



**Hochschule Magdeburg-Stendal
Fachbereich Ingenieurwissenschaften und
Industriedesign (IWID) Institut für Elektrotechnik**

Bachelorarbeit

**zur Erlangung des Grades eines „Bachelor of Engineering“
im Studiengang Elektrotechnik-IT- und Kommunikationsnetze**

**Thema: Vorgehensweise zur Bearbeitung von NB-IoT-
Störungen, Erstellung einer Schulungsunterlage**

Eingereicht von: Jonas Kubitschke

Angefertigt für: Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas,
Telekommunikation, Post und Eisenbahn

Matrikel: 20162768

Ausgabetermin: 05.07.2021

Abgabetermin: 13.09.2021

Schulischer Betreuer: Herr Prof. Dr. techn. Sebastian Hantscher

Betrieblicher Betreuer: Herr (M.Eng.) Richard Rauwolf

.....

1. Prüfer

.....

2. Prüfer

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Stellen sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

Katlenburg-Lindau, 11.08.2021

(Jonas Kubitschke)

I. Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation der Bachelorarbeit	1
1.2	Problemstellung	2
1.3	Ziel- und Aufgabenstellung der Arbeit	2
1.4	Ablauf der Arbeit	3
2	Theoretische Grundlagen	4
2.1	Long Term Evolution (LTE)	4
2.1.1	Einführung und Übersicht	4
2.1.2	HF-Eigenschaften	6
2.1.3	Signalstruktur	6
2.1.4	Downlink	7
2.1.5	Uplink	8
2.1.6	Scheduling und Kanalmessung	8
2.1.7	HF-Spektrum	10
2.2	NarrowBand Internet of Things (NB-IoT)	11
2.2.1	Einführung und Übersicht	11
2.2.2	HF-Eigenschaften	12
2.2.3	Signalstruktur	12
2.2.4	Downlink	13
2.2.5	Uplink	15
2.2.6	Genutzte Frequenzen	15
2.2.7	HF-Spektrum	16
2.2.8	NB-IoT Stromsparmechanismen	17
2.2.9	Reichweite	18
2.2.10	Signalparameter	18
3	Messungen	22
3.1	Einleitung	22
3.2	Messaufbau und Methodik	22
3.3	Mobilfunknetzabdeckung	25
3.4	Die verwendeten Messgeräte	25
3.4.1	Messungen mit dem DESK77	25
3.4.2	Messung mit dem NEMO Handy	29
3.4.3	Messungen mit dem FSP Spektrumanalysator	29
3.4.4	Messungen mit dem Realtime Spektrumanalysator	30
3.5	Durchführung der Messungen	31
3.5.1	Messungen mit dem Realtime Spektrumanalysator	31
3.5.2	Messungen im Untergeschoss	38
3.5.3	Messungen in der Schirmkabine	43
4	Schulungsunterlage NB-IoT	49
4.1	Vorgehensweise zur NB-IoT-Störungsbearbeitung mit dem NB-DESK77	49
4.2	Schulungsunterlage NB-IoT für das Skript zum Lehrgang: Digitale Übertragung Teil 2 Systeme	49
4.3	Evaluation	50
5	Auswertung	52

5.1	<i>Auswertung der Messungen mit dem Realtime Spektrumanalysator</i>	52
5.2	<i>Auswertung zu den Messungen im Untergeschoss</i>	52
5.3	<i>Auswertung zu den Messungen in der Schirmkabine</i>	53
6	Fazit und Ausblick	56
II.	Abkürzungsverzeichnis	III
III.	Abbildungsverzeichnis	VI
IV.	Tabellenverzeichnis	VII
V.	Literaturverzeichnis	VIII
VI.	Anhangsverzeichnis	IX

1 Einleitung

In diesem Kapitel wird die Motivation, die Problemstellung, die Ziel- und Aufgabenstellung und die Gliederung der Arbeit vorgestellt.

1.1 Motivation der Bachelorarbeit

Die Bundesnetzagentur (BNetzA) für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahn ist eine deutsche Bundesbehörde. Die BNetzA ist unter anderem für die Zuteilung der Frequenzen und deren Überwachung und Sicherstellung verantwortlich. Durch eine wachsende Anzahl an elektronischen Geräten und einer steigenden Vernetzbarkeit der Geräte untereinander, kommt es vor, dass sich Geräte untereinander stören können. Die Störungsbearbeitung wird innerhalb der BNetzA vom Prüf- und Messdienst (PMD) ausgeführt.

