigen) Ausfall der Stromversorgung auf allen Netzebenen zu kompensieren. Dies gilt insbesondere für das Funkzugangsnetz. Nach einem Stromausfall fallen bereits ein Großteil der Mobilfunksendeanlagen in wenigen Minuten weg.

Der Stromausfall in Berlin zeigt, dass die Mobilfunknetzbetreiber dafür gerüstet sind, innerhalb von 24 Stunden mit Netzersatzanlagen eine punktuelle und lokale Grundversorgung wieder herzustellen. Die Wirksamkeit dieser Maßnahme aus Sicht der Endkunden hängt dabei maßgeblich von der Fläche, die vom Stromausfall betroffen ist, ab. Je größer das Gebiet ist, dass vom Stromausfall betroffen ist, desto kleiner wird die Grundversorgung ausfallen müssen, da nicht für sämtliche Mobilfunkstandorte solche Netzersatzanlagen vorgehalten werden bzw. aus wirtschaftlichen Erwägungen vorgehalten werden.

Der Fall Berlin zeigt darüber hinaus auch operative Hemmnisse im Krisenfall. So kann eine NEA nur dann zum Einsatz kommen, wenn der Zugang zu den Mobilfunkstandorten auch im Falle einer Störung besteht. Elektrisch bedienbare Zugänge zu Gebäuden oder Grundstücken können beispielsweise beim Stromausfall nicht zu überwindende Hürden für die Mobilfunknetzbetreiber beim Aufstellen von NEA darstellen. Ferner müssen bei einer Aufstellung von NEA auf öffentlichem Raum auch etwaige Sicherheitsmaßnahmen hinsichtlich Diebstahl o.a. berücksichtigt werden. Auch musste der Kraftstoffnachschub durch das THW sichergestellt werden.[29]

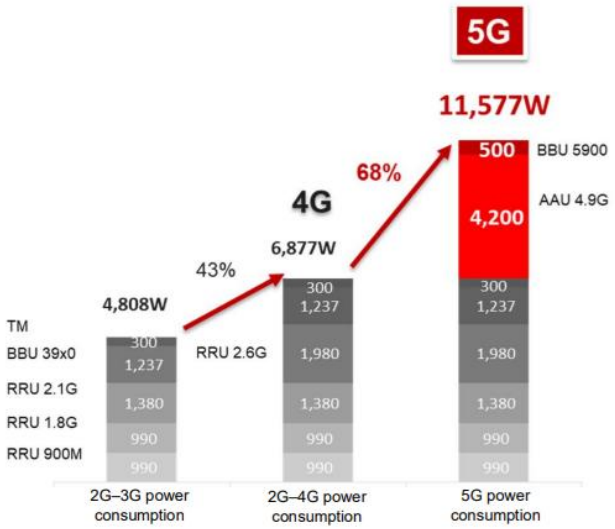
Wie bereits oben ausgeführt, sind nachträgliche Ausrüstungen von Bestandsstandorten mit einer USV durch die verfügbaren Flächen an Dachstandorten nicht möglich bzw. deutlich begrenzt.[30]

Eine Batteriepufferung an sämtlichen Standorten wäre außerdem mit erheblichen Kosten im Milliardenbereich verbunden. Wie Abbildung 4-1 zeigt, ist der (maximale) Leistungsbedarf für 5G-Standorte zunächst höher als bei früheren Mobilfunkgenerationen.

---

28 Bundesnetzagentur (2022): Resilienz der Telekommunikationsnetze. Strategiepapier.
29 https://www.thw.de/SharedDocs/Meldungen/DE/Einsaetze/Inland/2026/01/berlin_stromausfall.html, zuletzt abgerufen am 03.07.2026.
30 So Ausführungen der Mobilfunknetzbetreiber im Nachgang zum Stromausfall.

Abbildung 4-1: Maximale Leistungsaufnahme eines Mobilfunkstandorts



Quelle: HUAWEI (2019), S. 4.

In Tabelle 4-1 werden die Kosten einer Batteriepufferung der Mobilfunknetze für Deutschland abgeschätzt.

