



**GIGABITBÜRO  
DES BUNDES**

Ein Kompetenzzentrum  
des Bundesministeriums für  
Digitales und Verkehr

Im Auftrag des



Bundesministerium  
für Digitales  
und Verkehr

# Richtfunk

Versorgungsvariante für Breitbandinternet – Technologie  
und Anwendungsbereiche





# Inhalt

Einführung .....	4
<b>A Technologie .....</b>	<b>5</b>
<b>1 Grundlagen der Funktechnik .....</b>	<b>5</b>
<b>2 Grundlagen der Systemarchitektur .....</b>	<b>6</b>
2.1. Punkt-zu-Punkt-Verbindung .....	6
2.2 Punkt-zu-Mehrpunkt-Verbindung .....	8
<b>3 Grundlagen der Systemtechnik .....</b>	<b>9</b>
3.1 Komponenten .....	9
3.2 Voraussetzungen für den Aufbau von Richtfunkverbindungen.....	10
3.3 Leistungsfähigkeit einer Richtfunkverbindung.....	10
<b>4 Rechtliche Grundlagen .....</b>	<b>10</b>
4.1 Frequenzbereiche mit Einzelzuteilung.....	10
4.2 Allgemein zugeteilte Frequenzbereiche .....	10
4.3 Verfügbares Frequenzspektrum .....	11
<b>5 Planung und Umsetzung .....</b>	<b>13</b>
5.1 Funkfeldplanung .....	13
5.2 Frequenzplanung .....	14
5.3 Zuteilungsverfahren .....	14
<b>B Anwendungsbereiche für Richtfunk.....</b>	<b>15</b>
<b>1 Anbindung von Mobilfunkstandorten .....</b>	<b>15</b>
<b>2 Anbindung von Unternehmen .....</b>	<b>15</b>
<b>3 Back-up und Redundanz für kritische Anwendungen .....</b>	<b>15</b>
<b>4 Internetversorgung für Veranstaltungen und Katastrophenhilfe.....</b>	<b>15</b>
<b>5 Anbindung von Privathaushalten .....</b>	<b>16</b>
<b>C Richtfunk für Privathaushalte .....</b>	<b>17</b>
<b>1 Betreiber/Anbieter von Richtfunkverbindungen bzw. -netzen .....</b>	<b>17</b>
<b>2 Implementierungsszenarien .....</b>	<b>18</b>
<b>D Fazit und Handlungsempfehlungen .....</b>	<b>20</b>
<b>E Glossar .....</b>	<b>21</b>

# Einführung

Die Bundesregierung hat sich das Ziel gesteckt, in Deutschland flächendeckend Zugang zu gigabitfähigen Anschlüssen zu ermöglichen. Die Umrüstung des Festnetzes und der Mobilfunknetze auf Glasfaser bzw. 5G hat inzwischen spürbar an Fahrt aufgenommen. Doch angesichts mehrerer hunderttausend Kilometer Tiefbau, die für einen flächendeckenden Ausbau erforderlich sind, werden nicht alle Gebiete gleichzeitig ausgebaut werden können. In Gegenden, die erst mittel- bzw. langfristig mit Glasfaser erschlossen werden, können alternative drahtlose Übertragungstechnologien eine adäquate Lösung sein. Neben Mobilfunk und Satelliteninternet gehört hierzu auch Richtfunk.

Beim Richtfunk handelt es sich um eine Technologie, bei der Funkwellen gezielt gerichtet zwischen Sender und Empfänger übertragen werden. Sie ermöglicht die stabile und zuverlässige drahtlose Übertragung von Daten über weite Entfernungen. Bis zu mehr als 100 Kilometer sind hier unter idealen Bedingungen mit aktueller Technik zu erreichen. Die Anwendungsmöglichkeiten reichen von kommerziellen Anbindungen mit langen Reichweiten für Geschäftskunden bis hin zu nicht-kommerziellen Anbindungen mit kürzeren Reichweiten für private Kunden. Für Privatkunden bieten sich vor allem kleine, kostengünstige Lösungen an.

Richtfunk wurde erstmals in den 1930er-Jahren genutzt und seitdem stetig weiterentwickelt. Mit Datenraten bis zu 20 Gbit/s ist Richtfunk eine sehr leistungsfähige Technologie. Deutschland verzeichnet bis heute eines der dichtesten Richtfunknetze weltweit. Damit ist dieses Übertragungsmedium fester Bestandteil der bundesweiten digitalen Infrastruktur und hat sich in verschiedenen Anwendungsfällen als eine praktikable Lösung erwiesen.

Die Technologie wird unter anderem für die Anbindung von Mobilfunkstandorten, von Unternehmen, zur Vernetzung von Standorten, als Back-up-Verbindung für kritische Anwendungen, und auch zur Breitbandversorgung privater Gebäude eingesetzt.

## Vorteile

1. Richtfunkanwendungen können, verglichen mit anderen physikalischen Medien, sehr schnell aufgebaut und genutzt werden.
2. Die eingesetzte Technik ist in einem hohen Maße wiederverwendbar (günstige Kosten bei Umstrukturierungen).

## Nachteile

1. Aufgrund von Bandbreitenbeschränkungen stehen zwar hohe, aber – im Vergleich zur Glasfaser – begrenzte Übertragungsraten zur Verfügung.
2. Die Wellenausbreitung ist von den Witterungsbedingungen abhängig.

Diese Publikation dient als Orientierungshilfe zum Thema Richtfunk. Sie gibt Einblick in wesentliche technische und rechtliche Aspekte sowie in die Nutzungsmöglichkeiten. Der Fokus liegt dabei auf dem Privatkundenbereich, für den verschiedene Anwendungsszenarien näher beleuchtet werden.

# A Technologie

## 1 Grundlagen der Funktechnik

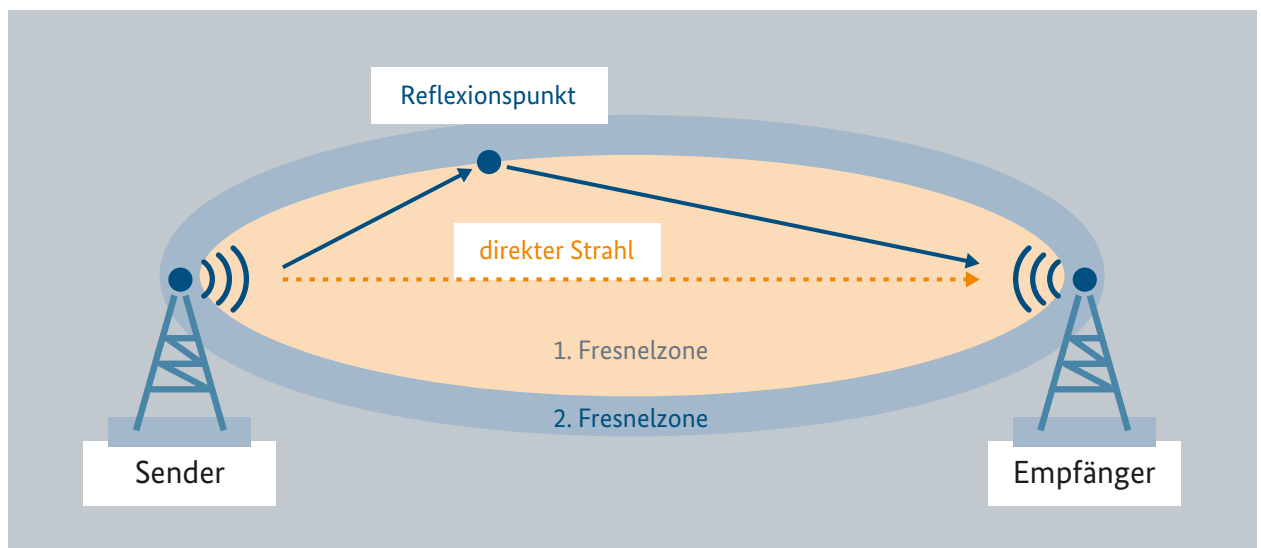
Unter Richtfunk versteht man die drahtlose Fernübertragung von Signalen zwischen Sender und Empfänger. Durch die gerichtete Ausstrahlung der elektromagnetischen Wellen zwischen Sender und Empfänger können auch schon bei geringer Sendeleistung große Entfernungen überbrückt werden. Voraussetzung für eine direkte Richtfunkstrecke ist dabei, dass zwischen Sender und Empfänger Sichtkontakt besteht.