Das Internet of Things (IoT) gewinnt in der Industrie, aber auch im privaten Bereich, immer mehr an Bedeutung. Auf der ganzen Welt werden Objekte mit Sensoren und Software ausgerüstet, um Daten zu erfassen und auszutauschen. Die Vernetzbarkeit der Geräte nimmt stetig zu. Für IoT-Anwendungen eignen sich Low-Power-Wide-Area-Systeme (LPWA) besonders gut. Es gibt zwar bestehende Mobilfunktechnologien, diese sind jedoch nicht für IoT-Anwendungen optimiert, da bei IoT häufig nur kleine Datenmengen ausgetauscht werden. Für die Anbindung von Geräten und Sensoren mit geringer Datenmenge gibt es einige LPWA-Techniken. Hierfür sind NB-IoT, Sigfox, LoRa und LTE-M einige Beispiele. Häufige IoT-Anwendungsfälle sind Smart Metering, Warenverfolgung oder die Überwachung von Industrieanlagen. Hierbei setzt man auf die schmalbandige Übertragungstechnik NarrowBand Internet of Things (NB-IoT). NB-IoT wurde für IoT-Anwendungen spezifiziert, die nur selten eine sehr kleine Datenmenge senden. Häufig kommunizieren NB-IoT-Module nur einmal am Tag, in der Woche oder sogar im Jahr. Das Hochfrequenzsignal für NB-IoT weist eine hohe Gebäudedurchdringung auf, wodurch auch noch mit tief im Gebäudeinneren installierten Geräten ein Datenaustausch möglich ist. Außerdem haben die Module einen niedrigen Energieverbrauch, wodurch sie eine Batterielaufzeit von bis zu 10 Jahren erreichen können. Bei NB-IoT-Modulen wurde auf Dienste, die für IoT-Anwendungsfälle nicht erforderlich sind, verzichtet, um die Hardwarekosten möglichst gering zu halten. So lassen sich die Module für unter 5\$ herstellen. Des Weiteren liegen die Kosten für eine SIM-Karte bei etwa 1€ pro Jahr.

Es ist davon auszugehen, dass in Zukunft häufiger NB-IoT-Module zum Einsatz kommen werden. Vodafone will bis 2025 mehr als 55 Milliarden IoT-Geräte in ihrem Netz betreiben.

Bereits Mitte 2020 waren nach Angaben von Vodafone mehr als 100 Millionen IoT-Chips im Umlauf [1]. Mit einer steigenden Anzahl der NB-IoT-Module wird voraussichtlich auch die Anzahl der Störungen in diesem Bereich zunehmen.

1.2 Problemstellung

Durch die vielen Vorteile des NarrowBand-IoT wird sich voraussichtlich die Anzahl der NB-IoT-Module erhöhen. Mit einer erhöhten Anzahl an Modulen wird es wahrscheinlicher, dass mehr Störungen in Verbindung mit NB-IoT auftreten. Dabei kann es sein, dass die Module von anderen Störquellen beim Kommunizieren gestört werden, aber auch, dass ein fehlerhaftes NB-IoT-Modul selber zur Störquelle wird und andere Geräte stört.

Bei einer Störung mit NB-IoT gestaltet sich die Störungseingrenzung schwierig. Nachfolgend sind einige Punkte aufgelistet, die bei der Störungsbearbeitung Probleme bereiten könnten.

- Seltene Datenübertragungen
 - Die seltenen Datenübertragungen im NB-IoT machen es schwierig, das NB-IoT-Modul als Störungsquelle auszumachen.
- Keine Schnittstelle am Modul
 - Die Module haben keine Schnittstelle, sodass man sie nicht zum Senden bringen oder den Batteriezustand abfragen kann.
- Geringe Gebäudedämpfung
 - Durch die vorhandene Gebäudedämpfung ist davon auszugehen, dass ein NB-IoT-Modul mit einer sehr geringen Nutzfeldstärke auskommen muss. Es wird vermutet, dass die Versorgungsfeldstärke zu gering ist, um sie mit der herkömmlichen Messausrüstung der Funkmesswagen der BNetzA zu empfangen.

Mit einer steigenden Anzahl an NB-IoT-Modulen und der damit verbundenen voraussichtlichen Zunahme an Störungen, liegt es im Interesse der Bundesnetzagentur, wie mit einer solchen Störungsbearbeitung umzugehen ist.

1.3 Ziel- und Aufgabenstellung der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist es, eine Vergleichsmessung zwischen dem NB-DESK77 und den herkömmlichen Messgeräten des PMD durchzuführen. Der „NB DESK 77 Rev. 1.0“ von exelonix kann hierbei als Vergleichsempfänger zu der aktuell vorhandenen HF-Messtechnik

des PMD eingesetzt werden. Es könnte sein, dass die Systeminformationen von dem schmalbandigen Modul noch ausgelesen werden können, wo die herkömmlichen Messempfänger des PMD keine Feldstärke mehr registrieren und LTE-Testmobile keine Verbindung ins Netz mehr herstellen können. Bei dieser Vergleichsmessung soll das Verhalten unter verschiedenen Mobilfunkbedingungen überprüft und verglichen werden. Dabei soll der Pfadverlust der Messgeräte innerhalb eines Gebäudes ermittelt werden. Abschließend soll gegenübergestellt werden, ob die aktuelle HF-Messtechnik der BNetzA ausreichend ist, um eine korrekte und vollumfängliche Störungsbearbeitung im Bereich NB-IoT sicherzustellen.

Zusätzlich soll eine Vorgehensweise zur Störungsbearbeitung im Bereich NB-IoT entwickelt werden. Dafür soll eine Schulungsunterlage für die NB-IoT-Theorie und ein Handlungsskript für den NB-DESK77 erstellt werden. Die Messbeamten des PMD sollen bei der Störungsbearbeitung auf diese Unterlagen zurückgreifen können. Mit diesen Unterlagen als Hilfe soll es möglich sein, dass sich die Messbeamten selbstständig in die Übertragungstechnik NB-IoT und das NB-Messgerät einarbeiten.