Tabelle 4-1: Jährliche Kosten der Pufferung von drei Funkzugangsnetzen bei einer Einsatzdauer der Batterien von 15 Jahren und einem WACC von 5 %

Standortlast	8 h Pufferung	24 h Pufferung	72 h Pufferung
5 kW	0,31 Mrd. €/a	0,93 Mrd. €/a	2,79 Mrd. €/a
10 kW	0,62 Mrd. €/a	1,86 Mrd. €/a	5,58 Mrd. €/a
20 kW	1,24 Mrd. €/a	3,72 Mrd. €/a	11,15 Mrd. €/a

Quelle: Eigene Berechnungen

Die Tabelle zeigt die jährlichen Gesamtkosten für Deutschland im mittleren Kostenszenario von 1.000 €/kWh für eine Batteriepufferung.[31] Im niedrigen Kostenszenario von 500 €/kWh würden die dargestellten Werte jeweils etwa halb so hoch ausfallen, während sie im hohen Kostenszenario von 1.500 €/kWh um rund 50 % über den Tabellenwerten liegen.

31 Die Kosten für Batteriespeicher entstammen dem Markt für Haushaltskunden, siehe z. B. https://eupd-group.com/european-residential-battery-storage-market-strong-momentum-continues-in-2025-eupd-research-highlights-strategic-growth-opportunities/?utm_source=chatgpt.com oder https://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien/presseinformationen/2024/photovoltaik-mit-batteriespeicher-guenstiger-als-konventionelle-kraftwerke.html (beide zuletzt abgerufen am 03.07.2026). Für Mobilfunkstandorte sollten hochwertige Batterien verwendet werden. Da die Kosten der Speicherung pro kWh in den vergangenen Jahren grundsätzlich gesunken sind, geben wir eine entsprechende Bandbreite an.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Investitionen und laufenden Betriebskosten maßgeblich von der Dauer der Pufferung und des Umfangs an Frequenzen, die beim Stromausfall genutzt werden sollen, abhängen. Sowohl eine höhere Standortlast als auch eine längere Pufferdauer erhöhen die Kosten. Besonders der Übergang von einer Kurzzeitpufferung zu einer 72-Stunden-Absicherung führt zu einem erheblichen Kostensprung. Damit wird deutlich, dass eine flächendeckende Batterieabsicherung aller Mobilfunkstandorte, insbesondere für lange Pufferdauern, mit sehr hohen jährlichen Kosten verbunden wäre. Zu diesen Kosten kämen noch Aufwände für ggf. neue Flächen an Dach- und Maststandorten, auf denen die Batterien aufgestellt und gewartet werden können. Fraglich ist hier, ob die bestehenden Mietverträge bereits Regelungen für solche Flächen beinhalten, oder ob bestehende Mietverträge erweitert werden müssten. Jedenfalls entstehen hier zusätzliche Transaktionskosten.

Eine Kostenreduktion könnte dahingehend stattfinden, dass nicht alle Standorte der Mobilfunknetzbetreiber ertüchtigt werden, sondern nur jeweils ein Mobilfunknetzbetreiber in einer definierten Fläche seine Netzinfrastruktur härtet, und beim Stromausfall den Kunden der anderen Mobilfunknetzbetreiber ein National Roaming gewährt. In einem solchen Szenario wäre zu prüfen, welche Übertragungskapazitäten dieser Mobilfunknetzbetreiber im Krisenfall bereitstellen soll. Je mehr Dienste unterstützt werden sollen, desto mehr Frequenzen müssten vor allem in Ballungsgebieten eingesetzt werden, womit die Kosten der Pufferung anstiegen. In diesem Szenario müssten dann auch die technischen und wirtschaftlichen Voraussetzungen für ein ad-hoc National Roaming gegeben sein.

