

SPEKTRUMSBEDARF DER BUNDESWEHR IM FREQUENZBEREICH 470-694 MHz

Gemeinsame Frequenzstudie von BDBOS und Bundeswehr zur Bedarfsanalyse im Frequenzband 470-694 MHz
Studie im Auftrag der Bundeswehr

Juli 2022

Studiendurchführung:

Goldmedia GmbH Strategy Consulting

Dr. André Wiegand
Oranienburger Str. 27
10117 Berlin
Tel. +49 30 246266 0
Fax +49 30 246266 66
andre.wiegand@Goldmedia.de
www.goldmedia.com

**Fraunhofer-Institut für
Integrierte Schaltungen IIS**

Abteilung Breitband und Rundfunk
Dipl.-Ing. Martin Speitel
Am Wolfsmantel 33
91058 Erlangen
Tel. +49 9131 776-4052
martin.speitel@iis.fraunhofer.de
www.iis.fraunhofer.de

Inhalt

1	Studienauftrag und Zielstellung	4
2	Aktuelle militärische Frequenzausstattung in Deutschland	6
2.1	Sicherheitspolitischer Auftrag der Bundeswehr	6
2.2	Aktuelle militärische Frequenzausstattung in Deutschland	7
2.2.1	Militärische Ausstattung mit Spektrum für breitbandige terrestrische Funkdienste mit großer Reichweite (< 1 GHz)	7
2.2.2	Militärische Ausstattung mit Spektrum für breitbandige terrestrische Funkdienste mit geringer Reichweite (2-3 GHz)	11
3	Digitalisierung landbasierter Operationen (D-LBO)	13
3.1	Einführung	13
3.2	Einsatz von D-LBO im Inland	15
3.2.1	Aufgaben	15
3.2.2	Einsatzgebiete	16
3.3	Anschaffungsbedarfe von D-LBO	17
3.4	Systemarchitektur von D-LBO	18
3.4.1	Mobile ad hoc Network (MANET)	18
3.4.2	Tactical Node und Tactical Client	19
4	Grundlagen der Modellierung	23
4.1	Nachrichtentechnische Prinzipien	24
4.1.1	Netzwerkplanung: Typische Zellgrößen in Abhängigkeit von der Bandfrequenz	24
4.1.2	Frequenz-Wiederholbarkeit	25
4.1.3	Realisierung mobiler taktischer Knoten aus zivilen Komponenten	26
4.1.4	Realisierung mobiler Terminals basierend auf zivilen Komponenten	27
4.1.5	Endgeräte im UHF-Band	28
4.1.6	Vor- und Nachteile des UHF-Bandes	31
4.1.7	Backbone, Backhaul	33
4.1.8	Verhalten bei Störungen und Interferenzen	35
4.2	Berechnung des Verkehrsmodells	36
4.2.1	Maximal zu erwartende Datenrate	37
4.2.2	Spektrale Bandbreite	38
4.3	Modellhafte Datenraten von D-LBO-Funkanwendungen	41
5	D-LBO-Verkehrsmodell: Einsatzszenarien und resultierende Frequenzbedarfe	42
5.1	Szenario „Backbone des D-LBO-Verbunds“	43
5.2	Szenario „Amtshilfe Hochwasser“	46
5.3	Szenario „Marschkolonne“	48
5.4	Zusammenfassung der szenarienabhängigen Frequenzbedarfe	49

6	Kooperative Frequenznutzungen mit anderen Funkdiensten... 50	
6.1	Regulatorischer Rahmen kooperativer Frequenznutzungen 50	
6.1.1	Bedarfsgerechte Bereitstellung an UHF-Spektrum für Rundfunkdienste.....	50
6.1.2	Ko-primäre Nutzung des Frequenzbereiches 470-694 MHz.....	52
6.1.3	Anforderungen an europäische Koordinierung und Harmonisierung	52
6.2	Mögliche kooperative Frequenznutzungen eines dem Militär zuge teilten UHF-Spektrums 53	
6.2.1	NATO Joint Civil/Military Frequency Agreement (NJFA).....	54
6.2.2	Programme Making and Special Events.....	56
6.2.3	Öffentlicher Mobilfunk	57
6.2.4	Digitalfunk BOS	59
7	Künftige Bedarfsperspektive im Frequenzbereich 470 MHz-694 MHz 62	
8	Verzeichnisse 67	
8.1	Abkürzungsverzeichnis 67	
8.2	Abbildungsverzeichnis 70	
8.3	Tabellenverzeichnis 71	
8.4	Quellenverzeichnis..... 72	

1 Studienauftrag und Zielstellung

Der Frequenzbereich 470-694 MHz wird primär für die terrestrische Verbreitung von digitalem Fernsehen (im Standard DVB-T2) genutzt. Darüber hinaus existiert eine Allgemeinzuteilung für drahtlose Mikrofone, In-Ear-Monitore und Übertragungsstrecken professioneller Veranstalter, welche die Frequenzteilbereiche 470-608 MHz und 614-694 MHz als Sekundärnutzer in Anspruch nehmen können, falls am Veranstaltungsort Frequenzen nicht durch Fernsehen genutzt werden. Diese Zuteilungen sind bis zum 31.12.2030 befristet.

Im Rahmen der Weltfunkkonferenz WRC-23 fällt die Vorentscheidung darüber, ob der primär für Rundfunkdienste zugeordnete Frequenzbereich 470-694 MHz im unteren UHF-Spektrum in der ITU-Region 1 ko-primär auch für mobile Telekommunikation genutzt werden kann. Sofern auf der Weltfunkkonferenz WRC-23 eine solche ko-primäre Nutzungsmöglichkeit beschlossen wird, könnte dieser Frequenzbereich ab 2031 potenziell auch für andere Nutzergruppen und deren Funkanwendungen geöffnet werden.

Besonders im Blick stehen hierbei Nutzergruppen, denen aktuell Spektrum für den Betrieb künftig erforderlicher breitbandiger Telekommunikationsdienste fehlt. Hierzu zählen in Deutschland die Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS) und die Bundeswehr (BW). Aus diesem Grund streben die Bundesanstalt für den Digitalfunk der Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BDBOS) und die National Radio Frequency Agency – Germany (NARFA DEU), zuständig für die militärische Frequenzverwaltung, im Rahmen der Diskussion über die zukünftige Nutzung des Frequenzbereiches 470-694 MHz eine internationale Öffnung des Bereiches für mobile Telekommunikationsdienste an.

Angestrebt wird daraufhin eine nationale Zuteilung von in Summe 160 MHz an UHF-Spektrum zur langfristigen Deckung der mobilen Telekommunikationsbedarfe von BOS und Militär. Gefordert werden hierbei 60 MHz für einen gemeinsamen Spektrumsbedarf an einheitlichen Breitbanddiensten von BOS und Militär.¹ Hierunter fallen Dienste, die bestimmte Nutzungen der Bundeswehr im Inland, insbesondere bei Katastrophenlagen im Rahmen der Amtshilfe, umfasst. Geplant ist, eine dedizierte BOS-Infrastruktur für hochverfügbare, krisenfeste, ad-hoc-fähige und bedarfsbezogen flächendeckende Breitband-Kommunikationsdienste (inkl. einsatzkritischer Sprachkommunikation) mittels standardisierter Übertragungsverfahren und Endgeräte zu schaffen.

Die Bundeswehr fordert für den gesonderten, rein militärischen Bedarf insgesamt 100 MHz an UHF-Spektrum, um eine breitbandige, resiliente, infrastrukturunabhängige Vernetzung landbasierter und bodennaher mobiler Systeme und Plattformen zu realisieren. Hier gilt es, für die Landesverteidigung und deren Beübung vernetzte Militärtechnik zu verwenden, mit der die Durchsetzungsfähigkeit der Streitkräfte (sowie die von Bündnispartnern auf dem Gebiet der Bundesrepublik) unter non-kooperativen Bedingungen gesichert werden kann.²

¹ vgl. BDBOS/NARFA DEU (2019): Strategie der BDBOS und Bundeswehr künftiger gemeinsamer Nutzung von Frequenzen zur Breitbandkommunikation. Version 1.0, 04.09.2019.

² vgl. ebd.

Ziel dieser Studie ist es, die künftigen Spektrumsbedarfe der Bundeswehr mit Hinblick auf den Frequenzbereich von 470-694 MHz herauszuarbeiten sowie gegebenenfalls mögliche Alternativen oder Strategien für die Deckung der Bedarfe zu ermitteln, zu prüfen und zu bewerten.

Hierfür werden auf Basis erster Einsatzkonzepte der geplanten breitbandigen militärischen Funkanwendungen Verkehrsmodelle entwickelt, die das zu erwartende Datenaufkommen pro Funkzelle in verschiedenen Szenarien abschätzen. Grundlage der Berechnung des daraus resultierenden Spektrumsbedarfes ist der aktuell modernste Kommunikationsstandard 5G. Auch wenn langfristig eine hiervon angepasste militärische Wellenform zum Einsatz kommen sollte, dienen heute real erzielbare Spektraleffizienzen als repräsentative Berechnungsgrundlage. Da bei der Berechnung der spektralen Effizienz ein real existierender Mobilfunkstandard zugrunde liegt, bleiben zudem etwaige Effizienzgewinne zukünftiger Standards unberücksichtigt.

Auf dieser Basis wird das hierfür erforderliche Frequenzspektrum unter Berücksichtigung der steigenden Spektrumsbedarfe für militärische Anwendungen (insbesondere durch das Programm Digitalisierung landbasierter Operationen), der spezifischen militärischen Spektrumsbedarfe für Sub-GHz-Spektrum und der Verteilung der Spektrumsbedarfe in der Fläche abgeleitet.

Zugleich wird dargestellt, unter welchen Möglichkeiten und Bedingungen eine Mitnutzung eines militärischen Frequenz-Teilbereiches durch weitere, sekundäre Funkdienste erfolgen kann.

Für die Studienerstellung kamen insbesondere folgende methodische Instrumente zum Einsatz:

- Freie Literaturrecherche
- Dokumente der Bundeswehr (Einstufung: offen)
- Strukturierte Fragebögen und Expertengespräche in mehreren Erhebungsrunden

Im Zeitraum April bis Juni 2022 standen den Studienautoren folgende Ansprechpartner freundlicherweise zur Verfügung:

- Bundesamt für Ausrüstung, Informationstechnik und Nutzung der Bundeswehr
- National Radio Frequency Agency – Germany
- Blackned GmbH
- Fraunhofer IIS

2 Aktuelle militärische Frequenz- ausstattung in Deutschland

2.1 Sicherheitspolitischer Auftrag der Bundeswehr

Im Weißbuch 2016 werden die sicherheitspolitischen Leitlinien der deutschen Sicherheitspolitik dargestellt.³ Besonders akzentuiert werden hierbei die Aufgaben der Landes- und Bündnisverteidigung im Rahmen von NATO und EU im Zeitalter hybrider Bedrohungen. Die verstärkte Bedeutung der Aufgabe, Deutschlands Souveränität und territoriale Integrität zu verteidigen und seine Bürgerinnen und Bürger zu schützen, verlangt von der Bundeswehr, ihre Einsatzorientierung auf diese Aufgabe zu erweitern, die hierzu notwendigen Vorbereitungen zu treffen und erforderliche organisatorische und technische Fähigkeiten zu stärken, um der zunehmenden Bedrohungslage begegnen und den eingegangenen Bündnisverpflichtungen gerecht werden zu können. Hieraus resultierende Verpflichtungen und Maßnahmen haben jüngst mit der Errichtung eines *Sondervermögens Bundeswehr*⁴ eine neue Dimension erreicht.

Zudem übernimmt die Bundeswehr in besonderen Fällen subsidiäre Unterstützungsleistungen im Inland. Etwa im Rahmen der Amtshilfe (Art. 35 Abs. 1 GG), insbesondere im Rahmen der Katastrophenhilfe (Art. 35 Abs. 2 Satz 2, Abs. 3 GG) und als letztes Mittel zur Bekämpfung eines staatlichen Notstandes (Art. 87a Abs. 4 GG in Verbindung mit Art. 91 Abs. 2 GG).

Der Digitalisierung der Streitkräfte kommt hierbei eine wesentliche Bedeutung zu. Die Bundeswehr als Bündnisarmee hat das Ziel, eine Ad-hoc-Führungsfähigkeit im gesamten Aufgabenspektrum der NATO sicherzustellen. Die Bundeswehr verfolgt den Anspruch einer autarken, durchgehenden Einsatz- und Operationsführung (*Seamless Information Sharing*) durch einen effektiven Verbund von Führung, Aufklärung, Wirkung und Unterstützung durch moderne, leistungsfähige und resiliente Führungs- und Informationssysteme.

Für einen robusten Fähigkeitsaufbau gilt es unter anderem, die Führungsfähigkeit durch die Digitalisierung der Kommunikationsmittel der mobilen Kräfte zügig zu gestalten. Die Bundeswehr wird zu diesem Zweck in den künftigen Haushaltsjahren 20,7 Mrd. Euro investieren.⁵

Für diese taktische Einsatzkommunikation kann sich die Bundeswehr nicht auf feste bzw. zivile Kommunikationsinfrastrukturen verlassen. Leistungsfähige militärische (verlegfähige und mobile) Kommunikationsmittel sind notwendig, die ad hoc genutzt werden können und über ein hinreichendes Maß an Sicherheit, Robustheit und Resilienz verfügen, um den taktischen Erfordernissen gerecht werden.

³ vgl. Bundesministerium der Verteidigung (2016): Weißbuch 2016. Zur Sicherheitspolitik und zur Zukunft der Bundeswehr.

⁴ vgl. Deutscher Bundestag (2022): Sondervermögen Bundeswehr [Bundeswehrondervermögensgesetz] beschlossen. hib 208/2022 vom 02.06.2022.

⁵ vgl. Deutscher Bundestag (2022): Entwurf eines Gesetzes zur Errichtung eines „Sondervermögens Bundeswehr“ (Bundeswehrondervermögensgesetz – BwSVermG). Beschlussempfehlung und Bericht des Haushaltsausschusses (8. Ausschuss) zu dem Gesetzentwurf der Bundesregierung – Drucksache 20/1409. Drucksache 20/2090 vom 01.06.2022.

Das bedeutet, die infrastrukturunabhängige Vernetzung landbasierter und bodennaher mobiler Systeme und Plattformen muss im Vergleich mit zivil-kommerziellen Systemen eine besonders hohe Störfestigkeit, geringe Aufklärbarkeit und höhere Sicherheitseinstufungen ermöglichen, um auch unter non-kooperativen Bedingungen gegenüber hybriden Bedrohungen funktionsfähig zu sein.

Zukünftig wird insbesondere die taktische Vernetzung im Rahmen von digitalisierten landbasierten Operationen (D-LBO) einen signifikanten Stellenwert für die Landstreitkräfte einnehmen (vgl. dazu Kapitel 3). Für digitale Lagebilder, Bild- und Videoübertragungen, die Sensorkommunikation und Drohnensteuerung, den Einsatz von echtzeitfähigen Battle-Management-Systemen sowie den Einsatz von *Sensor-to-Shooter*- und *Sensor-to-Effector*-Plattformen ist die Vernetzung mit breitbandigen zellularen Netzen essenziell.

Eine wesentliche Ressource für diese taktische breitbandige Vernetzung stellen terrestrische, militärisch nutzbare Funkfrequenzen dar, deren aktuelle Verfügbarkeit für das Militär nachfolgend dargestellt und analysiert wird.

2.2 Aktuelle militärische Frequenzausstattung in Deutschland

2.2.1 Militärische Ausstattung mit Spektrum für breitbandige terrestrische Funkdienste mit großer Reichweite (< 1 GHz)

Nach Einschätzung der Bundeswehr sind gesonderte, rein militärische Breitband-Bedarfe zur resilienten, infrastrukturunabhängigen Vernetzung von landbasierten und bodennahen mobilen Systemen, welche gute Ausbreitungsbedingungen benötigen, vorrangig mit UHF-Spektrum oberhalb von 470 MHz und unterhalb von 1 GHz zu decken.

UHF-Spektrum unterhalb von 1 GHz wird dabei als notwendig erachtet, um eine hinreichend leistungsfähige Konnektivität für landbasierte Operationen, wie z. B. die Luftverteidigung vom Boden, mit hohen Anforderungen an Datenübertragungsvolumina, Echtzeitfähigkeit und Störresistenz bereitzustellen und hierfür eine hinreichende Durchdringung von typischen mitteleuropäischen Räumen mit hoher natürlicher Dämpfung der Wellenausbreitung (Mittelgebirgslagen, Wälder) zu ermöglichen.

Aufgrund ihrer geringen Dämpfung reichen UHF-Frequenzen im Vergleich zu höheren Frequenzen mit gleicher Sendeleistung weiter in die Fläche hinein. Aufgrund ihrer quasioptischen Ausbreitungsbedingungen begrenzt (abgesehen von der Sendeleistung) vor allem die Erdkrümmung ihre Reichweite.⁶ In ihrer Verbreitung werden sie nur gering durch topografische Hindernisse oder Gebäude abgeschattet. Zudem haben sie die Eigenschaft, vergleichsweise tief in Gebäude einzudringen, sodass sie auch innerhalb von Gebäuden, Kellern, Gräben und Kanälen weitgehend störungsfrei genutzt werden können.

⁶ Der Berliner Fernsehturm, das höchste Bauwerk Deutschlands, hat auf Basis der UHF-Ausbreitungseigenschaften eine Reichweite von näherungsweise 56 km.

Genau wegen dieser Eigenschaften wurden große Teile des Spektrums über viele Jahrzehnte primär für analoge Fernsehübertragungen genutzt, da dies eine der wenigen existierenden Funkdienste war, die ein solches Profil an Eigenschaften, insbesondere die Fähigkeit zur breitbandigen großflächigen Übertragung, benötigten.

Mit der Digitalisierung der Fernsehübertragung konnte der Bandbreitenbedarf für TV-Übertragungen erheblich gesenkt werden. Infolgedessen wurde Spektrum, das vormals für den Rundfunk zugeteilt war, ab 2010 sukzessive umgewidmet und dem öffentlichen Mobilfunk zugeteilt, insbesondere, um auf Basis des LTE-Funkstandards die Breitbandversorgung im ländlichen Raum mit Mobilfunk zu verbessern.

In etwa zur gleichen Zeit entfielen auch die letzten militärischen Spektrumsanteile im oberen Sub-GHz-UHF-Band, dies entspricht dem C-Band in der Nato-Bezeichnung (500-1.000 MHz). Bis Mitte der 2000-er Jahre verblieben der Bundeswehr noch 20 MHz an C-Band-Spektrum im Frequenzteilbereich von 880-890 MHz und 925-935 MHz. Aufgrund der damaligen Sicherheitslage⁷ wurde jedoch entschieden, auch diese Frequenzbänder ab 2006 zugunsten öffentlicher, kommerzieller Mobilfunknetze umzuwidmen, um die Mobilfunkverfügbarkeit in der Fläche weiter zu verbessern.⁸

Nach Wegfall des militärischen Spektrums im C-Band ist der Bundeswehr zur breitbandigen Kommunikation **lediglich der UHF-Frequenzbereich von 230-399,9 MHz verblieben**. Unterhalb von 230 MHz ist aufgrund der bestehenden Frequenznutzungen kein UHF-Spektrum in hinreichender Bandbreite verfügbar, um breitbandige Anwendungen zu realisieren.

Im NATO-weit voll harmonisierten Frequenzbereich 230-399,9 MHz (entspricht größtenteils dem B-Band) befinden sich zahlreiche, vorrangig militärische Funkanwendungen. Neben der terrestrischen Nutzung wird dieser Frequenzbereich zudem auch für die militärische Satellitenkommunikation genutzt. Auch einige sicherheitskritische zivile Funkanwendungen befinden sich in diesem Frequenzbereich, unter anderem die Luftraumüberwachung und der Digitalfunk BOS. Somit verbleiben von rund 170 MHz Spektrum im Frequenzbereich 230-399,9 MHz letztlich effektiv nur 135,9 MHz für terrestrische militärische Funkanwendungen als uneingeschränkt nutzbar.

Sämtliche Teilstreitkräfte der Bundeswehr operieren harmonisiert in diesem Frequenzbereich, ebenso die alliierten Streitkräfte der NATO. Damit ist der Frequenzbereich 230-399,9 MHz, der auch als „NATO-Band“ bezeichnet wird, grenzübergreifend (im Einflussgebiet der NATO) bereits sehr stark mit Funkanwendungen ausgelastet.⁹

Nicht zuletzt ist es den zahlreichen NATO-weit harmonisierten Funkanwendungen sowie den besonderen Anforderungen an taktische Kommunikation (hohe Störfestigkeit, geringe Aufklärbarkeit durch Verfahren wie Frequenzhopping etc.) geschuldet, dass sich weitere – insbesondere breitbandige – militärische Funkanwendungen in einem so eng gerasterten Frequenzbereich nicht mehr zusätzlich ansiedeln lassen.

⁷ Damals wurde diese Entscheidung durch das BMVg akzeptiert, jedoch auch deutlich darauf verwiesen, dass bei sich wieder verschärfender Sicherheitslage eine Neubewertung der frequenzpolitischen Entscheidung, sämtliches C-Band-Spektrum der Bundeswehr zu entziehen, erforderlich sein wird.

⁸ „E-Netz-Anbieter“ bekamen durch die Maßnahmen erstmals Zugriff auf Spektrum unterhalb von 1 GHz und damit auf UHF-Frequenzen mit besonders günstigen Ausbreitungseigenschaften für die Flächen- und Gebäudeversorgung.

⁹ Quelle: Expertengespräch mit der National Radio Frequency Agency – Germany (NARFA DEU) am 31.05.2022

Es würde sich für breitbandige Kommunikation der militärische Frequenzteilbereich 380-399,9 MHz grundsätzlich eignen, aber aufgrund einer Vereinbarung zwischen dem BMI und BMVg ist bis Ende 2032 das Spektrum 380 MHz bis 385 MHz (Uplink) und 390-395 MHz (Downlink) dem Digitalfunk BOS (TETRA) zugeteilt und steht für militärische Anwendungen nicht zur Verfügung.

Die Bundeswehr nutzt im Rahmen des Digitalfunks BOS lediglich die Frequenzteilbereiche 385-386,5 MHz und 395-396,5 MHz für ein Sprachfunknetz für militärpolizeiliche Aufgaben (Feldjäger) und zur Zusammenarbeit mit BOS-Behörden im Rahmen der nationalen Krisen- und Risikovorsorge bei subsidiären Unterstützungsleistungen. Damit stehen innerhalb dieses 20-MHz-Blocks mindestens bis zum Jahr 2033 13 MHz für eine gesonderte militärische Nutzung nicht zur Verfügung.

Die Bundeswehr besteht auf eine zukünftige Eigennutzung dieses Frequenzteilbereichs, da die militärischen Frequenzbänder unterhalb 380 MHz bereits stark ausgelastet und aufgrund ihrer engen Kanalarasterungen kaum für Breitbandanwendungen tauglich sind.

Ob der Frequenzteilbereich 380-399,9 MHz jedoch bereits 2033 vollständig an die Bundeswehr zurückfallen kann, ist unklar. Im Zuge dieses Transformationsprozesses ist eher von einer verzögerten und schrittweisen Rückübertragung des Spektrums an die Bundeswehr auszugehen. Mitte der 2030-er Jahre könnte dieser 20-MHz-Frequenzteilbereich jedoch zumindest regional zur Unterstützung breitbandiger militärischer Funkanwendungen eingesetzt werden. Aufgrund der gemeinsamen Bandlage mit anderen sicherheitsrelevanten Funkdiensten stünde dieser Frequenzteilbereich bis zur vollständigen Räumung des Digitalfunks BOS nur im Rahmen von Übungen und ggf. geplanten Manövern zur Verfügung, nicht jedoch im Rahmen eines Spannungs- oder Verteidigungsfalls.

Tab. 1: Übersicht über den Frequenzbereich von 230-399,9 MHz (B-Band)

von (MHz)	bis (MHz)	Spektrum (MHz)	Frequenznutzung
230	235	5	Militärische Funkanwendungen
235	242,95	7,95	Militärische Funkanwendungen
242,95	243,05	0,1	Such- und Rettungsdienst
243,05	272	28,95	Militärische Funkanwendungen
272	273	1	Weltraumfernwirkfunk
273	312	39	Militärische Funkanwendungen
312	315	3	Militärischer Mobilfunkdienst über Satelliten
315	322	7	Militärische Funkanwendungen
322	328,6	6,6	Radioastronomie
328,6	335,4	6,8	Flugnavigation (ILS)
335,4	380	44,6	Militärische Funkanwendungen
380	386,5	6,5	Digitalfunk BOS
387	390	3	Militärischer Mobilfunkdienst über Satelliten
390	396,5	6,5	Digitalfunk BOS
396,5	399,9	3,4	Militärische Funkanwendungen

Quelle: Goldmedia nach BNetzA (2022): Frequenzplan

Anmerkung: Vereinfachte Darstellung, ggf. weitere Nebennutzungen.

Aktuell besteht als weitere UHF-Spektrumsressource im 700-MHz-Band in einigen Frequenzteilbereichen (698-703 MHz; 753-758 MHz; 733-736 MHz und 788-791 MHz) eine gemeinsame Spektrumszuteilung an BOS/Bundeswehr.

Aufgrund nicht vorhandener kommerziell verfügbarer BOS-Endgeräte kommen diese Frequenzteilbereiche von BOS/Bundeswehr im 700-MHz-Band aktuell jedoch bei den BOS-Behörden nicht zum Einsatz.

Eine militärische Nutzung für künftige militärische Breitbandanwendungen (vgl. Kapitel 3) kommt in diesen Frequenzteilbereichen jedoch aufgrund der begrenzten Bandbreite nicht in Frage: Wie die Bedarfsmodellierung im weiteren Verlauf der Studie (vgl. Kapitel 5) zeigt, können die für die künftigen militärischen Breitbandanwendungen erforderlichen Datenraten (vgl. Kapitel 4.3) mit der im 700-MHz-Band zugeteilten Bandbreite (pro Block max. 5 MHz) nicht mit der notwendigen Störfestigkeit erzielt werden (vgl. Kapitel 5.4).¹⁰

Um zusätzliche Frequenzen im unteren UHF-Bereich nutzen zu können, besteht für die Bundeswehr aktuell nur die Möglichkeit, im Frequenzbereich 470 MHz-694 MHz einzelne Frequenzen unter Koordinierung der Bundesnetzagentur (BNetzA) zu nutzen. Diese fallweise Nutzung wird derzeit insbesondere für Gaststreitkräfte im Rahmen des

¹⁰ Die modellierten Frequenzbedarfe innerhalb des Programms Digitalisierung landbasierter Operationen liegen für den Backbone des D-LBO-Verbunds zwischen 44,4 MHz und 397,3 MHz. Lediglich beim Marsch liegt der Mindestbedarf mit 5,1 MHz nur geringfügig über der maximal im 700-MHz-Band vorhandenen Blockgröße.

Host Nation Supports notwendig, da anderenfalls nicht hinreichend militärische Frequenzressourcen zur Verfügung stünden.¹¹

Damit ist die Bundeswehr in Konsequenz derzeit nicht hinreichend mit militärisch nutzbarem UHF-Spektrum ausgestattet, welches flächendeckend breitbandige Funkanwendungen mit für die Aufgabenerfüllung notwendigen Datenraten ermöglichen würde. Hierbei ist zudem zu beachten, dass aufgrund der besonderen Anforderungen militärischer Funksysteme an Redundanz, Störfestigkeit unter ungünstigen Bedingungen (z. B. geringe Antennenhöhen mit niedrigem Wirkungsgrad) im Vergleich zum öffentlichen Mobilfunk ein grundsätzlich deutlich erhöhter Spektrumsbedarf für die gleiche Datenrate besteht (vgl. dazu Kapitel 4).

2.2.2 Militärische Ausstattung mit Spektrum für breitbandige terrestrische Funkdienste mit geringer Reichweite (2-3 GHz)

Oberhalb von 2 GHz und unterhalb von 3 GHz stehen im E-Band¹² grundsätzlich mehrere UHF-Frequenzbereiche für breitbandige militärische Anwendungen zur Verfügung. Diesen kommt aufgrund ihrer im Vergleich geringeren Reichweite eine besondere Bedeutung für die künftige taktische Kommunikation zu: Diese sind für die lokalen, breitbandigen Funkzellen der Zugangsnetze der taktischen Knoten des D-LBO-Verbunds (vgl. Kapitel 3) besonders geeignet, da ihre Signale aufgrund ihrer höheren Dämpfung kaum über das Gefechtsfeld hinausreichen und somit durch Kontrahenten schlechter gestört oder belauscht werden können.