1.4 Ablauf der Arbeit

Diese Arbeit beginnt mit den theoretischen Grundlagen. Zu Beginn wird ein Einblick in die LTE-Theorie und dessen HF-Eigenschaften gegeben. Anschließend wird die, auf das LTE aufbauende, NB-IoT-Theorie vermittelt. Dabei wird auf die Signalstruktur im Downlink und Uplink eingegangen. Es soll dem Leser ermöglicht werden, sich die Grundlagen dieser Mobilfunktechniken anzueignen, um die darauf folgenden Messungen besser nachvollziehen zu können.

In dem Kapitel 3 werden erst Messaufbau und Methodik, anschließend die verwendeten Messgeräte erläutert. Nachfolgend werden die durchgeführten Messungen geschildert und die dabei erzielten Ergebnisse vorgestellt.

Nachfolgend wird im 4. Kapitel die Vorgehensweise zur NB-IoT-Störungsbearbeitung mit dem NB-DESK77 und die Schulungsunterlage NB-IoT für das Skript zum Lehrgang: Digitale Übertragung Teil 2 Systeme vorgestellt. Zusätzlich wird in diesem Kapitel noch die Überprüfung der Vorgehensweise erläutert.

Die Auswertungen der zuvor geschilderten Messergebnisse werden im Kapitel 5 beschrieben.

Abschließend wird im 6. Kapitel das Fazit dieser Arbeit gegeben.

2 Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen erfasst. Es werden zunächst die Grundlagen für Long Term Evolution (LTE) und anschließend für NarrowBand Internet of Things (NB-IoT) beschrieben.

2.1 Long Term Evolution (LTE)

Im Folgenden wird auf das LTE eingegangen. Dabei werden vertieft die technischen Eigenschaften des LTEs aufgegriffen.

2.1.1 Einführung und Übersicht

Der Mobilfunkstandard der dritten Generation (3G) war das Universal Mobile Telecommunications System (UMTS). Die darauffolgende digitale Mobilfunktechnik ist das Long Term Evolution (LTE). Dieser Mobilfunkstandard wurde von der 3rd Generation Partnership Project Organisation (3GPP) in Release 8 veröffentlicht und standardisiert. LTE trägt zu einer flächendeckenden Versorgung mit Breitbanddiensten bei. 2010 wurde mit der Einführung von LTE in Deutschland begonnen. Seit 2014 ist in Deutschland auch LTE-Advanced verfügbar. LTE-Advanced erfüllt die Anforderungen, die an eine Mobilfunktechnik der vierten Generation (4G) gestellt werden.

Nachfolgend wird ein Überblick über die Entwicklung der Mobilfunkstandards vom GSM bis zum LTE gegeben. Dabei wird auf die Unterschiede und Neuerungen der Standards eingegangen.

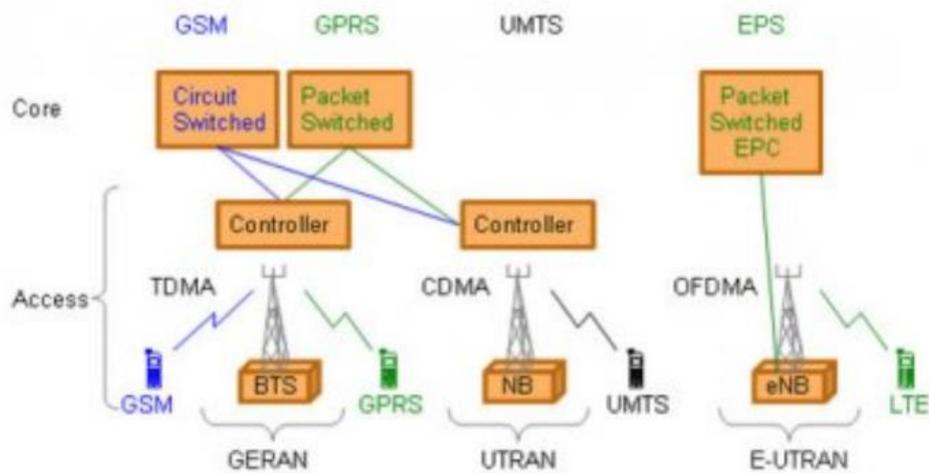


Abbildung 1: Netzwerklösungen von GSM zu LTE

Quelle: [2]

Das Global System for Mobile Communications (GSM) ist eine leitungsvermittelte Modem-Verbindung mit sehr niedriger Datenrate (blau in Abbildung 1). Der Mobilfunkstandard der zweiten Generation („2G“) wird hauptsächlich für Telefonie und Kurzmitteilungen genutzt. Das Frequenzzugriffsverfahren im Accessnetwork ist TDMA.

Mit der Entwicklung von GSM zu General Packet Radio Service (GPRS) wurde die IP-basierte Paketvermittlung im Corenetwork eingeführt (grün in Abbildung 1).