Um eine störungsfreie Verbindung zu gewährleisten, muss sichergestellt werden, dass die erste Fresnelzone weitgehend frei von Reflexionspunkten ist. Die Fresnelzone, benannt nach dem französischen Physiker Augustin-Jean Fresnel (1788–1827), ist ein dreidimensionaler ellipsenförmiger Bereich (Rotationsellipsoid) zwischen Sender und Empfänger. Im Bereich dieser Fresnelzone wird die Hauptenergie einer Richtfunkverbindung (direkter Strahl) übertragen.

Gibt es Reflexionspunkte in diesem Bereich, wird das Signal möglicherweise maßgeblich beeinträchtigt. Befinden sich Hindernisse in der ersten Fresnelzone, kann dadurch das Funksignal gestört und die maximale Reichweite verringert werden. Die Fehlerrate der Datenübertragung steigt dabei. Die Leistungsfähigkeit der Übertragungsqualität kann dadurch negativ beeinflusst werden – mit möglichen Übertragungsabbrüchen als Folge. Der Radius der Fresnelzone ist abhängig von der Reichweite der Verbindung und der Sendefrequenz. Je höher die Sendefrequenz, desto kleiner ist die Ausdehnung der Fresnelzone. Die zweite Fresnelzone hat in der Praxis eine untergeordnete Bedeutung und kann hier vernachlässigt werden.

In der Praxis werden Richtfunkstrecken so geplant, dass nicht mehr als das untere Drittel der Fresnelzone beeinträchtigt wird.

Abbildung 1 Darstellung der Fresnelzonen



## 2 Grundlagen der Systemarchitektur

Bei der Verbindung durch Richtfunk wird zwischen einer Punkt-zu-Punkt-Übertragung und einer Punkt-zu-Mehrpunkt-Übertragung unterschieden.

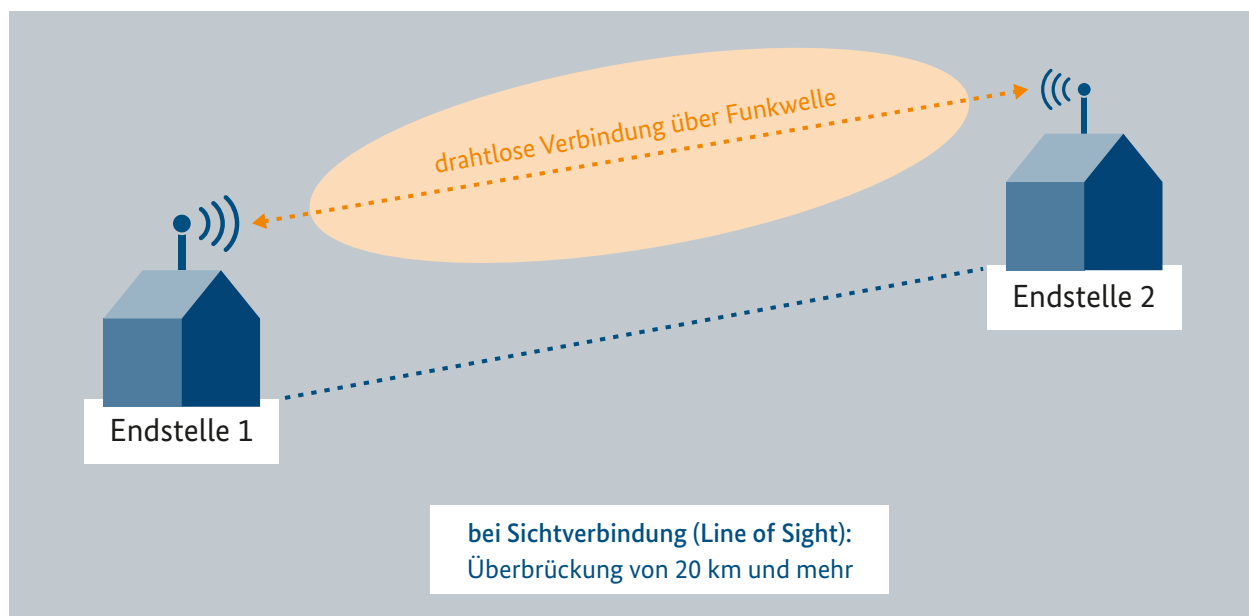
### 2.1. Punkt-zu-Punkt-Verbindung

Bei einer Punkt-zu-Punkt-Verbindung (Point-to-Point, kurz: P2P) werden immer zwei Standorte über eine Richtfunkverbindung miteinander verbunden. Die Strecke zwischen den beiden Antennen bildet ein Funkfeld. Die Gesamtheit – bestehend aus dem Funkfeld und der Systemtechnik, einschließlich der Antennen – wird als Richtfunkstrecke bezeichnet.

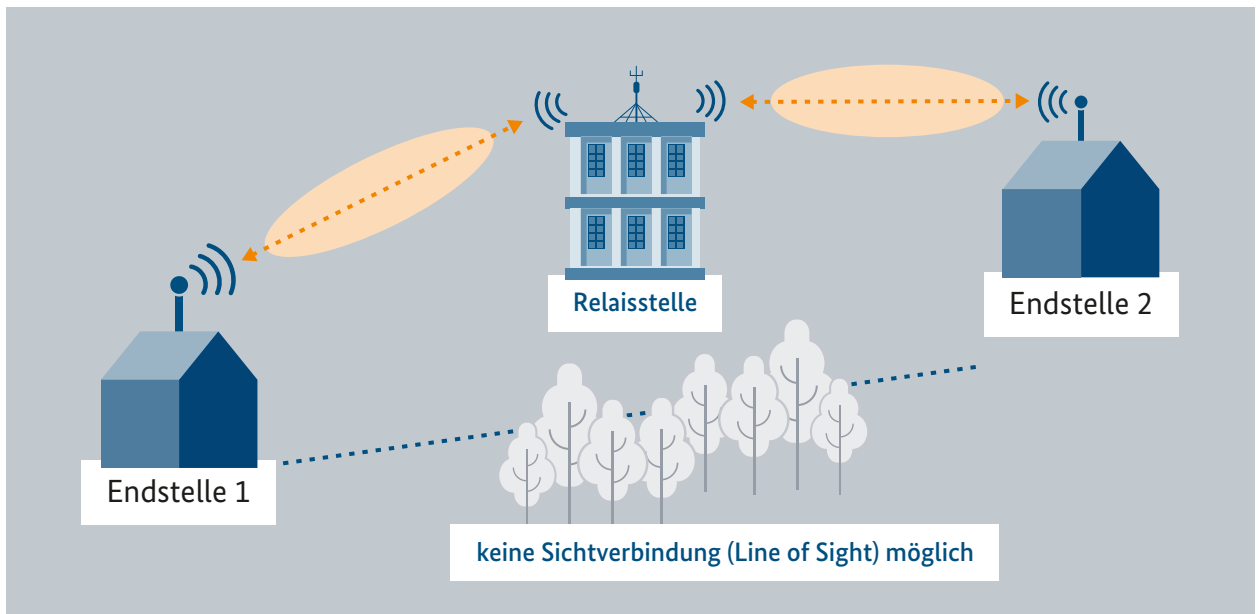
Die Sendeanlage an der ersten Endstelle sendet ihr Signal direkt zur zweiten Endstelle und umgekehrt. An den beiden Endstellen muss die Planung so ausgelegt sein, dass eine Sichtverbindung (Line of Sight) zwischen den Endstellen besteht. Das heißt, die erste Fresnelzone darf nicht wesentlich durch hineinragende Hindernisse wie Bäume oder Gebäude, insbesondere in der Nähe der Endstellen, beeinträchtigt sein. Ist die Ausbreitung der Funksignale in einem Funkfeld ungehindert möglich, spricht man von einer Freiraumausbreitung.

Sollte eine direkte Verbindung nicht möglich sein, können durch den Einsatz sogenannter Relaisstellen die Signale umgelenkt, Hindernisse umgangen bzw. die Reichweite erhöht werden.

Abbildung 2 Punkt-zu-Punkt-Verbindung



**Abbildung 3 Richtfunkverbindung mit Relaisstelle**



Für jedes einzelne Funkfeld einer Funkverbindung über eine Relaisstation gelten dieselben Voraussetzungen wie für ein einzelnes, direktes Funkfeld. Es existieren zwei unterschiedliche Arten von Relaisstationen, aktive und passive.

Bei einer aktiven Relaisstation kommen Verstärker (Richtfunkhardware) zum Einsatz. Diese entsprechen einer normalen Endstation. Sie werden direkt gekoppelt, sodass zwei vollständig unabhängige Funkfelder entstehen. Die Sendeleistungen beider Funkfelder werden durch die Verstärker in der Relaisstation und den Endstationen gesteuert. Für den Betrieb der aktiven Relaisstation ist eine Stromversorgung notwendig.