Tab. 2: Übersicht über den Frequenzbereich von 2-3 GHz (E-Band)

von (MHz)	bis (MHz)	Spektrum (MHz)	Frequenznutzung
2200	2290	90	Weltraumfernwirkfunkdienst
2290	2300	10	Weltraumforschungsfunkdienst
2320	2400	80	Militärische Funkanwendungen, BOS, Amateurfunk, Reportagefunk, drahtlose Kameras
2400	2450	50	Militärische Funkanwendungen, WLAN, SRD, Bewegungsmelder, Betriebsfunk, Reportagefunk, Amateurfunk (inkl. Satelliten), Funkanwendungen zu Identifizierungszwecken, Funkdemonstrationen etc.
2450	2483,5	33,5	Militärische Funkanwendungen, WLAN, SRD, Bewegungsmelder, Betriebsfunk, Reportagefunk), Funkanwendungen zu Identifizierungszwecken, Funkdemonstrationen etc.
2700	2900	200	Flugnavigationfunkdienst
2900	3100	200	Schiffsradar

Quelle: Goldmedia nach BNetzA (2022): Frequenzplan

Anmerkung: Vereinfachte Darstellung, ggf. weitere Nebennutzungen.

¹¹ vgl. BNetzA (2021): Frequenzplan. Frequenzplan-Eintrag 249003.

¹² Neben der aktuellen NATO-Band-Bezeichnung (E-Band) für den Frequenzbereich 2-3 GHz ist zum Teil auch noch die historische NATO-Band-Bezeichnung „S-Band“ im militärischen Sprachgebrauch geläufig. Diese ist jedoch weniger spezifisch und umfasst einen größeren Frequenzbereich (1.550-3.900 MHz).

Im E-Band sind mehrere Frequenzbereiche militärisch nutzbar, allerdings ist keines dieser Frequenzbereiche exklusiv für eine militärische Nutzung zugeteilt. Insbesondere der Bereich 2.400-2.483,5 MHz ist stark beansprucht, da dies der bedeutendste Frequenzbereich für WLAN-Konnektivität darstellt. Für eine taktische Nutzung eignet sich daher vor allem der Frequenzbereich 2.320-2.400 MHz. Mit Blick auf die vielfältigen Funkdienste, die in diesem Bereich existieren können, empfiehlt sich daher künftig das regulatorische Modell des *Licensed Shared Access Regime*, das es grundsätzlich ermöglicht, verschiedenen Nutzern die parallele Nutzung des gleichen Spektrums zu ermöglichen und hierbei verschiedene Instrumente bereithält, räumlich bestimmten Diensten Vorrang einzuräumen und hierbei einen definierten Quality-of-Service zu garantieren.¹³ Die nachfolgende Tabelle fasst die wesentlichen, im Studienkontext relevanten Frequenzteilbereiche und deren (breitbandige) militärische Anwendungsmöglichkeiten zusammen und bewertet diese kurz.

Tab. 3: Auswahl im Studienkontext relevanter Frequenzteilbereiche und deren militärische Anwendungen

Frequenzteilbereich (MHz)	NATO-Band-Bezeichnung	Beschreibung/Anwendungen	Bewertung
Bis 30	A-Band	Kurzwellen (VHF)	Grundsätzlich nicht für Breitbandkommunikation geeignet.
30-88	A-Band	Taktischer Führungsfunk, mit Frequenzhopping gesichert	Bereits durch bestehende militärische Anwendungen in enger Kanalarasterung belegt.
225-399,9	B-Band (sowie oberes A-Band)	Harmonisiertes NATO-UHF-Band für Funkanwendungen, u. a. Führungs-, Soldaten-, und Gruppenfunk	NATO-weit harmonisierter UHF-Frequenzbereich für zahlreiche militärische Anwendungen.
470-694	C-Band	Primärzuteilung für Rundfunkdienste (Fernsehen), Sekundärnutzung u. a. durch Veranstaltungsfunk	Perspektivisch: Breitbandige BMS-Systeme und D-LBO-Core-Kommunikation (Taktische Knoten untereinander und Backbone-Anbindung).
698-703; 733-736; 753-758; 788-791	C-Band	Frequenzteilbereiche für digitale Kommunikation von BDBOS/BW	Spektrum von max. 2x5-MHz für militärische Einzelnutzungen. Für den D-LBO-Verbund ungenügend.
Näher zu bestimmendes standardisiertes LTE-Band	C-Band / E-Band	Militärische zellulare Netze (verlegbar)	Zellulare Netze auf Basis kommerzieller Produkte (4G/5G).
2.320-2.400	E-Band, bzw. „S-Band“	Militärische zellulare Netze (mobil)	Taktische Access-Netze, durch mobile taktische Knoten im D-LBO-Verbund.

Quelle: Goldmedia (2022)

¹³ So hat u. a. Portugal diesen Frequenzteilbereich unter einem LSA-Regime für den Mobilfunk geöffnet, vgl. auch CEPT (2014): ECC Decision (14)02. Harmonised technical and regulatory conditions for the use of the band 2300-2400 MHz for Mobile/Fixed Communications Networks (MFCN).

3 Digitalisierung landbasierter Operationen (D-LBO)

3.1 Einführung

Militärische Einsätze haben sich durch technologische Entwicklungen stark verändert. Die Erstananschaffung der stationären, verlegefähigen und mobilen Kommunikationsmittel der Bundeswehr reicht bis in die 1980-er Jahren zurück. Um den zukünftigen Anforderungen gerecht zu werden, müssen diese Kommunikationsmittel dringend modernisiert werden.

Zudem müssen bereits bestehende Systeme der elektronischen Kriegsführung wie Spektrumsüberwachung, Funkortung oder Drohnenaufklärung ausgebaut und die Vermittlung der Information durchgängig digitalisiert werden.

Die hiermit verbundenen Beschaffungsmaßnahmen werden seit 2018 im Programm **Digitalisierung landbasierter Operationen (D-LBO)** gebündelt, welches die ehemaligen Projekte *Mobile Taktische Kommunikation* (MoTaKo) und *Mobile Taktische Informationsverarbeitung* (MoTIV Land) zusammenführt.¹⁴

Bei der Digitalisierung landbasierter Operationen handelt es sich um die Schaffung eines übergreifenden, integrierten, verschlüsselten Kommunikationssystems, das zahlreiche bisherige Kommunikationsmittel ersetzt und zugleich um zukunftsweisende digitale Anwendungen erweitert. Zunächst wird das System im Heer eingeführt, mittelfristig werden dann die weiteren Teilstreitkräfte sowie sämtliche militärische Organisationsbereiche einbezogen.

Im Fokus liegt dabei eine bis zur Vertraulichkeitsstufe „geheim“ befähigte Kommunikationsinfrastruktur, welche von der Verbandsebene abwärts an benutzt werden soll und damit die Führungsebenen Bataillon, Kompanie, Zug, Gruppe sowie einzelne Fahrzeuge sowie Soldatinnen und Soldaten umfasst. Die einzelnen Systeme sollen wiederum untereinander vernetzt werden und die querschnittliche Verfügbarkeit taktischer Informationsdienste ermöglichen.

¹⁴ vgl. BMVg (2020): Zweiter Bericht zur Digitalen Transformation des Geschäftsbereichs des Bundesministeriums der Verteidigung. Online unter: <https://www.bmvg.de/resource/blob/258260/cc60ba7e2570976df105baf97080fe45/20200312-download-zweiter-bericht-digitale-transformation-data.pdf> [zuletzt abgerufen am 20.05.2022].

Das D-LBO sieht acht Hauptfunktionen (HF) vor, welche durch digitale Informationsdienste realisiert werden sollen und erstmalig in der *Fähigkeitslücke und Funktionalen Forderung der Mobilen Taktischen Informationsverarbeitung Land* (FFF MoTIV Land) definiert wurden:

- HF 1: Eigenposition
- HF 2: Lagebild
- HF 3: Notfallmeldung
- HF 4: Taktische Führung
- HF 5: Multimedia
- HF 6: Fachliche Führung
- HF 7: Waffenführung im Verbund (*Sensor-to-Shooter*)
- HF 8: Vernetzung von Führungseinrichtungen¹⁵

Mit einer Ziellaufzeit von 15 Jahren und dem Ziel, einen einzelnen Vertragspartner zu finden, wurde 2021 der Ausschreibungsprozess für **Führungsfunkgeräte** gestartet. Die ausgeschriebenen Funkgeräte¹⁶ für die erstmalige Implementierung der digitalen landbasierten Operationen (D-LBO) sollen über eine einheitliche netzwerkfähige Wellenform im UHF-Spektrum von 225-400 MHz verfügen und Sprache, Positionsinformationen und IP-Daten parallel übertragen, ohne Datenverluste zu erleiden. Um von Skaleneffekten zu profitieren, können die Funkgeräte in einem breiten Funkspektrum für vielseitige Anwendungen eingesetzt werden.¹⁷

Die Panzergrenadierbrigade 37 Freistaat Sachsen erprobt seit 2021 als erste Brigade neuartige **Battle-Management-Systeme** (u. a. *SitaWare*) und wird als erste ausgerüstete Brigade Teil der NATO-Eingreiftruppe Very High Readiness Joint Task Force Land [VJTF(L)2023]¹⁸. Zunächst kommen dort jedoch noch die eingeführten SEM-Sprechfunkgeräte zum Einsatz, die lediglich begrenzt zur schmalbandigen digitalen Datenübertragung befähigt sind.¹⁹

¹⁵ vgl. Blackned (2018): Systemkonzept Digitalisierung landbasierter Operationen (D-LBO)

¹⁶ vgl. Öffentliche Ausschreibungen Deutschland (2021): Lieferung von Funkgeräten für den Führungsfunk. Online unter: https://ausschreibungen-deutschland.de/822080_Lieferung_von_Funkgeraeten_fuer_den_Fuehrungsfunk_sowie_ggf_Erbringung_verschiedener_2021_Koblenz [zuletzt abgerufen am 20.05.2022].

¹⁷ vgl. Soldat-und-Technik (2022): D-LBO: Entscheidung beim UHF-Soldatenfunk gefallen? [zuletzt abgerufen am 20.05.2022].

¹⁸ vgl. BWI: Bundeswehr stellt neues Battle-Management-System vor. Online unter: <https://www.bwi.de/news-blog/news/artikel/bundeswehr-stellt-neues-battle-management-system-vor> [zuletzt abgerufen am 29.06.2022].

¹⁹ vgl. Esut (2020): Spektrumsüberwachung und Funkortung mit UMS400. Online unter: <https://esut.de/2022/04/meldungen/33651/spektrumueberwachung-und-funkortung-mit-ums400/> [zuletzt abgerufen am 20.05.2022].

Grundsätzlich soll eine Vernetzung unterschiedlicher Waffensysteme und Plattformen zu einem Gesamtverbund stattfinden. Einen zentralen Punkt nimmt dabei **der Infanterist der Zukunft (IdZ) sowie die Soldat:innenausstattung** ein. Dieses Programm zur Modernisierung der Infanterie wurde 2022 zum ersten Mal im Kosovo getestet. Seit 2012 gilt der aktuelle Stand *Gladius* (IdZ-2), welcher ab der nächsten Stufe 3.0 D-LBO-konform ausgestattet werden soll und den Zusatz *Erweitertes System* trägt (IdZ-ES).²⁰

Auch ist beabsichtigt, das Panzerfuhrwerk der Bundeswehr von Grund auf zu erneuern und D-LBO-konform auszustatten. So wollen Deutschland und Frankreich kooperativ bis zum Jahr 2035 ihre bisherigen Panzer Leopard 2 und Leclerc durch das neue Landkampfsystem Main Ground Combat System (MGCS) ersetzen.²¹ Beabsichtigt wurde ebenfalls die Kooperation zwischen der deutschen und der niederländischen Armee unter dem Programm *Tactical Edge Networking* (TEN).²²

3.2 Einsatz von D-LBO im Inland

Die Bundeswehr, insbesondere das Heer, muss in der Lage sein, D-LBO als grundlegendes taktisches Kommunikationssystem bei allen Einsatzszenarien der Bundeswehr nutzen zu können.

3.2.1 Aufgaben

Die Bundeswehr erfüllt mannigfaltige Aufgaben, sowohl im Spannungs- bzw. im Verteidigungsfall als auch in Friedenszeiten. Die folgende Aufzählung umfasst exemplarische Aufgaben, bei denen die Bundeswehr für die Erfüllung ihres Auftrages auf D-LBO angewiesen ist:

- auf Liegenschaften der Bundeswehr, insbesondere Kasernengeländen und Truppenübungsplätzen zur Fähigkeitserhaltung (Grundbetrieb),
- zu Ausbildungs- und Übungszwecken,
- bei Manövern, Großübungen und internationalen Krisenmanagementübungen,
- zur Bewachung/Sicherung von besonders gefährdeten oder sicherheitsempfindlichen Liegenschaften/Objekten/Personen,
- für subsidiäre Unterstützungsleistungen (Amtshilfe),
- zur Nationale Krisenvorsorge (NatKV),
- zur Aufgabenwahrnehmung im Heimatschutz,
- für Dauereinsatzaufgaben wie Sicherheit im Luftraum (SiLuRa), Marschsicherung (MarSi), Territoriale Flugkörperabwehr (TerrFKAbw) sowie Search and Rescue (SAR),
- zur Bewältigung von besonderen Lagen mit erheblichem Sicherheitsbezug,
- für die Sensorkommunikation im Gefecht,

²⁰ vgl. Bundeswehr-Journal (2020): Funkgeraetefamilie-SEM-8090-bewaehrte-Huelle-neuer-Kern. Online unter: <https://www.bundeswehr-journal.de/2021/funkgeraetefamilie-sem-8090-bewaehrte-huelle-neuer-kern/> [zuletzt abgerufen am 20.05.2022].

²¹ vgl. BMVG (2021): 14. Bericht des Bundesministeriums der Verteidigung zu Rüstungsangelegenheiten. Online unter: <https://www.bmvg.de/re-source/blob/5325320/1f15343d355c6d77c332b06f27ebd025/download-14-ruestungsbericht-data.pdf> [zuletzt abgerufen am 20.05.2022].

²² vgl. Soldat-und-Technik (2021): Deutsch-Niederländisches TEN-Programm. Online unter: <https://soldat-und-technik.de/2021/04/fuehrung-kommunikation/26690/deutsch-niederlaendisches-ten-programm-keine-gemeinsame-beschaffung-von-funkgeraeten/> [zuletzt aufgerufen am 20.05.2022].

- zur Steuerung von Drohnen (Uplink), inkl. der rückwärtigen Signalübertragung von Überwachungsdrohnen (Downlink),
- für Truppenverlegungen auf dem Gebiet der Bundesrepublik (Marsch),
- für den Transit von Bündnispartnern auf dem Gebiet der Bundesrepublik (Host Nation Support),
- zur Unterstützung bei Auslandseinsätzen,
- bei Evakuierungsoperationen,
- bei einsatzgleichen Verpflichtungen (EGV),
- im Spannungs- und Verteidigungsfall,
- zur Landes- und Bündnisverteidigung.

Im Studienverlauf werden aus diesen Aufgaben der Bundeswehr spezifische, relevante Einsatzszenarien modelliert, deren Bandbreitenbedarfe im Anschluss operationalisiert und quantifiziert werden (vgl. Kapitel 5).

3.2.2 Einsatzgebiete

In Friedenszeiten wird durch den Einsatz von D-LBO vor allem auf **Truppenübungsplätzen (TrÜbPI)** ein erheblicher Bandbreitenbedarf entstehen, da hier unter realitätsnahen Bedingungen sämtliche Fähigkeiten des D-LBO-Verbunds gleichzeitig zum Einsatz kommen, und dies auf sehr verdichtetem Raum. Das UHF-Band wird hier insbesondere für die rückwärtige Datenübertragung im Backbone (Tactical Wide-Area-Network/TaWAN) zu den jeweiligen Leitständen zum Einsatz kommen.

In Deutschland existieren aktuell 16 Truppenübungsplätze des Heeres.²³ Diese Truppenübungsplätze haben eine Durchschnittsgröße von 127 km². Größter Truppenübungsplatz ist der TrÜbPI Bergen in der Lüneburger Heide (Niedersachsen) mit einer Fläche von 284 km². Die Gesamtfläche der Truppenübungsplätze umfasst rd. 2.150 km², was rd. 0,6 Prozent der Gesamtfläche Deutschlands entspricht. Die hier eingesetzten Funkzellen werden jedoch deutlich über die Grenzen der Truppenübungsplätze hinausreichen.

Darüber hinaus wird auf **Geländen der über 300 Kasernenstandorte und Standortübungsplätze** ein großflächigerer Breitbandfunk für Ausbildung und Wartung und zur Standortvernetzung zum Einsatz kommen. Solange für die rückwärtige Datenübertragung im Backbone (TaWAN) auch auf Kasernengeländen UHF-Spektrum zum Einsatz kommt, würde sich die militärische Fläche, für die dauerhaft UHF-Spektrum benötigt wird, auf 2.630 km² zzgl. der über das Gelände hinausreichenden Flächenradien der Funkzellen erhöhen.²⁴

²³ vgl. Wikipedia: Truppenübungsplatz. Online unter: <https://de.wikipedia.org/wiki/Truppen%C3%BCbungsplatz> [zuletzt abgerufen am 29.06.2022].

²⁴ vgl. Bundeswehr: Standorte der Bundeswehr. Online unter: <https://www.bundeswehr.de/de/organisation/standorte-bundeswehr> [zuletzt abgerufen am 29.06.2022].

Hinzu kommt, dass auch im Rahmen von **Truppentransporten** auf den innerdeutschen Marschrouten breitbandige Datenkommunikation nicht nur zwischen den Fahrzeugen der Kolonne, sondern auch zu Leitständen zum Einsatz kommen wird. Diese Marschrouten befinden sich überwiegend auf zivilen Verkehrsstraßen, z. B. Bundesstraßen. Diese Truppentransporte lassen sich räumlich nicht lokal eingrenzen und sind zeitlich kaum planbar, da auch spontane Truppenverlegungen jederzeit möglich sind.

Auch kurzfristig sich ergebende **zivile Katastrophenlagen** und eine hier erforderliche Amtshilfe der Bundeswehr führt zukünftig zu mehr Spektrumsbedarf in der Fläche.

3.3 Anschaffungsbedarfe von D-LBO

Im Rahmen der Digitalisierung landbasierter Operationen müssen in den künftigen Haushaltsjahren zahlreiche Vorhaben realisiert werden. Hierfür sind im Gesetz zur Errichtung eines *Sondervermögens Bundeswehr* (BwSVermG) Haushaltsmittel in Höhe von 20.742 Mio. Euro vorgesehen. Veranschlagt sind allein im Sondervermögen Bundeswehr die Vorhaben:

- Digitalisierung landbasierter Operationen (D-LBO-Basic)
- D-LBO (Battle Management System, Gefechtsstände, Funkgeräte)
- Taktisches Wide Area Network (TAWAN), erster Anteil
- Rechenzentrumsverbund
- Satellitenkommunikation (SATCOMBw) Stufe 2 und 3
- German Mission Network 1 (Vernetzung der BW verlegefähig)
- German Mission Network 2 (Erhalt der Führungsfähigkeit Marine)
- Funkgeräte PRC-117G²⁵

Die umfangreiche Beschaffung erfolgt über einen mehrjährigen Zeitraum als gestaffelter Fähigkeitsaufbau in acht geplanten Beschaffungsrunden (Kräftedispositiven). Die heeresweite Ausstattung soll bis spätestens 2035 abgeschlossen sein.

Ein wesentliches Systemelement von D-LBO sind die sogenannten *Tactical Nodes* (Fahrzeuge, die als taktische Netzknoten die Anbindung von Geräten an das Backbone realisieren) und *Tactical Clients* (z. B. Endgeräte der Soldatinnen und Soldaten oder Sensorik, etwa von Drohnen) (vgl. Kapitel 3.4.2). Nach vollständiger Ausrüstung des Heeres wird es ungefähr 20.000 Tactical Nodes im Heer der Bundeswehr geben. Dies entspricht etwa 20-100 Tactical Nodes pro Einsatzverband (Bataillon). In der ersten Beschaffungsrunde (KD 1) werden rd. 150 Tactical Nodes und rd. 1.500 Tactical Clients beschafft.

D-LBO-fähige Endgeräte, sogenannte Tactical Clients, müssen künftig sowohl für einen Großteil der Fahrzeuge des Heeres als auch für die rd. 62.000 Soldatinnen und Soldaten des Heeres²⁶ beschafft werden. Zwingend ist die Ausstattung für die rd. 30 Prozent dieser Soldatinnen und Soldaten, die aktuell in sogenannten Battle Groups (NATO-Verteidigungstruppen) eingebunden sind.

²⁵ vgl. Deutscher Bundestag (2022): Entwurf eines Gesetzes zur Errichtung eines „Sondervermögens Bundeswehr“ (Bundeswehrsondervermögensgesetz – BwSVermG). Beschlussempfehlung und Bericht des Haushaltsausschusses (8. Ausschuss) zu dem Gesetzentwurf der Bundesregierung – Drucksache 20/1409. Drucksache 20/2090, vom 01.06.2022.

²⁶ vgl. <https://www.bundeswehr.de/de/ueber-die-bundeswehr/zahlen-daten-fakten/personalzahlen-bundeswehr>, Stand: 30. Juni 2022

3.4 Systemarchitektur von D-LBO

3.4.1 Mobile ad hoc Network (MANET)

Der D-LBO-Architektur liegt topologisch ein dezentraler Ansatz mit vermaschten Netzknoten zugrunde. Der Ansatz wird auch *Mobile ad hoc Network* (MANET) bezeichnet. In einem MANET kann ein Knoten (Tactical Node) gleichzeitig als Absender und Empfänger dienen. Datenverkehre können so während des Einsatzes von Knoten zu Knoten weitergeleitet werden.

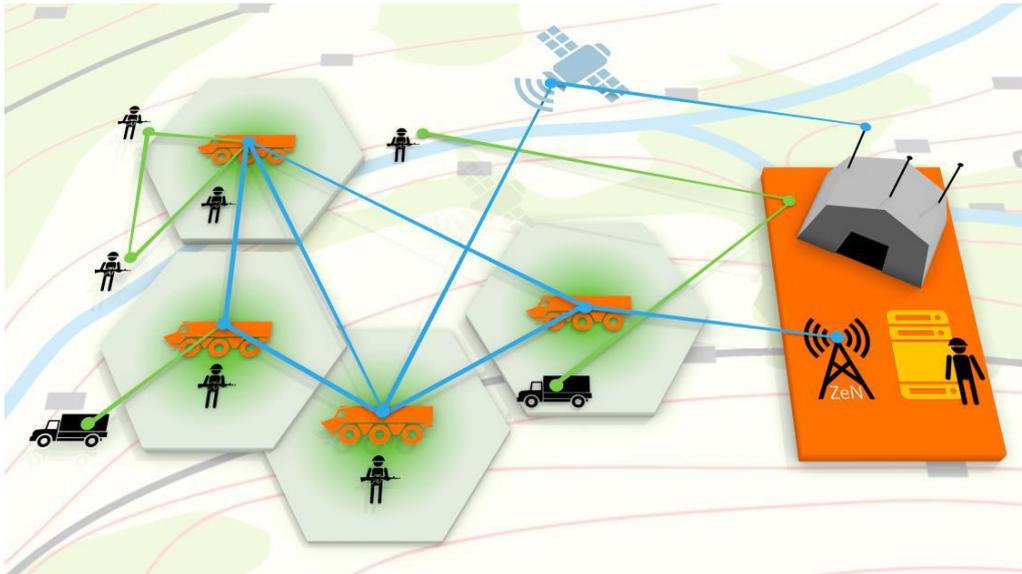
Jeder Knoten kann dabei im Bedarfsfall die Aufgaben eines Repeaters wahrnehmen, welcher den eingehenden Datenverkehr weiterleitet. Somit ist der Ausfall eines Knotens kein Hindernis für das Gelingen von Kommunikation, da Informationen über ein dezentrales Netzwerk ohne hierarchische Instanz transportiert werden.

Zu beachten ist jedoch hierbei, dass durch die Nutzung von Knoten auch für den Weitertransport von Nachrichten der Bandbreitenbedarf für ein MANET-System deutlich höher ist als bei einem hierarchisch gegliederten zellulären Funksystem. Aus diesem Grund sieht die System-Architektur vor, dass alle Tactical Nodes (TN), die eine Basisstation tragen, auch sämtliche Kern-Funktionalitäten bereitstellen können. Dadurch erhält ein TN die Fähigkeit, ein eigenes zelluläres Netz aufzubauen und autark zu betreiben.

Neben den zellularen Funktechnologien spielen etablierte nicht-zellulare Funktechnologien im Kontext D-LBO weiterhin eine bedeutende Rolle. Etwa, um die Kernführungsfähigkeit unter den Rahmenbedingungen einer Contested Information Environment, insbesondere im Hinblick auf Electronic Counter Measures (ECM), aufrechtzuerhalten. Dabei wird in der Regel eine geringere verfügbare Bandbreite und eine damit verbundene Servicequalität in Kauf genommen. Das D-LBO-System ist somit in der Lage, flexibel nach Quantität und Qualität zu skalieren. Abhängig von der Verfügbarkeit der jeweiligen Technik können bestimmte Endnutzerdienste im Extremfall ggf. nur eingeschränkt oder überhaupt nicht genutzt werden (Service Degradation).²⁷

Die folgende Grafik verdeutlicht, wie die Kommunikation zwischen abgesessenen Trupps (mit ihren Tactical Clients), Fahrzeugen (Mobile Tactical Nodes sowie Tactical Clients) sowie dem Tactical Wide Area Network (TaWAN), inkl. dem rückwärtigen D-LBO Core, zustandekommt. Die Kommunikation kann über Deployable Tactical Nodes im UHF-Band oder durch Satellitenkommunikation (Satcom) zustandekommen. Im Vergleich zum UHF-Band ist die Satellitenverbindung jedoch deutlich limitierter in ihrer Bandbreite.

²⁷ vgl. Blackned (2018): Systemkonzept Digitalisierung landbasierter Operationen (D-LBO)

Abb. 1: Schematischer Aufbau des D-LBO-Verbunds

Legende: grün: User Access; blau: D-LBO Backbone (inkl. UHF-Band); rot: D-LBO Core;

Quelle: Blackned (2018): Systemkonzept Digitalisierung landbasierter Operationen (D-LBO)

3.4.2 Tactical Node und Tactical Client

Zwei wesentliche Elemente einer D-LBO-Verbundeinheit, den sogenannten taktischen Informations- und Kommunikationsverbänden (luK VBU), sind der Tactical Node und der Tactical Client.

Tactical Node

Der **Tactical Node** kann mobil (Mobile Tactical Node; MTN) oder verlegefähig (Deployable Tactical Node; DTN) sein und erfüllt drei Hauptfunktionen:

1. Bereitstellung der operativ-kritischen Endnutzerdienste
2. Sicherung des Zugangs der Tactical Clients zum taktischen Informations- und Kommunikationsverband (luK VBU)
3. Vermittlungspunkt innerhalb des Backbones über das Tactical Wide Area Network (TaWAN)

Der Tactical Node Core ist Kernbestandteil eines Tactical Node. Er beinhaltet mehrere Module und umfasst neben den Kommunikationssystemen u. a. auch Backend-Systeme, um das Mission Enabling System der Bundeswehr (MESBw) für Tactical Communication and Collaboration (TCC) sowie andere Nutzerdienste bereitzustellen. Hierbei sind auch verteilte Datenbank-Aufgaben im Feld denkbar, bei denen bestimmte Informationen von spezifischen Tactical Nodes abgerufen werden.

Welche Rolle ein Tactical Node innerhalb eines D-LBO-Verbundes einnimmt, hängt von der Verteilung und Anzahl der Tactical Nodes im Feld und ggf. auftretender Ausfälle anderer Tactical Nodes ab. Das Datenvolumen, das an einem Mobile Tactical Node anfällt, kann hierbei beträchtlich sein.

Dies hängt nicht zuletzt von der Vielzahl der vorhandenen Kamerasysteme ab: etwa vier bis sechs pro Fahrzeug, zzgl. der Bildsignale von Drohnen und der Bodycams abgesessener Soldatinnen und Soldaten. Hinzu kommt das anfallende Datenvolumen für den

Zugriff der MTNs und der TCs auf das Tactical Node Core, der dortigen Backbone-Anwendungen sowie die geschützte und verschlüsselte Sprachkommunikation.