Die Zugangstechnologie Wideband Code Division Multiple Access (WCDMA) verwendet eine größere Bandbreite, wodurch höhere Datenraten in UMTS möglich sind (schwarz in Abbildung 1). Im UMTS gibt es leitungsvermittelte Verbindung für Echtzeitdienste und paketvermittelte Verbindung für Datenkommunikationsdienste.

Das in 3GPP R8 eingeführte Evolved Universal Terrestrial Access Network (E-UTRAN), bildet die Funkschnittstelle des Evolved Packet System (EPS), bekannt als LTE-Mobilfunknetz. Die Hauptanforderungen sind hohe spektrale Effizienz, hohe Spitzendatenraten, sowie Flexibilität in Frequenz und Bandbreite. Beim EPS werden Echtzeitdienste und Datenkommunikationsdienste vom IP-Protokoll übertragen (dunkelgrün in Abbildung 1). EPS setzt ausschließlich auf das paketvermittelnde Internet-Protokoll (IP). Beim Einschalten erhält jedes Mobiltelefon eine IP-Adresse, die beim Ausschalten des Gerätes wieder freigegeben wird [2]. LTE ermöglicht besonders kurze Reaktionszeiten (Latenzzeiten), da die Datenübertragung paketorientiert erfolgt [3]. Gebiete, die mit LTE zu versorgen sind, werden in Funkzellen eingeteilt. In diesen Funkzellen wird die Versorgung mit ortsfesten Funksendeanlagen (Basisstationen,

eNodeB) sichergestellt. Bei LTE-Endgeräten (UE) beträgt die maximale Sendeleistung 200 mW [3].

2.1.2 HF-Eigenschaften

Das LTE ist eine Breitbandtechnologie und wird in den Frequenzbändern Band 1 um 2100 MHz, Band 3 um 1800 MHz, Band 7 um 2600 MHz, Band 8 um 900 MHz, Band 20 um 800 MHz, Band 28 um 700 MHz, Band 32 um 1500 MHz betrieben.

LTE unterstützt im Gegensatz zu UMTS unterschiedliche Kanalbandbreiten von 1,4; 3; 5; 10; 15 und 20 MHz. Bei LTE-Advanced sind durch Zusammenlegung von Kanälen bis 100 MHz möglich. Bei LTE wird die Kombination aus OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) mit der Modulation einer höheren Ordnung (QPSK, 16QAM, 64QAM), großen Bandbreiten (bis zu 20 MHz) und räumlichen Multiplexing im Downlink (MIMO bis zu 4x4) verwendet. Durch diese Kombination sind theoretisch Datenraten von 75 Mbit/s im Uplink und 300 Mbit/s im Downlink möglich [2].

LTE unterstützt sowohl die Zeitduplex-Technologie (TDD), als auch den Frequenzduplex (FDD) [2]. In Deutschland nutzt LTE ausschließlich Frequenzduplexing, um die von der Basisstation gesendeten Daten, von denen des Endgeräts gesendeten Daten, zu trennen. Beim Frequenzduplexverfahren wird in Uplink- und Downlink-Richtung in einem eigenen Frequenzkanal gesendet [3].

2.1.3 Signalstruktur

LTE verwendet für den Downlink OFDMA und für den Uplink Single Carrier – Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA), um eine hohe Funkspektraleffizienz zu erzielen [3].

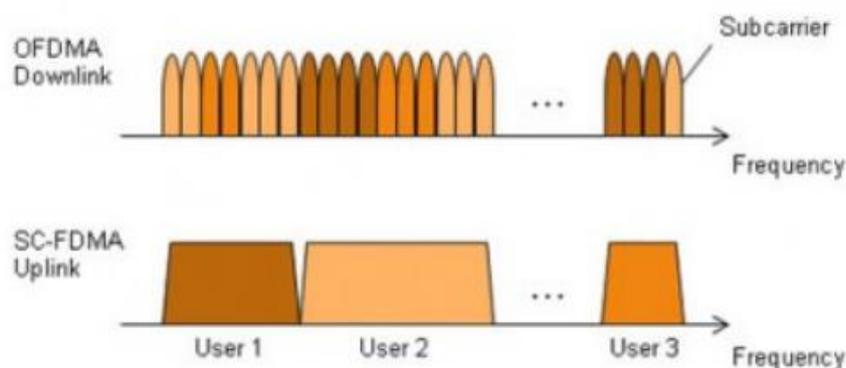


Abbildung 2: OFDMA und SC-FDMA

Quelle: [2]

2.1.4 Downlink

OFDMA basiert auf der Mehrträgermodulation Orthogonal Frequency Division Multiplex (OFDM, dt. Orthogonaler Frequenzmultiplex). Es wird mit Frequency Division Multiple Access (FDMA, dt. Frequenzmultiplex-Mehrfachzugriff) und Time Division Multiple Access (TDMA, dt. Zeitmultiplex-Mehrfachzugriff) erweitert. Bei FDMA wird die Bandbreite eines Kanals in separate, nicht überlappende Frequenzkanäle aufgeteilt und jeder Benutzer bekommt exklusiv einen Kanal zugewiesen. Bei TDMA können mittels Timeslots mehrere Benutzer nacheinander die gleiche Übertragungsfrequenz nutzen. Hierbei handelt es sich um Zeitmultiplex [4].