Das Funksignal kann alternativ durch eine passive Relaisstation (Antennen) umgelenkt werden. Hierbei werden lediglich die beiden Antennen miteinander verbunden. Das Sendesignal wird nicht zwischenverstärkt, sondern direkt an die zweite Antenne in die zweite Richtung geleitet. Da die passiven Antennen eine zusätzliche Dämpfung in den beiden Funkfeldern darstellen, muss die Sendeleistung ausreichend dimensioniert werden. Aufgrund der regulatorischen Begrenzung der maximalen Sendeleistung wird dies allerdings nicht in allen Fällen möglich sein.

**Abbildung 4 Relaisstation**



Quelle: CBL GmbH

Die passive Relaisstation eignet sich aufgrund der fehlenden Zwischenverstärkung an der Relaisstation nur für kurze Funkfelder von wenigen Kilometern. Da keine Stromversorgung erforderlich ist, ist der Aufbau und Betrieb der passiven Relaisstation wesentlich einfacher als der einer aktiven Relaisstation. Es ist demnach in jedem Einzelfall sorgfältig zu prüfen, ob eine passive Relaisstation als Lösungsansatz infrage kommt.

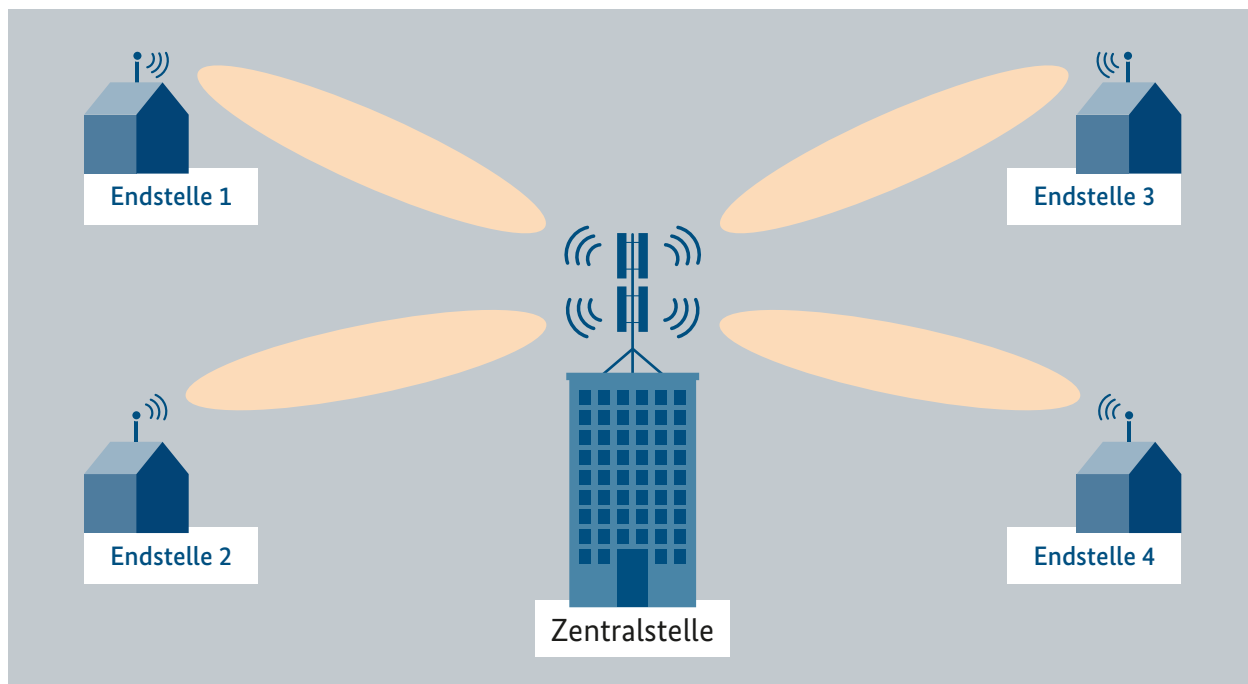
## 2.2 Punkt-zu-Mehrpunkt-Verbindung

Punkt-zu-Mehrpunkt-Systeme (Point-to-Multipoint, kurz: PmP) dienen dazu, eine große Anzahl von Standorten, sogenannte Richtfunkendpunkte, über eine zentrale Funkstation anzubinden.

Diese zentrale Funkstelle muss so aufgebaut werden, dass sie die Region funktechnisch sehr gut abdeckt, da zum Zeitpunkt des Aufbaus der zentralen Station nicht unbedingt alle potenziellen Nutzer bekannt sind. Aus diesem Grund kommen hier rundstrahlende Antennen oder Sektorantennen mit einer hohen Flächenabdeckung zum Einsatz. In der Regel werden für die PmP-Installation zentrale, hoch gelegene Punkte (Gebäude, Mast) genutzt, um eine möglichst optimale Abdeckung aller Endstellen zu erreichen.

Die Anbindung weiterer Nutzer ist hier sehr einfach, da alle funktechnischen Voraussetzungen inklusive der Zuteilung der Frequenzen zu Beginn der Einrichtung bereitgestellt werden. Für jede zusätzliche Anbindung ist lediglich das Endgerät des Kunden zu planen und aufzubauen. Für die einzelnen Funkfelder gelten auch hier dieselben Grundvoraussetzungen wie bei einer Punkt-zu-Punkt-Verbindung. Die Mehrfachanbindung vieler Nutzer an einen zentralen Standort stellt einen wesentlichen Kostenvorteil der Punkt-zu-Mehrpunkt-Lösung gegenüber der Punkt-zu-Punkt-Verbindung dar.

Abbildung 5 Punkt-zu-Mehrpunkt-System (Sektorantennen)





## 3 Grundlagen der Systemtechnik

### 3.1 Komponenten

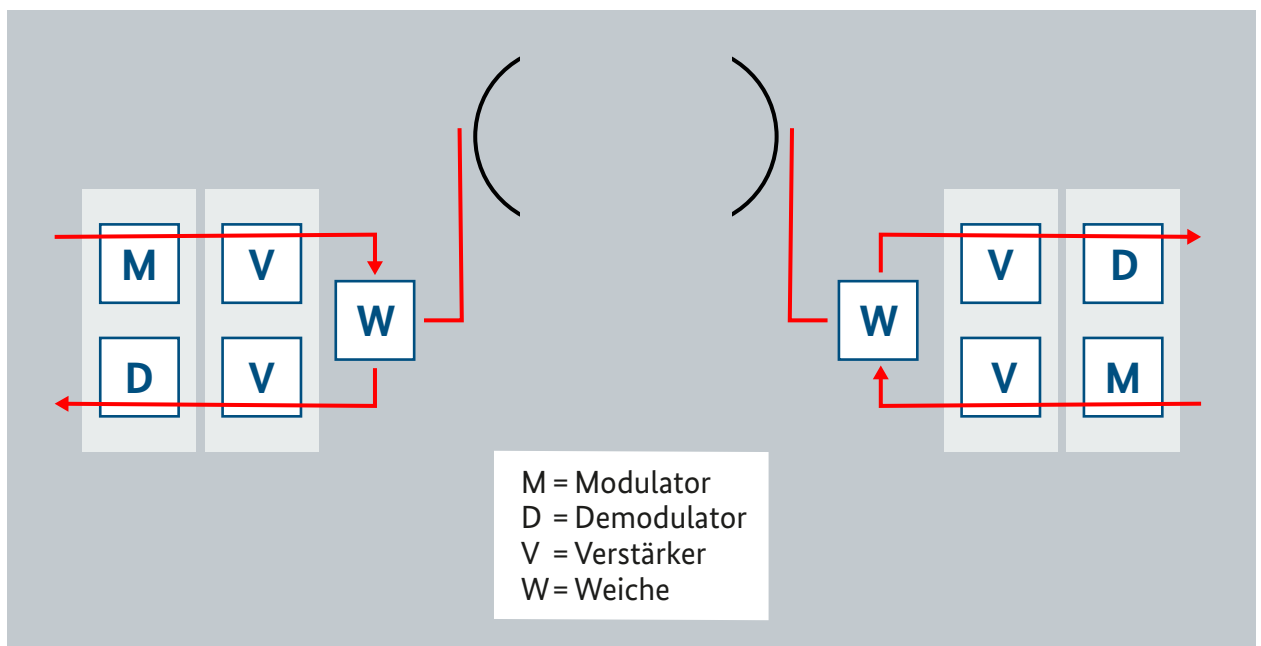
Abbildung 7 stellt eine schematische Richtfunkverbindung zwischen zwei Endstellen (1 und 2) dar. Richtfunksysteme übertragen die Sendesignale zumeist bidirektional. Daher sind die Systemkomponenten zur Modulation und Verstärkung der Signale doppelt vorhanden. Das Signal auf der Sendeseite wird zunächst durch einen Modulator (M) auf die sogenannte Trägerfrequenz moduliert. Anschließend wird das Signal im Verstärker (V) auf die notwendige Sendeleistung verstärkt. Über das Antennenkabel gelangt das verstärkte Signal zur Antenne und wird von dort gerichtet zur Empfangsantenne abgestrahlt. Auf der Empfangsseite wird das Signal über die Antenne empfangen. Aufgrund der Dämpfung des Signals durch den Übertragungsweg (Freiraumdämpfung, Wettereinflüsse etc.) muss das Signal zunächst wieder verstärkt werden (Verstärker V), um im Anschluss im Demodulator (D) demoduliert zu werden. Hierbei wird die eigentliche Nutzinformation in ein weiter verarbeitbares Signal zurückgewandelt. Die Weiche (W) trennt die Sende- und Empfangsrichtung entsprechend ihrer Frequenzlage.