Abschließend stellt sich die Frage, wie schnell die Mobilfunkdienste nach Spannungswiederkehr verfügbar sind. Das Beispiel in Spanien zeigt, dass bis zu eineinhalb Tagen vergehen können, bis ein Mobilfunknetz wieder vollständig im Betrieb ist. Je länger der Stromausfall dauert, desto weniger bzw. gar nicht stehen aktive Komponenten selbst mit einer Notstromversorgung mittels Batterien zur Verfügung.

4.2 Für kritische Anwendungen wie in der Energiewirtschaft

Der Stromausfall in Berlin zeigt, welche Bedeutung verfügbare Telekommunikationsdienste bei der Versorgungswiederherstellung mit Strom heute und künftig haben werden. In Berlin wurden die Telekommunikationsdienste des vom Netzbetreiber selbst betriebenen TETRA-Netzes genutzt.

Nicht nur während des Stromausfalls benötigte der Verteilnetzbetreiber in Berlin Sprach- und Datendienste (z. B. für Reparaturmaßnahmen im Feld), sondern auch unmittelbar danach. Hierbei steuerte der Netzbetreiber vergleichsweise nur wenige Anlagen (Ortsnetzstationen) und griff dabei auf seine eigene Telekommunikationsinfrastruktur zurück.

Auch wenn es heute noch ausreichend ist, wenige Betriebsmittel im Stromnetz beim Netzwiederaufbau zu steuern, wird sich dies mit der steigenden Nutzung von flexiblen Lasten verändern.

Um künftig ein koordiniertes Wiederhochfahren des Stromnetzes sicherzustellen, wird es nicht mehr ausreichen, nur die Abgänge von Ortsnetzstationen zu steuern. Vielmehr zeigt der Vorfall in Berlin, dass zunehmend (flexible) Lasten in den Fokus rücken. So bat der Netzbetreiber die Haushalte im betroffenen Gebiet, größere Lasten nach Spannungswiederkehr nicht unmittelbar einzuschalten. Dies geschah über Cell Broadcasting, wobei die nicht von der Grundversorgung erfassten Haushalte davon keine unmittelbare Kenntnis erlangen konnten. Da künftig die Anzahl von flexiblen Lasten wie Wärmepumpen oder E-Autos in den Niederspannungsnetzen weiter ansteigen wird, sind beim Versuch der Versorgungswiederherstellung mit Nachholeffekten (Cold Load Pickup) oder je nach Wetterlage mit hohen Einspeisungen aus PV-Anlagen bei niedriger Last zu rechnen.[32] Solche Lasten und Einspeisungen sind kritisch und müssen beim sicheren und schnellen Versorgungswiederaufbau künftig berücksichtigt werden. In der Wiederaufbauphase nach einem Schwarzfall befindet sich das System regelmäßig in einem kritischen Systemzustand hinsichtlich aufkommender Netzengpässe und Einhaltung des Leistungsgleichgewichts, sodass die sich aus dem Schwarzfall ergebenden Anforderungen auch die Beherrschung weiterer systemkritischer Situationen, d. h. Netzengpässe und drohende Leistungsungleichgewichte abdecken.[33] Aus diesem Grund benötigen Verteilnetzbetreiber unmittelbar nach Spannungswiederkehr Datenverbindungen zu einer Vielzahl von in der Fläche vorhandenen Anlagen und flexiblen Lasten. Unmittelbar bedeutet hier, innerhalb von 15 Minuten nach Spannungswiederkehr am jeweiligen Netzanschlusspunkt.[34]

Folglich besteht vor allem in Krisenlagen mit einem Stromausfall eine wechselseitige Abhängigkeit beider Netzinfrastrukturen (vgl. Abbildung 4-2).

Abbildung 4-2: Gegenseitige Abhängigkeiten verschiedener Teilsektoren

32 Vgl. BET/WIK-C (2024).
33 BET/WIK-C (2024), S. 7.
34 BET/WIK-C (2024), S. 17.

Ausfall des Teilsektors → / Auswirkung auf Teilsektor ↓	Stromversorgung	Telekommunikation	Informationssysteme und -netze
Stromversorgung	–	2	1
Telekommunikation	3	–	3
Informationssysteme und -netze	3	2	–
Internet	3	3	3
Instrumentations-, Automations- und Überwachungssysteme	3	3	3
Rundfunk und Medien	3	2	3
auf alle 31 Teilsektoren	68	45	45

Bewertet wurden auf einer vierstufigen Skala von 0 (keine Auswirkungen) bis 3 (sehr große Auswirkungen) – unter der Annahme eines Totalausfalls während dreier Wochen in der ganzen Schweiz – die Dependenzen der 31 Teilsektoren voneinander.