Daten werden jedoch nicht unverarbeitet an das TaWAN weitergeleitet. Manche Endnutzeranwendungen werden dabei direkt im Tactical Node gehostet, etwa Tactical Communication and Collaboration (TCC) oder E-Mail. Der MTN erfüllt damit deutlich mehr Funktionen als ein simpler Netzwerk-Repeater. Im MTN erfolgt eine Auswahl der Datenströme, eine Datenverarbeitung in den lokal-vorgehaltenen Datenbanken, die Ausführung bestimmter Client Server Requests der Tactical Clients sowie ggf. zukünftig auch eine (KI-gestützte) Auswertung der mannigfaltigen Sensoren, etwa die Analyse erfasster Rohdaten, z. B. der Überwachungsdrohnen (Mobile Edge Computing).

Die Aufgaben mobiler Tactical Nodes (MTNs) wird in vielen Fällen

- a) die Bereitstellung von Konnektivität für Mobile Tactical Clients,
- b) die Bereitstellung von Informationen aus On-Board-Datenbanken sowie
- c) die Weiterleitung von Informationsanfragen und Datenströmen (Positionsdaten, Bilddaten) von kleinen Einheiten im Feld oder der eigenen On-Board-Sensorik an das Backbone umfassen.

Die Einbindung eines Tactical Nodes in das rückwärtige D-LBO-Backbone (LuK VBU) wird durch verschiedene Übertragungstechnologien, insbesondere UHF-Funk, Satellit und dedizierte zellulare Mobilfunknetze, ermöglicht. Auf der Ebene des rückwärtigen D-LBO-Backbone (TaWAN) kann zwischen breitbandigen/IP-fähigen Systemen (Tx BB IP/WB) sowie robusten, schmalbandigen/nicht-IP-fähigen Systemen (Tx BB Tactical) unterschieden werden. Falls nötig, können auch nicht-IP-fähige Übertragungssysteme (v. a. analog oder digitaler Sprachfunk über Bestandsgeräte) über ein Gateway an das D-LBO-Backbone angeschlossen werden.

Für die Kommunikation der MTNs mit den rückwärtigen Gefechtsständen²⁸ und dem TaWAN stehen verschiedene Kommunikationswege zur Verfügung. Neben weiteren MTNs oder DTNs (mit größerer Antenne), Satellitenverbindungen oder Richtfunkverbindungen (ggf. zu einem Glasfaser-PoP) gewinnen zunehmend Kommunikationsdrohnen an Bedeutung, die die rückwärtige Backbone-Kommunikation über UHF-Frequenzen über viele weitere Kilometer übernehmen können.

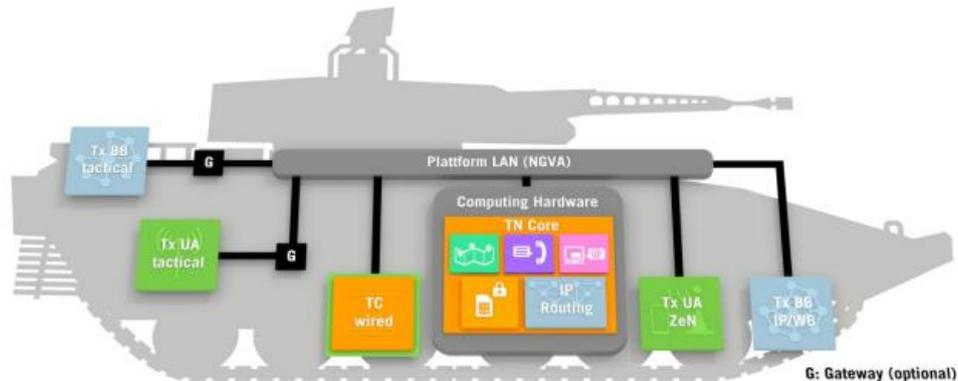
Ähnlich wie bei den Mobile Tactical Nodes können diese selbst auch ein dynamisches Ad-hoc-Netzwerk ausbilden und durch indirekte Kommunikation von Drohne zu Drohne erhebliche Distanzen überwinden, ohne auf Glasfaser- oder Satellitenverbindungen angewiesen zu sein.

²⁸ „Gefechtsstände werden ab Bataillonsebene aufwärts gebildet, seltener auch von Kompanien. Es werden im Allgemeinen ein Hauptgefechtsstand für die Gefechtsführung und ein rückwärtiger Gefechtsstand für die Personal- und Versorgungsführung eingerichtet.“, zit. nach <https://de.wikipedia.org/wiki/Gefechtsstand>

Die Backbone-Kommunikation zwischen einzelnen Mobile Tactical Nodes sowie die rückwärtige Kommunikation zum Tactical Wide Area Network (TaWAN) soll in der Strategie der Bundeswehr vorrangig über den Frequenzbereich 470-694 MHz realisiert werden.

Hintergrund ist, dass insbesondere die Abstände zwischen den Mobile Tactical Nodes und den rückwärtigen D-LBO-Systemelementen (im Tactical Wide Area Network) in der Regel mehrere Kilometer betragen und der Zwischenraum topografische Hindernisse oder Waldflächen aufweisen kann.

Abb. 2: Generischer Aufbau eines Mobile Tactical Node



Quelle: Blackned (2018): Systemkonzept Digitalisierung landbasierter Operationen (D-LBO)

Tactical Client

Hiervon grundsätzlich unterschieden werden muss die Kommunikation des **Tactical Clients**. Der Tactical Client ist das jeweilige Endgerät, mit dem Soldatinnen und Soldaten oder Sensorik (z. B. in Fahrzeugen) Zugriff auf die verschiedenen Anwendungen erhalten. Der Tactical Client beinhaltet folgende wesentliche Komponenten:

- ein D-LBO User Device als Hardwarekomponente, z. B. Smartphone, Tablet
- eine zentrale Softwarekomponente (TC Core), die User-Access-Funktionalitäten realisiert
- ein Secure Element (SIMCard/Schloss-Symbol)
- Transmissionssysteme zur Einbindung des TC in den Informations- und Kommunikationsverband (luK VBU)
- ein Personal Radio Adapter (PRA) zum Anschluss zusätzlicher Übertragungssysteme
- Peripheriegeräte (z. B. Headset)

Die Tactical Client Software steuert die angeschlossenen Peripheriegeräte und bildet die Schnittstelle zwischen Nutzer und System.

Der **Tactical Client (TC)** erfüllt ebenfalls drei Hauptfunktionen:

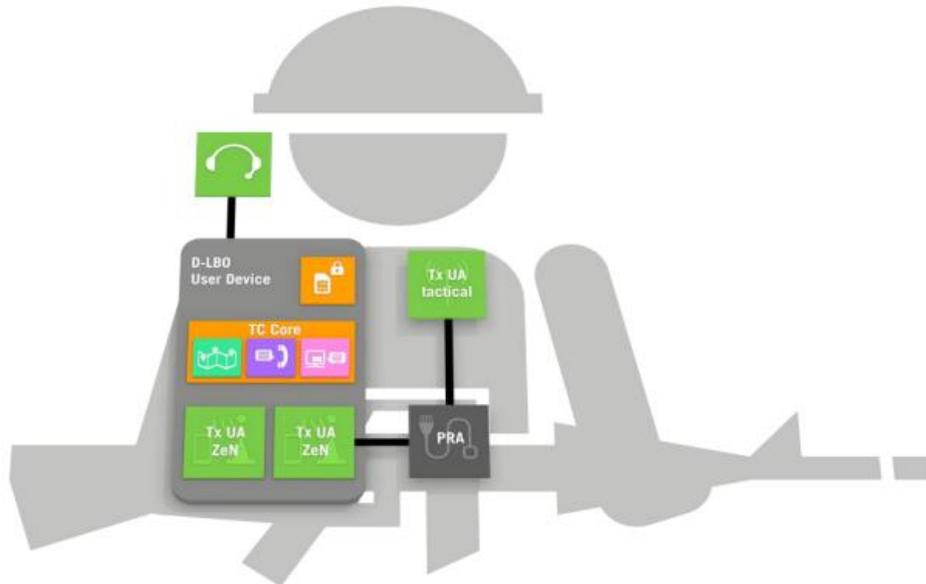
1. Bereitstellung des Zugangs zum LuK VBU auf der Übertragungsschicht
2. Bereitstellung einer universellen Schnittstelle zum taktischen Informations- und Kommunikationsverbund auch für ältere Sprachfunktechnik
3. Ermöglichung der Frontendbenutzung für Endnutzengeräte, z. B. für Blue Force Tracking

Für die Kommunikation zwischen Mobile Tactical Nodes und den Tactical Clients wird zwischen schmalbandigen/robusten Systemen (Tx UA Tactical) sowie nicht-kritischen, breitbandigen, zellularen Systemen (Tx UA ZeN) unterschieden.

Die Bereitstellung von Konnektivität der Mobile Tactical Clients durch die zellularen Netze Mobile Tactical Nodes erfolgt durch Aufspannen kleinräumiger Zellen, typischerweise im E-Band (Frequenzbereich 2-3 GHz).

Ein Mobile Tactical Client kommuniziert somit über ein zellulares Netz mit dem nächstgelegenen Tactical Node, der neben eigenen Server-Diensten auch die Aufgabe eines Netzwerkknotens zur Datenweiterleitung wahrnimmt. Die Daten werden entweder direkt oder indirekt an das Tactical Wide Area Network (TaWAN) übergeben.

Abb. 3: Systematischer Aufbau eines Tactical Clients



Quelle: Blackned (2018): Systemkonzept Digitalisierung landbasierter Operationen (D-LBO)

4 Grundlagen der Modellierung

Im folgenden Kapitel werden die Grundlagen zur Berechnung des D-LBO-Verkehrsmodells (vgl. Kapitel 5) gelegt. Hierfür werden zunächst die grundlegenden nachrichtentechnischen Prinzipien erörtert, bevor im Anschluss die methodischen Grundlagen zur Berechnung des Verkehrsmodells dargelegt werden.

Wie in Kapitel 3 erläutert, hat der D-LBO-Verbund das Potenzial, alle bisherigen und zukünftigen militärischen Funkanwendungen der Bundeswehr in einem Verbund zu integrieren. Hierfür nutzt das D-BLO-System verschiedene Frequenzbereiche mit verschiedenen Wellenformen und umfasst neben dem VHF- und UHF-Band auch die Satellitenkommunikation.

In Übereinstimmung mit dem Studienauftrag stehen für die sich anschließende Analyse die **Bandbreitenbedarfe im UHF-Band** im Vordergrund. Das UHF-Band wird im D-LBO-Verbund vorrangig für die interne Kommunikation auf dem D-LBO-Backbone verwendet, inkl. der rückwärtigen Verbindung zum D-LBO-Core (vgl. Kapitel 3.4).

Die Datenübertragung an Fahrzeuge und die Endgeräte der Soldatinnen und Soldaten wird innerhalb des D-LBO-Verbunds hingegen auf anderen Frequenzbereichen übertragen, etwa im 2,3-GHz-Band im Falle der zellularen Zugangnetze der Tactical Nodes, oder im VHF- bzw. unteren UHF-Bereich („NATO-Band“) für die taktische Führungskommunikation.

Die Wellenform, auf der Backbone-Datenkommunikation innerhalb des D-LBO-Verbundes künftig stattfinden wird, ist zurzeit noch nicht abschließend definiert und aktuell Gegenstand intensiver Überlegungen. Der modernste Mobilfunkstandard 5G ist hierbei eine der technischen Übertragungsmöglichkeiten, die derzeit für ihren militärischen Einsatz geprüft und erprobt wird. Alternativen hierzu stellen bereits eingeführte militärische Wellenformen (ECCM, ESSOR HDRWF) dar. Weiterhin denkbar ist, dass auf Basis des 5G-Mobilfunkstandards eine militärische Weiterentwicklung erfolgt, welche die spezifischen Anforderungen an ein taktisches *Mobile Ad Hoc Network* (MANET) mit vermaschten Netzknoten unter nicht-kooperativen Bedingungen besonders berücksichtigt.

Im Folgenden wird aufgrund der aktuellen Ausrichtung des D-LBO-Programms und der hierbei laufenden Feldversuche davon ausgegangen, dass im wahrscheinlichsten Fall 5G die Wellenform für den künftigen D-LBO-Backbone darstellen wird. Daher werden die Numerologie und spektralen Effizienzen des 5G-Standards bei den folgenden Berechnungen unterstellt.

Hierzu ist festzuhalten, dass dies nur eine näherungsweise Betrachtung des benötigten Spektrums darstellen kann, da die letztgültige Entscheidung zur Wellenform noch nicht gefallen ist. Allerdings bietet der 5G-Standard eine sehr solide, real existierende und darüber hinaus konservative Grundlage für die Spektrumsbedarfe. 5G verfügt über hohe spektrale Effizienzen, die bereits nahe an die physikalische Shannon-Grenze heranreichen. Eine geringe spektrale Effizienz ist hingegen das wahrscheinlichere Szenario, da ein eventuelles militärisches Derivat des 5G-Standards für die besonderen militärischen Fähigkeiten im Vergleich zum herkömmlichen (zivilen) 5G-Standard erhöhte Signal-Overheads transportiert. Dies wird in Konsequenz dazu führen, dass die im Folgenden berechneten Verkehrsmodelle stets eine Bedarfsuntergrenze darstellen. Die realen Bandbreiten können daher aufgrund der militärischen Anforderungen auch größer als die hier berechneten Bandbreiten ausfallen.

4.1 Nachrichtentechnische Prinzipien²⁹

4.1.1 Netzwerkplanung: Typische Zellgrößen in Abhängigkeit von der Bandfrequenz

Physikalisch bedingt, nimmt der Pfadverlust (engl. path loss) mit steigender Frequenz zu. Zellen werden folglich bei höheren Frequenzen und ansonsten gleichen Bedingungen kleiner in ihrer Ausdehnung. Die Zellgröße ist auch von anderen Faktoren abhängig, wie der Sendeleistung und dem Antennengewinn. Der Einsatz von Beamforming erlaubt z. B. größere Zellen. Zudem spielt die Topografie eine Rolle, beispielsweise Abschattung, Reflexionen, Beugungserscheinungen, Interferenz in der eigenen Zelle und von Nachbarzellen etc.

Eine exakte Zellgröße kann jedoch nicht einer Frequenz zugeordnet werden, da zu viele Einflussgrößen die Abstände der Basisstationen bestimmen. Die Geländetopologie ist bekanntermaßen der am schwierigsten zu erfassende Faktor. Andere Faktoren sind die erforderliche Netzwerkkapazität, d. h. wie viele Teilnehmer in einem gegebenen Gebiet versorgt werden müssen (wenn eine höhere Netzkapazität erforderlich ist, kann die Zelldichte durch geringere Abstände erhöht werden), welche Signalqualität am Zellrand benötigt wird, welche Nachbarzellstörungen erlaubt sind, ob Beamforming, Sektor-Antennen oder Rundstrahler verwendet werden oder die Antennenhöhe.

Die Bestimmung der Zellgröße bzw. deren Abständen voneinander (ISD = Inter Site Distance) ist Aufgabe der Netzwerkplanung. Wird dazu beispielsweise der Idealfall einer Ebene angenommen, können bei einer Trägerfrequenz unter 1 GHz, wie bei GSM-900, ohne Rücksicht auf Kapazität die Abstände von zwei Basisstationen 15-20 km betragen (Rural Case). Weist die Geländetopologie zunehmend mehr Hügel, Gebäude, Bewuchs etc. auf, müssen die Basisstationen immer dichter aufgestellt werden, um die mehr und mehr entstehenden „Funklöcher“ zu beleuchten. Dabei ist die Antennenhöhe ein zusätzlicher wichtiger Faktor: Je höher die Antenne, desto größer ist die Reichweite und desto größere Abstände sind möglich. Dies ist das eine Extrem der Netzwerkplanung aus Sicht der Funkreichweite.

Ausgehend von dieser reichweitenbezogenen Planung wird nun bestimmt, wie eine geforderte Kapazität bereitzustellen ist. Bei statistischer Verteilung der Teilnehmer multipliziert sich die Netzkapazität mit der Anzahl der Zellen. D. h. je kleiner die Abstände der Funkzellen sind, desto höher ist die Netzkapazität. Im zweiten Schritt einer Netzwerkplanung werden die Basisstationen entsprechend dichter gestellt, bis alle Teilnehmer in einem Gebiet versorgt werden können. Bei dieser kapazitätsbestimmten Planung, um beim GSM-900-Beispiel zu bleiben, sinken die Abstände auf 1 km oder weniger (urbanes Gelände).

Allein mit diesem Beispiel bei einer Trägerfrequenz von unter 1 GHz können die Zellabstände zwischen unter 1 km bis über 15 km liegen, je nach der örtlichen Topologie, Bewuchs, Bebauung, Antennenhöhe und Kapazitätsanforderungen. Dazu kommen noch nichttechnische Faktoren wie Verfügbarkeit der Aufstellungsorte etc.

²⁹ Teile dieses Kapitels sind folgender Quelle entnommen: Fraunhofer IIS (o. J.): RAPID AVAILABLE MODULES FOR INTEROPERABLE CAPABLE OPERATIONAL NETWORKING IN 5G (RAM ICON 5G). Studie (in Erstellung) im Auftrag der Bundeswehr, Vertrag: E/E810/LC038/IF105. Entwurfsfassung.

Ist die Netzwerkplanung durch die Reichweite bestimmt und sind die Trägerfrequenzen erhöht, dann werden die Zellabstände entsprechend kleiner werden, sich also so verhalten wie in Tutela, *What we can learn from relative cell sizes*³⁰, beschrieben.

Ist die Netzwerkplanung jedoch durch die Kapazitätsanforderung bestimmt, dann ist die ISD bereits so klein, dass Reichweite in der Praxis kein Problem mehr ist. D. h. man kann die Trägerfrequenz zunächst erhöhen, ohne die Anordnung der Basisstationen ändern zu müssen. Erst bei hohen Frequenzen über 6 GHz würde die Reichweite wieder zum begrenzenden Faktor, und die ISD müsste entsprechend weiter verkleinert werden, wobei dann auch die Kapazität wieder wachsen würde usw.

Diese Beschreibung zeigt, dass die Aufstellungsorte der Basisstationen und damit die ISD stark von örtlichen Gegebenheiten abhängig sind. Durch die zahlreichen Faktoren wie Kosten, Teilnehmerzahl (d. h. benötigte Kapazität), Topologie, u. v. m. kann die ISD um mehr als eine Größenordnung schwanken.

Ein weiterer Aspekt ist, dass die 3GPP-Spezifikation Inter-Frequency Trägerkombinationen mit Bändern unterhalb 1 GHz und oberhalb von 4,5 GHz enthält, d. h. Trägerfrequenzen, die sich um den Faktor 5 unterscheiden. Eine entsprechende Zellgröße würde auf die höhere Frequenz zugeschnitten werden, aber um Interferenzen in benachbarten Zellen bei der niedrigen Frequenz zu vermeiden, muss deren Sendeleistung adaptiert werden.

Die neuen FR2-Spektren erlauben noch kleinere Zellen. Hierbei ist der höhere Pfadverlust durchaus erwünscht, da er es ermöglicht, Zellen dichter zu packen, um die RAN-Kapazität zu erhöhen. Hierbei wird bevorzugt Beamforming verwendet, um die Zelle nicht zu klein werden zu lassen. Dabei wirkt sich positiv aus, dass die Apertur von Beamforming-Antennen im FR2-Frequenzband wegen der hohen Frequenzen von 25-50 GHz nicht zu groß wird. Dies wäre eine Alternative oder Ergänzung zur Nutzung von UHF-Bändern im Nahbereich oder bei kleinen Funkzellen in der Größe von bis zu 100 m Durchmesser.

4.1.2 Frequenz-Wiederholbarkeit

Benachbarte Zellen innerhalb eines Mobilfunknetzwerks bilden sogenannte Zellcluster. In diesen werden die zur Verfügung stehenden Trägerfrequenzen aufgeteilt. Erst die benachbarten Zellcluster wiederholen die Trägerfrequenzen wieder. Die Anzahl an Zellen innerhalb eines Zellclusters definiert den sog. Reuse-Faktor, der die Wiederverwendung der gleichen Frequenz in benachbarten Zellen ausdrückt. Der 5G-NR-Mobilfunkstandard unterstützt einen Reuse-Faktor von 1. Damit können selbst unmittelbar benachbarte Zellen auf derselben Trägerfrequenz arbeiten.

Eine direkte Wiederverwendung der gleichen Frequenz in benachbarten Zellen ist nur in *koordinierten Funkzellen*, also in Zellen eines gemeinsamen Netzwerkes, möglich. Die zellularen Netze des D-LBO-Verbundes stellen ein solches gemeinsames Netzwerk dar.

³⁰ vgl. Tutela (2018): What we can learn from relative cell sizes. Online unter: <https://www.tutela.com/blog/what-we-can-learn-from-relative-cell-sizes> [zuletzt aufgerufen am 29.06.2022].

4.1.3 Realisierung mobiler taktischer Knoten aus zivilen Komponenten

Das Funknetz ist nicht stationär installiert, sondern ist ausschließlich am Ort des Einsatzes und für die Dauer des Einsatzes präsent. Die dazu erforderliche Funkzelle ist mobil und befindet sich am Gefechtsfahrzeug (ggf. im Schützenpanzer) und wird zusammen mit den Soldatinnen und Soldaten zum und im Einsatz bewegt. Der mobile Betrieb der netzwerkseitigen Komponenten, sowohl Basisstation als auch 5G-Kernnetz im Sinne von 3GPP ohne Erweiterungen im Sinne von D-LBO, ist möglich – die nötigen Komponenten sind bzgl. Volumen, Masse und Energieverbrauch klein genug. Kühlung und Klimatisierung sollten ebenso ohne Probleme in einem Gefechtsfahrzeug installiert werden können.

Ein derartiger Betrieb ist aber im 3GPP-Standard nicht ausdrücklich vorgesehen. Basisstationen für den militärischen Einsatz können jedoch von kommerziellen Basisstationen abgeleitet werden, wobei die Basisfunktionalität zwangsläufig identisch zur 3GPP-Spezifikation ist. D. h., dass generell davon ausgegangen werden kann, dass ein 5G-Netzwerk mobil betrieben werden kann.

Dabei werden einige Fragen aufgeworfen, da das Netz nicht statisch räumlich lokal (Basisstationen desselben Netzes auf verschiedenen Fahrzeugen in relativer Bewegung) oder auch mehrere Netze unter Verwendung derselben Ressourcen (Frequenzen, Nummernbereiche) betrieben werden. Da der 3GPP-Standard von ortsfesten Basisstationen ausgeht, muss auch eine zuverlässige Vernetzung der mobilen Basisstationen im Backbone geklärt werden.

Dies erfordert eine neue Art der dynamischen Netzwerkplanung, die relative Ortsveränderung der Basisstationen berücksichtigt. Zum Beispiel, dass die relativen Positionen der Gefechtsfahrzeuge so koordiniert werden, dass sie zueinander nur in einem bestimmten Radius veränderbar sind oder im einfachsten Fall sich parallel zueinander bewegen, so dass die relativen Positionen der Funkzellen immer gleich bleiben, d. h. die Netzwerktopologie statisch ist und sich im Ganzen bewegt. Zudem muss die Netzwerkplanung den Ausfall von Basisstationen berücksichtigen.

Eine Funkzelle kann ohne Anbindung an das Kernnetz betrieben werden, wie im D-LBO Systemkonzept gefordert. In diesem Fall stellt das Kommunikationsnetz nur Verbindungen innerhalb der eigenen Gruppe zur Verfügung:

- Kommunikation innerhalb einer Gruppe abgessener Soldatinnen und Soldaten
- Kommunikation zwischen Fahrzeugbesatzung und abgessenen Soldatinnen und Soldaten

Bei einem zellularen Mobilfunknetz benötigt jeder Teilnehmende zunächst eine Funkverbindung zur Basisstation. Eine Abschätzung zum typischerweise nutzbaren Zellradius, also der maximalen Entfernung zwischen Soldat und Gefechtsfahrzeug, ist ohne Kenntnis der tatsächlich vorliegenden örtlichen Gegebenheiten sehr ungenau. Z. B. werden abgessene Soldatinnen und Soldaten während des Einsatzgeschehens häufig ohne Sichtverbindung (Non Line Of Sight, NLOS) zum Fahrzeug operieren.

Wie in Kapitel 4.1.1 beschrieben, würde die maximale Entfernung zwischen Basisstation und Endgerät in einem Band unterhalb 1 GHz wenige km betragen, bei entsprechender Topologie möglicherweise nur einige hundert Meter. In besonders ungünstigen Fällen, beispielsweise Nutzung von Gebäuden (Stahlbeton, Brandschutztür, Keller), liegt die maximale Entfernung nochmals niedriger.

Neben der Anbindung eines Teilnehmenden an die Funkzelle benötigen die Teilnehmenden eine gemeinsame Server-Infrastruktur. Wenn beispielsweise eine Video-Konferenzschaltung durchgeführt werden soll, baut jeder Teilnehmende eine sende- und empfangsseitige Datenverbindung zu einem gemeinsamen Server auf. Auf diesem Server werden die einzelnen Datenströme zusammengefügt. Es sind ggf. Konferenzschaltungen für Sprachkommunikation realisierbar, die auf Multicast basieren und damit ohne gemeinsamen Server auskommen.

Befinden sich mehrere Gefechtsfahrzeuge (Mobile Tactical Nodes) im Feld, können die Teilnehmenden zur Verbesserung der Abdeckung über die Zelle einer anderen Basisstation ins Funknetz eingebunden werden.

Die Datenbanken bzw. Dateninfrastruktur, die dazu erforderlich ist, Teilnehmende in das Netz aufzunehmen, muss in diesem Fall auf jedem Gefechtsfahrzeug (Mobile Tactical Node) vorgesehen und aktuell gehalten werden.

Durch die Anbindung der Funkzelle an ein Kernnetz erhalten die abgesehenen Soldatinnen und Soldaten im Feld Zugriff auf die bereits erwähnten Netzwerkdienste. Diese Anbindung kann entweder über das Mobilfunknetz selbst oder über eine andere Funkverbindung erfolgen.

4.1.4 Realisierung mobiler Terminals basierend auf zivilen Komponenten

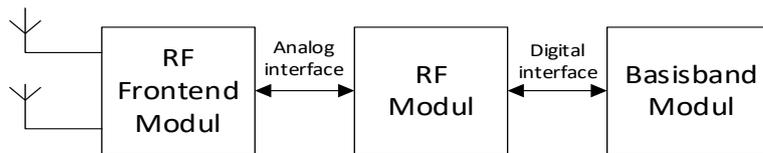
Für die Anbindung eines mobilen Teilnehmenden an eine Funkzelle ist ein Gerät erforderlich, das einem kommerziellen Endgerät entspricht, d. h. der Gegenstelle der Basisstation. Das können Smartphones, Module in Fahrzeugen, IoT-Geräte etc. sein. 3GPP enthält keine dedizierten militärischen Spezifikationen. Endgeräte für den militärischen Einsatz können von kommerziellen Endgeräten abgeleitet werden, wobei die Grundfunktionalität zwangsläufig identisch zur 3GPP-Spezifikation ist. Die Unterschiede für die Eignung für den militärischen Einsatz liegen demnach auf anderen Ebenen, wie z. B. besonders geschützte Module durch robustere Gehäuse mit höherer Abschirmung, Schockresistenz, Wasserdichtigkeit etc. Die Teilnehmenden in den Funkzellen wurden bereits im Kapitel 3.4.2 mit ihren Eigenschaften und Anforderungen an die Kommunikation beschrieben.

4.1.5 Endgeräte im UHF-Band

Für die Entwicklung von Endgeräten für den militärischen Einsatz können kommerzielle Chipsätze von Plattformherstellern wie Qualcomm verwendet werden. Eine Endgeräteplattform besteht in der Regel aus den Komponenten (vgl. Abb. 4):

- Basisbandmodul
- RF Modul
- RF Frontendmodul

Abb. 4: Blockdiagramm Mobilfunkplattform



Quelle: Fraunhofer IIS (2022)

Das Basisbandmodul integriert die digitale Signalverarbeitung des Modems von Layer 1 bis zur TCP/IP-Anbindung, sämtliche Schnittstellen und Steuerung von Peripheriegeräten (Tastatur, Bildschirm, Mikrophone, Lautsprecher, Sensoren etc.), Audio- und Videocodecs, Applikationsprozessoren, Speicher, Speichercontroller u. v. m.

Das Basisbandmodul ist über digitale Schnittstellen für die Signalübertragung sowie Kontrolle mit dem RF-Modul verbunden. Das RF-Modul beinhaltet ein sogenanntes digitales Frontend (digitale Trägerfilterung, Trägertrennung und -kombination, Automatic Gain Control (AGC) etc.), die Digital-Analog und Analog-Digital-Wandlung sowie analoge Auf- und Abmischung (IQ Modulation und Demodulation).