Abbildung 6 Wandhalterung mit 60-Zentimeter-Antenne



Quelle: Pan Dacom Direkt GmbH

Abbildung 7 Komponenten eines Richtfunksystems



### 3.2 Voraussetzungen für den Aufbau von Richtfunkverbindungen

Über die bereits beschriebenen Voraussetzungen für die Funkverbindung hinaus wird an den Standorten eine Stromversorgung für den Betrieb der aktiven Technik sowie die Zuführung der Datenverbindung benötigt. Diese erfolgt heute in der Regel über Ethernet.

Für den Aufbau einer Richtfunkstrecke muss die Antennenhöhe der beiden Richtfunkstandorte so bemessen sein, dass eine ungehinderte Sichtverbindung möglich ist. Sollen größere Reichweiten überbrückt werden, muss die Erdkrümmung in den Planungen berücksichtigt werden. In diesem Szenario sind die Kosten für einen Mastbau in großen Höhen und die erforderlichen größeren Antennen sowie der Aufwand für eine Baugenehmigung entsprechend hoch, sodass dies kein Anwendungsfall für Privathaushalte darstellt.

### 3.3 Leistungsfähigkeit einer Richtfunkverbindung

Die Leistungsfähigkeit von Richtfunksystemen kann mit den folgenden drei Parametern beschrieben werden. Angegeben sind hierbei die typischen Höchstwerte für Parameter von Funkverbindungen, die nicht alle gleichzeitig in einem System realisierbar sind:

- Bandbreite: Übertragungsraten bis 20 Gbit/s
- Reichweite: Distanzen bis über 100 Kilometer können ohne Relaisstellen überbrückt werden (vorausgesetzt, die Sichtverbindung ist gewährleistet; aufgrund der Abhängigkeit der Reichweite von der Sendefrequenz können hohe Reichweiten nur mit niedrigen Frequenzen und damit nicht mit der maximalen Bandbreite realisiert werden)
- Geplante Jahresverfügbarkeit: z.B. 99,995 Prozent (26 Minuten Ausfall/Jahr)

Die maximale Leistungsfähigkeit der Systeme entspricht in der Regel den Systemparametern für kommerzielle Richtfunkanwendungen. Für den Privatanwender stehen deutlich günstigere Systeme zur Verfügung, die aber nicht die maximale Leistungsfähigkeit erreichen.

## 4 Rechtliche Grundlagen

Richtfunksysteme können sowohl im dezidiert zugeteilten als auch im allgemein zugeteilten Spektrum genutzt werden. Der Einsatz der jeweiligen Frequenz hängt von der Situation vor Ort und den Anforderungen an die Übertragungsleistung ab.

### 4.1 Frequenzbereiche mit Einzelzuteilung

In den Frequenzbereichen 4 GHz, 6 GHz, 7 GHz, 13 GHz, 15 GHz, 18 GHz, 23 GHz, 26 GHz, 28 GHz, 32 GHz, 38 GHz, 42 GHz, 52 GHz und 71-76/81-86 GHz werden Einzelzuteilungen für Richtfunkanwendungen erteilt.

In diesen Frequenzbereichen wird jedem Nutzer eine feste Frequenz zugeteilt, die exklusiv genutzt werden kann. Dadurch wird die technisch mögliche Bandbreite gesichert und das Risiko von Störungen durch andere Spektrumsnutzungen minimiert. Dies ist besonders für Einsatzgebiete wichtig, die eine zuverlässige Verbindung ohne Störungen von außen erfordern. Für den professionellen Bereich, zum Beispiel für die Vernetzung von Unternehmensstandorten, empfiehlt sich die Nutzung von Frequenzbereichen mit Einzelbelegung.

Diese Richtfunkstrecken müssen bei der Bundesnetzagentur (BNetzA) beantragt werden. Die BNetzA vergibt in Deutschland die Rechte zur Nutzung eines Frequenzspektrums. Bei Störungen der Frequenznutzung kann sie durch die Zuteilungsinhaber eingeschaltet werden. Die BNetzA identifiziert Störer und leitet Maßnahmen ein, die eine störungsfreie Frequenznutzung sicherstellen.

In der Regel steht in den höheren Frequenzbereichen mehr Spektrum zur Verfügung und es können höhere Datenübertragungsraten realisiert werden.

### 4.2 Allgemein zugeteilte Frequenzbereiche

Richtfunksysteme in allgemein zugeteilten Frequenzbändern haben keine exklusiven Spektrumsnutzungsrechte, da die Frequenzressource von mehreren Nutzern geteilt wird. Die BNetzA teilt dafür Frequenzbereiche zur allgemeinen Verwendung mittels Amtsblattverfügungen zu. Da keine weiteren Genehmigungen durch die BNetzA erforderlich sind, können Richtfunksysteme mit Allgemeinzuteilung schnell und flexibel ohne zusätzliche Antrags- und Nutzungskosten für die Frequenzen realisiert werden.

Die Störanfälligkeit solcher Richtfunkverbindungen durch fremde Systeme im gleichen Frequenzspektrum ist allerdings nicht kalkulierbar und es besteht kein Recht auf Entstörung.

Die Störungen führen zwar in der Regel nicht zum vollständigen Ausfall der Systeme, schränken aber die verfügbare Datenrate ein. Um Störungen durch andere Sender zu vermeiden, die in derselben Region im allgemein zugewiesenen Frequenzbereich betrieben oder künftig errichtet werden, sollten mit allgemein zugewiesenen Frequenzen nur geringere Entfernungen überbrückt werden. Die Nutzung beschränkt sich daher in der Regel auf den privaten Bereich.

### 4.3 Verfügbares Frequenzspektrum

Die verfügbaren Frequenzen und das zugehörige Spektrum können im Frequenzplan der Bundesnetzagentur<sup>1</sup> im Detail nachgelesen werden. In Tabelle 1 sind die für Richtfunk typischen Frequenzbereiche und Reichweiten für einzeln zugewiesene Frequenzbereiche dargestellt. Im Einzelfall können die Reichweiten aufgrund der lokalen und konkreten Gegebenheiten (Hindernisse im Funkfeld, Verwendung spezieller Antennen mit sehr hohem Gewinn, ...) variieren.

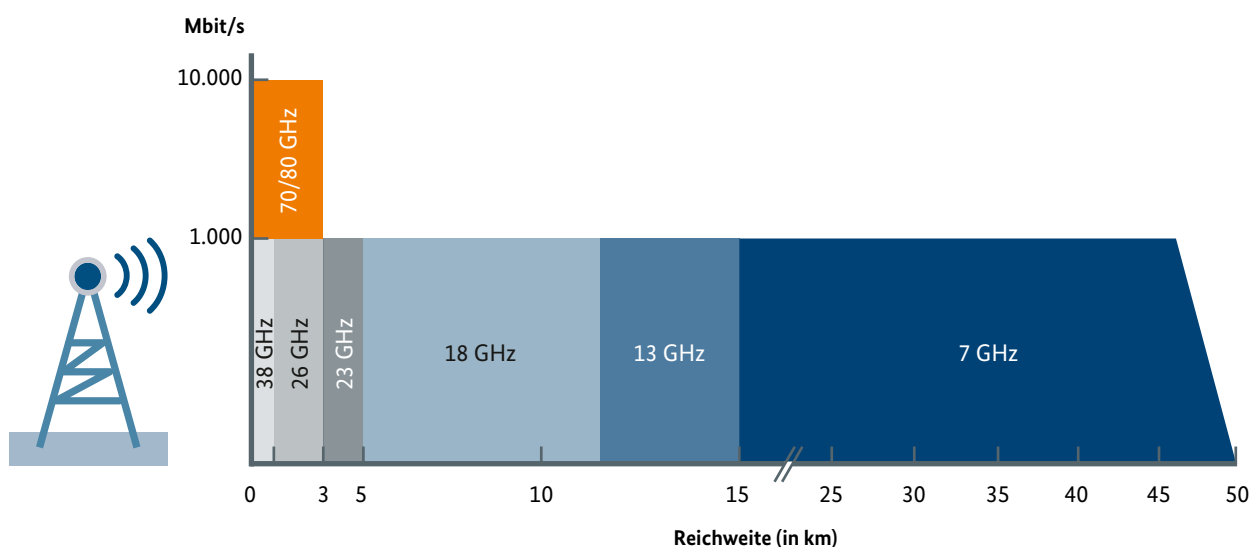
**Tabelle 1** Mögliche Reichweiten in den typischen einzeln zugewiesenen Frequenzbereichen