Bei OFDM wird, nicht wie bei UMTS, ein Signal über einen breiten Übertragungskanal gesendet, sondern die verfügbare Bandbreite wird in eine Vielzahl von schmalbandigen Unterträgern (Subkanäle, Subcarrier) unterteilt, die gleichzeitig übertragen werden. Dies ist in der Abbildung 2 zu sehen. Der Unterträger-Abstand beträgt 15 kHz, wobei sich deren Spektren überlappen. Dennoch erreicht man bei OFDM eine nur minimale Beeinflussung der Träger untereinander durch die folgenden zwei Punkte. Der erste Grund für die minimale Beeinflussung der überlappenden Träger ist, dass bei OFDM der Nulldurchgang im Spektrum eines modulierten Trägers genau auf der Mittenfrequenz des Nachbarträgers ist. Der Abstand des Nulldurchgangs zur Mittenfrequenz entspricht hierbei genau dem Kehrwert einer Symboldauer. Der zweite Grund ist, dass die Trägerbezugsphase für die Modulation zwischen den einzelnen Trägern orthogonal ist. Die Trägerbezugsphasendifferenz beträgt 90° , sodass es zu einer maximalen Winkelentkopplung kommt.

Jeder der Unterträger wird mit einer relativ geringen Datenrate moduliert [4]. Die Unterträger werden mit 16-, 64, oder 256-Quadrature Amplitude Modulation (QAM) moduliert. Bei der QAM werden die Bits durch Modulation der Amplituden und Phasenlage der Träger übertragen [4].

Ein LTE-Signal setzt sich aus einer Vielzahl sogenannter Physical Resource Blocks (PRB) zusammen. Ein PRB besteht aus $12 \times 15 \text{ kHz}$ OFDM-Unterträgern. Damit hat ein PRB eine Bandbreite von $\Delta f = 180 \text{ kHz}$. Ein PRB-Slot hat eine zeitliche Länge von 1 ms [4].

Bei OFDMA werden die OFDM-Unterträger eines PRBs jeweils für die Dauer eines Subframes mit den Daten eines Kanals mit QAM moduliert. Im nächsten Subframe können weitere Daten auf andere OFDM-Träger anderer PRBs moduliert werden. Dadurch erhält man optimale Flexibilität bei der Verteilung der Nutzerdaten auf die zur Verfügung stehenden Träger und bestmögliche Ausnutzung der Gesamtkapazität [5].

Durch die Kombinationen können bei OFDMA mehrere Benutzer die Unterträger gemeinsam nutzen. OFDMA erfordert in der Anwendung teure Leistungsverstärker mit hoher Linearität, was zu einem erhöhten Stromverbrauch führt. Bei den Basisstationen stellt dies kein Problem dar, sie sind mit den Leistungsverstärkern ausgerüstet. Durch den erhöhten Stromverbrauch wird jedoch bei den mobilen Endgeräten auf diese Technologie verzichtet, um eine längere Betriebszeit zu ermöglichen [2]. Bei den UEs wird eine andere Übertragungstechnik angewendet, die im Nachfolgenden beschrieben wird.

2.1.5 Uplink

Um die teuren Leistungsverstärker und den erhöhten Stromverbrauch bei den UEs zu umgehen, wurde im Uplink-Bereich auf SC-FDMA gesetzt. Es wird auch Discrete Fourier Transform Division spread OFDM genannt. Bei SC-FDMA wird ein Signal mit Einzelträgerereigenschaften erzeugt. Dies ist in Abbildung 2 zu sehen [2].

Bei SC-FDMA werden die Informationen von den vielen OFDM-Unterträgern zu einem Träger (SC=Single Carrier) zusammengefasst. Jedes SC-FDMA-Symbol besteht aus kleinen Untersymbolen. Während der Dauer eines Symbols werden die Daten nacheinander mit QPSK auf den breiten Einzelträger moduliert. Die Umtastung muss hierbei um ein Vielfaches schneller sein, als bei OFDM. Die Bandbreite des Einzelträgers ist in der Regel größer als die Bandbreite der OFDM-Unterträger. Die OFDMA- und die SC-FDMA-Symboldauer liegt bei LTE bei $66,7 \mu\text{s}$ [5].

Der Crest-Faktor ist bei dieser Vorgehensweise nicht höher als bei einem QPSK-Einträgersignal. Der Crest-Faktor ist das Verhältnis von Spitzenleistung zur mittleren Leistung und wird in dB angegeben.

2.1.6 Scheduling und Kanalmessung

Das Zugangsnetz von LTE wird von Basisstationen (eNodeB) aufgebaut. Es gibt keine Base-stationcontroller, wie bei GSM/UMTS. Die einzelnen eNodeB sind, wie in Abbildung 3 dargestellt, über die X2-Schnittstelle verbunden. Das Kernnetzwerk steht über die S1-Schnittstelle mit den eNodeBs in Verbindung. Beim LTE-Zugangsnetz gibt es keine zentrale intelligente Steuerung. Dieser Aufbau ermöglicht einen beschleunigten Verbindungsaufbau und verkürzt die Zeit der Übergabe, dies ist besonders für eine Echtzeit-Datensitzung wichtig [2].