Kommerzielle Basisband- und RF-Module sind bandunabhängig und können jedes Band verarbeiten, das in der 3GPP-Spezifikation für die Frequency Range 1 (sub 6 GHz)³¹, und ggf. für die Frequency Range 2³²,³³ spezifiziert ist. Um den Umfang zu verdeutlichen, zeigt Tab. 4 die Listen aller Bänder aus der Spezifikation für Frequency Range 1 (FR 1).

Anders ist es beim RF-Frontendmodul. Dieses beinhaltet die Sendeverstärker, Duplexer, Diplexer, Bandfilter und Schalter, die für ein bestimmtes Band oder auch mehrere Bänder (Carrier Aggregation) die Wege von der Antenne über die entsprechenden Verstärker/Duplexer/Diplexer/Filter zu analogen Schnittstellen des RF-Moduls schalten.

Insbesondere die Filter legen fest, welche Bänder verwendet werden können. D. h., das RF-Frontendmodul ist auf eine bestimmte Bandkombination zugeschnitten. Für kommerzielle Systeme werden die Komponenten für RF-Frontendmodule nur für die spezifizierten Bänder und den entsprechenden Massenmarkt angeboten.

³¹ vgl. 3GPP: *NR User Equipment (UE) radio transmission and reception Part 1: Range 1. Standalone*. Online unter: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.101-1/38101-1-h50.zip [zuletzt abgerufen am 29.06.2022].

³² vgl. 3GPP: *NR User Equipment (UE) radio transmission and reception Part 2: Range 2 Standalone*. Online unter: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.101-2/38101-2-h50.zip [zuletzt aufgerufen am 29.06.2022].

Das einzige 3GPP-Band im UHF-Bereich ist n71 im oberen UHF-Bereich von 617-698 MHz. Da es ein Frequency Division Duplex (FDD) ist, ist es in zwei Teilbänder – eines für Uplink, das andere für Downlink – aufgeteilt und bietet in beiden Richtungen nur 35 MHz Bandbreite. Da dieses Band in Canada und USA kommerziell verwendet wird, stehen auch passende kommerzielle Komponenten zur Verfügung.

Das bedeutet, für den militärischen Einsatz unterhalb n71 bzw. für höhere Bandbreiten müssen die Hersteller für RF-Frontend-Komponenten beauftragt werden, entsprechende zugeschnittene Komponenten zu entwickeln. Entsprechend gilt dies auch für Basisstationen.

Tab. 4: Bandübersicht der 3GPP-Bänder der Frequency Range 1 (FR 1)

NR Operating Band	Uplink (UL) Operating Band BS Receive / UE Transmit (MHz) FUL_Low - FUL_High	Downlink (DL) Operating Band BS Transmit / UE Receive (MHz) FDL_low - FDL_high	Duplex Mode
n1	1920–1980	2110–2170	FDD
n2	1850–1910	1930–1990	FDD
n3	1710–1785	1805–1880	FDD
n5	824–849	869–894	FDD
n7	2500–2570	2620–2690	FDD
n8	880–915	925–960	FDD
n12	699–716	729–746	FDD
n13	777–787	746–756	FDD
n14	788–798	758–768	FDD
n18	815–830	860–875	FDD
n20	832–862	791–821	FDD
n24	1626.5–1660.5	1525–1559	FDD
n25	1850–1915	1930–1995	FDD
n26	814–849	859–894	FDD
n28	703–748	758–803	FDD
n29	N/A	717–728	SDL
n30	2305–2315	2350–2360	FDD
n34	2010–2025	2010–2025	TDD
n38	2570–2620	2570–2620	TDD
n39	1880–1920	1880–1920	TDD
n40	2300–2400	2300–2400	TDD
n41	2496–2690	2496–2690	TDD
n46	5150–5925	5150–5925	TDD
n47	5855–5925	5855–5925	TDD
n48	3550–3700	3550–3700	TDD
n50	1432–1517	1432–1517	TDD ¹
n51	1427–1432	1427–1432	TDD

NR Operating Band	Uplink (UL) Operating Band BS Receive / UE Transmit (MHz) FUL_Low - FUL_High	Downlink (DL) Operating Band BS Transmit / UE Receive (MHz) FDL_low - FDL_high	Duplex Mode
n53	2483.5–2495	2483.5–2495	TDD
n65	1920–2010	2110–2200	FDD
n66	1710–1780	2110–2200	FDD
n70	1695–1710	1995–2020	FDD
n71	663–698	617–652	FDD
n74	1427–1470	1475–1518	FDD
n75	N/A	1432–1517	SDL
n76	N/A	1427–1432	SDL
n77	3300–4200	3300–4200	TDD
n78	3300–3800	3300–3800	TDD
n79	4400–5000	4400–5000	TDD
n80	1710–1785	N/A	SUL
n81	880–915	N/A	SUL
n82	832–862	N/A	SUL
n83	703–748	N/A	SUL
n84	1920–1980	N/A	SUL
n86	1710–1780	N/A	SUL
n89	824–849	N/A	SUL
n90	2496–2690	2496–2690	TDD
n91	832–862	1427–1432	FDD
n92	832–862	1432–1517	FDD
n93	880–915	1427–1432	FDD
n94	880–915	1432–1517	FDD
n95⁸	2010–2025	N/A	SUL
n96	5925–7125	5925–7125	TDD
n97	2300–2400	N/A	SUL
n98	1880–1920	N/A	SUL
n99	1626.5–1660.5	N/A	SUL

Quelle: 3GPP TS 38.101-1, NR User Equipment (UE) radio transmission and reception Part 1: Range 1 Standalone

4.1.6 Vor- und Nachteile des UHF-Bandes

Kapitel 3.2.2. beschreibt die Einsatzgebiete der D-LBO, die sich im Allgemeinen über großflächige Gebiete von vielen Quadratkilometern erstrecken. Dies erfordert die Betrachtung der Funkausbreitung in unterschiedlichen Frequenzbereichen und eine spezielle Betrachtung des in dieser Studie relevanten UHF-Bandes für die in 3.2.1 beschriebenen Aufgaben.

Der Pfadverlust steigt mit der Frequenz, sodass für höhere Reichweiten Bänder aus niedrigeren Frequenzbereichen besser geeignet sind. Für höhere Bandbreiten jedoch sind Bänder aus höheren Frequenzbereichen besser geeignet, wie durch Abb. 5 veranschaulicht. Der Pfadverlustfaktor für das einfachste Modell der Freiraumausbreitung ist gegeben durch $L_p = (4\pi df/c)^2$, wobei d die Distanz zwischen Sender und Empfänger und f die Sendefrequenz sind. Die Darstellung in dB ist:

$$L_p(\text{dB}) = 32,4 \text{ dB} + 20 \log(f/\text{MHz}) + 20 \log(d/\text{km}).$$

Dieses einfachste Modell zeigt, dass im Freiraum die Empfangsleistung mit dem Quadrat der Entfernung und dem Quadrat der Sendefrequenz sinkt. Für eine terrestrische Übertragung ist dieses Modell zu optimistisch, da das Sendesignal den Empfänger nicht nur direkt, sondern auch über eine Bodenreflexion erreicht. Im einfachsten Fall wird dieses durch eine ideal leitende Ebene modelliert, sodass die beiden Pfade sich überwiegend destruktiv überlagern und dazu führen, dass der Pfadverlust mit der vierten Potenz der Entfernung steigt. In der Realität bewegt sich der Exponentialfaktor der Entfernung zwischen 2 und 4, je nach Antennenhöhe und Bodenbeschaffenheit.

Insgesamt setzt sich der Gesamtpfadverlust aus drei Faktoren zusammen. Zu dem vorhergehend beschriebenen Pfadverlust addieren sich noch Dämpfung durch Abschattung, dem sogenannten *Log-normal Fading*, sowie durch Mehrwegeschwund.

Um einen groben Eindruck über die Ausbreitungsdämpfung zu vermitteln, zeigt Tab. 6 die Empfangsleistung eines Endgerätes im Downlink für einige ausgewählte Szenarien wie Entfernung, Umgebung und Trägerfrequenz. Die Pfaddämpfung ist dabei nach dem Okumura-Hata-Modell berechnet, das auch die Antennenhöhen der Basisstation und der Endgeräte berücksichtigt. Schwunderscheinungen sind mit entsprechenden Margins angenommen. Weitere Modellparameter wie Sendeleistung, Antennengewinne, Verlust in Sender und Empfänger sind in folgender Tabelle angegeben.

Tab. 5: Modellparameter für Abschätzung der Pfaddämpfung in Tab. 6

Modellparameter	Parameterwert
Antennenhöhe Basisstation	5 m
Antennenhöhe Endgerät	1,5 m
Margin für Abschattungsschwund	20,5 dB
Margin für Mehrwegeschwund (Rayleigh Fading)	12,9 dB
Antennengewinn Sender Basisstation	17 dBi
Antennengewinn Empfänger Endgerät	2 dBi
Sendeleistung	23 dBm

Quelle: Fraunhofer IIS (2022)

Tab. 6: Ausbreitungsdämpfung in verschiedenen Szenarien

Frequency [MHz]	Umgebung	Empfangsleistung in 500 m [dBm]	Empfangsleistung in 1 km [dBm]	Empfangsleistung in 2 km [dBm]
600 (n71)	Stadtzentrum	-86	-70	-111
	Vorstadt	-76	-88	-101
	Offenes Gelände	-58	-70	-82
3600 (n78)	Stadtzentrum	-109	-121	-133
	Vorstadt	-106	-118	-130
	Offenes Gelände	-104	-116	-128

Quelle: Fraunhofer IIS (2022)

Die beiden gewählten Frequenzen repräsentieren zum einen den Bereich unterhalb von 1 GHz (n8) und zum anderen das für Campusnetze verwendete Band n78.

Tab. 6 veranschaulicht den Vorteil niedriger Frequenzen für die Reichweite. Für Band n8 liegen die 3GPP in spezifizierten Referenzempfindlichkeiten für Empfänger je nach Trägerbandbreite zwischen -85 dBm und -95 dBm. Bei kommerziellen Systemen sind diese Werte noch einmal um 5 bis 10 dB besser und können als typische Empfindlichkeitsgrenzen in der Praxis angenommen werden. Damit ist zumindest für offenes Gelände die Signalübertragung mit hoher SNR-Marge gegeben. Nur in Bereichen mit höheren Abschattungs- und Mehrwegeschwund (Stadtgebiete) wird es kritisch. In diesem Fall kann die Sendeleistung erhöht oder eine größere Antennenhöhe verwendet werden.

Mit der höheren Trägerfrequenz werden die Referenzempfindlichkeiten mit den Werten in Tab. 6 nicht mehr erreicht. Aufgrund der Simplizität des Okumura-Hata-Modells sind die Ergebnisse aus dieser Berechnung mit Vorbehalt zu sehen. Sie können lediglich eine grobe Vorstellung der Größenverhältnisse der Pfaddämpfungen geben und müssten durch präzisere Modelle im konkreten Fall bestimmt werden.

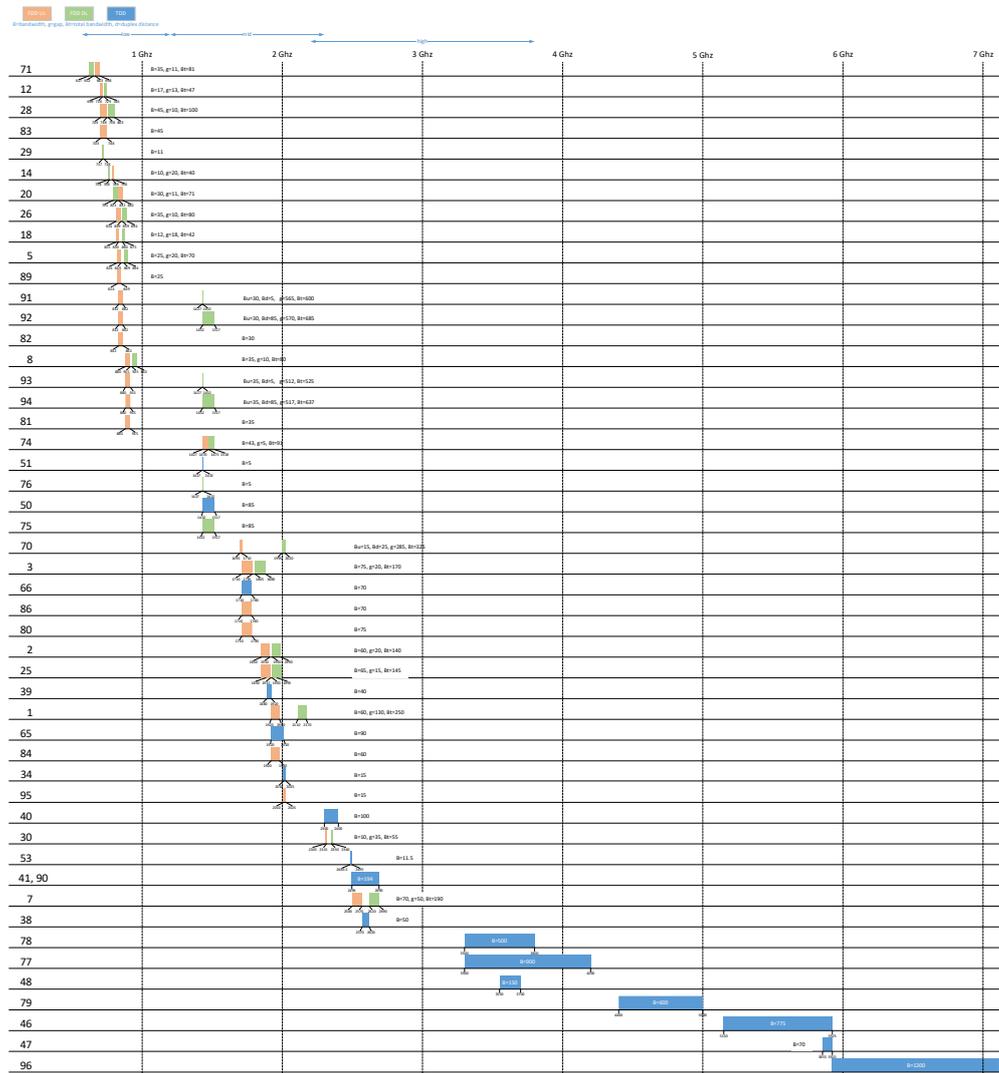
Auch wenn die Ausbreitungsverluste für Band n78 sehr pessimistisch aussehen, ist es möglich, die Empfangsleistung über die von 3GPP spezifizierte Referenzempfindlichkeit zu steigern, z. B. durch höhere Sendeleistungen oder höheren Antennengewinn mit Beamforming. Erhöht man die Sendeleistung z. B. um 20 dBm auf 43 dBm, eine für Basisstationen typische Leistung, kann die geforderte Empfindlichkeit bis zu einer Entfernung von 1 km erreicht werden.

Zusammengefasst ist der Hauptvorteil niederfrequenter Bänder, wie dem UHF-Band, die hohe Reichweite gegenüber hochfrequenten Bändern. Zudem ist bei NLOS-Situationen die Durchdringung durch Hindernisse wie Wände oder Vegetation besser. Beugungerscheinungen sind bei niedrigen Frequenzen stärker ausgeprägt, sodass Hindernisse wie Hügel weniger Pfaddämpfung bewirken. Dies ist insbesondere für die in Kapitel 3.2.1 beschriebenen Aufgaben mit großflächiger Funkausbreitung relevant.

Der Nachteil, zumindest bei den von 3GPP spezifizierten Bändern, ist die geringere Bandbreite der niederen Frequenzen wie in Abb. 5 veranschaulicht, die eine maßstabsgerechte Darstellung der FR1-Bänder, geordnet nach ihrer Frequenzlage, zeigt. So bietet das einzige Band n71 im UHF-Bereich nur 35 MHz Bandbreite, während oberhalb von 3 GHz Bänder mit bis 1200 MHz Bandbreite existieren. Die für Campusnetzwerke üblicherweise verwendeten Bänder n77 und n78 bieten Bandbreiten von 500 MHz bzw. 900 MHz.

Jedoch verringert sich dieser Nachteil, wenn die gesamte Bandbreite von 224 MHz zur Verfügung stehen würde oder ein größerer Anteil von z. B. 100 MHz.

Abb. 5: Maßstabsgerechte Darstellung der 5G NR-Bänder aus 38.101-x



Quelle: Fraunhofer IIS (2022)

4.1.7 Backbone, Backhaul

Für die Übergabe eines UEs von einer Basisstation zur nächsten ist eine Kommunikation zwischen den beiden Basisstationen erforderlich. Für eine reduzierte Interferenz in den Randbereichen der Zelle – was insbesondere bei mobilen Zellen eine wichtige Funktionalität ist – muss die Kommunikation zwischen den Zellen zusätzlich mit sehr geringer Latenz erfolgen. Der Backhaul für 5G ist nicht in 3GPP festgelegt und kann mit unterschiedlichen Übertragungstechnologien erfolgen. Bei bestehenden Mobilfunkkommunikationsnetzwerken basiert der Backhaul in der Regel auf Draht- oder Glasfaserverbindungen. Für den militärischen mobilen Einsatz mit bewegten Mobile Tactical Nodes ist das nicht anwendbar, und es müssen drahtlose Lösungen verwendet werden. Abb. 1 in Kapitel 3.4.1 veranschaulicht die Struktur des Netzwerkes und die Bedeutung des Backhails in der Kommunikation über mehrere hierarchische Ebenen.

Die ältesten drahtlosen Backhails basieren auf Mikrowellenrichtfunk. Dafür stehen in Deutschland Frequenzbereiche zwischen 3,8 GHz und 86 GHz mit einer Bandbreite von

41 GHz zu Verfügung. Kommerzielle Systeme bieten Datenraten bis zu 20 Gb/s. Der Vorteil ist, dass praktisch kein Engpass für die Bandbreite besteht. Der Nachteil ist, dass die Richtfunkantenne immer auf die Gegenstelle ausgerichtet sein muss und daher während der Bewegung der Station immer nachgeführt werden muss.

5G NTN (Non Terrestrial Networks) stellt eine Komponente des 5G-Standards dar, mit deren Hilfe es möglich ist, auch über Satellit 5G-standardkonform zu kommunizieren. Damit gibt es mit der Rel-17 erstmals eine Erweiterung eines Mobilfunkstandards zur Einbindung von Satelliten und damit eine Konvergenz von terrestrischer und Satellitenkommunikation. Neben Backhauling über Satellit wird in Rel-17 auch der Direct Access von einem UE zum Satelliten mit einer standardisierten 5G-Wellenform ermöglicht. Dabei stellen die größeren Entfernungen zu den Satelliten die zentrale Herausforderung dar. Dadurch sind die möglichen Datenraten stark begrenzt und die Verzögerungszeiten hoch. Der Einsatz als Backhaul ist daher nur eingeschränkt möglich. Insbesondere darf die Latenz des Backhails nicht zu groß sein, um Handover zu ermöglichen. Man spricht dabei von einem nichtidealen Backhaul, der Latenzen mit einigen 10 ms spezifiziert (vgl. 3GPP TR 36.932, Scenarios and Requirements for Small Cell Enhancements, Tabelle 6.1-1).

Neu in 5G ist der sogenannte *Integrated Access and Backhaul (IAB)*, bei dem sich Backhaul und Access ggf. auch die gleichen Frequenzressourcen teilen können. Mit IAB existiert eine alternative drahtlose Funktionalität für Backhauling, die direkt durch den 5G-Mobilfunkstandard unterstützt wird. IAB baut auf dem in Release 10 eingeführten LTE Relaying auf. In 5G schließlich wurde Relaying als *Integrated Access and Backhaul* in Release 16 erweitert.

Die beiden wesentlichen Elemente sind der IAB-Donor und der IAB-Node. In der Regel werden ein IAB-Donor mit mehreren IAB-Nodes betrieben. Damit unterstützt IAB ein flexibles und skalierbares Multi-Hop Backhauling. Der IAB-Donor beinhaltet eine gNB- und Core-Funktion. Ein IAB-Node besteht aus einer gNB-Funktion und einer Mobile Termination Funktion (IAB-MT). Während die gNB-Funktion am Netzzugriff, d. h. Verbindung zu den UEs und gleichzeitig am Backhauling beteiligt ist, dient die IAB-MT als Gegenstelle der gNB-Funktion eines benachbarten IAB-Nodes oder IAB-Donors nur für den Backhaul. IAB-Nodes betreiben und kontrollieren somit den Backhaul zu anderen IAB-Nodes und den Service für Ues, in ihrem Abdeckungsbereich, der auch in mehrere Sektoren aufgeteilt sein kann. Für eine UE erscheint der IAB-Node, mit dem es verbunden ist, als eine normale Basisstation.

IAB unterstützt Out-of-Band und In-Band-Backhauling, d. h. Datenverbindung und Backhaul verwenden zwei getrennte bzw. den gleichen Frequenzträger. Beim In-Band-Betrieb muss beachtet werden, dass dieser zwischen DU und MT nur im Halbduplex betrieben werden kann, da die IAB-MT-Seite eines IAB-Nodes nicht empfangen darf, wenn gleichzeitig seine DU-Seite sendet und umgekehrt. Wenn z. B. eine IAB-Node eine Übertragung auf dem Backhaul von einem anderen IAB-Node oder dem IAB-Donor empfängt, darf dieser nicht gleichzeitig im DL senden, weder zu einem anderen IAB-Node noch zu einer UE, da dieses, unabhängig vom Duplex Verfahren (TDD, FDD), zur gleichen Zeit auf der gleichen Frequenz erfolgt. Um dieses zu verhindern, werden die IAB-Einheiten entsprechend konfiguriert, sodass Datenverbindung und Backhaul getrennten Slots zugewiesen werden. Berücksichtigt werden muss aber in diesem Fall, dass für den Backhaul eine entsprechende Datenrate bzw. ein Spektrumsbedarf mit einberechnet werden muss.

4.1.8 Verhalten bei Störungen und Interferenzen

Grundsätzlich ist das 5G RAN darauf ausgelegt, die verfügbare Kanalkapazität bis an die theoretische Grenze, dem sogenannten Shannon Limit, optimal auszunutzen. Diese Grenze wird durch Rauschen und Interferenz, dem SINR, bestimmt. Das Shannon Limit gibt die maximale Bitrate an, die ein Kanal unter gegebenen SINR fehlerfrei übertragen kann. Ein Störer würde dabei so wirken, als ob das SINR sehr schlecht ist.

All diese im Folgenden genannten Strategien zur Anpassung der Datenrate an die aktuellen Kanalzustände im 5G RAN werden ständig automatisch für die Kommunikation vom UE zur Basisstation angewendet. Beabsichtigte oder unbeabsichtigte Störungen führen nur zu einer zeitlichen oder frequenzselektiven Beeinträchtigung des Kanals, worauf das System automatisch reagiert. Ein kompletter Ausfall der Datenübertragung ist deshalb nicht zu erwarten, aber die Servicequalität nimmt entsprechend ab.

Dazu werden verschiedene Techniken angewendet:

Anpassung von

- MIMO-Ordnung, d. h. Anzahl der MIMO-Layer. Bei gegebener Anzahl von Antennen können weniger als die maximal mögliche Zahl an Layern verwendet werden. Die quasi freiwerdenden Antennen erhöhen dann die Antennendiversität, wodurch die Datenübertragung robuster wird.
- Antennen-Diversität, vgl. ebd.
- Modulationsordnung in Kombination mit der Kodierungsrate (Coderate) bei der Kanalkodierung, im Standard als Modulation and Coding Scheme (MCS) bezeichnet. Die Modulationsordnung und die Kodierungsrate sind so gepaart, dass sich eine kontinuierliche Anpassung an die Kanalkapazität ergibt. In anderen Worten: eine kontinuierliche Anpassung der informationstheoretischen Mutual Information.
- Dynamische Zuweisung von Ressourcen in Frequenz- (Ressource Blocks) und Zeitbereich (Slots), abhängig von Messungen der Kanalqualität
- Trägerwechsel bei Mehrfachträgerübertragung (Carrier Aggregation)
- Hybrid Automatic Repeat Request (HARQ). Wiederholte Sendung eines fehlerhaften Datenpakets, wobei die Redundanzinformation aus der Kanalkodierung bei jeder Wiederholung geändert wird. Dieses ist äquivalent zu einer stufenweisen Reduzierung der Coderate. HARQ kann somit als Bestandteil des MCS interpretiert werden.
- Automatic Repeat Request (ARQ) auf höheren Schichten
- Paketwiederholung (Repetition)
- Sendeleistungsregelung (Power Control)
- Automatic Gain Control (AGC)

Bei niedrigen SINR werden MIMO und Modulationsordnungen erniedrigt und die Anzahl der HARQ-Wiederholungen steigt. Z. B. kann mit QPSK und Codierungsrate von $\frac{1}{2}$ ein SINR um 0 dB verkräftet werden. Mit extrem niedrigen Codierungsraten und Paketwiederholung ist es möglich, bei einem SINR weit im negativen Bereich zu empfangen. Ein Beispiel ist die Zellsuche, die Zellen bis zu -14 dB unterm Rauschen detektieren kann.

Natürlich sinkt die Datenrate, je robuster die Übertragung ist. Solange der Empfänger nicht übersteuert bzw. blockiert ist, d. h. die AGC noch wirksam ist, gibt es sehr viele

Möglichkeiten, unter Reduktion der Datenrate eine Datenübertragung aufrecht zu erhalten. Durch die dynamische Zuweisung von Frequenzbereichsressourcen werden, soweit möglich, Spektralbereiche mit niedrigen SINR, z. B. verursacht durch Störungen, vermieden. Dieses geschieht im Zeitbereich mit Slotgranularität, d. h. je nach Numerologie, jede 1, 0,5, 0,25 oder 0,125 ms. **Dieses kann als stark verbessertes, hocheffizientes Frequenzhopping aufgefasst werden, das keinem starren Schema folgt.**

Bei Anwendung von Carrier Aggregation werden Trägerwechsel auf den Träger mit der jeweils besten Übertragungsqualität vorgenommen. Dazu misst das UE permanent im Hintergrund die Stärke aller gefundenen Träger.

Da für ein 5G-Netz jeweils größere Trägerbandbreiten von bis zu 50 MHz³³ als ein Netzwerk betrachtet werden können, ist eine separate manuelle Ausweichstrategie bei Störungen nicht nötig. Es werden daher keine redundanten Frequenzblöcke aufgrund der gewünschten Robustheit bei absichtlichen Störungen benötigt. Ein Ausweichen in Frequenzbereiche außerhalb des UHF-Bandes kann jedoch trotzdem Sinn ergeben.

4.2 Berechnung des Verkehrsmodells

Für den Bandbreitenbedarf ist die maximal zu erwartende Datenmenge bzw. -rate in einer Zelle relevant. Dazu müssen Annahmen über die maximale Anzahl der Teilnehmer, die gleichzeitig mit der Zelle kommunizieren, und die entsprechend verwendeten Datendienste getroffen werden. Diese Annahmen können auf ein mehrzelliges System angepasst werden. Jedoch ist zu berücksichtigen, dass es in einem Szenario mit bewegten Zellen vorkommen kann, dass zeitweise nur eine Zelle erreichbar ist und Teilnehmer zur Entlastung der Zelle nicht auf eine andere wechseln können. Deshalb ist dieses „Worst Case“-Szenario als Grundannahme für ein Datenverkehrsmodell erforderlich.

Im Folgenden wird ein einfaches Datenverkehrsmodell hergeleitet, das auf Parametern beruht, die auf durchschnittliche Werte in einer Zelle basieren. Die erforderliche Bandbreite wird damit aus Annahmen der

- maximal zu erwartenden Datenrate in der Zelle,
- der zu erwartenden durchschnittlichen spektralen Effizienz

und einem Redundanzfaktor berechnet. Der Redundanzfaktor beschreibt das Verhältnis von verfügbarer zu verwendeter Bandbreite. Die entsprechend größere verfügbare Bandbreite ist notwendig, um das verwendete Spektrum verändern zu können und robust zu werden, z. B. gegen Jamming.

³³ So in der Numerologie 0 der Frequency Range 1.

4.2.1 Maximal zu erwartende Datenrate

Eine Abschätzung der maximal erwartbaren Datenrate in einer Zelle kann für den Downlink (DL) durch

$$D^{DL} = \sum_{i=1}^S N_i^{DL} \cdot B_i$$

und den Uplink (UL) durch

$$D^{UL} = \sum_{i=1}^S N_i^{UL} \cdot B_i$$

angegeben werden. Die Bedeutungen der Formelzeichen können der folgenden Tabelle entnommen werden.