Frequenzbereich	Sendereichweite*
4–7 GHz	> 15 km
15–18 GHz	4–12 km
23–32 GHz	2–5 km
38–42 GHz	0–3 km
52 GHz	0–3 km
71–76/81–86 GHz	0–3 km

\* Die erzielte Reichweite zwischen den Sende- und Empfangseinheiten hängt von verschiedenen Parametern wie Frequenz, Sendeleistung, Modulation, Antennengröße oder äußeren Einflüssen ab. Es werden hier beispielhafte Werte angegeben.

Während in den niedrigen Frequenzbereichen Datenraten von 1 Gbit/s erreicht werden können, sind in den hohen Frequenzbereichen von 70 bis 80 GHz höhere Datenraten bis zu 10 Gbit/s möglich, mit den neuen Gerätevarianten auch bis zu 20 Gbit/s.

**Abbildung 8** Zusammenhang zwischen genutzten Frequenzen, Reichweite und übertragbarer Datenrate im allgemein zugewiesenen Funkbereich



Eigene Darstellung nach Pan Dacom Direkt GmbH

1 <https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/Telekommunikation/Frequenzen/Firmennetze/Richtfunk/richtfunk-node.html>

Mit den allgemein zugewiesenen Frequenzbereichen stehen weitere Ressourcen zur Verfügung, die durch Richtfunk genutzt werden können.

Diese Frequenzen stellen kein exklusives Nutzungsrecht sicher und sind oft auch nicht ausschließlich für Richtfunkanwendungen vorgesehen. Die maximale Sendeleistung ist begrenzt, wodurch die Reichweiten eingeschränkt sind. Aus diesem Grund wird der allgemein zugewiesene Bereich nur für Einsatzgebiete mit geringeren Reichweiten empfohlen, um Störungen durch andere Sendeeinrichtungen vorzubeugen.

In Tabelle 2 sind die Reichweiten für Richtfunk in allgemein zugewiesenen Frequenzbereichen dargestellt.

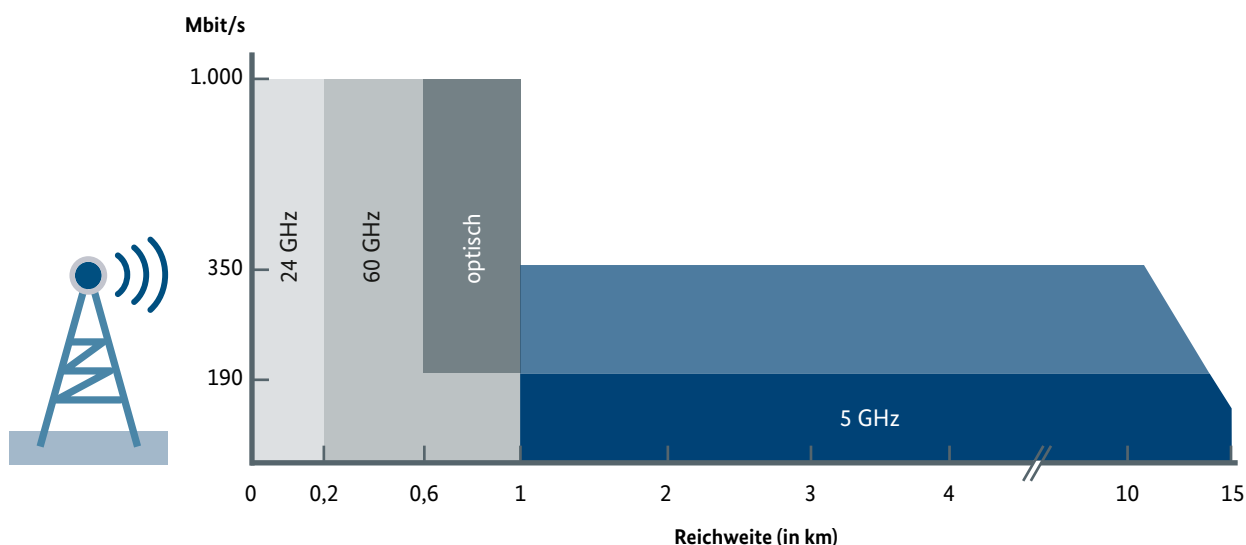
Bei den kurzen Reichweiten sind Datenraten von 1 Gbit/s bis 2,5 Gbit/s umsetzbar.

**Tabelle 2 Typische Frequenzbereiche und Reichweiten im allgemein zugewiesenen Frequenzbereich**

Frequenzbereich	Sendereichweite*	Regulierung/Zuteilung
5 GHz	0–15 km	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 34/2017 (BFWA in 5755–5875MHz)</li> <li>• 65/2018 (WAS/WLAN in 5150–5350MHz und 5470–5725MHz)</li> <li>• 151/2018 (WAS/WLAN in 5150–5350MHz und 5470–5725MHz),</li> </ul>
38 GHz	0–2 km	Vfg Nr. 55/2013
58 GHz	0–1 km	Vfg Nr. 56/2013, 45/2014, 133/2019
59–63 GHz	0–1 km	Vfg Nr. 97/2021

\* Die Entfernung zwischen den Sendeeinrichtungen hängt von verschiedenen Parametern wie Frequenz, Sendeleistung, Antennengröße oder Störungen ab. Es werden hier beispielhafte Werte angegeben.

**Abbildung 9 Zusammenhang zwischen genutzten Frequenzen, Reichweite und übertragbarer Datenrate im allgemein zugewiesenen Frequenzbereich**



Eigene Darstellung nach Pan Dacom Direkt GmbH

## 5 Planung und Umsetzung

Aufgrund der charakteristischen Merkmale der Richtfunktechnik müssen bei der Planung und dem Betrieb bestimmte Rahmenbedingungen eingehalten werden, um eine erfolgreiche Richtfunkverbindung zu etablieren.

### 5.1 Funkfeldplanung

Die Planung von Richtfunkverbindungen ist ein komplexer Prozess, den nicht fachkundige Personen ohne zusätzliche Hilfe nicht bewältigen können. Aus diesem Grunde setzt die BNetzA für eine Frequenzzuteilung (funktechnische) Fachkunde voraus. Da diese in der Mehrzahl der Fälle beim Bedarfsträger nicht vorhanden ist, muss sich der Antragsteller für die Frequenzzuteilung der Fachkunde z.B. von Planungsbüros versichern. Dies ist der BNetzA im Antragsprozess mitzuteilen.

Da Richtfunk auf der direkten, gerichteten Übertragung von Funkwellen basiert, ist die Grundlage für einen störungsfreien Betrieb die Sichtverbindung von Sender und Empfänger. Diese zu prüfen bzw. herzustellen, ist Aufgabe der Funkfeldplanung.

Ist eine direkte Sichtverbindung bei der Errichtung der Richtfunkstrecke nicht möglich, kann eine Verbindung über Umlenkpunkte sichergestellt werden. Diese Umlenkpunkte können entweder aktiv mit voll ausgestatteter Richtfunkhardware (aktive Relaisstellen) gestaltet werden oder passiv in Form zweier Antennen (passive Relaisstellen), siehe auch Kapitel A 2.1.

Planungsbüros nutzen softwaregestützte IT-Lösungen, die unter Berücksichtigung der Erdkrümmung, der geografischen Daten (Geländedaten) sowie der Gebäudehöhen unterhalb der Verbindungslinie der beiden Endpunkte die Qualität der Verbindung berechnen. Auf dieser Basis lassen sich dann die notwendigen Höhen der Antennen an den beiden Standorten ermitteln.

#### Entfernungen

Die Sendeleistung der Funkanlage und die Größe der Antennen sind die ausschlaggebenden Faktoren für die maximale Reichweite, die mit der Richtfunkstrecke erzielt werden kann.