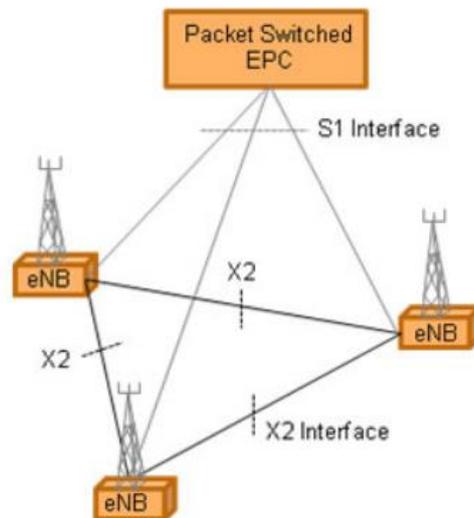


Abbildung 3: X2- und S1-Schnittstellen

Quelle: [2]

Des Weiteren ist die MAC-Protokollschicht nur im eNodeB und im UE dargestellt. Die MAC-Protokollschicht ist für die Planung verantwortlich. So kann zwischen dem UE und dem eNodeB eine schnelle Kommunikation und Entscheidung erreicht werden [2].

Der Scheduler hat die Aufgabe die PRBs im Down- und Uplink optimal zusammenzustellen. Um dies zu ermöglichen, messen die UEs die Empfangsstärke der Referenzsignale (Reference Signal Received Power, RSRP) ununterbrochen. Die Messergebnisse werden anschließend der Basisstation mitgeteilt. Mit Hilfe dieser Informationen ordnet der Scheduler die PRBs für den Downlink an. Im Uplink wird der Basisstation von den UEs mitgeteilt, wie viel Leistung noch bereit steht. Anschließend teilt der Scheduler die Leistung, Modulation und Frequenzblock jedem UE für den folgenden Radioframe (RF) zu [2]. Dadurch kann das Netzwerk schnell auf sich ändernde Bedingungen reagieren, Überlastungen kontrollieren und die Quality of Service (QoS) Anforderungen steuern [4]. Es ergibt sich eine sehr hohe QoS, da die genutzten Frequenzbänder exklusiv für Mobilfunk genutzt werden [6]. LTE unterstützt sowohl verzögerungsempfindliche Echtzeitdienste als auch Datenkommunikationsdienste, die hohe Datenspitzensraten erfordern [2].

Bei einer LTE-Basisstation hängt die maximale Sendeleistung von der Größe der zu versorgenden Mobilfunkzelle ab. 20 bis 50 Watt pro Sektor sind hierbei typische Sendeleistungen. Die Antennen werden oftmals in drei Sektoren im Winkel von 120° zueinander aufgebaut. Bei der Basisstation werden mit der Antennentechnik Multiple Input Multiple Output (MIMO) Signale, die den gleichen Informationsinhalt haben, über zwei verschiedene Antennen ausgesendet. Mit MIMO lassen sich schnellere Datenübertragungen und größere Bandbreiten erzie-

len. Bei LTE-Endgeräten ist die maximale Sendeleistung auf 20 mW begrenzt. Theoretisch kann die Sendeleistung der Endgeräte, bei einer guten Funkverbindung zur Basisstation, auf bis zu 1 μ W reduziert werden [3].

2.1.7 HF-Spektrum

Um das LTE-Signal anschaulich aufzuzeigen wird in der Abbildung 4 ein LTE-Kanal der Deutschen Telekom dargestellt. Die Abbildung wurde mit einem Realtime Spektrumanalysator in der Dienststelle der BNetzA Hannover aufgenommen. Das LTE-Signal wird in einem Amplitudendichtespektrum dargestellt. In dem Amplitudendichtespektrum wird die Leistungsverteilung über die Frequenz abgebildet. Der Kanal befindet sich im LTE900 im Band 8 und hat eine Kanalbandbreite von 5 MHz.