Tab. 7: Übersicht der Formelzeichen

Formelzeichen	Bedeutung
D^{DL}	Maximal erwartbare Datenrate im DL
D^{UL}	Maximal erwartbare Datenrate im UL
S	Maximale Anzahl verschiedener Datenservices, z. B. Video, Sprache, Fernsteuerkommandos, Lageinformationen etc., die gleichzeitig verwendet werden.
i	Index eines Datenservices, z. B. Video, Sprache, Fernsteuerkommandos, Lageinformationen etc.
N_i^{DL}	Geschätzte maximale Anzahl der Teilnehmer, die gleichzeitig Datenservice i im DL verwenden.
N_i^{UL}	Geschätzte maximale Anzahl der Teilnehmer, die gleichzeitig Datenservice i im UL verwenden.
B_i	Datenrate in Bits pro Sekunde für Service i

Quelle: Fraunhofer IIS (2022)

Die obigen Formeln sind eine Summe über die verwendeten Datendienste. Jeder Datendienst i wird durch eine Datenrate B_i in Bits/s repräsentiert, für die ein typischer Wert angenommen wird, z. B. 10 Mbit/s für Video- oder 150 Kbit/s für Sprachübertragung etc. Dabei wird vereinfachend angenommen, dass die Datenrate eines Dienstes für jeden Teilnehmenden gleich ist, d. h. es wird ein Durchschnittswert bzw. Erwartungswert angenommen.

Durch die vereinfachende Modellannahme einer durchschnittlichen und somit gleichen Datenrate für jeden Benutzenden des Dienstes kann die akkumulierte Datenrate eines Dienstes in einer Zelle durch Multiplikation der Datenrate des Datendienstes mit der Anzahl der Teilnehmenden N_i^{DL} bzw. N_i^{UL} , die diesen Dienst entweder im DL bzw. UL gleichzeitig verwenden, berechnet werden.

Möglichst realistische Annahmen für N_i^{DL} und N_i^{UL} müssen hierfür in den entsprechenden Szenarien getroffen werden. Eine genaue Schätzung der Werte von N_i^{DL} und N_i^{UL} ist letztendlich erst durch statistische Betrachtungen aus realen Tests in den jeweiligen Szenarien zu ermitteln. Da diese noch nicht vorliegen, müssen hierfür stattdessen Literaturangaben angenommen werden. Zur Validierung der getroffenen Angaben sind zu einem späteren Zeitpunkt Messungen aus realen Feldtests notwendig.

4.2.2 Spektrale Bandbreite

Ein Modell, das die spektrale Bandbreite mit der Datenrate für die 5G NR-Wellenform in Beziehung setzt, ist die näherungsweise Berechnungsformel für die maximal unterstützte Datenrate aus 3GPP TS 38.306, User Equipment (UE) Radio Access Capabilities, Kapitel 4.1.2.

$$\text{data rate (in Mbps)} = 10^{-6} \cdot \sum_{j=1}^J \left(v_{\text{Layers}}^{(j)} \cdot Q_m^{(j)} \cdot f^{(j)} \cdot R_{\text{max}} \cdot \frac{N_{\text{PRB}}^{BW(j),\mu} \cdot 12}{T_s^\mu} \cdot (1 - OH^{(j)}) \right) \quad (1)$$

Die Bedeutungen der Formelzeichen können der folgenden Tabelle entnommen werden.

Tab. 8: Übersicht der Formelzeichen

Formelzeichen	Bedeutung
J	Anzahl der Träger bei Carrier Aggregation
j	Index eines Trägers bei Carrier Aggregation
R_{max}	Maximal Rate des Kanalkodes, 948/1024
$v_{\text{Layer}}^{(j)}$	Anzahl der MIMO-Layer
$Q_m^{(j)}$	Modulationsordnung, i. e. Anzahl Bits pro OFDM Unterträger
$f^{(j)}$	Skalierungsfaktor aus der Menge 1, 0.8, 0.75, 0.4. Parameter, der von Layer 3 konfiguriert wird
μ	Index der verwendeten Numerologie, die den Unterträgerabstand bestimmt. Z. B. $\mu = 0$ entspricht 15 KHz, $\mu = 1$ entspricht 30 KHz etc.
T_s^μ	Durchschnittliche OFDM Symbollänge für Numerologie μ , i.e. $T_s^\mu = 10^{-3} / 14 \cdot 2^\mu$ in Sekunden
$N_{\text{PRB}}^{BW(j),\mu}$	Anzahl der Ressource Blocks (12 Unterträger) für eine von 3GPP spezifizierte Bandbreite (siehe 3GPP TS 38.101-1, NR; User Equipment (UE) Radio Transmission and Reception; Part 1: Range 1 Standalone, Kapitel 5.3.2. mit Numerologie μ
$OH^{(j)}$	Overhead Faktor: <ul style="list-style-type: none"> ▪ 0,14 für DL ▪ 0,08 für UL

Quelle: Fraunhofer IIS (2022)

In dieser Formel wird die spektrale Bandbreite durch die Anzahl der verwendeten Resource Blocks (RB) $N_{\text{PRB}}^{BW(j),\mu}$ repräsentiert. Nach der 5G NR-Spezifikation besteht ein RB aus 12 OFDM Unterträger, d. h. seine Bandbreite ist 12-mal der Unterträgerabstand.

Obige Formel beinhaltet eine Summe über die einzelnen Träger bei Carrier Aggregation, sodass alle Parameter mit hochgestellten (j) für jeden Träger individuell eingestellt werden. Für den gegebenen Anwendungsfall im UHF-Spektrum ist davon auszugehen, dass *Intra-Band Contiguous Carrier Aggregation* verwendet wird. Zur weiteren Modellvereinfachung können daher die von (j) abhängigen Parameter $v_{\text{Layer}}^{(j)}$, $Q_m^{(j)}$, $f^{(j)}$ und $OH^{(j)}$ für alle Träger gleich angenommen bzw. als Durchschnittswerte über die Träger betrachtet werden.

Diese Parameter können somit wie folgt substituiert werden:

$$v_{\text{Layer}}^{(j)} = v_{\text{Layer}}, Q_m^{(j)} = Q_m, f^{(j)} = f, OH^{(j)} = OH.$$

Damit vereinfacht sich die Gleichung zu

$$\text{data rate (bit/s)} = D^{DL,UL} = v_{Layer} \cdot f \cdot Q_m \cdot R \cdot (1 - OH) \cdot \frac{12}{T_s^\mu} \cdot \sum_{j=1}^J N_{PRB}^{BW(j),\mu} \quad (2)$$

Die Summe beschreibt die akkumulierte Gesamtzahl N_{PRB}^μ der benötigten Resource Blocks (RB) über alle Träger. Für das vereinfachte Modell ist es jedoch nicht notwendig, diese Summe mitzuführen, vielmehr ist es sinnvoller, die akkumulierte Gesamtzahl der RBs $N_{PRB}^\mu = \sum_{j=1}^J N_{PRB}^{BW(j),\mu}$ aus der Datenrate $D^{DL,UL}$ zu bestimmen und danach eine sinnvolle Aufteilung auf Träger vorzunehmen. Somit ergibt sich aus vorhergehender Formel

$$\begin{aligned} D^{DL,UL} &= v_{Layer} \cdot f \cdot Q_m \cdot R \cdot (1 - OH) \cdot \frac{12}{T_s^\mu} \cdot N_{PRB}^\mu \\ &= v_{Layer} \cdot f \cdot Q_m \cdot R \cdot (1 - OH) \cdot 1000 \cdot 12 \cdot 14 \cdot 2^\mu \cdot N_{PRB}^\mu \end{aligned} \quad (3)$$

Bei der Umstellung auf N_{PRB}^μ muss berücksichtigt werden, dass N_{PRB}^μ eine ganze Zahl sein muss. D. h. Umstellung auf N_{PRB}^μ und Aufrunden auf ganze Zahlen ergibt

$$N_{PRB}^{\mu,DL,UL} = \left\lceil \frac{D^{DL,UL}}{v_{Layer} \cdot f \cdot Q_m \cdot R \cdot (1 - OH) \cdot 1000 \cdot 12 \cdot 14 \cdot 2^\mu} \right\rceil \quad (4)$$

Eine weitere sinnvolle Vereinfachung ist die Zusammenfassung der Produkte $Q_m \cdot R$, da die beiden Faktoren entsprechend der Spezifikation 3GPP TS 38.214; NR; Physical Layer Procedures for Data, Tabellen 5.1.3.1-1 bis 5.1.3.1-4, nicht unabhängig voneinander sind. Das vereinfacht nicht nur das Modell, sondern verhindert auch nicht unterstützte Parametrisierung. Die Zusammenfassung durch $\sigma = Q_m \cdot R$ beschreibt die spektrale Effizienz. Die spektrale Effizienz ist gemäß der Informationstheorie nach Shannon als die effektive Anzahl von Informationsbits definiert, die mit einem Unterträger übertragen werden kann. Die effektive Anzahl der Informationsbits ergibt sich aus dem Quotienten der Anzahl der erfolgreich empfangenen Bits (Anzahl der gesendeten Bits abzüglich der Anzahl der Bitfehler, die durch das Signal to Interference and Noise Ratio (SINR) des Funkkanals verursacht werden, und der Anzahl der gesendeten Bits.

Zusammen mit den unterschiedlichen Werten für den Overhead-Faktor in vorhergehender Tabelle erhält man schließlich für den Downlink

$$N_{PRB}^{\mu,DL} = \frac{D^{DL}}{v_{Layer} \cdot f \cdot \sigma \cdot (1 - OH^{DL}) \cdot 1000 \cdot 12 \cdot 14 \cdot 2^\mu}, \quad (5)$$

und den Uplink

$$N_{PRB}^{\mu,UL} = \frac{D^{UL}}{v_{Layer} \cdot f \cdot \sigma \cdot (1 - OH^{UL}) \cdot 1000 \cdot 12 \cdot 14 \cdot 2^\mu}. \quad (6)$$

Zusammenfassung der Konstanten und Einsetzen der Werte für OH^{DL} und OH^{UL} ergibt für den Downlink

$$N_{PRB}^{\mu,DL} = \frac{D^{DL}}{v_{Layer} \cdot f \cdot \sigma \cdot 144480 \cdot 2^\mu}, \quad (7)$$

und den Uplink

$$N_{PRB}^{\mu,UL} = \frac{D^{UL}}{v_{Layer} \cdot f \cdot \sigma \cdot 154560 \cdot 2^\mu}. \quad (8)$$

In der Realität wäre die spektrale Effizienz für jeden Teilnehmenden individuell anzugeben. Dieses würde allerdings den Rahmen für ein vereinfachtes Modell sprengen, da es schwierig ist, die spektrale Effizienz bei einer großen Zahl von Teilnehmenden für jeden individuell zu bestimmen und diese sich auch aufgrund der Mobilität ständig ändert. Daher wird ein einzelner Wert für σ als Durchschnitts- bzw. Erwartungswert für alle Teilnehmenden angenommen bzw. abgeschätzt. Wie bei den Werten von N_i^{DL} und N_i^{UL} ist eine genauere Schätzung letztendlich durch statistische Betrachtungen aus realen Tests des jeweiligen Szenarios zu ermitteln. Für Worst Case-Szenarien, mit z. B. allen Teilnehmenden am Zellrand, ist hingegen die Annahme eines Durchschnitts- bzw. Erwartungswertes von σ für alle Teilnehmenden gut geeignet. Die von 5G unterstützten Wertebereiche für die durch die oben genannten Tabellen 5.1.3.1-1 bis 5.1.3.1-4 repräsentierten Konfigurationen sind:

- 3GPP TS 38.214, Tabelle 5.1.3.1-1: 0,2344 bis 5,5547
- 3GPP TS 38.214, Tabelle 5.1.3.1-2: 0,2344 bis 7,4063
- 3GPP TS 38.214, Tabelle 5.1.3.1-3: 0,0586 bis 4,5234
- 3GPP TS 38.214, Tabelle 5.1.3.1-4: 0,2344 bis 9,2578

Dabei repräsentieren die Tabellen 5.1.3.1-1, 5.1.3.1-2 sowie 5.1.3.1-4 die Standardkonfigurationen für Blockfehlerraten, die in Kombination mit Hybrid Automatic Repeat Request (hybrid ARQ bzw. HARQ) eine bestmögliche Ausnutzung der theoretisch möglichen Kanalkapazität nach dem Shannon-Theorem ergeben. Der Unterschied dieser Tabellen ist die maximal unterstützte Modulationsordnung QAM64, QAM256 bzw. QAM1024. Tabelle 5.1.3.1-3 hingegen ist auf sehr niedrige Blockfehlerraten ausgelegt, d. h. besonders robuste Übertragung mit niedrigen Latenzen durch weniger HARQ Retransmissionen, bei allerdings schlechter Ausnutzung der Kanalkapazität.

Wie oben erwähnt, besteht ein RB aus 12 Unterträgern, d. h. seine Bandbreite ist 12-mal der Unterträgerabstand. Für die unterschiedlichen Numerologien ergeben sich also die folgenden RB-Bandbreiten

- $\mu = 0$ (Unterträgerabstand 15 KHz): 180 KHz
- $\mu = 1$ (Unterträgerabstand 30 KHz): 360 KHz
- $\mu = 2$ (Unterträgerabstand 60 KHz): 720 KHz
- $\mu = 3$ (Unterträgerabstand 120 KHz): 1,44 MHz

Damit lässt sich schließlich die minimal benötigte spektrale Bandbreite für DL und UL aus $N_{PRB}^{\mu,DL,UL}$ mit

$$B^{DL,UL} = N_{PRB}^{\mu,DL,UL} \cdot 12 \cdot 15000 \cdot 2^\mu . \quad (9)$$

bestimmen.

Das Einsetzen der Gleichungen (7) und (8) ergibt schließlich für die Bandbreite im Downlink

$$B^{DL} = \frac{D^{DL} \cdot 1,246}{v_{Layer} \cdot f \cdot \sigma} , \quad (10)$$

und im Uplink

$$B^{UL} = \frac{D^{UL} \cdot 1,165}{v_{Layer} \cdot f \cdot \sigma} . \quad (11)$$

4.3 Modellhafte Datenraten von D-LBO-Funkanwendungen

Für die Betrachtungen wurden folgende exemplarische Datenraten angenommen. Hierbei wird deutlich, dass vor allem Anwendungen der Hauptfunktion 5 Multimedia – u. a. Live-Streams der Kamerasysteme von Fahrzeugen oder von hochauflösenden Überwachungsdrohnen sowie von Body-Cams abgessener Soldatinnen und Soldaten – einen wesentlichen Treiber der benötigten Datenraten darstellen.

Tab. 9: Durchschnittliche Datenraten von D-LBO-Funkanwendungen im Verkehrsmodell

Dienst	Datenrate [Mbit/s]	Anforderung	Häufigkeit
Soldaten-(Gruppen)Funk Sprache	64×10^{-3}	VoIP 64kBit/s pro Richtung	Kontinuierliche Nutzung
Große Dateninhalte (z. B. Softwareupdates) Up-/Download	13	Größere Downloads mit annehmbarer Geschwindigkeit, 100 MB in 60 sec pro TN, bei Bedarf	Burst-Zugriff
GeoPosition, Blueforce Tracking	$0,96 \times 10^{-3}$	32 Bit x 3 Dimensionen, einmal pro Sekunde	Kontinuierliche Nutzung
Bild- und Videoübertragungen (inkl. Aufklärung)	10	FHD@32Hz	Kontinuierliche Nutzung
Zugriff auf taktische Informationen im Shared Information Space (SIS) D-LBO Aktualisierung der redundant verteilten Informationen	6	Größere Datenmengen (Bild/ Video) bei annehmbarer Geschwindigkeit, jedoch mindestens 1 Mbit/s kontinuierlich verfügbare Bandbreite für kritische Informationen	Überwiegend Burst-Zugriffe
Sensorkommunikation und Drohnensteuerung	25	UHD@60Hz Positionsdaten, Telemetrie	Kontinuierliche Nutzung

Quelle: Fraunhofer IIS (2022)

Für die Kommunikation wird davon ausgegangen, dass ähnliche Übertragungsparameter, wie sie aktuell für Mobilfunk (5G) verwendet werden, zum Einsatz kommen. Dabei werden diese Parameter so gewählt, dass sich ein ausgewogenes Verhältnis zwischen erzielbarer Datenrate und überbrückbarer Entfernung ergibt.

5 D-LBO-Verkehrsmodell: Einsatzszenarien und resultierende Frequenzbedarfe

Im Folgenden werden für die Zielstellung der Studie ergebnisrelevante Einsatzszenarien für den Bandbreitenbedarf im UHF-Frequenzbereich 470-694 MHz betrachtet. Grundlage für die Modellierung der Einsatzszenarien bilden die Aufgaben der Bundeswehr, für den der D-LBO-Verbund die taktische Kommunikation bereitstellen wird (vgl. Kapitel 3.2.1).

Diese folgenden Einsatzszenarien wurden ausgewählt, da sie bestimmte extreme Anforderungen („Spitzenlasten“) an den Bandbreitenbedarf stellen. Im Vergleich zu diesen haben andere Einsätze, die sich aus dem Aufgabenkatalog der Bundeswehr ableiten lassen, nur abgeschwächte Bandbreitenbedarfe und werden daher nicht näher im Einzelnen betrachtet.

Es wird für alle Szenarien davon ausgegangen, dass die Kommunikation im UHF-Band nur für die Kommunikation zwischen den taktischen Knoten bzw. zwischen taktischen Knoten und rückwärtigen, verlegefähigen IT-Systemen der höheren Führungsebenen stattfindet (Backbone-Kommunikation im D-LBO-Verbund). Die Zugangsnetze zu den Endgeräten der Soldatinnen und Soldaten und Fahrzeuge werden auf anderen Frequenzbändern betrieben.

Zusätzlich zum Einsatz für die Kommunikation im D-LBO-Backbone kann der Frequenzbereich 470 MHz–690 MHz im Bedarfsfall im Rahmen des Host Nation Support auch durch andere Bündnisarmeen genutzt werden. Insbesondere der Frequenzteilbereich von 470-512 MHz ist hierfür von besonderer Relevanz. Eine genaue Quantifizierung analog zu dem in Kapitel 4.3 dargelegten methodischen Vorgehen ist jedoch nicht möglich, da keine genauen Angaben zu den militärischen Funkanwendungen anderer Bündnisarmeen vorliegen. Die Bandbreitenbedarfe der Bündnisarmeen werden in der Systematik dieser Studie daher stattdessen in Kapitel 6.2.1 qualitativ dargelegt.

In den nachfolgenden Szenarien wird zunächst die jeweilige akkumulierte Datenrate abgeschätzt und daraus mit Gleichungen (10) und (11) aus Kapitel 4.2.2 die benötigte Netztobandbreite berechnet. Dabei sind geeignete Werte für den Skalierungsfaktor f , die Anzahl der MIMO-Layer ν_{Layer} sowie die spektrale Effizienz σ zu finden.

Der Skalierungsfaktor f beschreibt die Verarbeitungsleistung im Basisband eines Endgerätes, bzw. MTN. Das entspricht dem Faktor zwischen der Konfigurierbarkeit eines MTN und des Anteils, den der MTN mit seiner Prozessorleistung verarbeiten kann. Z. B., wenn die Prozessorleistung maximal eine Bandbreite von 100 MHz mit 4x4 MIMO verarbeiten kann, dann würde bei einer Konfiguration mit 2x100 MHz die Leistung nur für 2x2 MIMO ausreichen. In diesem Falle würde der Skalierungsfaktor bezogen auf einen Träger 0,5 betragen. In den untenstehenden Szenarien wird ein Highend Endgerät (MTN) angenommen, sodass der Skalierungsfaktor $f = 1$ angewandt wird.

Des Weiteren wird angenommen, dass jeder MTN mit mindestens zwei Antennen ausgestattet ist. Somit wird für die Anzahl der MIMO-Layer $\nu_{Layer} = 2$ angenommen.

Die spektrale Effizienz σ hängt von den jeweiligen Kanalbedingungen ab, die für jedes Szenario individuell angenommen wird. Z.B., wenn von Störungen auszugehen ist, die einen sehr schlechten Funkkanal bedingen, muss eine sehr niedrige spektrale Effizienz angenommen werden. Es muss hier jedoch angemerkt werden, dass eine Annahme für

die spektrale Effizienz zum jetzigen Zeitpunkt nicht exakt möglich ist. Dazu fehlen praktische Erfahrungen, da mobile Basisstationen ein neues Anwendungsszenario darstellen, das bei herkömmlichen kommerziellen Mobilfunknetzen bisher nicht vorkommt. Die Werte müssen daher geschätzt werden.

Wie bereits in Kapitel 4.2.2 beschrieben, müsste die spektrale Effizienz für jeden Teilnehmenden individuell bestimmt werden. Die Komplexität eines entsprechenden Verkehrsmodells würde den Rahmen dieser Studie sprengen. Um das Modell handhabbar zu machen, wird daher ein Mittelwert für σ über alle Teilnehmenden verwendet. Um diesen Mittelwert näherungsweise zu bestimmen, wären jedoch praktische Feldtests notwendig, mit denen σ angepasst werden kann. Selbst mit einem solchen *Parameter fitting* bleibt eine pauschale Angabe der spektralen Effizienz nur ein Richtwert, der stark schwanken kann, da die Anzahl der Einflussgrößen außerordentlich hoch ist. Die in den folgenden Szenarien getroffenen Annahmen stellen daher eine erste Annäherung dar und sind daher mit hoher Unsicherheit behaftet.

5.1 Szenario „Backbone des D-LBO-Verbunds“

Bei diesem Szenario soll der Frequenzbedarf des Backbones, d.h. die Kommunikation zwischen den mobilen taktischen Knoten und den rückwärtigen verlegefähigen IT-Systemen, für großräumige, kritische Kommunikation betrachtet werden.

Hierbei geht es um den Datenverkehr, der für die Übertragung von Informationen (Bilddaten, Sensorik-Daten, GPS-Informationen, Sprachkommunikation) anfällt, die

- an die Leitstände übertragen werden sowie
- die aus dem Feld angefragt und entweder aus dem Tactical Node Core oder aus zentralen Datenbanken der Bundeswehr oder aus dem Internet abgerufen werden.

Bei der Übertragung von Informationen aus dem Feld ist zu berücksichtigen, dass hierbei nur ein Bruchteil der vor Ort anfallenden Datenmengen (ggf. verarbeitet, aggregiert) an die Leitstände übertragen werden. Insbesondere die anfallenden Kamerasignale, die nur zur Steuerung der Fahrzeuge erzeugt werden, aber auch Aufklärungs-Bildsignale, die keine taktischen Informationen enthalten, werden zwar ggf. lokal gespeichert, aber nicht in das Backbone (TaWAN) übertragen.

Parameter des Szenarios

Für das Szenario „Backbone des D-LBO-Verbunds“ wird angenommen, dass auf einem Truppenübungsplatz ein Einsatzverband in der Größe eines Bataillons mit ca. 750 Soldatinnen und Soldaten und bis zu 100 Fahrzeugen als D-LBO-Verbund operiert und Daten untereinander und mit dem Leitstand über ein gemeinschaftliches Backbone (TaWAN) austauschen.

Hierbei wird von einem Bewegungsraum des Einsatzverbands von ca. 8km x 8km ausgegangen. Hierbei ist zu beachten, dass es sich um maximale Bewegungsräume handelt, die aus den zellularen Netzen der MTNs abgeleitet sind. Die tatsächlichen Bewegungsräume eines zusammen agierenden Verbands dürften in der Regel geringer sein.

Die Kanalbedingungen werden als potenziell herausfordernd angesehen, d.h. eine robuste Modulation ist hauptsächlich wegen der gegenüber kommerziellen Mobilfunklösungen schlechteren Antennenplatzierung (geringere Höhe auf den Fahrzeugen) und unter Umständen zu erwartenden Interferenzen im UHF-Band notwendig.

Es ergeben sich folgende Modellparameter für die weiteren Berechnungen:

Tab. 10: Modellparameter des Szenarios „Backbone des D-LBO-Verbunds“

Dienst	Anzahl TC Up-link	Anzahl TC Downlink	Datenrate [Mbit/s]	Erläuterung
Soldat:innen- (Gruppen-) Funk Sprache	20	20	2,56	Gruppenführer:innen, die <i>außerhalb</i> der eigenen Gruppe kommunizieren
Dateninhalte (Software) Up-/Download	0	0	0	Nur bei Bedarf (z.B. für Wartungshandbücher)
GeoPosition, Blueforce Tracking	0	850	0,08	Soldat:innen (750) und jedes Fahrzeug (100) senden ihre Position
Bild- und Videoübertragungen (inkl. Aufklärung) ohne Drohnen	1	10	110	10 (bis 15) ausgewählte hochauflösende Kamerasysteme im Feld, die die Daten an TNs liefern, die diese zur Leitzentrale weitergeben
Zugriff auf den „Shared Information Space (SIS)“ D-LBO	2	0	6	Synchronisation der Daten im TN (Cache), Karten und Lage-Updates
Sensorkommunikation und Drohnensteuerung inkl. Videoübertragung	0	1	25	Ein Videobild von einer Drohne
SUMME (gerundet)			143,6	

Quelle: Fraunhofer IIS (2022)

Für die Datenraten/Anzahl der Nutzer:innen beziehen sich die angegebenen Werte auf einen unterstellten kontinuierlichen, durchschnittlichen Kommunikationsbedarf in diesem Anwendungsszenario.

Die in diesem Szenario angesetzten 10 Kamerasysteme im Feld stellen einen angenommenen Grundbedarf dar. Je nach Situation (z. B. bei Übungen zu Analysezwecken) kann auch eine höhere Anzahl notwendig werden. Auch vor dem Hintergrund der technischen Weiterentwicklung der Ausrüstung kann zukünftig von einem höheren Bedarf an gleichzeitigen Übertragungssystemen ausgegangen werden.

Spektrumsbedarfe des Szenarios

Die Summe der in diesem Szenario benötigten Datenraten im Up- und Downlink beträgt 143,6 Mbit/s. Zur Berechnung der Bandbreite werden neben den oben genannten Werten für den Skalierungsfaktor $f = 1$ und die Anzahl der MIMO-Layer $v_{Layer} = 2$ ein Funkkanal mit nicht allzu hohen Störungen angenommen und somit eine moderate Kanalqualität. Die spektrale Effizienz wird somit durch $\sigma = 2$ abgeschätzt. Dies ergibt eine Frequenzbandbreite von 44,4 MHz.

Im ansonsten identischen Szenario ergäbe sich bei verschlechterten Kommunikationsbedingungen mit einer spektralen Effizienz von $\sigma = 0,3$ wie z. B. mehr Interferenzen oder höhere Signalabschattung ein deutlich höherer Frequenzbedarf von 295,4 MHz, um die formulierten Kommunikationsbedarfe weiterhin in gleicher Qualität sicherzustellen.

Damit ergibt sich je nach Kommunikationsbedingung bei Verwendung einer 3GPP-5G-Wellenform zur Übertragung des Grundbedarfs eines Bataillons auf einem Truppenübungsplatz eine benötigte Frequenzbandbreite von 44,4 MHz-295,4 MHz.

Die Mindestanforderung an ein Spektrum von 44 MHz stellt dabei eine Untergrenze bei guten Kommunikationsbedingungen dar. Die Annahmen, dass bei 100 Fahrzeugen und 750 Soldat:innen im Einsatz nur 10 Videolinks dauerhaft zur Verfügung stehen müssen, ist eine konservative Schätzung.

Allein bei einer Erhöhung der gleichzeitigen Videostreams auf 15 Übertragungen ergibt sich, unter ansonsten identischen Bedingungen, ein zusätzlicher Frequenzbedarf von 15,3 MHz (im moderaten Szenario) bzw. ein zusätzlicher Bedarf von 101,9 MHz (schlechte Kommunikationsbedingungen), was dann in Summe bereits einen Frequenzbedarf von 59,7 MHz bzw. 397,3 MHz ergibt.

Zudem handelt es sich hierbei nur um den Spektrumsbedarf für die Größenordnung eines Bataillons. In Großübungen mit mehreren Bataillonen oder gar zwei Brigaden addiert sich der Spektrumsbedarf für das TaWAN entsprechend auf, sodass auch unter guten Kommunikationsbedingungen der Bedarf von 100 MHz überschritten werden kann. Hinzu kommt, dass insbesondere bei Einbindung von Nato-Partnern in die Übung logisch getrennte TaWANs für beide Parteien notwendig werden, da sie mit eigenen Funksystemen, Battle-Management-Systemen und eigenem Leitstand operieren und die Funkzellen sich überlappen.