#### Wettereinflüsse

Die Wetterlage hat Einfluss auf die Verbindungsqualität bei Richtfunk. Die Abhängigkeit von Wetterbedingungen steigt mit der Höhe der genutzten Frequenz. Bei schlechtem Wetter kann die Sendeleistung dem Wetter entsprechend durch eine Sendeleistungsregelung (ATPC) angepasst werden, um eine stabile Verbindung zu erzielen.

#### Störungen

Funksysteme können durch unterschiedliche Einflüsse gestört werden. In Frequenzbereichen mit Einzelzuteilung überwacht die BNetzA die Nutzung

der Frequenzen, identifiziert störende Systeme und sorgt für die Funkentstörung.

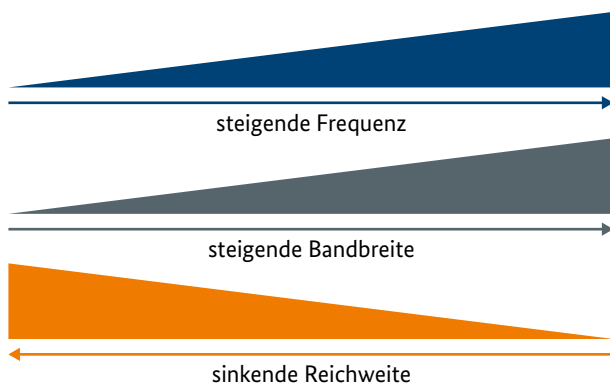
In Frequenzbereichen mit Allgemeinzuteilung sind die Betreiber der Funkverbindung auf sich selbst gestellt. Ein Anspruch auf Funkentstörung besteht nicht. Potenzielle Störungen können durch eine Vielzahl gleichartiger Systeme, etwa benachbarte Richtfunkstrecken im selben Frequenzbereich, aber auch völlig andere Nutzungsszenarien wie zum Beispiel WLAN im 5-GHz-Bereich hervorgerufen werden.

#### Betrieb und Wartung

Trotz ihrer sehr geringen Störanfälligkeit müssen Richtfunkanlagen aktiv betrieben und gewartet werden. Hierzu sollte bereits in der Planungsphase ein Wartungskonzept erstellt und in der kommerziellen Planung berücksichtigt werden.

Bei der Planung des Funkfelds sollte auch die zur Verfügung stehende Bandbreite und die mögliche Reichweite einer Richtfunkverbindung in Abhängigkeit von der Frequenz berücksichtigt werden. Abbildung 10 veranschaulicht dies prinzipiell: Mit steigender Frequenz steht mehr Spektrum zur Verfügung, wodurch eine höhere Bandbreite möglich wird. Zugleich reduziert sich mit wachsender Frequenz die maximal mögliche Reichweite.

**Abbildung 10** Abhängigkeiten der Kernparameter einer Richtfunkverbindung\*



\* vereinfachte schematische Darstellung, die keine mathematisch genaue Abhängigkeit der Parameter aufzeigt

## 5.2 Frequenzplanung

Um die optimale Frequenz für das Richtfunksystem zu finden, erfolgt durch einen Funkplaner eine detaillierte Frequenzplanung.

## 5.3 Zuteilungsverfahren

Anhand des in der Frequenzplanung festgelegten Frequenzbedarfs (Mittelfrequenzen und notwendige Bandbreite) muss die Nutzung einzeln zugeteilter Frequenzen bei der BNetzA beantragt werden. Dabei können Wünsche bezüglich der Frequenzen angegeben werden, ein Rechtsanspruch auf Zuteilung einer bestimmten Frequenz besteht jedoch nicht. Des Weiteren müssen die Parameter der verwendeten Geräte auf der Grundlage des Standards EN 302217 2 angegeben werden.

Die BNetzA prüft den Antrag hinsichtlich der Funkverträglichkeit der beantragten Frequenznutzung mit anderen Spektrumsanwendungen im Inland sowie, bei grenznahen Einsatzorten, auch mit Anwendungen im Ausland. Die Frequenzzuteilung ist in der Regel auf zehn Jahre begrenzt.

# B Anwendungsbereiche für Richtfunk

Aufgrund seiner charakteristischen Merkmale bietet der Richtfunk eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten im Mobilfunkbereich, als Back-up-Netz oder als primäres Übertragungsmedium für die Breitbandversorgung von Unternehmen, ggf. auch von Privathaushalten, insbesondere in ansonsten nur schwer zu erschließenden Gebieten.

## 1 Anbindung von Mobilfunkstandorten

Die unkomplizierte und schnelle Möglichkeit, Richtfunkverbindungen aufzubauen, bietet auch die Chance, Mobilfunkstandorte, die noch nicht an die Glasfaserinfrastruktur angebunden sind, mit einer stabilen und leistungsfähigen Verbindung zu versorgen.

## 2 Anbindung von Unternehmen

Neben der Anbindung von Mobilfunkmasten wird Richtfunk derzeit vor allem von Unternehmen eingesetzt – zum Beispiel zur Anbindung von Standorten und als Back-up zum Festnetzanschluss.

Ein Internetzugang per Fixed Wireless Access (FWA) wird dazu über Funkantennen des Providers zu einer Funkantenne am Gebäude des Unternehmens eingerichtet. Auch hierbei ist es wichtig, dass eine Sichtverbindung zur nächsten Funkantenne besteht. Vom Gebäudedach wird die Verbindung dann mittels einer Glasfaserleitung ins Gebäude geführt. Im städtischen Raum lassen sich auch mehrere Standorte eines Unternehmens direkt über Richtfunk vernetzen. Liegt ein angebundener Standort in unmittelbarer Nähe zu anderen, nicht ausreichend versorgten Gebäuden, besteht die Möglichkeit, sich die Richtfunkantenne zu teilen, siehe auch Kapitel A 2.1.

## 3 Back-up und Redundanz für kritische Anwendungen

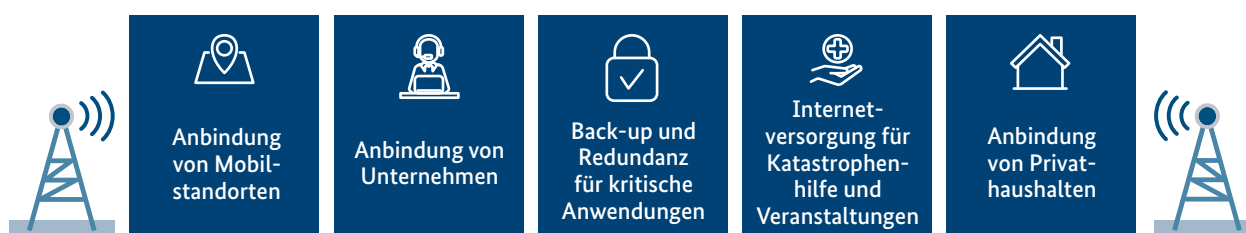
Richtfunk ist durch seine hohe Zuverlässigkeit ideal für kritische Anbindungen zwischen Gebäuden. So kann Richtfunk beispielsweise als Back-up-Leitung eingesetzt werden, um Kommunikationsausfällen vorzubeugen und eine möglichst hohe Verfügbarkeit sicherzustellen. Aufgrund der skalierbaren Leistungsfähigkeit sowie der hohen Datensicherheit bei Richtfunkverbindungen greifen auch Krankenhäuser auf diese Technologie zurück, um etwa Röntgenbilder und Patientenakten zu übertragen.

## 4 Internetversorgung für Veranstaltungen und Katastrophenhilfe

Systeme für allgemein zugeteilte Frequenzbereiche eignen sich für die schnelle und flexible Sicherstellung einer stabilen Internetversorgung bei Messen oder anderen Großveranstaltungen. Die flexiblen Systeme können schnell auf- und abgebaut und später an anderer Stelle wiederverwendet werden. Diese Eigenschaften prädestinieren Richtfunk auch für den Einsatz bei Umweltkatastrophen, um eine Mobilfunk- und Internetverbindung schnell wiederherzustellen und so die Kommunikation in Krisensituationen zu erleichtern.

In den Frequenzbereichen 18, 28 und 32 GHz stehen Kanäle zur Bewältigung von Katastrophen exklusiv zur Verfügung. Diese Kanäle werden üblicherweise keinen Nutzern zugeteilt. Die Frequenzzuteilung erfolgt unmittelbar und in Absprache mit der BNetzA.