Quelle: Petermann et al. (2011), S.78 auf Basis von BABS (2010), S. 10.

Dass solche Krisenlagen nicht mehr gänzlich unwahrscheinlich sind, zeigen die Beispiele in Spanien und Berlin. Darüber hinaus hat es jüngst Cyberangriffe auf die Stromversorgung in Polen gegeben.[35]

Wenn die Bundesnetzagentur in ihrem Strategiepapier „Resilienz der Telekommunikationsnetze“[36] deshalb feststellt, dass der Wegfall der Stromversorgung die größte Bedrohung für die Telekommunikationsnetze darstellt, so wird damit noch nicht erfasst, dass Telekommunikationsdienste wesentlich sind, um einen sicheren und schnellen Versorgungswiederaufbau der Stromversorgung zu gewährleisten. Mit der weiteren Zunahme kleinerer dezentraler Erzeugungsanlagen und Batteriespeichersysteme erhöht sich nicht nur die Komplexität der Koordination beim Netzwiederaufbau, sondern auch die Notwendigkeit einer schwarzfallfesten Anbindung dieser Anlagen.[37]

Der Rechtsrahmen für die Energiewirtschaft hat in Teilen bereits auf die (neuen) kritischen Lagen reagiert. Aus der EU-Verordnung 2017/2196 leitet sich eine Verpflichtung zur Vorhaltung schwarzfallfester Kommunikationsinfrastruktur von Übertragungs- und Verteilnetzbetreibern ab (Art. 41 Abs. 1 der Verordnung). Danach müssen bestimmte Netzbetreiber eine Schnittstelle zu einem Kommunikationsnetz mit

35 https://de.euronews.com/2026/01/14/russischer-cyberangriff-polen-blackout, zuletzt abgerufen am 29.04.2026.
36 Bundesnetzagentur (2022): Resilienz der Telekommunikationsnetze. Strategiepapier.
37 DNV (2026)

Schwarzfallfestigkeit besitzen. Zudem sollen Netzbetreiber über eine schwarzfallfeste Sprachkommunikation verfügen.[38]

Sofern es doch zu einem Ausfall der Stromversorgung kommt, sind die Übertragungs- und Verteilnetzbetreiber bestrebt, die Stromversorgung möglichst schnell wiederherzustellen (Resilienz nach einem Schwarzfall), damit die volkswirtschaftlichen Schäden sich in Grenzen halten. Hieraus resultieren die höchsten Anforderungen an die zur Unterstützung notwendigen Telekommunikationsdienste: Diese Dienste müssen auch im Schwarzfall verfügbar sein. Hier dienen die Telekommunikationsinfrastruktur bzw. die Telekommunikationsdienste nicht der Vermeidung eines System-zusammenbruchs, vielmehr wird die TK-Infrastruktur für das (schnelle) Wieder-hochfahren nach einem Zusammenbruch des Stromnetzes benötigt.[39]

Ein weiterer Aspekt betrifft die Kommunikationstechnologie als solche. Sowohl in Spanien als auch in Berlin wurde der Netzwiederaufbau über Kommunikationsnetze realisiert, die die jeweiligen Verteilnetzbetreiber kontrollieren und betreiben.

In Berlin wurde dabei u.a. das TETRA-Netz des Verteilnetzbetreibers eingesetzt. Hierbei handelt es sich um eine Technologie, die angesichts ihrer limitierten Übertragungs-kapazitäten den künftigen Anforderungen nicht standhalten kann.[40] Zudem zeichnet sich bei Anwendern von Bündelfunktechnologien wie TETRA (wie beispielsweise bei den Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben) eine Ablösung dieser Technologie und der Einsatz modernster Mobilfunktechnologien ab.