5.2 Szenario „Amtshilfe Hochwasser“

Dieses Szenario zeigt exemplarisch den Frequenzbedarf bei der Kommunikation im Katastrophenunterstützungsfall. Die nachfolgende Grafik fasst die Leistungsfähigkeit der Bundeswehr bei der sog. „Amtshilfe Hochwasser“ zusammen:

Abb. 6: Kennzahlen der Bundeswehr für das Szenario „Amtshilfe Hochwasser“



Übersicht der eingesetzten Kräfte und Mittel während der Amtshilfe nach dem Hochwasser

© Bundeswehr

Quelle: Bundeswehr: Hilfe in der Not: Bundeswehr im Einsatz in den Hochwassergebieten, online unter: <https://www.bundeswehr.de/de/organisation/streitkraeftebasis/bundeswehr-einsatz-hochwassergebiet>, zuletzt abgerufen am 30.06.2022

Parameter des Szenarios

Für das Szenarios „Amtshilfe Hochwasser“ wird ein großflächiges Einsatzgebiet ca. 20km x 20km unterstellt. Die Anzahl der im Einsatz befindlichen Kräfte wird mit ca. 2.300, die der Fahrzeuge mit 470 angenommen. Das Gelände im Einsatzgebiet bedingt teilweise Signalabschattungen, die sonstigen Kanalbedingungen werden als moderat angesehen.

Gegenüber dem D-LBO-Backbone-Szenario wird ein deutlich erhöhter Sprachkommunikationsbedarf angenommen. Dieser kann insbesondere dann entstehen, wenn es zu Ausfällen des öffentlichen Mobilfunknetzes oder sogar der BOS-Netze durch Elementarschäden kommt. Es ergeben sich folgende Modellparameter für die weiteren Berechnungen:

Tab. 11: Modellparameter des Szenarios „Amtshilfe Hochwasser“

Dienst	Anzahl TC Uplink	Anzahl TC Downlink	Datenrate [Mbit/s]	Erläuterung
Soldat:innen- (Gruppen-) Funk Sprache	115	115	14,72	Eine aktive Funkverbindung je 20 Soldat:innen (hoher Koordinierungsaufwand)
Dateninhalte (Software) Up-/Download	0	0	0	Nur bei Bedarf (z.B. für Wartungshandbücher)
GeoPosition, Blueforce Tracking	0	470	0,045	Jedes Fahrzeug (470) sendet seine Position
Bild- und Videoübertragungen (inkl. Aufklärung) ohne Drohnen	0	0	0	Keine Videoverbindung zu Soldat:innen oder Fahrzeugen
Zugriff auf den „Shared Information Space (SIS)“ D-LBO	10	1	66	Synchronisation der Daten in lokalen Lagezentren; Karten und Lage-Updates
Sensorkommunikation und Drohnensteuerung (inkl. Videoübertragung)	0	5	125	5 Drohnen zur Aufklärung
SUMME (gerundet)			205,8	

Quelle: Fraunhofer IIS (2022)

Spektrumsbedarf des Szenarios

Für die Datenraten/Anzahl der Nutzer:innen beziehen sich die angegebenen Werte auf den kontinuierlichen, durchschnittlichen Kommunikationsbedarf in diesem Anwendungsszenario.

Die Summe der in diesem Szenario benötigten Datenraten im Up- und Downlink beträgt 205,8 Mbit/s. Zur Berechnung der Bandbreite wird neben den oben genannten Werten für den Skalierungsfaktor $f = 1$ und die Anzahl der MIMO-Layer $v_{Layer} = 2$ ein Funkkanal mit nicht allzu hohen Störungen angenommen, allerdings mit etwas schlechterer Kanalqualität durch die größere räumliche Ausdehnung und damit größere Zellabstände. Die spektrale Effizienz wird somit durch $\sigma = 1$ abgeschätzt. **Damit ergibt sich bei Verwendung einer 3GPP-5G-Wellenform zur Übertragung eine benötigte Frequenzbandbreite von 128,9 MHz.**

5.3 Szenario „Marschkolonne“

Parameter des Szenarios

Bei diesem Szenario wird von einer sich in Bewegung befindlichen Marschkolonne, bestehend aus 25 Fahrzeugen und 150 Soldat:innen ausgegangen. Die räumliche Ausdehnung ist im Gegensatz zu den vorangegangenen Szenarien mit angenommenen 1 km x 3 km vergleichsweise gering. Der Kommunikationsbedarf ergibt sich hauptsächlich aus der Koordinierung per Funk und dem Zugriff auf gemeinsame Datenbestände (z.B. Kartenmaterial). Die Kanalbedingungen werden als moderat angesehen.

Tab. 12: Modellparameter des Szenarios „Marschkolonne“

Dienst	Anzahl TC Uplink	Anzahl TC Downlink	Datenrate [Mbit/s]	Erläuterung
Soldat:innen- (Gruppen-) Funk Sprache	25	25	3,2	Eine Person pro Fahrzeug
Dateninhalte (Software) Up-/Download	0	0	0	Nur bei Bedarf (z.B. für Wartungshandbücher)
GeoPosition, Blueforce Tracking	0	25	0,0024	Jedes Fahrzeug (14) sendet seine Position
Bild- und Videoübertragungen (inkl. Aufklärung)	0	0	0	Keine Videoverbindung zu Soldat:innen oder Fahrzeugen
Zugriff auf den „Shared Information Space (SIS)“ D-LBO	2	0	12	Synchronisation der Daten in lokalen Lagezentren; Karten und Lage-Updates
Sensorkommunikation und Drohnensteuerung	0	0	0	Keine Drohnen in diesem Szenario notwendig
SUMME (gerundet)			15,2	

Quelle: Fraunhofer IIS (2022)

Spektrumsbedarf des Szenarios

Die Summe der in diesem Szenario benötigten Datenraten im Up- und Downlink beträgt 15,2 Mbit/s. Zur Berechnung der Bandbreite wird neben den oben genannten Werten für den Skalierungsfaktor $f = 1$ und die Anzahl der MIMO Layer $v_{Layer} = 2$ ein Funkkanal mit nicht allzu hohen Störungen angenommen und somit eine moderate Kanalqualität. Die spektrale Effizienz wird somit durch $\sigma = 2$ abgeschätzt. **Damit ergibt sich bei Verwendung einer 3GPP-5G-Wellenform zur Übertragung eine benötigte Frequenzbandbreite von 5,1 MHz pro Einsatzverband.**

Bei größeren Aufmarschszenarios von mehreren unabhängigen Einheiten zu z. B. gemeinsamen Übungen oder im Verteidigungsfall benötigt jede Einheit ihr eigenes Spektrum, wenn sie sich in räumlicher Nähe bewegen.

Die Frequenzbandbreite vervielfacht sich entsprechend der Anzahl zu koordinierender Einsatzverbände. Bei z. B. drei unabhängigen Verbänden ergibt sich dann bereits eine benötigte Frequenzbandbreite von 15,3 MHz. Gleiches gilt, wenn befreundete NATO-Verbände das gleiche Frequenzspektrum nutzen.

Sofern für bestimmte Anwendungen (bspw. teleoperiertes Fahren) auch für Marschkolonnen zukünftig Video-Links relevant werden, erhöht sich auch hier der Bedarf nach Frequenzspektrum weiter.

5.4 Zusammenfassung der szenarienabhängigen Frequenzbedarfe

Zusammenfassung Szenarien

Bei den vorgestellten Szenarien ergeben sich Frequenzspektrumsbedarfe von rd. 5 MHz bis zu rd. 397 MHz.

- Szenario „Backbone des D-LBO-Verbunds“: 44,4–397,3 MHz
- Szenario „Amtshilfe Hochwasser“: 128,9 MHz
- Szenario „Marschkolonne“: 5,1–15,3 MHz

Diese sehr große Schwankungsbreite wird stark von den genutzten Diensten, die wiederum auch von der Frequenz der Nutzung abhängen, und den individuellen Kanalbedingungen bedingt. Gerade diese sind ohne praktische Feldtests schwer enger einzugrenzen und unterliegen teilweise auch während der Nutzung starken Schwankungen. Für die Formulierung eines konservativen Spektrumsbedarfs sollte daher grundsätzlich von eher schlechten Kanalbedingungen ausgegangen werden. Den höchsten Bedarf an Bandbreite verursachen in allen aufgezeigten Szenarien die Anwendungen, die der Hauptfunktion Multimedia (HF 5) zugeordnet sind. Da zu erwarten ist, dass deren Einsatz und qualitative Anforderungen in Zukunft weiter zunehmen werden, kann perspektivisch auch von einem weiter steigenden Bedarf an breitbandiger Kommunikation im D-LBO-Verbund ausgegangen werden.

Zu berücksichtigen ist auch, dass der aggregierte Spektrumsbedarf im Fall räumlich benachbarter und sich im Abdeckungsbereich des Funksystems überlappender Funkzellen bei fehlender Koordinierung weiter ansteigen kann. Der Reuse-Faktor 1 gilt nur innerhalb eines Netzwerkes mit koordinierten Funkzellen (vgl. Kapitel 4.1.2). Für den Fall nicht-koordinierter benachbarter Netze ergäbe sich somit ein größerer Spektrumsbedarf als bei (über ein gemeinsames Backbone) koordinierten Netzen. Im Kontext dieser Studie könnte dieser Fall z. B. bei gemeinsam operierenden Verbänden aus unterschiedlichen Ländern in enger räumlicher Nähe, zum Beispiel bei internationalen Großübungen, eintreten. Bei benachbarten Einsatzverbänden, deren zellulare Netze nicht koordiniert sind, würde somit pro Einsatzverband entsprechend weniger Spektrum zur Verfügung stehen.

Frequenzbedarfe unter non-kooperativen Bedingungen

Klassische Verfahren zur Sicherstellung der Robustheit und Abhörsicherheit wie Frequenz-Hopping etc., die zu einem erhöhten Spektrumsbedarf führen, können in ihrer Funktionsweise nicht auf zellulare Netze übertragen werden.

Breitbandige, zellulare Netze haben stattdessen eine Reihe von Standard-inhärenter Mechanismen, um mit Störungen, wie unter non-kooperativen Bedingungen zu erwarten sind, umzugehen. Wie in Kapitel 4.1.8 beschrieben, ist im 5G-NR-System für die Kompensation von Störungen (schlechter SINR), wie sie unter non-kooperativen Bedingungen zu erwarten sind, ein erhöhter Spektrumsbedarf prinzipbedingt nicht zwangsläufig notwendig.

Das Vorhalten von redundantem Spektrum würde jedoch die Möglichkeiten erhöhen, Spektralanteilen mit schlechtem SINR auszuweichen und somit die Störresistenz zu verbessern.

6 Kooperative Frequenznutzungen mit anderen Funkdiensten

6.1 Regulatorischer Rahmen kooperativer Frequenznutzungen

6.1.1 Bedarfsgerechte Bereitstellung an UHF-Spektrum für Rundfunkdienste

Zu den bestehenden primären Nutzern im Frequenzbereich 470-694 MHz zählen aktuell öffentlich-rechtliche Rundfunkveranstalter sowie Media Broadcast (Teil der Freenet AG) als Anbieter von Rundfunkdiensten.

Die Bundesnetzagentur (BNetzA) beabsichtigt, das Spektrum 470-694 MHz nach 2030 bedarfsgerecht an bestehende Nutzer und neue Bedarfsträger unter Berücksichtigung der künftigen Nachfrage und technologischer Effizienzpotenziale zuzuteilen.

Aufgrund der aktuell stagnierenden Nutzerentwicklung beim frei empfangbaren terrestrischen Fernsehen und der stark rückläufigen Abonnemententwicklung bei der DVB-T2-TV-Plattform Freenet TV erscheint es fraglich, ob nach 2030 zur Befriedigung der Nutzungsnachfrage noch ein Großteil des bisherigen Frequenzbereiches 470-694 MHz für die terrestrische Übertragung von Rundfunkdiensten benötigt werden dürfte. Aktuelle Äußerungen des TV-Plattformbetreibers Freenet zur Zukunftsfähigkeit des DVB-T2-Plattformbetriebs bestätigen dies.³⁴

Auch die öffentlich-rechtlichen Rundfunkanbieter sind nicht dazu verpflichtet, ihr Programmangebot terrestrisch zu übertragen. Der Grundversorgungsauftrag der öffentlich-rechtlichen Anbieter, der eine flächendeckende Verfügbarkeit des grundständigen Programmangebotes vorsieht, ist in seiner Ausgestaltung technologieneutral und kann auch anderweitig erfüllt werden.³⁵

Als zukünftige primäre Nutzer mit Mobilfunkdiensten im Frequenzbereich 470-694 MHz kommen neben dem Militär zum einen Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS) in Betracht, welche aktuell nicht über ausreichendes Spektrum für hochbitratige Funkanwendungen verfügen. Aus diesem Grund haben die BOS-Netzbetreiber zusammen mit der Bundeswehr, welche insbesondere zur Unterstützung von Großlagen

³⁴ „Freenet-CEO Christoph Vilanek erklärte in der aktuellen Ausgabe des TV-Helden-Podcasts, er sehe für 2030 ‚nach heutigem Wissen‘ das ‚natürliche Ende‘ von DVB-T2. Schon jetzt sei freenet TV bzw. generell das terrestrische Fernsehen kein Wachstumsthema mehr“, zitiert nach Teltarif.de (2022): freenet-Chef Vilanek: "2030 natürliches Ende von DVB-T2". Online unter: <https://www.teltarif.de/freenet-tv-dvb-t2-christoph-vilanek/news/87089.html> [zuletzt aufgerufen am 29.06.2022].

³⁵ „Dies bedeutet [...], dass [k]ein bestimmter Übertragungsweg vorgeschrieben ist, solange die technische Verbreitung auch auf anderem Weg sichergestellt ist und daher ein geeigneter Weg im Sinne der Gewährleistungsverantwortung vorliegt, sodass die Aufgabe der Grundversorgung erfüllt wird. Eine Reduktion der terrestrischen Verbreitung ist daher rundfunkverfassungsrechtlich nicht problematisch, auch wenn DVB-T2 als umfassende terrestrische (und auch mobile) Verbreitungsform zurückgeführt wird. Denn diese spezielle Verbreitungsform ist nicht spezifischer Gegenstand der verfassungsrechtlich zwingend vorgesehenen Grundversorgung.“, zitiert nach Goldmedia/Fraunhofer IIS/Kühling (2021): PERSPEKTIVEN ZUR NUTZUNG DES UHF-BANDS 470-694 MHz NACH 2030. Studie im Auftrag der Bundesnetzagentur, Seite 118

ebenfalls auf ein leistungsfähiges BOS-Netz angewiesen ist, einen *gemeinsamen Spektrumsbedarf* von 60 MHz im UHF-Band für einheitliche Breitbanddienste von BOS und Militär formuliert (vgl. Kap. 1).

Zum anderen besteht ein starkes Interesse seitens des öffentlichen Mobilfunks an diesem Frequenzspektrum, u. a. um die mobile Breitbandversorgung insbesondere in ländlichen Gebieten weiter verbessern zu können.^{36,37}

Zu berücksichtigen ist, dass aktuell im Spektrum 470-694 MHz neben dem Rundfunk eine umfängliche Sekundärnutzungen regional ungenutzter Frequenzen durch Funkmikrofone bzw. für die Übertragungen von professionellen Anwendungen der Veranstaltungstechnik (Programme Making and Special Events; PMSE) stattfindet. Zudem werden in dem Frequenzbereich lokal begrenzt auch Wetter-Messradare (aktiv) und Radioastronomie (passiv) betrieben.

Die folgende Tabelle fasst die relevanten Funkdienste und deren Dienstbetreiber mit einem Bedarf nach Spektrum im Frequenzbereich 470-694 MHz zusammen:

Tab. 13: Aktuelle und potenzielle Funkdienste und deren Dienstbetreiber im Frequenzbereich 470–694 MHz

Funkdienst	Dienstbetreiber (Bedarfsträger)
Militärischer Mobilfunkdienst	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bundeswehr ▪ NATO-Bündnisarmeen
Mobilfunkdienste der öffentlichen Sicherheit (BOS)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben ▪ Katastrophenschutz ▪ Bundeswehr
Mobilfunkdienste für Programme Making and Special Events (PMSE)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Veranstalter und Dienstleister im Bereich Veranstaltungstechnik ▪ Öffentlich-rechtliche und private Rundfunkveranstalter
Öffentlicher Mobilfunkdienst	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Mobilfunknetzbetreiber
Rundfunkdienst (Terrestrisches Fernsehen)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ TV-Plattformbetreiber ▪ Öffentlich-rechtliche und private Rundfunkveranstalter

Quelle: Goldmedia (2022)

³⁶ vgl. exemplarisch Telekom Deutschland (2020): Vergabestrategie 2025. Beantwortung Frequenzkompass 2020 Telekom Deutschland GmbH.

³⁷ vgl. exemplarisch Vodafone (2020): Stellungnahme der Vodafone GmbH zum Frequenzkompass 2020, 23.10.2020.

6.1.2 Ko-primäre Nutzung des Frequenzbereiches 470-694 MHz

Grundvoraussetzung für eine Nutzung des Frequenzbereiches 470-694 MHz mit Mobilfunkdiensten ist, dass im Rahmen der Weltfunkkonferenz 2023 (WRC-23) die Entscheidung für eine ko-primäre Nutzung sowohl für den Rundfunkdienst als auch für den Mobilfunkdienst in der ITU-Region 1 (u. a. Europa) getroffen wird.

Unter der aktuellen Vollzugsordnung für den Funkdienst (VO Funk), beruhend auf der Schlussakte der WRC-19, ist eine primäre Zuweisung des Frequenzbereiches 470-694 MHz an einen anderen Funkdienst als den Rundfunk ausgeschlossen. Die bisherigen primären Frequenzzuweisungen³⁸ im Frequenzbereich 470-694 MHz für den Rundfunkdienst gelten europaweit mindestens bis Ende des Jahres 2030.³⁹

Ab 2031 kann der nationale Regulierer den Frequenzbereich entweder an einen bestimmten Funkdienst primär zuweisen, oder der Frequenzbereich könnte in (bedarfsgerechte) Teilbereiche aufgeteilt werden, sodass sowohl Rundfunk- als auf Mobilfunkdienste als primäre Dienste in verschiedenen Bandlagen betrieben werden könnten. Mit der Möglichkeit einer ko-primären Nutzung im Frequenzbereich 470-694 MHz innerhalb der ITU-Region 1 würde sich der hierfür notwendige Koordinierungsaufwand für den nationalen Regulierer erheblich reduzieren.

6.1.3 Anforderungen an europäische Koordination und Harmonisierung

Allerdings unterliegt eine ko-primäre Zuweisung Einschränkungen, die sich aus den Eigenschaften der physikalischen Wellenausbreitung ergeben. Aufgrund der geringen Dämpfungseigenschaften von UHF-Frequenzen < 1 GHz haben UHF-Sender eine hohe Reichweite und damit auch die Möglichkeit, weit entfernte UHF-Empfänger, auch im Ausland, auf derselben Frequenz zu stören. Der grenzübergreifenden Harmonisierung der Bandnutzung kommt damit eine hohe strategische Bedeutung zu.

Mit Blick auf die aktuell gegebene Anrainer-Situation erscheint derzeit eine großflächige Nutzung für Mobilfunkdienste im Frequenzbereich 470-694 MHz in der Bundesrepublik Deutschland nur schwer vereinbar. Ohne eine grenzüberschreitende Neukoordinierung des Frequenzbereiches 470-694 MHz würden sich Mobilfunkdienste und bestehende DVB-T2-Sendeanlagen im Ausland gegenseitig stören.

Sollte eine harmonisierte Bandnutzung mit (einem oder mehreren) Anrainerstaaten nicht gelingen, bestünde das Risiko, dass in mehreren der 10 Bundesländer, die Außengrenzen zu Anrainerstaaten besitzen, die potenzielle Nutzung für Mobilfunk für unbestimmte Zeit nur sehr stark eingeschränkt möglich wäre. Dies gilt nicht nur für den öffentlichen Mobilfunk. Auch der Mobilfunkeinsatz von BOS oder Militär wäre bis tief in die einzelnen Bundesländer hinein davon betroffen.

³⁸ Neben der primären Nutzung besteht eine Reihe von sekundären Funkdiensten, insbesondere im Rahmen der professionellen Veranstaltungstechnik, die den Frequenzbereich 470-694 MHz bis 2030 nutzen können.

³⁹ vgl. Amtsblatt der Europäischen Union (2017): BESCHLUSS (EU) 2017/899 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 17. Mai 2017 über die Nutzung des Frequenzbands 470-790 MHz in der Union. L 138/131 vom 25.05.2017.

Allerdings wäre mit einem mehrheitlichen Beschluss einer ko-primären Nutzung des Frequenzbereiches 470-694 MHz auf der WRC-23 die rechtliche Grundlage geschaffen, mit den Anrainerstaaten ihre ggf. abweichende Frequenznutzung innerhalb des Bandes mit der Bundesrepublik Deutschland verpflichtend koordinieren zu müssen.

Die technische Umsetzung einer solchen Grenzkoordination kann jedoch dafür sorgen, dass das Spektrum für eine Mobilfunknutzung in Deutschland erst mit zeitlichem Versatz flächendeckend zur Verfügung steht. Grund hierfür liegt zum einen in den unterschiedlichen Abschaltzeitpunkten von Rundfunksendern (z. B. aufgrund unterschiedlicher Frequenzlaufzeiten in verschiedenen Ländern), zum anderen an einem intensiven administrativen Koordinationsaufwand (z. B. für Reduzierung von Sendeleistungen grenznaher Sendeeinrichtungen, Refarming von Rundfunkfrequenzen im In- und Ausland etc.).

In einem Szenario, in dem Anrainerstaaten der Bundesrepublik sich dafür entscheiden, einen Frequenzteilbereich weiterhin für Rundfunkdienste zu nutzen, den die Bundesrepublik Deutschland einer Mobilfunknutzung zugewiesen hat, würden während dieses Zeitraumes großräumige Abstände mit Schutzkorridoren von mehr als 100 km um einen ausländischen Rundfunksender erforderlich werden, in dem in Deutschland keine Mobilfunknutzung erfolgen kann.

6.2 Mögliche kooperative Frequenznutzungen eines dem Militär zugeteilten UHF-Spektrums

Unter der Annahme, dass zukünftig im Frequenzbereich 470-694 MHz ein Spektrum von 100 MHz primär der Bundeswehr zugeteilt wird, wird im Folgenden untersucht, inwiefern Möglichkeiten bestehen, dieses Spektrum für weitere Bedarfsträger zu öffnen und eine gemeinsame Spektrumsnutzung zu ermöglichen.

Wesentliche Voraussetzung für eine gemeinsame Spektrumsnutzung von einem primären Dienst mit weiteren Nutzern ist eine effiziente und störungsfreie Nutzung der verschiedenen Dienste im gleichen Frequenzbereich. Hierbei ist notwendig, die technischen und administrativen Herausforderungen zu lösen, die durch eine dauerhaft flächendeckende kooperative Frequenznutzung entstehen.

Als Vorbild für eine kooperative Frequenznutzung kann die bisherige Koexistenz von Rundfunk- und PMSE-Diensten im Frequenzbereich 470-694 MHz dienen. Aufgrund ihrer jeweiligen Charakteristika konnten diese beiden Dienste über viele Jahrzehnte im selben Band arbeiten, ohne dass sich die beiden Dienste wesentlich gegeneinander störten.

Der militärische Frequenzbedarf im Frequenzbereich 470-694 MHz ermöglicht im Grundsatz ebenfalls eine Ko-Existenz mit anderen, sekundären Funkdiensten: Die geplanten militärischen Anwendungen im Frequenzbereich 470-694 MHz mit wesentlichen Spektrumsanforderungen beschränken sich in Friedenszeiten auf Einsatzszenarien, die üblicherweise zeitlich klar definier- und geografisch abgrenzbar sind, etwa Ausbildung, Manöver und Katastrophenschutz (vgl. Kapitel 5). Der größte Spektrumsbedarf ist hierbei in Friedenszeiten für Großübungen und Manöver zu erwarten. Diese Einsatzfälle haben einen langen Vorlauf und sind entsprechend gut planbar.

Hiermit eröffnen sich Potenziale für eine geregelte gemeinsame Spektrumsnutzung mit weiteren, sekundären Funkdiensten. Vor allem ist eine gemeinsame Nutzung des Frequenzspektrums mit solchen Funkdiensten gut koordinierbar, die in ihrer Nutzung

ebenfalls zeitlich planbar und geografisch begrenzt bleiben und eine möglichst einfache Koordinierung der gemeinschaftlichen Spektrumsnutzung, entweder durch technische Verfahren oder durch eine geeignete Genehmigungspraxis, erlauben.

Für ungeplante Einsätze, etwa bei der Katastrophenhilfe oder für den Spannungs- bzw. Verteidigungsfall, muss der primäre Zugriff auf das Spektrum so geregelt werden, dass die Bundeswehr jederzeit in der Lage ist, im Sinne einer agilen, mobilen Einsatzstrategie auch kurzfristig Ad-hoc-Netze in Gegenden zu betreiben, in denen sie sonst das Spektrum nicht dauerhaft nutzt.

Dies könnte, in Ergänzung entsprechender Antragsverfahren auf zeitlich und lokal begrenzte Sekundärnutzung, ggf. auch technisch unterstützt umgesetzt werden. Grundsätzlich ermöglichen die dynamischen Instrumentarien eines Licenced Shared Access (vgl. Kapitel 6.2.3) solche lokalen Vorrangstellungen eines Incumbent Users auf rein technischer Ebene durch intelligentes Spektrumsmanagement (Cognitive Radio).⁴⁰

Militärische Anwendungen, die dauerhaft und flächendeckend im Frequenzbereich 470-694 MHz verfügbar sein sollen, verfügen insgesamt nur über eher geringe Bandbreitenbedarfe, sodass eine parallele, sekundäre Nutzung in Friedenszeiten möglich bleiben sollte (vgl. Szenario „Marschkolonne“; Kapitel 5.3).

6.2.1 NATO Joint Civil/Military Frequency Agreement (NJFA)

Hinweis: Die militärische Mitnutzung im Frequenzband 470–694 MHz für Nato-Bündnispartner ist kein Mitnutzungsszenario mit einem anderen, zivilen Bedarfsträger und wird strenggenommen in der Analyse des künftigen militärischen Spektrumsbedarfes unter dem Begriff „Host Nation Support“ bereits mitumfasst. Da es sich auf technischer Ebene jedoch operativ um separate Netze handelt, wird diese Form der kooperativen Frequenznutzung auch in diesem Kapitel erörtert.

Für eine künftig militärische Nutzung im Frequenzband 470-694 MHz ist eine europaweit harmonisierte Frequenznutzung ein wesentlicher Faktor. Aufgrund der räumlichen Lage Deutschlands und der daraus resultierenden Bedeutung für Transit- und Aufmarschrouten der NATO kommt einer europäisch koordinierten Nutzung von UHF-Frequenzen eine hervorgehobene Bedeutung zu, damit auch Bündnis-Streitkräfte in der Lage sind, in Deutschland auf diesem Frequenzband zu operieren.

Militärische Gremien aus mehreren Nationen stellen Überlegungen zur zukünftigen militärischen Nutzung im Frequenzbereich 470-694 MHz an. So hat beispielsweise Frankreich sein Interesse daran erklärt, den Frequenzbereich 470-694 MHz, insbesondere den Frequenzbereich 470-512 MHz, für Ad-hoc-Netze zu nutzen.⁴¹

Laut NATO Joint Civil/Military Frequency Agreement (NJFA) ist der UHF-Frequenzbereich unterhalb von 1 GHz von hoher strategischer Bedeutung für militärische Anwen-

⁴⁰ Inwiefern Verfahren wie „Cognitive Radio“, die aus dem zivilen Kontext stammen und für Mobilfunk entwickelt wurden, auch für militärische Funktechnik Anwendung finden könnten, müsste noch weiter auf Machbarkeit untersucht werden.

⁴¹ vgl. ITU (2020): France: WRC-23 Agenda Item 1.5: Spectrum use, future spectrum needs and technical characteristics for private global protection non-IMT mobile applications, undatierter Entwurf

dungen, insbesondere aufgrund der Überlastung des harmonisierten NATO-UHF-Bandes 230-399,9 MHz.⁴² Künftig gibt es daher laut NATO den Bedarf für eine militärische Frequenznutzung im Frequenzbereich 450-790 MHz, insbesondere für mobile Breitbandanwendungen.⁴³ Eine abgestimmte Position der NATO bezüglich einer Harmonisierung im Frequenzband 470-694 MHz wird in Vorbereitung auf die WRC-23 erarbeitet und befindet sich derzeit in der Findungsphase.

Zudem besteht von Seiten der Bundeswehr Interesse an verschiedenen bi- und trilateralen Maßnahmen, D-LBO im Verbund mit Bündnisarmeen zu nutzen. Eine diesbezügliche Kooperation mit dem niederländischen Militär wird perspektivisch verfolgt.