Abbildung 11 Anwendungsfälle für Richtfunk



## 5 Anbindung von Privathaushalten

Richtfunk kann eine attraktive und überaus leistungsfähige Option zur Anbindung von Haushalten darstellen. Allerdings bieten die großen Netzbetreiber derzeit keine Richtfunkprodukte für Privatkunden an. Im privaten Bereich kommt Richtfunk deshalb vor allem dort zum Einsatz, wo spezialisierte regionale Richtfunkanbieter bereits über eine bestehende Infrastruktur von Masten verfügen und damit leistungsfähige Konnektivität zu attraktiven Preisen anbieten können. Auch maßgeschneiderte Richtfunklösungen sind im Privatkundenbereich zu finden, beispielsweise bei herausfordernder Topografie und/oder entfernten Einzellagen. Einrichtung, Betrieb und Wartung solcher eigens hergestellten Richtfunkstrecken erfolgen in der Regel durch spezialisierte Anbieter oder lokale Fachfirmen für Funk- und Satellitentechnik.

Das folgende Kapitel C geht ausführlich auf die Nutzung von Richtfunk für Privathaushalte ein.



# C Richtfunk für Privathaushalte

Für die Richtfunkanbindung eines Privathaushalts ist es zunächst wichtig, einen geeigneten Ausgangspunkt für die beiden Standorte der Funkverbindung festzulegen. Zudem müssen bei der gesamten Planung und Installation die geltenden gesetzlichen Vorgaben eingehalten werden, einschließlich des Betriebs der Antennen.

Zur Realisierung von Richtfunkstrecken für private Anwendungsbereiche werden in den meisten Fällen allgemein zugewiesene Richtfunkfrequenzen genutzt, da sie keinen Genehmigungsaufwand und keine dauerhaften Gebühren verursachen.

Die von den Systemherstellern angegebenen Reichweiten und Bandbreiten variieren stark. Es empfiehlt sich daher, die Systemtechnik von fachkundigen Personen auf den Bedarfsfall abstimmen zu lassen. Je nach genutzter Bandbreite und Frequenz unterscheiden sich die Preise der Systeme stark; sie können von hundert bis hin zu mehreren tausend Euro reichen.

**Tabelle 3 Allgemein zugewiesene Richtfunkfrequenzbereiche für den Privatgebrauch**

Frequenzbereiche mit Allgemeinzuteilung für Richtfunk	Typische, maximale Übertragungsrate	Reichweite
58/60 GHz	2,5 Gbit/s	bis 1 km je nach Bandbreite
38 GHz	2 Gbit/s	bis 2 km je nach Bandbreite
5 GHz	1 Gbit/s	bis 15 km
2,4 GHz	nur bedingt geeignet; aufgrund der großen Zahl an Geräten, die in diesem Frequenzbereich funken, ergibt sich eine hohe Störanfälligkeit	

## 1 Betreiber/Anbieter von Richtfunkverbindungen bzw. -netzen

Regionale Anbieter mit vorhandener Mastinfrastruktur können Verbindungen für Standorte herstellen. Die Anbieter übernehmen hierbei die Planung, den Bau und

die Wartung der Richtfunkstandorte. Darüber hinaus bieten sie auch Sonderlösungen für Gewerbekunden.

**Abbildung 12 Mögliche Betreiber von Richtfunksystemen**



## 2 Implementierungsszenarien

Bei der Implementierung von Richtfunklösungen im Privatkundenbereich sind unterschiedliche Parameter zu berücksichtigen und gegeneinander abzuwägen. Wie dies konkret aussehen kann, zeigt die nachfolgende

Übersicht anhand von drei möglichen Implementierungsvarianten mit den jeweils notwendigen technischen Komponenten, den Zuständigkeiten, speziellen Herausforderungen und Kosten.

### Variante 1: Versorgung über bestehende Richtfunkinfrastruktur

In der Region existieren Anbieter von richtfunkbasierten Produkten mit vorhandener Mastinfrastruktur.

Im Privatkundenbereich kann das Internetprodukt und die dazu erforderliche technische Ausstattung vom Anbieter bezogen werden. Der Anbieter übernimmt Montage und Betrieb der Richtfunkstrecke.

#### Beispielszenario

Die Eigentümerin eines Gebäudes schließt einen Vertrag über ein Richtfunkinternetprodukt mit einem Anbieter ab, der in der Region über diverse Masten verfügt und zum Gebäude eine Sichtverbindung herstellen kann.

### Variante 2: Neuerrichtung einer Richtfunkstrecke – direkte Sichtverbindung

Es existieren keine Anbieter von richtfunkbasierten Produkten in der Region.

Es müssen sowohl die Sende- als auch die Empfangsstation errichtet werden. Für die Sendestation ist eine mit Breitband versorgte Adresse erforderlich, von der aus eine Sichtverbindung zu dem Zielobjekt hergestellt werden kann, z.B. Hausdach, Silo, Kirchturm.

Der Eigentümer des Zielobjekts für die Sendestation muss sowohl der Verlegung eines separaten Festnetzanschlusses als auch der Installation des Senders zustimmen.

#### Beispielszenario

Ein Landwirt kann vom Haus eines nahen Verwandten im nächsten mit Glasfaser erschlossenen Ortsteil eine Sichtverbindung zu seinem circa 500 Meter entfernten Hof herstellen.

### Variante 3: Neuerrichtung einer Richtfunkstrecke – keine direkte Sichtverbindung

Wie bei Variante 2. Da aber keine direkte Sichtverbindung hergestellt werden kann, ist der Einsatz einer oder mehrerer Relaisstellen – meist auf separat zu errichtenden Masten – erforderlich.

Das erhöht den Planungs- und Errichtungsaufwand deutlich und schlägt sich in den Kosten nieder. Daher kommt diese Variante für Privatkundschaft nur bei optimalen Rahmenbedingungen infrage, z. B. wenn bestehende Strukturen als Relaisstation genutzt werden und sich mehrere Haushalte die Errichtungskosten teilen können.

#### Beispielszenario

Ein abgelegener Weiler mit mehreren Haushalten kann keine direkte Sichtverbindung zum nächsten mit Glasfaser erschlossenen Ortsteil herstellen. Ein nahegelegenes Unternehmen bietet an, dass ein auf dem Firmengelände vorhandener Mast für die Anbringung einer Relaisstation genutzt werden kann, um eine Verbindung herzustellen.

	<b>Variante 1 Versorgung über bestehende Richtfunk- infrastruktur</b>	<b>Variante 2 Neuerrichtung einer Richt- funkstrecke – direkte Sicht- verbindung</b>	<b>Variante 3 Neuerrichtung einer Richt- funkstrecke – keine direkte Sichtverbindung</b>
Montage, Betrieb und Wartung	Durch den Richtfunkanbieter bzw. ein vom Richtfunkanbieter beauftragtes Spezialunternehmen.	Durch ein Fachunternehmen, das von der Privatkundschaft zu beauftragen ist.	Durch ein Fachunternehmen, das von der Privatkundschaft zu beauftragen ist.
Verantwor- tung für die Richtfunk- strecke	Richtfunkanbieter	Privatkunden	Privatkunden
Heraus- forderungen	Keine	Mit dem Eigentümer des Objekts, an dem der Sender montiert werden soll, müssen mindestens folgende Themen geklärt werden: <ul style="list-style-type: none"> <li>• zusätzlicher Internet-/ Glasfaseranschluss</li> <li>• Montage des Sendemasts</li> <li>• Stromversorgung</li> <li>• Zugang zu Wartungszwecken</li> </ul>	Wie bei Szenario 2, zuzüglich Regelungen für die Relais- stationen.
<b>Errichtungs- kosten</b>	<b>&lt; 300 Euro*</b>	<b>1.500 Euro bis &gt; 5.000 Euro</b>	<b>Je nach Gegebenheit von 2.500 Euro bis &gt; 15.000 Euro</b>

\* Im Privatkundenbereich können in der Variante 1 bei der Nutzung von lizenzfreien Frequenzen Anbindungen mit bis zu 2 Gbit/s realisiert werden. Die Errichtungskosten liegen zwischen 100 und 300 Euro. Im Gewerbekundenbereich können in dieser Variante Anbindungen mit bis zu 10 Gbit/s angeboten werden. Die Errichtungskosten belaufen sich zwischen 300 bis 5.000 Euro, je nachdem, ob allgemein oder einzeln zugewiesene Frequenzen genutzt werden.

Bei Variante 1 handelt es sich in der Regel um einen akkreditierten Provider mit entsprechendem Zugang bzw. den notwendigen Anschlüssen an das öffentliche Telekommunikationsnetz. Dieser übernimmt dann auch die Verantwortung für den Betrieb und die Wartung der Richtfunkstrecke.

Bei den Varianten 2 und 3 ist zu klären, wie der Anschluss an das öffentliche Telekommunikationsnetz hergestellt werden kann. Netzbetreiber benötigen zur Terminierung des Anschlusses eine valide Adresse. Der Eigentümer der Richtfunkverbindung muss dazu die Einwilligung des Anschlusses abgeben, aber auch die Haftung für die Terminierung übernehmen.