Im Übrigen sind Bündelfunknetze bei Energieversorgern heute nur punktuell verfügbar.

5 Fazit

Die Resilienz der öffentlichen Mobilfunknetze hängt maßgeblich von einer vorhandenen Stromversorgung ab. Beim Wegfall der Stromversorgung können sofort bzw. innerhalb weniger Stunden keine Mobilfunkdienste mehr angeboten werden. Die Funkzugangsnetze sind nicht so ausgebaut, dass sie bei einem Stromausfall in Gänze und über mehrere Stunden weiter funktionsfähig bleiben. Für eine solche Funktionsfähigkeit gab es in der Vergangenheit mit den sehr geringen Ausfallzeiten der Stromnetze keine Veranlassung.

Der Stromausfall in Berlin zeigt nachdrücklich, dass Verteilnetzbetreiber bei der Versorgungswiederherstellung auf Kundenanlagen, insbesondere größere flexible Lasten, einwirken müssen. Ohne die Steuerung und Kontrolle der Vielzahl flexibler

---

38 Heute wird diese Anforderungen in einem zentral strukturierten Stromsystem ohne den Einsatz von Funktechnologien realisiert. Künftig, in einem dezentralen Stromsystem, sind schwarzfallfeste Telekommunikationsdienste notwendig, die deutlich mehr „Endpunkte“ (EE-Anlagen, Messsysteme, Lasten) einbinden müssen.

39 Vgl. BET/WIK-C (2024).

40 Vgl. zu den Anforderungen WIK (2018).

Lasten und Erzeugungsanlagen wird es künftig nicht oder nur erschwert möglich sein, die Versorgung mit Strom schnell und sicher wiederherzustellen.

Öffentliche Mobilfunknetze sind nicht dafür ausgelegt, innerhalb weniger Minuten nach Spannungswiederkehr die Telekommunikationsdienste anzubieten, mit denen Verteilnetzbetreiber im Prozess der Versorgungswiederkehr gesichert arbeiten können. Sie verfügen weder über die hierfür erforderliche Architektur noch sind die wirtschaftlichen und zeitlichen Aufwände gering, eine bundesweite Ertüchtigung der notwendigen Netzinfrastrukturen zu realisieren. Je nach Dauer der Überbrückung und Qualität der während des Stromausfalls ermöglichten Dienste müssten Kosten in Milliardenhöhe getragen werden. Das ist kein Defizit der öffentlichen Mobilfunknetze, die für solche Anwendungen weder gebaut sind noch solch eine Nachfrage in der Vergangenheit bei ihrem Netzaufbau berücksichtigen mussten.

Vor diesem Hintergrund hat die Bundesnetzagentur im Jahr 2021 Frequenzen im Bereich 450 MHz vergeben, mit denen schwarzfallfeste Telekommunikationsdienste für kritische Anwendungen bereitgestellt werden können. Die Architektur des 450-MHz-Netzes stellt sicher, dass sämtliche aktiven Komponenten durchgängig über einen Zeitraum von 72 Stunden abgesichert sind. Das Kern- und Aggregationsnetz umfasst rund 50 georedundant miteinander verbundene Standorte. Auch die Funkstandorte sind redundant angebunden. Durch die überlappende Funkversorgung benachbarter Standorte kann insbesondere die Sprachkommunikation auch beim Ausfall einzelner Stationen aufrechterhalten werden. Damit ist das 450-MHz-Netz gezielt für den Betrieb in einem solchen Krisenszenario ausgelegt. Mit dem 450-MHz-Netz verfügt Deutschland nunmehr über die Netzinfrastruktur, mit der die bestehende Lücke bei der Resilienz öffentlicher Mobilfunknetze wirtschaftlich effizient kompensiert werden kann.

Literatur

BABS [Bundesamt für Bevölkerungsschutz] (2010): Schlussbericht Kritikalität der Teilsektoren, Programm Schutz Kritischer Infrastrukturen.