Mittelfristig kann im Rahmen des Federated Mission Networking (FMN) unter Federführung der NATO darüber hinaus eine interoperable Nutzung des Frequenzbereiches 470-694 MHz für die mobile taktische Nutzung erreicht werden. Aktuell werden im Track „Tactical Edge“ erste Vorgaben, Schnittstellenspezifikationen und Standards für den mobilen taktischen Bereich erarbeitet. Erste Inhalte aus dieser Arbeitsgruppe könnten in die kommende „Spiral 5 Specification“ einfließen.

Zudem bestehen zahlreiche Rüstungskoooperationen mit Frankreich und anderen Partnerationen, die zum Großteil vergleichbare zukünftige Spektrumsbedarfe anmelden und bei harmonisierter Frequenznutzung signifikante Synergiepotenziale erzielen können.

Eine militärische Nutzung innerhalb des Frequenzbereiches 470-694 MHz wäre bei NATO-Streitkräften, die Verfügbarkeit des Spektrums vorausgesetzt, auch unabhängig des Federated Mission Networking bereits heute möglich: Der Frequenzbereich bis 512 MHz ist im gesamten NATO-Gebiet für eine militärische Nutzung identifiziert.⁴⁴ Insofern verfügen viele Streitkräfte, inkl. der Bundeswehr, über Funkgeräte, die bis 512 MHz durchstimmbare sind.

Da die Frequenzkoordinierung für Bündnisarmeen in Deutschland grundsätzlich durch die NARFA DEU erfolgt, bedeutete eine militärische Nutzung im Frequenzteilbereich 470-512 MHz auch keinen zusätzlichen Verwaltungs- und Koordinationsaufwand gegenüber dem Status quo der militärischen Frequenzadministration.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass bereits der Frequenzteilbereich 470-512 MHz eine signifikante Entlastung für die militärischen Spektrumsbedarfe verbündeter Streitkräfte in Deutschland darstellt. Aufgrund der Zunahmen von breitbandigen Anwendungen im taktischen Einsatz, auch bei Manövern, ist künftig auch von steigendem Bandbreitenbedarf im Frequenzbereich < 1GHz bei Bündnispartnern auf dem Gebiet der Bundesrepublik auszugehen. Da zahlreiche vorhandene Funkgeräte von NATO-Streitkräften den Teilfrequenzbereich bis 512 MHz bereits heute für gängige militärische Schmalband- und Breitband-Wellenformen nutzen können, bietet sich insbesondere dieser Frequenzteilbereich zur Deckung der künftigen Frequenzbedarfe der Bündnispartner an.

⁴² vgl. NATO (2022): NATO JOINT CIVIL AND MILITARY FREQUENCY AGREEMENT (NJFA) 2021. DOCUMENT PO(2022)0208. ANNEX 1 AC/322-D(2022)0006, Seite 1-9

⁴³ vgl. ebd., Seite 1-19

⁴⁴ Das klassische, standardisierte „Nato-Band“ umfasst den Frequenzbereich 225-512 MHz.

Langfristig ließen sich auch verbündete Streitkräfte in den künftigen D-LBO-Verbund und dessen Szenarien vollständig integrieren. Hierdurch ist mit einem weiteren Spektrumsbedarf, zzgl. zu dem in Kapitel 4 hergeleiteten Frequenzbedarf der Bundeswehr, zu rechnen, insbesondere bei Manövern auf dem Gebiet der Bundesrepublik.

6.2.2 Programme Making and Special Events

Als lokal begrenzte Anwendung mit niedriger Sendeleistung (bis zu 50 Milliwatt effektive Strahlungsleistung) kann PMSE grundsätzlich ohne größere Probleme mit anderen Funkdiensten im selben Band koexistieren, solange die individuelle Frequenznutzung hinreichend transparent ist, etwa durch vorherige Planungen und Koordinierungen oder durch technische Maßnahmen (z. B. Cognitive Radio).

Der wichtigste Frequenzbereich für professionelle drahtlose Mikrofone ist seit vielen Jahren 470-694 MHz. Neben dem Rundfunk als Primärnutzer, ist dieser Frequenzbereich auch für PMSE, einen mobilen Landfunkdienst, als sekundärer Nutzer zugeteilt. Seit dem 2. Quartal 2020 gilt für die Sekundärnutzung des Spektrums zwischen 470-608 MHz und 614-694 MHz durch Funkmikrofone eine Allgemeinzuteilung. Damit ist eine Nutzung ohne vorherige Anmeldung bei der Bundesnetzagentur möglich. Die neue Allgemeinzuteilung ist befristet und endet zum 31. Dezember 2030.⁴⁵

Der Sub-1-GHz-Frequenzbereich ist für Anwendungen für „Programme Making and Special Events“ (PMSE) von besonderer strategischer Bedeutung, da ein vergleichsweise geringer Energieaufwand der Funkübertragung mit günstigen Übertragungseigenschaften und geringer Körperabsorption einhergeht. PMSE verfügt neben dem Frequenzbereich 470-694 MHz auch über weitere Frequenzzuteilungen unterhalb von 1 GHz. Hier ist zum Beispiel die Mittenlücke im LTE-Band 20 bei 823-832 MHz zu nennen. Allerdings stellen diese für professionelle Großproduktionen bislang keine ernstzunehmende Alternative dar, da diese in der Regel in der verfügbaren Bandbreite für große, professionelle Veranstaltungen zu beschränkt sind und aufgrund ihrer Nähe zu Mobilfunkfrequenzen ein zu hohes Risiko für Out-of-Band-Emission (OOBE) besteht.

PMSE-Funk und taktisch-mobile militärische Funkanwendungen würden räumlich kaum zusammenfallen, da Veranstaltungsfunk vielfach innerorts zum Einsatz kommt. Zudem ist die Reichweite der PMSE-Funksignale aufgrund der geringen Sendeleistung der Systeme in der Regel auf wenige Hundert Meter begrenzt.

Eine kooperative Nutzung von Funkpektrum zwischen Bundeswehr und PMSE ist in Friedenszeiten daher grundsätzlich vorstellbar, da die bandbreitenintensiven Nutzungen der Bundeswehr im UHF-Band vor allem im ländlichen Raum (Truppenübungsplätze) oder zeitlich begrenzt (Manöver) stattfinden.

Somit kann aufgrund der gegebenen räumlichen Trennung zwischen Gegenden mit hoher PMSE-Nachfrage (Ballungsräume) und Gegenden mit intensiver militärischer Nutzung (Truppenübungsplätze) eine Nutzungskonkurrenz der Dienste weitgehend ausgeschlossen werden. Eine Mitnutzung des militärischen Spektrums im Frequenzbereich 470-694 MHz durch PMSE-Anwendungen wird auch von der Bundeswehr als vereinbar angesehen.

⁴⁵ vgl. BNetzA Vgf. 34/2020, Ziff. 3.9.

Von der sekundären PMSE-Nutzung müsste allerdings ein gewisser Sockel an Spektrum im militärischen Frequenzbereich grundsätzlich ausgenommen werden, der in Deutschland dauerhaft flächendeckend für die militärische Nutzung zur Verfügung stehen muss (für Marschrouten und den Einsatz auf den Kasernengeländen und ggf. auch für den Host Nation Support).

Da die Frequenzteilbereiche jenseits dieses Sockels, die für eine Sekundärnutzung geöffnet werden könnten, sich stark, abhängig von Tag und Region (Postleitzahlen-Ebene), unterscheiden können, müsste die NARFA DEU (bzw. die BNetzA im Auftrag der NARFA DEU) die für PMSE mitnutzbaren Teilfrequenzbereiche vorab identifizieren und entsprechend mit den sekundären Nutzern koordinieren. Dies bedeutet, das militärische Spektrum könnte dem Veranstaltungsfunk nicht wie aktuell auf Basis einer Allgemeinzuteilung überlassen werden, sondern wäre nur mit Anmeldung und entsprechender Koordination nutzbar. Dies bedingt, dass dem Veranstaltungsrundfunk in anderen Teilbereichen des UHF-Spektrums gewisse Spektrumskapazitäten für den PMSE-Sockelbedarf als Allgemeinzuteilung zur Verfügung gestellt werden. Das militärische Spektrum könnte dann als Erweiterungsspektrum zur Unterstützung bei Spitzenbedarfen herangezogen werden. Da solche Spitzenbedarfe vor allem bei mit entsprechendem Vorlauf geplanten Großereignissen mit mehreren Bühnen und ggf. Hunderten Audio-Links entstehen, ist hier eine koordinierte Bereitstellung mit vorheriger Genehmigung verhältnismäßig. Ggf. sind auch regelmäßige Nutzungen an festen Standorten (große Konzerthallen) denkbar.

Von einer Zuteilung von militärischem Spektrum im Frequenzbereich 470-694 MHz könnten somit auch PMSE-Funkdienste profitieren. Überwiegende Teile eines militärischen Frequenzteilbereiches könnten in Ballungsräumen, wo der Bedarf an PMSE-Spektrum am größten ist, für eine Sekundärnutzung durch PMSE zur Verfügung stehen. Zudem wäre das Spektrum vermutlich breitbandiger nutzbar als aktuell unter dem primären Nutzer-Fernsehen, da das 8-MHz-TV-Kanalraster entfielen.

6.2.3 Öffentlicher Mobilfunk

Die deutschen Mobilfunknetzbetreiber melden Bedarf am Frequenzbereich 470-694 MHz an, um in der Zukunft höhere Datenraten, insbesondere in der Flächenversorgung, realisieren zu können und um die allgemein steigenden Datenvolumina im Endkundensegment kosteneffizient auffangen zu können.

In den für die Flächenversorgung relevanten Frequenzbereichen unterhalb von 1 GHz verfügen die drei operativen Netzbetreiber in Deutschland über insgesamt jeweils 60 MHz (2x30 MHz) bzw. 70 MHz (2x35 MHz) an Spektrum. Tab. 14 gewährt einen Überblick.

Tab. 14: Zugeteiltes Spektrum nach Netzbetreiber in MHz

Frequenzband	Deutsche Telekom		Vodafone Deutschland		Telefónica Deutschland		1&1 Drillisch	
	Ge-paart	Un-ge-paart	Ge-paart	Un-ge-paart	Ge-paart	Un-ge-paart	Ge-paart	Un-ge-paart
700 MHz	2x10	-	2x10	-	2x10	-	-	-
800 MHz	2x10	-	2x10	-	2x10	-	-	-
900 MHz	2x15	-	2x10	-	2x10	-	-	-
Zwischensumme	2x35	-	2x30	-	2x30	-	-	-
1,5 GHz	-	20	-	20	-	-	-	-
1,8 GHz	2x30	-	2x25	-	2x20	-	-	-
2,1 GHz	2x20	-	2x20	-	2x10 ⁴⁶ (ab 2025)	19,2	2x10 ⁴⁷ (ab 2025)	-
2,6 GHz	2x20	5	2x20	25	2x30	20	-	-
3,6 GHz	-	90	-	90	-	70	-	50
Gesamt	2x105	115	2x95	135	2x90	109,2	2x10	50

Quelle: Goldmedia nach Bundesnetzagentur (2020)

Ein konkreter Vorschlag der Mobilfunknetzbetreiber lautet hierbei, das Mobilfunkband 71 im Frequenzteilbereich 617 bis 698 MHz dem Mobilfunk zuzuweisen.⁴⁸ Dieses Spektrum wurde dem Mobilfunk in den USA im Zuge der digitalen Dividende zugewiesen und kann im Mobilfunkstandard 5G genutzt werden. Mobilfunkendgeräte, die dieses Band theoretisch nutzen können, befinden sich bereits im Markt.⁴⁹ Weitergehende Vorschläge sehen darüber hinaus vor, den kompletten Frequenzbereich 470-694 MHz dem öffentlichen Mobilfunk zuzuteilen.

Mobilfunknetze haben die Eigenschaft, dass diese im Idealfall kontinuierlich und flächendeckend betrieben werden. Dies gilt selbst innerhalb eines Mobilfunkteilbereiches für die Netze verschiedener Betreiber: Auch falls diese auf Basis desselben Mobilfunkstandards operieren, ist es erforderlich, dass diese in voneinander getrennten Frequenzblöcken arbeiten. Anderenfalls ist kein störungsfreier Mobilfunknetzbetrieb möglich.

Allerdings wird in Europa insbesondere für das Frequenzband 2,3-2,4 GHz, das in vielen Ländern für die Übertragung mobiler Kamerasignale oder für Telemetrieanwendungen zum Einsatz kommt, aber auch für Spektrum des öffentlichen Mobilfunks im sogenannten „Licensed Shared Access“ diskutiert.

Das Konzept des „Licensed Shared Access“ (LSA) geht davon aus, dass für eine effiziente Spektrumsnutzung mittelfristig Mobilfunknetzbetreiber oder andere Funkdienste (lokal/regional) auf lizenziertes Mobilfunkspektrum zugreifen, welches vom Lizenzhaltenden MNO im jeweiligen Gebiet nicht oder nicht in vollem Umfang genutzt wird.

Die Technologie baut darauf auf, dass ein durch den öffentlichen Mobilfunk genutztes Spektrum, für das ein Mobilfunknetzbetreiber die Lizenz hält, lokal (und ggf. zeitlich begrenzt) durch andere Mobilfunknetzbetreiber oder andere Funktechnologien genutzt

⁴⁶ Änderung der Zuteilung im Jahr 2025: 2x20 MHz bis 2025, danach 2x10 MHz

⁴⁷ Änderung der Zuteilung im Jahr 2025: 0x10 MHz bis 2025, danach 2x10 MHz

⁴⁸ vgl. Vodafone (2020): Stellungnahme der Vodafone GmbH zum Frequenzkompass 2020, 23.10.2020

⁴⁹ vgl. T-Mobile LTE Band 71: Online unter: [Phonesshttps://www.tmoband71.com/](https://www.tmoband71.com/) [zuletzt abgerufen am 29.06.2022].

werden kann. Hierfür kommen Warnsender zum Einsatz, die dem Mobilfunknetzbetreiber GPS-Daten-basiert das Auftreten einer bestimmten (lizenzierter) Nutzung anzeigen, beziehungsweise diese anmelden. Je nach Vereinbarung unterbindet der Mobilfunknetzbetreiber dann über eine Datenbank in diesem Gebiet die Anmeldung mobiler Endgeräte der eigenen Kunden an das Mobilfunknetz über diese Frequenz, beziehungsweise gibt die Nutzung der Frequenz durch den anderen Nutzer frei, weil die Frequenz in diesem Gebiet durch den MNO nicht genutzt wird.

Ein LSA-Pilotprojekt wurde u. a. 2019 in Portugal erfolgreich absolviert. In diesem Piloten nutzten mobile Kamerasysteme der Rundfunkveranstalter ein Mobilfunkspektrum im Spektrum 2,3-2,4 GHz für kurzzeitige lokale Bildübertragungen.⁵⁰

Mit Blick auf das für den LSA-Betrieb notwendige Netzwerkmanagement, welches von flächendeckend aktiven Mobilfunknetzen ausgeht, die lokal/regional durch Dritte genutzt werden, wäre eine gemeinsame Nutzung eines UHF-Frequenzspektrums durch öffentlichen Mobilfunk und Militär zumindest grundsätzlich vorstellbar. Unabhängig von der technischen Kontrolle müssten jedoch dem Militär entsprechend privilegierte Zugriffsrechte auf dieses Spektrum eingeräumt werden.

Damit könnte der öffentliche Mobilfunk in Deutschland ein Spektrum im Frequenzbereich 470-694 MHz, für das entsprechende Endgeräte-Chipsets entwickelt und verbaut werden müssten, nur additiv nutzen: Dem Militär müsste ad hoc jederzeit und prinzipiell überall Zugriff auf dieses Spektrum gewährt werden. Hierfür müssten entsprechende Warnsender zum Einsatz kommen, die verhindern, dass öffentliche Mobilfunknetze in einem bestimmten Gebiet auf Sendung gehen, wenn dort das Spektrum militärisch genutzt wird. Inwiefern der Einsatz solcher Warnsender bei militärischen Einsätzen aus Sicherheitsgesichtspunkten (Geheimhaltung) heraus sinnvoll und vertretbar wäre, müsste allerdings noch genauer geprüft werden.⁵¹

Hinzu kämen hier ggf. weitere längerfristige Nutzungseinschränkungen für die Mobilfunknetzbetreiber, die durch die Frequenzkoordination mit Anrainerstaaten für deren DVB-T2-Sendernetzbetrieb entstehen. Ob eine solche Konstellation damit wirtschaftlich für Mobilfunknetzbetreiber attraktiv wäre, kann an dieser Stelle nicht beurteilt werden.

6.2.4 Digitalfunk BOS

In Deutschland gehören Bundes- und Landespolizeien, Feuerwehren, Zoll, Rettungsdienste, Technisches Hilfswerk und Katastrophenschutzorganisationen zu den Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS). Neben diesen ist seit dem 21. Februar 2019 auch die Bundeswehr berechtigter Teilnehmer am Digitalfunk BOS. Auf organisatorischer Ebene arbeitet die BDBOS eng mit der Bundeswehr zusammen, letztlich ist die Bundeswehr selbst Teilnehmer am Digitalfunk BOS. Das Funknetz der BDBOS basiert aktuell auf dem für Sprache optimierten TETRA-Standard (Terrestrial Trunked Radio).⁵²

⁵⁰ vgl. Anacom: Study on the Licensed Shared Access (LSA) spectrum sharing model in Portugal (final report). Online unter: <https://www.anacom.pt/render.jsp?contentId=1636571> [zuletzt aufgerufen am 29.06.2022].

⁵¹ Durch die Nutzung solcher Warnsender würden Metadaten generiert, die von Dritten aggregiert werden könnten.

⁵² "The TETRA standard foresees frequency channels with a carrier spacing of 25 kHz and 4 time slots per carrier or traffic channels. The overall achievable user data rate is 36 kbit/s per carrier." vgl. ITU (2020): Germany (Federal Republic of) – Current spectrum use and future spectrum needs of critical communications for governmental use. Document 5A/200-E, 02.11.2020

Mit dem TETRA-Netz betreibt die BDBOS eine nationale, einsatzkritische Infrastruktur mit ca. 4.600 Basisstationen und einer Flächenabdeckung von 99,2 Prozent für rund 900.000 Nutzer (Stand: Juli 2020)⁵³, das zwischen 380 MHz und 410 MHz arbeitet (vgl. Tab. 15). Das gegen Abhören gesicherte und gehärtete TETRA-Netz bildet die Basis für die Sprachkommunikation der BOS und spezifische Aufgaben der Bundeswehr in Friedenszeiten. Gegenüber öffentlichen Mobilfunknetzen zeichnet sich das BOS-Netz durch eine hohe Verfügbarkeit bis hin zur Schwarzfallfestigkeit aus. Breitbandige Anwendungen sind auf Basis des TETRA-Standards jedoch nicht realisierbar.

Tab. 15: Genutztes Spektrum für digitalen BOS-Sprechfunk (TETRA) in Deutschland 2020

Deployment Scenario	Used Spectrum in Germany
TMO [BOS-Nutzung]	380–385 MHz (uplink) 390–395 MHz (downlink)
Additional TMO [Bundeswehr-Nutzung]	385–386.5 MHz (uplink) 395–396.5 MHz (downlink)
EURO-DMO	specific channels in TMO spectrum
Additional DMO [BOS-Nutzung]	406.1–410 MHz

Quelle: ITU (2020): Germany (Federal Republic of) – Current spectrum use and future spectrum needs of critical communications for governmental use. Document 5A/200-E, 02.11.2020. Anmerkung in eckigen Klammern: Goldmedia.

Die BDBOS plant, das bisherige TETRA-Netz spätestens 2030 durch ein breitbandiges BOS-Mobilfunknetz für die einsatzkritische Sprach- und Datenkommunikation im Frequenzbereich 470-694 MHz zu ersetzen. Die BDBOS geht von einem künftigen Spektrumsbedarf von mindestens 60 MHz für Breitbandanwendungen im Digitalfunk BOS aus. Dieser Spektrumsbedarf von mindestens 60 MHz in mindestens 10-MHz-Blöcken in einem zusammenhängenden Frequenzbereich wurde jüngst in einer Studie substantiiert.⁵⁴

In Anbetracht des künftigen Spektrumsbedarfes für breitbandige PPDR-Anwendungen erscheint die bisherige Zuteilung an Spektrum im 700-MHz-Band aus dem Jahr 2018 von insgesamt 16 MHz (Blöcke aus 2*3MHz und 2*5 MHz, vgl. S. 10) als unzureichend. Insbesondere, da sich herausgestellt hat, dass keine BOS-Geräte für die beiden 5-MHz-Blöcke kommerziell verfügbar sind.⁵⁵ Die beiden 5-MHz-Blöcke können daher aktuell de facto nicht erschlossen werden.⁵⁶ Die BDBOS plant daher, ebenso wie die Bundeswehr, ihre spezifischen Bedarfe innerhalb des Frequenzbandes 470–694 MHz zu decken.

Für ein breitbandiges Digitalfunknetz der BOS ist die kommerzielle Verfügbarkeit von Endgeräten von herausgehobener Bedeutung, insofern ist eine europaweit harmonisierte Frequenznutzung für BOS-Dienste im Frequenzbereich 470–694 MHz ein wesent-

⁵³ vgl. ITU (2020): Germany (Federal Republic of) – Current spectrum use and future spectrum needs of critical communications for governmental use. Document 5A/200-E, 02.11.2020

⁵⁴ Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft (2022): Studie zur Bedarfsermittlung des Breitbandspektrums der BOS in Breitbandmobilfunknetzen. Unveröffentlichte Studie im Auftrag der Bundesanstalt für den Digitalfunk der Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben

⁵⁵ Tabelleneintrag 698-703 MHz: „No equipment is available actually“ in ITU (2020): Germany (Federal Republic of) – Current spectrum use and future spectrum needs for governmental usage in 470 MHz to 960 MHz. Document 5A/201-E, 02.11.2020, Tab. 2, S. 6.

⁵⁶ vgl. ITU (2020): Germany (Federal Republic of) – Current spectrum use and future spectrum needs for governmental usage in 470 MHz to 960 MHz. Document 5A/201-E, 02.11.2020

liches strategisches Ziel der BDBOS. Eine mit anderen bevölkerungsreichen europäischen Staaten harmonisierte Spektrumsnutzung und koordinierte Gerätenachfrage würde die Chancen auf kommerziell verfügbare Endgeräte signifikant erhöhen.

Allgemeine Interessensbekundungen für Anwendungen der öffentlichen Sicherheit im Frequenzbereich 470–694 MHz gibt es dem Vernehmen nach bereits in weiteren europäischen Ländern wie beispielsweise Frankreich, Belgien oder Finnland.

Auf organisatorischer Ebene ist davon auszugehen, dass sich die Bundeswehr und die BDBOS bei ihren jeweiligen Nutzungen innerhalb des Frequenzbereiches 470–694 MHz eng koordinieren werden. Die BDBOS und die Bundeswehr haben in der Vergangenheit bereits bewiesen, dass sie ihre Spektrumsnutzungen erfolgreich miteinander koordinieren können.⁵⁷

Es stellt sich außerdem die Frage, ob die Bundeswehr in Deutschland aufgrund ihres nur lokal auftretenden hohen Spektrumsbedarfs in definierten Regionen Teile dieses geforderten BOS-Spektrums auch für rein militärische Zwecke verwenden könnte. Ansonsten würde die Bundeswehr das geforderte breitbandige BOS-Spektrum vornehmlich im Rahmen des gemeinsamen Bedarfes bei Großeinsätzen mit Rettungskräften und der Polizei mitnutzen.

Hier besteht allerdings ein entscheidender Unterschied zu möglichen Überlegungen einer koordinierten gemeinsamen Nutzung von Spektrum zwischen Bundeswehr und öffentlichem Mobilfunk (vgl. Kapitel 6.2.3). Während der öffentliche Mobilfunk bereits über viel breitbandfähiges Spektrum verfügt, stellen die von den BOS geforderten 60 MHz die zentrale Spektrumsressource für BOS-Breitbanddienste dar, sofern nicht Kapazitäten bei den öffentlichen Mobilfunknetzbetreibern eingekauft werden. Diese zentrale Ressource muss für die BOS ständig und im besten Falle flächendeckend zur Verfügung stehen. Eine lokal und zeitlich begrenzte Übernahme des Spektrums oder von Spektrumsanteilen durch das Militär wäre daher problematisch, weil ggf. wichtige Dienste der BOS-Behörden (bspw. Polizeidrohnen) nicht spontan eingesetzt werden können.

Der Digitalfunk BOS muss flächendeckend, rund um die Uhr, in der gesamten Bundesrepublik verfügbar sein, was durch eine feste, gehärtete und gegen Ausfälle besonders gesicherte Infrastruktur erreicht wird. Dies bedeutet, dass das hierfür bereitgestellte Spektrum kontinuierlich belegt ist und keine weiteren Nutzungen zulässt. Eine gemeinsame Nutzung von Digitalfunk BOS und einer gesonderten militärischen Nutzung innerhalb desselben Frequenzteilbereiches schließt sich aus. Daher müssen die Spektrumsforderungen von BOS und Bundeswehr für den Frequenzbereich 470-694 MHz als zueinander additiv betrachtet werden.

⁵⁷ So arbeitet der Digitalfunk BOS derzeit auf militärischen Frequenzen, während die Bundeswehr wiederum auch selbst Teilnehmer am Digitalfunk BOS ist.

7 Künftige Bedarfsperspektive im Frequenzbereich 470 MHz-694 MHz

Stetig steigende Spektrumsbedarfe durch die Einrüstung von D-LBO

Steigende Spektrumsbedarfe beim Truppen- und Soldatenfunk ergeben sich bereits aus den aktuellen Beschaffungsprogrammen für neue Sprachfunktechnik der Landstreitkräfte. Diese Endgeräte ermöglichen neben der Übermittlung von Geopositionsdaten den mobilen Zugang zu Inter- und Intranet. Mit der bevorstehenden Einführung des D-LBO-Programms wird der Bedarf an breitbandigem Spektrum zur Bereitstellung der notwendigen Backbone-Kommunikation innerhalb des D-LBO-Kommunikationsverbands eine neue Qualität erreichen.

Die Haushaltsmittel in Höhe von 20,7 Mrd. Euro im Sondervermögen Bundeswehr, die allein für die wesentlichsten Systembestandteile eingestellt sind, geben ein Indiz für die massiven technischen Fortentwicklungen, die im Bereich der taktischen Kommunikation in den kommenden Jahren Einzug in das Heer der Bundeswehr finden werden.

Vor allem die deutlich steigende Zahl an aktiven Funkteilnehmenden und Fahrzeugen sowie der neuartigen vernetzten Sensorik am Boden und in der Luft, insbesondere im Rahmen der Aufklärung, sind hierbei die maßgeblichen Treiber für den künftig wachsenden Bandbreiten- und Spektrumsbedarf militärischer Anwendungen.

Die Digitalisierung landbasierter Operationen erfolgt gestaffelt, über einen Zeitraum von mehreren Jahren. Bis 2035 sollen in acht Beschaffungszyklen alle Truppenteile des Heeres ausgerüstet sein. Mit Blick auf den Spektrumsbedarf ist hierbei von einer langsamen, aber stetigen Zunahme auszugehen.

Spätestens mit Masseneinführung von D-LBO werden die Spektrumsbedarfe der Bundeswehr derart gestiegen sein, dass diese nicht ansatzweise mit der bestehenden Spektrumsausstattung, insbesondere nicht mit der bestehenden strategisch bedeutsamen Ausstattung an UHF-Spektrum unterhalb von 1 GHz abgedeckt werden können.

Alternativen zur Nutzung des Frequenzbereichs 470-694 MHz

Aufgrund der spezifischen Fähigkeiten, für die der D-LBO-Verbund entwickelt wurde, bestehen keine gleichrangigen Alternativen zum Einsatz von breitbandigem UHF-Spektrum < 1 GHz. Oberhalb des sogenannten UHF-Lowband sind die physikalischen Ausbreitungseigenschaften nicht mehr gegeben, um größere Distanzen von mehr als 10 km terrestrisch zu überbrücken, ohne übermäßig durch Pfadverlust, Abschattungsämpfung und Mehrwegeschwund in topologisch herausforderndem Terrain beeinträchtigt zu werden.

Mit UHF-Frequenzen < 470 MHz wären diese Merkmale zwar gegeben, jedoch ist dieser UHF-Frequenzbereich sehr engmaschig durch vielfältige Funkanwendungen belegt. Hier könnte kein zusammenhängendes Spektrum geräumt werden, das nur annähernd breitbandig genug wäre, um die benötigten Datenraten zu erreichen. Auch das größtenteils militärisch genutzte „NATO-Band“ zwischen 230 MHz und 399,9 MHz weist für die bestehenden und auch zukünftig relevanten Funkdienste so enge Kanalarasterungen auf, dass weitere, insbesondere breitbandige Funkdienste nicht realisiert werden können.