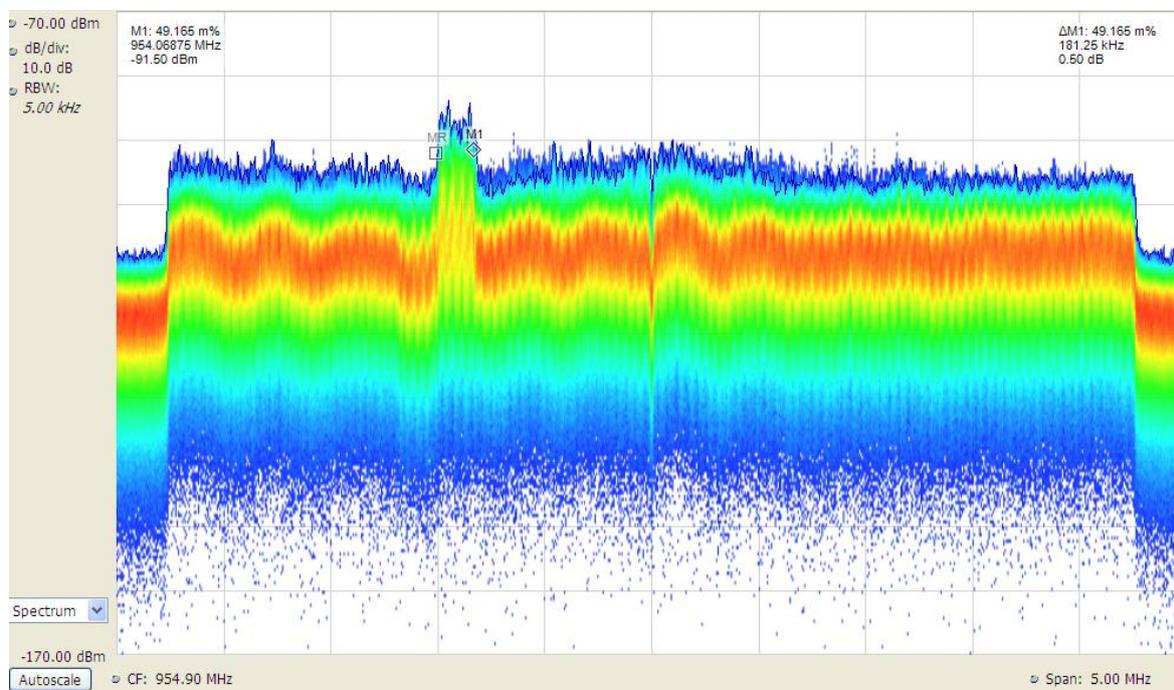


Abbildung 4: LTE-Kanal der Telekom im Spektrum

2.2 NarrowBand Internet of Things (NB-IoT)

Nachfolgend werden die technischen Eigenschaften des NB-IoT beschrieben. Es soll ein vertiefter Einblick in die Übertragungstechnik NB-IoT gegeben werden.

2.2.1 Einführung und Übersicht

Als treibende Kraft der gegenwärtigen und zukünftigen drahtlosen Kommunikation gilt das Internet der Dinge (Internet of Things, IoT). Hierbei handelt es sich um die Kommunikation zwischen Maschinen ohne menschliches Handeln. Schon im Jahr 2008 waren mehr Objekte (Maschinen) mit dem Internet verbunden, als Menschen einen Internetzugang hatten. Es kommen immer weitere Geräte und Anwendungen, wie Smart Home und Wearables (Smartwatch, Sensoren) hinzu, die in ihren Anforderungen an die Kommunikation, Akkulaufzeiten und Reichweiten variieren [7].

Um bei IoT-Anwendungen die unterschiedlichen Anforderungen abdecken zu können, wurden im LTE-Bereich Erweiterungen spezifiziert. Der Standard NarrowBand Internet of Things (NB-IoT, LTE Cat-NB1) von der 3GPP ist eine Erweiterung des LTE-Radionetzwerkes. NB-IoT ist für Machine-Type Traffic optimiert. Diese Anwendung wurde für Geräte entwickelt, die oft an unzugänglichen Orten zum Einsatz kommen und dabei möglichst kostengünstig produziert und betrieben werden sollen. Hierbei wurde auf lange Batterielaufzeiten, große Reichweiten und eine hohe Gebäudedurchdringung Wert gelegt, um auch bei schlechter Netzabdeckung kommunizieren zu können. Der Unterschied von NB-IoT-Modulen zu Smartphones ist sehr stark beim Stromverbrauch und bei der Übertragung von Daten, da die NB-IoT-Module nur sehr sporadisch und mit geringen Datenmengen kommunizieren, ersichtlich. Für die Übertragung werden Frequenzen um 800 MHz und 900 MHz genutzt [4]. Da zusätzliche Gateways den Wartungsaufwand und die Kosten erhöhen würden, wird eine direkte Verbindung von den NB-IoT-Modulen zum Internet über das LTE-Mobilfunknetzwerk realisiert. Dafür ist keine neue Netzwerkinfrastruktur nötig. Mit einem Softwareupdate kann der Netzbetreiber die existierende LTE-Infrastruktur aufrüsten und NB-IoT in die bestehenden Frequenzbänder und -kanäle des LTEs einbetten [4].

NB-IoT bietet eine hohe Kanalkapazität, so können viele IoT-Module gleichzeitig in einer Funkzelle kommunizieren. Mit der NB-IoT-Technik ist es möglich, bis zu 50.000 Geräte parallel in einer Funkzelle zu vernetzen.

Neben dem Standard LTE Cat-NB1 wird in Deutschland zusätzlich auch LTE CAT-M1 betrieben, welches auf den gleichen Frequenzen im Netz arbeitet, jedoch höhere Datenraten verwendet [6].

2.2.2 HF-Eigenschaften

NarrowBand IoT setzt das von LTE verwendete Übertragungsverfahren Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access (OFDMA) ein. Bei NB-IoT beträgt die Bandbreite eines Kanals nur 180 kHz, da hier nur ein Physical Resource Blocks (PRB) verwendet wird. Das ist sehr schmalbandig im Vergleich zu einem LTE Kanal mit 20 MHz und einer Vielzahl an PRBs. Diese Kanalbandbreite wurde gewählt, da es die Nutzung von einem oder mehreren NB-IoT Kanälen innerhalb eines LTE Kanals ermöglicht. Ein PBR setzt sich aus zwölf 15 kHz Subcarrier zusammen und nimmt einen Slot von 1 ms ein [4].