BET / WIK-C (2024): Schwarzfallfeste Kommunikationsanbindung nach § 34 MsbG für dezentrale Flexibilitäten, Studie im Auftrag des BMWK.

Broemme et al. (2026): Resilienz in Berlin: über die Funktionsfähigkeit der kritischen Infrastruktur, Bericht der Expertenkommission des Regierenden Bürgermeisters von Berlin.

BSI [Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik] (2025): 5G Risk Analysis, Detailed Analysis: 5G Core Network.

Bundesnetzagentur (2022): Resilienz der Telekommunikationsnetze. Strategiepapier.

Chernogorov, F., Inca, S. (Hrsg.)(2021): 5Gsmart, D1.5, Evaluation of radio network deployment options.

DNV (2026): Schwarzfallfeste Kommunikation für den Netzwiederaufbau.

ETSI [European Telecommunications Standards Institute] (2018): Environmental Engineering (EE); Energy Efficiency measurement methodology and metrics for RAN equipment, ETSI EN 303 472 V1.1.1 (2018-10).

ETSI [European Telecommunications Standards Institute] (2025): 5G; System architecture for the 5G System (5GS) (3GPP TS 23.501 version 18.10.0 Release 18).

Giambartolomei, F., Barcelo, M., Brighente, A., Urbieta, A., Conti, M. (2024): Penetration Testing of 5G Core Network Web Technologies, IEEE International Conference on Communications (ICC), PP: 702-707.

HUAWEI (2019): 5G Power Whitepaper.

ITU [International Telecommunication Union] (2022): Energy saving technologies and best practices for 5G radio access network (RAN) equipment, Recommendation ITU-T L.1390.

ITU-R [Radiocommunication Sector of ITU] (2016): Use of fixed service for transport of traffic, including backhaul, for IMT and other terrestrial mobile broadband systems, Report ITU-R F.2393-0.

Larsen, L.M.P., Berger, M.S., Christiansen, H.L. (2020): Energy-Aware Technology Comparisons for 5G Mobile Fronthaul Networks, in: International Journal On Advances in Networks and Services, 13(1&2), pp. 21 - 32.

NGMN [Next Generation Mobile Networks Alliance](2021): Green Future Networks, Network Energy Efficiency, v1.1.

Ofcom [Office of Communications] (2026): Network and Service Resilience Guidance for Communications Providers, Guidance for communications providers on resilience related security duties under the Communications Act 2003.

Petermann, T., Bradke, H., Lüllmann, A., Paetzsch, M., Riehm, U. (2011): Was bei einem Blackout geschieht: Folgen eines langandauernden und großflächigen Stromausfalls. Studien des Büros für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag - 33.

Piovesan, N., López-Pérez, D., De Domenico, A., Geng, X., Bao, H., Debbah, M. (2022): Machine Learning and Analytical Power Consumption Models for 5G Base Stations, in: IEEE Communications Magazine, vol. 60, no. 10, pp. 56-62.

Umweltbundesamt (UBA) (Hrsg.)(2023): Umweltbezogene Technikfolgenabschätzung Mobilfunk in Deutschland, Projekt UTAMO, von: Dr. Lutz Stobbe, Nikolai Richter, Maximilian Quaeck, Konstantin Knüfermann, Jan Druschke, Maximilian Fahland, Victor Werner Höller, Nico Wahry, Hannes Zedel, Michael Kaiser, Stefan Hoffmann, Michael Töpper, Dr. Nils F. Nissen.

Wani, M.S., Kretschmer, M., Schröder, B., Grebe, A., Rademacher, M. (2025): Open RAN: A Concise Overview, in: IEEE Open Journal of the Communications Society 6 (2025), pp. 13-28.

WIK (2018): Topthema 3: TK-Netzinfrastruktur und TK-Regulierung. Gutachten für das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.

Wissner, M., Elbanna, A., Sörries, B., Plückebaum, T. (2021): Open RAN und SDN/NFV: Perspektiven, Optionen, Restriktionen und Herausforderungen, WIK-Diskussionsbeitrag Nr. 478.