Zudem muss bei den Varianten 2 und 3 der Aufbau der Sendeinheit vom Hauseigentümer genehmigt werden.

Eine separate Stromversorgung ist sicherzustellen. Auch wenn das System einen allgemein zugewiesenen Frequenzbereich nutzt und der Aufwand für den Aufbau vertretbar ist (vergleichbar mit einem Satellitensystem), bleiben einige Hürden zu überwinden. Oft ist es dennoch die einfachste und schnellste Möglichkeit, einen breitbandigen Internetanschluss zu realisieren. Die Klärung der Anschlussrechte und des Aufbaus obliegt bei diesen beiden Varianten der Kundschaft. Die Netzbetreiber sind bei diesen beiden Varianten nicht in der Verantwortung und bieten solche Lösungen auch nicht an. Festnetzbetreiber übernehmen in der Regel nicht den Betrieb und die Wartung einer Richtfunkstrecke. Es liegt dann in der Verantwortung der Anschlussnehmer, dafür qualifizierte Fachfirmen vor Ort zu finden und zu beauftragen.

# D Fazit und Handlungsempfehlungen

Überall dort, wo heute und kurzfristig noch keine kabelgebundene oder drahtlose Infrastruktur zur Verfügung steht, kann eine individuelle Richtfunkverbindung helfen, kurzfristig eine stabile und breitbandige Verbindung zu realisieren. Vor der Errichtung einer individuellen Richtfunkverbindung muss jedoch geklärt werden, ob eine solche an der konkreten Adresse überhaupt möglich und sinnvoll ist. Dazu sollten Sie sich folgende Fragen stellen:

## **Gibt es neben individuellem Richtfunk andere Optionen?**

Je nach Nutzungsabsicht und Rahmenbedingungen vor Ort kann eine leistungsfähige Internetverbindung auch über andere Technologien hergestellt werden, insbesondere über Mobilfunk (Fixed-Mobile-Access-Produkte) oder Satelliteninternet. Wo nicht ausreichend Signal für eine leistungsfähige Breitbandversorgung über Mobilfunkempfang vorhanden ist, kann geprüft werden, ob spezielle Außenantennen zur Verstärkung des Mobilfunksignals Abhilfe schaffen.

## **Kommt Richtfunk wirklich für mich infrage?**

Um zu entscheiden, ob eine individuelle Richtfunkverbindung realisierbar ist, muss geprüft werden, ob die Rahmenbedingungen für eine erfolgreiche Verbindung, wie z.B. Sichtverbindung zwischen Sender und Empfänger und eine möglichst freie Fresnelzone, im eigenen Umfeld realisierbar sind. Des Weiteren sollte geklärt werden, welche Anforderungen an die eigene Internetverbindung bestehen und ob diese durch eine individuelle Richtfunkstrecke abgedeckt werden können.

## **Wie bzw. wo kann ich Richtfunklösungen beziehen und wer kann mich dazu beraten?**

Ist die Entscheidung für eine Richtfunklösung gefallen, muss evaluiert werden, wie beim Richtfunkausbau vorgegangen werden soll und welche Ansprechpartner einbezogen werden sollen. Sofern regionale Anbieter mit eigener Infrastruktur zur Verfügung stehen, sollten diese für Planung und Bau der Richtfunkverbindung zu Rate gezogen werden. Ist die Errichtung einer eigenen Infrastruktur vorgesehen, sollten alle am Bau beteiligten Parteien, etwa ein lokaler Richtfunkanbieter, miteinbezogen werden.

# E Glossar

## Dämpfung

Die Ausbreitung eines Funksignals ist abhängig von der zu überbrückenden Entfernung, der verwendeten Frequenz, der geografischen Lage und von Wettereinflüssen. Durch derartige Faktoren kommt das vom Sender ausgestrahlte Signal gedämpft an der Empfangsstelle an. Diese zeitlich abhängige Größe wird bei der Funkfeldberechnung berücksichtigt und nennt sich Dämpfung. Durch Dämpfung bedingte Einschränkungen lassen sich durch eine automatische Sendeleistungsregelung oder eine adaptive Modulation in Grenzen ausgleichen.

---

## Endstelle

Die beiden Endpunkte eines Funkfeldes werden als Endstellen bezeichnet. Die erste Endstelle befindet sich am Zuführungspunkt des Breitbandsignals, die zweite am Nutzerstandort.

---

## Fresnelzone

Als Fresnelzone wird der räumliche Bereich zwischen zwei Richtfunkendstellen bezeichnet. Elektromagnetische Wellen können bei ihrer Ausbreitung im Raum gestört werden. Befinden sich Hindernisse in diesem Raum, insbesondere in der ersten Fresnelzone, kann es zu zusätzlichen Dämpfungen bei der Wellenausbreitung kommen. Die Höhe der Dämpfung wird in der Berechnung des Funkfeldes berücksichtigt. Hindernisse sind nicht nur die natürliche Geländeform, sondern auch Gebäude oder hohe Pflanzen.

---

## Modulation

Nutzsignale werden zur Übertragung zwischen zwei entfernten Orten auf ein Trägersignal moduliert, welches physikalisch geeignet ist, sinnvoll und effizient über das Kommunikationsmedium (für terrestrische Funkverbindungen ist das meist die Luft) übertragen werden zu können. Zusätzlich wird die Effizienz der übertragenen Nutzinformation erhöht. Es kann also mehr Informationsgehalt (eine höhere Bitrate/Übertragungsrate) übertragen werden. Bei einer Amplitudenmodulation beispielsweise wird die Amplitude der Trägerfrequenz durch das Nutzsignal variiert. Moderne Modulationsverfahren nutzen mehrere Parameter des Trägersignals, um die Nutzsignalinformation zu kodieren. Die QAM (Quadratur-Amplitudenmodulation) verwendet neben der Amplitude auch die Phase des Trägersignals, um das Nutzsignal zu transportieren.

---

## Relaisstelle

In der Funktechnik ist es häufig nicht möglich, eine direkte Funkverbindung zwischen zwei Endpunkten herzustellen. In diesen Fällen wird das Funksignal über Relaisstellen umgelenkt, um vorhandene Hindernisse wie beispielsweise Geländeerhöhungen oder Gebäude zu umgehen. Mithilfe von Relaisstellen lässt sich auch die Reichweite durch den Einsatz mehrere Funkfelder erhöhen. Unterschieden wird in aktive und passive Relaisstellen. Die aktive Relaisstelle empfängt das Signal, verstärkt dieses und sendet es in das nächste Funkfeld aus. Bei einer passiven Relaisstelle wird das Signal durch zwei direkt gekoppelte Antennen umgelenkt. Die Reichweite solcher Funkverbindungen kann daher eingeschränkt sein.

---

## Richtfunk

Richtfunk bezeichnet die drahtlose, gerichtete Übertragung von Signalen durch Radiowellen.

---

## Sichtverbindung (Line of Sight)

Der Begriff bedeutet in der Funktechnik, dass Sichtkontakt zwischen Sende- und Empfangseinrichtung besteht und dass die erste Fresnelzone frei von Hindernissen wie Bäumen, Hügeln oder Gebäuden ist.

---

## Fixed Wireless Access (FWA)

Dieser Begriff bezeichnet den Einsatz von Funksystemen zur Anschaltung von Endteilnehmern auf der letzten Teilstrecke zum Kunden, der sogenannten letzten Meile (Local Loop). FWA ist somit vergleichbar mit anderen Zugangstechnologien. Klassisch kann mit FWA sowohl eine Punkt-zu-Mehrpunkt als auch eine Punkt-zu-Punkt Architektur dargestellt werden.

## Impressum

### Herausgeber

Bundesministerium für Digitales  
und Verkehr (BMDV)  
Invalidenstraße 44  
10115 Berlin  
[www.bmdv.bund.de](http://www.bmdv.bund.de)

### Druck

Bundesministerium für Digitales  
und Verkehr (BMDV)  
Referat Z 21  
Hausdruckerei

### Redaktion und Gestaltung

Gigabitbüro des Bundes  
Kapelle-Ufer 4  
10117 Berlin  
[www.gigabitbuero.de](http://www.gigabitbuero.de)

### Bildnachweis

Titelbild: iStock Photo

### Stand

April 2023



Gigabitbüro des Bundes  
Kapelle-Ufer 4  
10117 Berlin

Tel.: +49 (0) 30 2636 5040  
Fax: +49 (0) 30 2636 5042  
kontakt@gigabitbuero.de

[www.gigabitbuero.de](http://www.gigabitbuero.de)