Damit verbleiben aktuell als mögliche Spektrumperspektiven für die Nutzung im D-LBO-Verbund nur der bislang für Rundfunkübertragungen genutzte Frequenzbereich 470-694 MHz⁵⁸ sowie die dem öffentlichen Mobilfunk zugeteilten Frequenzbereiche in den 700/800/900-Bändern⁵⁹.

Spektrumsbedarfe im Frequenzbereich 470-694 MHz

Auf **Truppenübungsplätzen** besteht insbesondere bei Manövern und Großübungen der höchste Spektrumsbedarf der Bundeswehr, der im Rahmen der Verkehrsmodellberechnung ermittelt wurde (vgl. Kapitel 5). Dieser umfasst pro Einsatzverband (Bataillon) bei guten Kommunikationsbedingungen 44,4 MHz für einen angenommenen Grundbedarf. Unter besonders widrigen Send- und Empfangsbedingungen (Abschattung durch Topografie oder Wald) wächst der Spektrumsbedarf zur Aufrechterhaltung der Datenraten für den Grundbedarf im Verkehrsmodell auf 295,4 MHz. Solche besonders widrigen Bedingungen sind jedoch auf Truppenübungsplätzen, im Unterschied zum Spannungs- oder Verteidigungsfall, in der Regel durch entsprechende Antennenplatzierungen vermeidbar. Bei Teilnahme mehrerer Bataillone an einer Großübung addieren sich durch die Zunahmen der Datenverkehrsmenge die berechneten Spektrumsbedarfe auf, sodass auch unter guten Bedingungen Frequenzspektrum von 100 MHz und mehr erforderlich werden kann.

Die Mitnutzung des Funkspektrums durch andere Funkdienste ist in der Umgebung von großen Truppenübungsplätzen nicht möglich.

Der **Spannungs- und Verteidigungsfall** beruht auf ähnlichen Parametern wie das Szenario Truppenübungsplatz, mit dem Unterschied, dass militärisches Spektrum in erheblichem Umfang nicht nur lokal begrenzt, sondern flächendeckend genutzt würde. Die Verkehrsmodellberechnung für Truppenübungsplätze ergab bereits, dass unter besonders widrigen Bedingungen (bewaldetes Gebiet, Mittelgebirgslagen etc.) die Anforderung an das Spektrum deutlich größer als 100 MHz sein kann. Insofern wird trotz eines zusätzlichen militärischen zugeteilten UHF-Frequenzspektrums von 100 MHz nicht auszuschließen sein, dass im Spannungs- und Verteidigungsfall auf Grundlage des § 104 TKG Zuteilungen eingeschränkt werden und bei Bedarf auch weitere Frequenzressourcen, insbesondere unter 1 GHz, militärisch genutzt werden.

Bei besonderen **Katastrophenlagen** kann es auch in Friedenszeiten erforderlich werden, im Rahmen der Amtshilfe insbesondere taktische Kommunikationsinstrumente einzusetzen, etwa bei Elementarschäden an der zivilen Kommunikationsinfrastruktur in Katastrophengebieten. Die Szenarioberechnung ergab hierbei einen Spektrumsbedarf von 128,9 MHz. Dieses umfangreiche Spektrum muss nicht dauerhaft exklusiv der Bundeswehr zur Verfügung stehen, müsste jedoch bei Eintritt einer solchen Lage auf Weisung der BNetzA kurzfristig und für die Dauer der Einsatzlage von sekundären Spektrumsnutzern geräumt werden.

Dies könnte sich insbesondere beim öffentlichen Mobilfunk als potenziellem sekundären Nutzer des Spektrums als problematisch darstellen, da auch dessen Dienste bei Katastrophenlagen von kritischer Bedeutung sind und eine Nutzungsrivalität im Spektrum bei Katastrophenlagen kontraproduktiv ist.

⁵⁸ Die Zuteilung des Frequenzbereiches 470-694 MHz an den Rundfunk läuft 2030 aus.

⁵⁹ Die Lizenzen der Mobilfunkbetreiber laufen 2025 (800-MHz-Band) bzw. 2033 (700/900-MHz-Band) aus.

Im Gegensatz hierzu wäre eine kurzfristige Einschränkung von PMSE-Diensten weit weniger kritisch, da bei Katastrophenlagen Konzerte und Großveranstaltungen nicht weiter stattfinden können. Eine Nutzungs rivalität mit PMSE-Diensten kann daher weitgehend ausgeschlossen werden.

Zudem besteht **ein dauerhafter, flächendeckender Mindestbedarf** von 5,1-15,3 MHz, um die Einsatzfähigkeit des D-LBO-Verbunds während Truppenverlegungen („Marsch“) auf dem Gebiet der Bundesrepublik sicherzustellen. Aufgrund der Fragmentierung der Liegenschaften der Bundeswehr und der sie verbindenden Marschrouten ist eine lokal oder zeitlich begrenzte Spektrumsnutzung bei Truppenverlegungen nicht praktikabel.

Für **Übungszwecke in festen Einrichtungen** (Kasernen) besteht kein erhöhter Bedarf an UHF-Spektrum, der über das des Szenarios Marschkolonne hinausgeht. Aufgrund der im Zellmaßstab geringen räumlichen Ausdehnung einer Kaserne kann der reguläre Ausbildungsbetrieb und die Administration des D-LBO-Verbunds über das 2,3-GHz-Band realisiert werden, die Zellgröße einer 2,3-GHz-Zelle ist ausreichend, um ein Kasernengelände auszuleuchten. Die Notwendigkeit einer rückwärtigen Backbone-Verbindung (zu einem Bundeswehr-Standort) entfällt szenariobedingt. Für den Fähigkeitserhalt und zu Ausbildungs- und Wartungszwecken ist der Einsatz des UHF-Equipments dennoch flächendeckend, und damit auch auf Kasernengeländen und Standortübungsplätzen, notwendig.

Zusätzlich zu den in Verkehrsmodellen hergeleiteten Spektrumsbedarfen besteht zusätzlicher Spektrumsbedarf für Bündnisarmeen im Rahmen des **Host Nation Support**.

Dieser ergibt sich zum einen für den regulären Truppenbetrieb der NATO-Partner auf Kasernengeländen und Marschrouten. Zum anderen kommt hinzu, dass bei gemeinsamen Übungen bis zu einer ggf. langfristig erreichbaren Harmonisierung der digitalen Kommunikationsmittel keine gemeinsame Nutzung von Backbone-Kapazitäten zum Betrieb der jeweiligen Battle-Management-Systeme möglich ist. Solange in einer solchen Übergangsphase keine Gateways auf IP-Ebene zwischen den verschiedenen Streitkräfte-Systemen möglich sind, könnte sich dadurch der Mindest-Spektrumsbedarf im Szenario Truppenübungsplätze auch noch bis zu verdoppeln.

Diese Bedarfe wären vorrangig mit Spektrum im Frequenzteilbereich 470-512 MHz zu befriedigen, da innerhalb der NATO der Frequenzbereich bis 512 MHz für die militärische Nutzung harmonisiert ist.

Nutzung des militärischen Spektrums in der Fläche

Auf dem Gebiet der Bundesrepublik besteht **ein dauerhafter, flächendeckender Mindestbedarf von 5,1-15,3 MHz**, einerseits zum Fähigkeitserhalt (Übungs- und Wartungszwecke) und andererseits, um die Einsatzfähigkeit des D-LBO-Verbunds während Truppenverlegungen („Marsch“) sicherzustellen. Zudem bestehen Frequenzbedarfe von Bündnisarmeen im Rahmen des Host Nation Support.

Hierzu kommt ein **hoher szenarioabhängiger, örtlich begrenzter Aufwuchsbedarf**. Besonders hohe, zeitlich und räumlich begrenzte Spektrumsbedarfe sind bei Manövern und Großübungen auf Truppenübungsplätzen zu erwarten sowie bei besonderen Einsatzlagen im Rahmen der Amtshilfe, etwa bei Katastrophenlagen und schweren Unglücksfällen. Für diese Szenarien bestehen Frequenzbedarfe von bis zu 100 MHz und zum Teil auch darüber hinaus.

Die **Zugriffsmöglichkeiten auf weitere Spektrumsressourcen** im Spannungs- und im Verteidigungsfall, im Rahmen von Bündnisverpflichtungen, im Rahmen der Zusammenarbeit mit den Vereinten Nationen, im Rahmen internationaler Vereinbarungen zur Notfallbewältigung oder bei Naturkatastrophen, terroristischen Anschlägen oder sonstigen vergleichbaren Ereignissen und besonders schweren Unglücksfällen nach § 104 TKG bleiben hiervon unberührt.

Kooperative Frequenznutzungen

Insbesondere die kooperative Nutzung des Frequenzbereiches mit **Bündnispartnern** auf dem Gebiet der Bundesrepublik ist naheliegend. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass bereits der Frequenzteilbereich 470-512 MHz eine signifikante Entlastung für die militärischen Spektrumsbedarfe verbündeter Streitkräfte in Deutschland darstellt. Aufgrund der Zunahme breitbandiger Anwendungen im taktischen Einsatz ist künftig von steigendem Bandbreitenbedarf auch bei Bündnispartnern auszugehen, und der Frequenzteilbereich bis 512 MHz ist für eine militärische Nutzung europaweit harmonisiert.

In den meisten Einsatzszenarien in Friedenszeiten besteht eine erhebliche militärische Spektrumsnutzung nur zeitlich und örtlich beschränkt und ist überwiegend mit hinreichendem zeitlichen Vorlauf planbar (z. B. bei Großübungen und Manövern). Insofern bieten sich kooperative Frequenznutzungen insbesondere mit Funkdiensten an, die ebenfalls nur zeitlich oder räumlich begrenzt eingesetzt werden, wie dies beim **Veranstaltungsfunk PMSE** der Fall ist. Eine kooperative Frequenznutzung mit dem Veranstaltungsfunk PMSE böte im Übrigen den Vorteil, dass dessen Nutzung geografisch mit dem Einsatz taktisch-mobiler militärischer Funkanwendungen kaum zusammenfällt. Nutzungskonflikte können insbesondere, wenn das militärische Band nur additiv für Nutzungsspitzen herangezogen wird, durch entsprechende Koordination bei Vorrang der militärischen Nutzung vermieden werden.

Öffentliche Mobilfunknetze werden im Idealfall kontinuierlich und flächendeckend betrieben, eine kooperative Nutzung ist daher grundsätzlich herausfordernd. Eine diskutierte Lösung hierbei ist das Konzept des Licensed Shared Access (LSA), bei dem Mobilfunknetzbetreiber auf Spektrum anderer Funkdienste zugreifen können, solange dieses nicht durch den dortigen Incumbent genutzt wird. Hierfür müssten entsprechende Warnsender zum Einsatz kommen, die speziell auf die vom Militär eingesetzte Funktechnik ausgerichtet sind und erst entwickelt werden müssten. Ob eine solche Konstellation für die Mobilfunknetzbetreiber wirtschaftlich attraktiv wäre, kann an dieser Stelle nicht abschließend beurteilt werden.

Der **Digitalfunk BOS** muss flächendeckend, rund um die Uhr, in der gesamten Bundesrepublik verfügbar sein, was durch eine feste, gehärtete und gegen Ausfälle besonders gesicherte Infrastruktur erreicht wird. Dies bedeutet, dass das hierfür bereitgestellte Spektrum kontinuierlich genutzt wird. Eine lokal bzw. zeitlich begrenzte Nutzung des Spektrums durch das Militär wäre insbesondere problematisch, wenn ggf. wichtige Dienste der BOS-Behörden (bspw. Polizeidrohnen) aus diesem Grund in Katastrophenlagen nicht mehr eingesetzt werden könnten. Eine gemeinsame Nutzung von Digitalfunk BOS und einer gesonderten militärischen Nutzung innerhalb desselben Frequenzteilbereiches schließt sich aus. Auf organisatorischer Ebene ist davon auszugehen, dass sich die Bundeswehr und die BDBOS bei ihren jeweiligen Nutzungen innerhalb des Frequenzbereiches 470-694 MHz eng koordinieren werden.

Fazit

Goldmedia Strategy Consulting wurde zusammen mit dem Unterauftragnehmer Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen (IIS) damit beauftragt, über Szenarien und Verkehrsmodelle die aufkommenden mobilen Datenraten moderner militärischer Kommunikationssysteme und damit verbundenen Spektrumsbedarfe zu analysieren. Geprüft werden sollte die Validität erster Schätzungen seitens der Bundeswehr, die von einem Aufwuchsbedarf an rein militärischem Spektrum auf bis zu 100 MHz in einem Sub-GHz-UHF-Band ausgehen.

Die von den Projektpartnern durchgeführten Analysen ergeben, dass insbesondere bei Großübungen, aber auch im Rahmen der Amtshilfe bei Katastrophenlagen Datenraten erzeugt werden, die einen Spektrumsbedarf von 100 MHz im Sub-GHz-Spektrum sehr plausibel erscheinen lassen.

Unter bestimmten Bedingungen kann der nominelle Spektrumsbedarf im Sub-GHz-Spektrum 100 MHz auch unter- oder überschreiten. Das D-LBO-System ist in Verbindung mit dem Mobilfunkstandard 5G jedoch dazu in der Lage, solche Bedingungen durch flexible Verkehrsmanagement-Maßnahmen zu kompensieren. Die hierzu notwendigen Fähigkeiten zur Dienste-Priorisierung sind innerhalb der D-LBO-Systemarchitektur angelegt und werden durch die extreme Flexibilität des 5G-Standards beim Umgang mit Spektrumseinschränkungen noch erheblich erweitert (vgl. Kap. 3.4 sowie Kap. 4.1.8).

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die von der Bundesregierung mit dem Weißbuch 2016 vorgegebene Einsatzfähigkeit der Bundeswehr zur Landes- und Bündnisverteidigung künftig im hohen Maße von einer Ausweitung der Spektrumszuteilung für militärische Zwecke im unteren UHF-Band (unterhalb von 1 GHz) abhängig ist.

Festzuhalten ist ferner, dass die Spitzen im Spektrumsbedarf nur zeitlich und räumlich begrenzt auftreten. Die hohe Priorität der Beübung der Landes- und Bündnisverteidigung an Standorten der Bundeswehr und die Unvorhersehbarkeit von Naturkatastrophen gestalten eine großflächig gemeinsame Nutzung von Spektrum mit dem öffentlichen Mobilfunk daher schwierig. Eine temporäre, lokale Mitnutzung von Teilen des Spektrums durch Funkdienste des Veranstaltungsfunks erscheint hingegen vergleichsweise einfach zu realisieren.

Für den Bundeswehrbetrieb sowie den Host Nation Support außerhalb von Übungen und Manövern erscheint zudem die flächendeckende und dauerhafte Zuweisung eines Frequenzspektrums von mind. 15 MHz. sinnvoll. Sofern für bestimmte Anwendungen (bspw. teleoperiertes Fahren) auch für Marschkolonnen zukünftig Video-Links relevant werden, erhöht sich hierbei der Bedarf nach Frequenzspektrum weiter.

8 Verzeichnisse

8.1 Abkürzungsverzeichnis

3GPP	3 rd Generation Partnership Project
BAAINBw	Bundesamt für Ausrüstung, Informationstechnik und Nutzung der Bundeswehr
BC	Broadcast
BDBOS	Bundesanstalt für den Digitalfunk der Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben
BFT	Blue Force Tracking
BLOS	Beyond Line-Of-Sight
BMI	Bundesministeriums des Innern, für Bau und Heimat
BMS	Battle Management System
BMVg	Bundesministerium der Verteidigung
BMDV	Das Bundesministerium für Digitales und Verkehr
BNetzA	Bundesnetzagentur
BOS	Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben
BSI	Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik
BW	Bundeswehr
CEPT	Conference of Postal and Telecommunications Administrations
COI Services Land	Community of Interest Services Land, eine Betriebsorganisation
COTS	Commercial-off-the-shelf
D-LBO	Digitalisierung landbasierter Operationen
DTN	Deployable Tactical Node
DVB-T2	Digital Video Broadcasting – Terrestrial, 2nd generation
ECCM	Electronic Counter Counter Measure
ESSOR HDRWF	European Secure Software defined Radio High Data Rate Wave Form
FF Kdo H	Federführung Kommando Heer
FFF MoTIV Land	Fähigkeitslücke und Funktionale Forderung der Mobilen Taktischen Informationsverarbeitung Land
FMN	Federated Mission Networking
FMV	Full Motion Video
FreqVSuV	§§97-107 TKG (Frequenzverordnung)
FRMCS	Future Railway Mobile Communication System
GB BMDV	Geschäftsbereich Bundesministerium für Digitales und Verkehr
GB BMI	Geschäftsbereich Bundesministerium des Innern und für Heimat
HF	Hochfrequenz
HNS	Host Nation Support

HW	Hardware
IdZ	Infanterist der Zukunft
IdZ-ES	Infanterist der Zukunft - Erweitertes System
IM	Instant Messaging
IMT	International Mobile Telecommunications
ITU	International Telecommunication Union
KdoCIR	Kommando Cyber- und Informationsraum
LOS	Line-Of-Sight
LTE	Long Term Evolution
luk VBU	Informations- und Kommunikationsverband
LV	Leistungsverstärker
MANBw	Mobile Ad-hoc-Netzwerke der Bundeswehr
MANET	Mobile ad hoc Network
MarSi	Marsch Sicherung
MESBw	Mission Enabling System der Bundeswehr
MGCS	Main Ground Combat System
mil vlfq	militärisch verlegefähig
MoTaKo	Mobile Taktische Kommunikation
MoTIV	Mobile Taktische Informationsverarbeitung
MOTS	Military-off-the-shelf
MTC	Mobile Tactical Client
MTN	Mobile Tactical Node
NARFA	National Radio Frequency Agency
NATO	North Atlantic Treaty Organization
NRF/NRI	NATO Response Force (NRF), NATO Readiness Initiative (NRI)
OOBE	Out of Band Emissions
PfP	Partnerschaft für den Frieden (englisch: Partnership for Peace)
PlgABw	Planungsamt der Bundeswehr
PMSE	Programme Making and Special Events
PRC-117G/H	Portable Radio Communications, Typ 117, Version G/H (zur Satellitenkommunikation)
SAR	Search and Rescue
SiLuRa	Sicherheit im Luftraum
SOTM HG	SatCom On The Move High Gain
SOTM LP	SatCom On The Move Low Profile
SRD/UWB	Short Range Device/Ultra Wide Band
SW	Software
TacSat	Tactical Satellite; eine Reihe von US-amerikanischen Satelliten
Takt/op	Taktisch/operationell

TC	Tactical Client
TDM	Time Division Multiplexing
TEN	Tactical Edge Networking
TerrFKAbw	Territoriale Flugkörperabwehr
TETRA	Terrestrial Trunked Radio
TN	Tactical Node
TX	Transmission
UE	User Equipment
VHF	Very High Frequency
VJTF(L)	Very High Readiness Joint Task Force Land
VO Funk	Vollzugsordnung für den Funkdienst
VoLTE	Voice over LTE
WLAN	Wireless LAN
WRC-23	Weltfunkkonferenz 2023

8.2 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Schematischer Aufbau des D-LBO-Verbunds	19
Abb. 2:	Generischer Aufbau eines Mobile Tactical Node	21
Abb. 3:	Systematischer Aufbau eines Tactical Clients	22
Abb. 4:	Blockdiagramm Mobilfunkplattform	28
Abb. 5:	Maßstabgerechte Darstellung der 5G NR-Bänder aus 38.101-x	33
Abb. 6:	Kennzahlen der Bundeswehr für das Szenario „Amtshilfe Hochwasser“	46

8.3 Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Übersicht über den Frequenzbereich von 230-399,9 MHz (B-Band)	10
Tab. 2:	Übersicht über den Frequenzbereich von 2-3 GHz (E-Band)	11
Tab. 3:	Auswahl im Studienkontext relevanter Frequenzteilbereiche und deren militärische Anwendungen	12
Tab. 4:	Bandübersicht der 3GPP-Bänder der Frequency Range 1 (FR 1)	29
Tab. 5:	Modellparameter für Abschätzung der Pfaddämpfung in Tab. 6.....	31
Tab. 6:	Ausbreitungsdämpfung in verschiedenen Szenarien	32
Tab. 7:	Übersicht der Formelzeichen.....	37
Tab. 8:	Übersicht der Formelzeichen.....	38
Tab. 9:	Durchschnittliche Datenraten von D-LBO-Funkanwendungen im Verkehrsmodell.....	41
Tab. 10:	Modellparameter des Szenarios „Backbone des D-LBO-Verbunds“	44
Tab. 11:	Modellparameter des Szenarios „Amtshilfe Hochwasser“	47
Tab. 12:	Modellparameter des Szenarios „Marschkolonne“	48
Tab. 13:	Aktuelle und potenzielle Funkdienstleistung deren Dienstbetreiber im Frequenzbereich 470–694 MHz	51
Tab. 14:	Zugewiesenes Spektrum nach Netzbetreiber in MHz	58
Tab. 15:	Genutztes Spektrum für digitalen BOS-Sprechfunk (TETRA) in Deutschland 2020	60

8.4 Quellenverzeichnis

- 3GPP: NR User Equipment (UE) radio transmission and reception Part 1: Range 1. Standalone. Online unter: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.101-1/38101-1-h50.zip [zuletzt abgerufen am 29.06.2022].
- 3GPP: NR User Equipment (UE) radio transmission and reception Part 2: Range 2 Standalone. Online unter: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.101-2/38101-2-h50.zip [zuletzt abgerufen am 29.06.2022].
- Amtsblatt der Europäischen Union (2017): BESCHLUSS (EU) 2017/899 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 17. Mai 2017 über die Nutzung des Frequenzbands 470-790 MHz in der Union. L 138/131 vom 25.05.2017.
- Anacom: Study on the Licensed Shared Access (LSA) spectrum sharing model in Portugal (final report). Online unter: <https://www.anacom.pt/render.jsp?contentId=1636571> [zuletzt abgerufen am 29.06.2022].
- BDBOS/NARFA DEU (2019): Strategie der BDBOS und Bundeswehr künftiger gemeinsamer Nutzung von Frequenzen zur Breitbandkommunikation. Version 1.0, 04.09.2019.
- Blackned (2018): Systemkonzept Digitalisierung landbasierter Operationen (D-LBO). Version 2.0. Ausgestellt für BAAINBw I6.4.
- BMVg (2020): Zweiter Bericht zur Digitalen Transformation des Geschäftsbereichs des Bundesministeriums der Verteidigung. Online unter: <https://www.bmvg.de/resource/blob/258260/cc60ba7e2570976df105baf97080fe45/20200312-download-zweiter-bericht-digitale-transformation-data.pdf> [zuletzt abgerufen am 20.05.2022].
- BMVG (2021): 14. Bericht des Bundesministeriums der Verteidigung zu Rüstungsangelegenheiten. Online unter: <https://www.bmvg.de/resource/blob/5325320/1f15343d355c6d77c332b06f27ebd025/download-14-ruestungsbericht-data.pdf> [zuletzt abgerufen am 20.05.2022].
- BNetzA (2022): Frequenzplan. Online unter: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/20210114_Frequenzplan.pdf?__blob=publicationFile&v=3 [zuletzt abgerufen am 30.06.2022].
- Bundesministerium der Verteidigung (2016): Weißbuch 2016. Zur Sicherheitspolitik und zur Zukunft der Bundeswehr.
- Bundeswehr (o.D.): Standorte der Bundeswehr. Online unter: <https://www.bundeswehr.de/de/organisation/standorte-bundeswehr> [zuletzt abgerufen am 29.06.2022].
- Bundeswehr-Journal (2020): Funkgerätefamilie-SEM-8090-bewaehrte-Huelle-neuer-Kern. Online unter: <https://www.bundeswehr-journal.de/2021/funkgeraetefamilie-sem-8090-bewaehrte-huelle-neuer-kern/> [zuletzt abgerufen am 20.05.2022].
- BWI: Bundeswehr stellt neues Battle-Management-System vor. Online unter: <https://www.bwi.de/news-blog/news/artikel/bundeswehr-stellt-neues-battle-management-system-vor> [zuletzt abgerufen am 29.06.2022].

CEPT (2014): ECC Decision (14)02. Harmonised technical and regulatory conditions for the use of the band 2300-2400 MHz for Mobile/Fixed Communications Networks (MFCN).

Deutscher Bundestag (2022): Entwurf eines Gesetzes zur Errichtung eines „Sondervermögens Bundeswehr“ (Bundeswehrondervermögensgesetz – BwSVermG). Beschlussempfehlung und Bericht des Haushaltsausschusses (8. Ausschuss) zu dem Gesetzentwurf der Bundesregierung – Drucksache 20/1409. Drucksache 20/2090 vom 01.06.2022.

Deutscher Bundestag (2022): Sondervermögen Bundeswehr [Bundeswehrondervermögensgesetz] beschlossen. hib 208/2022 vom 02.06.2022.

Esut (2020): Spektrumsüberwachung und Funkortung mit UMS400. Online unter: <https://esut.de/2022/04/meldungen/33651/spektrumueberwachung-und-funkortung-mit-ums400/> [zuletzt abgerufen am 20.05.2022].

Fraunhofer IIS (o. J.): RAPID AVAILABLE MODULES FOR INTEROPERABLE CAPABLE OPERATIONAL NETWORKING IN 5G (RAM ICON 5G). Studie (in Erstellung) im Auftrag der Bundeswehr, Vertrag: E/E810/LC038/IF105. Nicht datierte Entwurfsfassung.

Goldmedia/Fraunhofer IIS/Kühling (2021): PERSPEKTIVEN ZUR NUTZUNG DES UHF-BANDS 470-694 MHZ NACH 2030. Studie im Auftrag der Bundesnetzagentur, Seite 118

Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft (2022): Studie zur Bedarfsermittlung des Breitbandspektrums der BOS in Breitbandmobilfunknetzen. Unveröffentlichte Studie im Auftrag der Bundesanstalt für den Digitalfunk der Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben.

ITU (2020): France: WRC-23 Agenda Item 1.5: Spectrum use, future spectrum needs and technical characteristics for private global protection non-IMT mobile applications, undatierter Entwurf

ITU (2020): Germany (Federal Republic of) – Current spectrum use and future spectrum needs of critical communications for governmental use. Document 5A/200-E, 02.11.2020

Öffentliche Ausschreibungen Deutschland (2021): Lieferung von Funkgeräten für den Führungsfunk. Online unter: https://ausschreibungen-deutschland.de/822080_Lieferung_von_Funkgeraeten_fuer_den_Fuehrungsfunk_sowie_ggf_Erbringung_verschiedener_2021_Koblenz [zuletzt abgerufen am 20.05.2022].

Soldat-und-Technik (2021): Deutsch-Niederländisches TEN-Programm. Online unter: <https://soldat-und-technik.de/2021/04/fuehrung-kommunikation/26690/deutsch-niederlaendisches-ten-programm-keine-gemeinsame-beschaffung-von-funkgeraeten/> [zuletzt abgerufen am 20.05.2022].

Soldat-und-Technik (2022): D-LBO: Entscheidung beim UHF-Soldatenfunk gefallen? Online unter: www.soldat-und-technik.de/2022/03/fuehrung-kommunikation/30374/d-lbo-entscheidung-beim-uhf-soldatenfunk-gefallen/ [zuletzt abgerufen am 20.05.2022].

- Telekom Deutschland (2020): Vergabestrategie 2025. Beantwortung Frequenzkompass 2020 Telekom Deutschland GmbH.
- Teltarif.de (2022): freenet-Chef Vilanek: "2030 natürliches Ende von DVB-T2". Online unter: <https://www.teltarif.de/freenet-tv-dvb-t2-christoph-vilanek/news/87089.html> [zuletzt abgerufen am 29.06.2022].
- T-Mobile LTE Band 71: Online unter: <https://www.tmoband71.com/> [zuletzt abgerufen am 29.06.2022].
- Tutela (2018): What we can learn from relative cell sizes. Online unter: <https://www.tutela.com/blog/what-we-can-learn-from-relative-cell-sizes> [zuletzt abgerufen am 29.06.2022].
- Vodafone (2020): Stellungnahme der Vodafone GmbH zum Frequenzkompass 2020, 23.10.2020.
- Wikipedia a: Gefechtsstand. Online unter: <https://de.wikipedia.org/wiki/Gefechtsstand> [zuletzt abgerufen am 29.06.2022].
- Wikipedia b: Heer (Bundeswehr). Online unter: [https://de.wikipedia.org/wiki/Heer_\(Bundeswehr\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Heer_(Bundeswehr)) [zuletzt abgerufen am 29.06.2022].
- Wikipedia c: Truppenübungsplatz. Online unter: <https://de.wikipedia.org/wiki/Truppen%C3%BCbungsplatz> [zuletzt abgerufen am 29.06.2022].