2.2.3 Signalstruktur

Im Release 13 von 3GPP wurde spezifiziert, dass der Duplexmodus für NB-IoT Halbduplex-FDD vom Typ B ist. Das bedeutet, dass Uplink und Downlink in verschiedenen Frequenzkanälen gesendet werden. Das UE darf trotzdem nicht gleichzeitig senden und empfangen. Zwischen jedem Wechsel von Uplink zu Downlink und andersherum, wird ein Guard-Subframe eingefügt, das dem UE die Zeit gibt, zwischen dem Senden und Empfangen umzuschalten [7]. Die Kommunikation wird immer vom Endgerät initiiert, sodass es nicht möglich ist, vom Server oder einer Cloud direkt Kontakt zum Modul aufzunehmen. Nach dem Senden muss im Endgerät immer ein Empfangsfenster geöffnet werden, sodass Daten, z.B. ein Firmenupdate, an das NB-IoT-Endgerät übertragen werden können. Die Basisstation übernimmt die Zuteilung der Empfangsfenster (Polling-Verfahren) [6].

NB-IoT kann in drei Betriebsarten unterschieden werden [8]. Diese sind in der Abbildung 5 dargestellt.

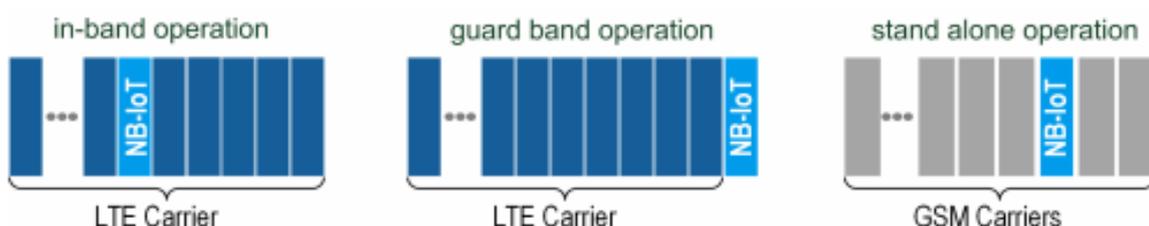


Abbildung 5: Die drei NB-IoT-Betriebsarten

Quelle: [7]

Bei der Betriebsart in-band operation (dt. Inband-Betrieb) wird das Trägersignal in das breitbandige LTE-Signal eingebettet. Dabei ist die reguläre Nutzung eines LTE-Trägers ebenso möglich, da NB-IoT die von LTE nicht verwendeten Frequenzen benutzt. Es wird eine Koexistenz mit dem normalen LTE-Signal gewährleistet.

Bei der guard band operation (dt. Schutzbandbetrieb) werden die Lücken zwischen zwei LTE-Kanälen verwendet. NB-IoT wird dann in den Schutzabstandslücken zwischen LTE-Kanälen betrieben. NB-IoT verwendet dabei die PRBs der Schutzbänder eines LTE-Kanals.

Des Weiteren gibt es die Betriebsart stand alone operation (dt. Alleinstehender-Betrieb). Hierbei kann beispielsweise die Verwendung eines GSM-Kanals ein eigenständiges Netz darstellen. Der 180 kHz breite NB-IoT Kanal passt in die 200 kHz GSM-Kanalbandbreite und bietet auf beiden Seiten 10 kHz Schutzpuffer zu den benachbarten GSM-Kanälen. NB-IoT kann so schrittweise eingeführt werden, wo GSM nicht mehr benötigt wird [7].

2.2.4 Downlink

NB-IoT verwendet wie LTE in Downlink-Richtung OFDMA mit Quadrature Phase Shift Keying Modulation (QPSK, 2 Bits pro Übertragungsschritt). Das beim LTE verwendete Verfahren MIMO kommt bei NB-IoT nicht zum Einsatz [4].

Wie in einem LTE-PRB verwendet NB-IoT zwölf 15 kHz Unterträger, was zu einem Kanal mit einer 180 kHz Bandbreite führt [4]. In der Abbildung 6 wird das erzeugte Gitter dargestellt. Ein Ressourcenelement (RE) ist ein Unterträger in einem OFDM-Symbol. Ein RE wird als ein Quadrat dargestellt.

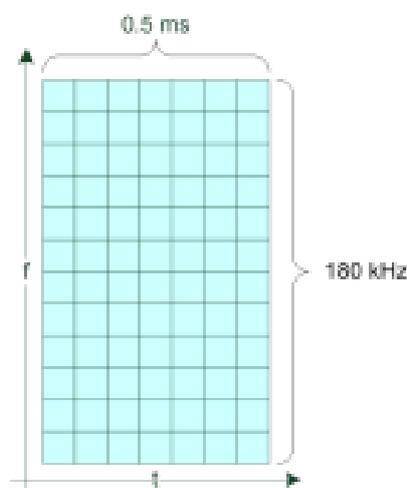


Abbildung 6: Downlink-Gitter: 12 Träger mit einem Abstand von 15

Quelle: [7]

In einem Subframe (SF, dt. Unterrahmen) gibt es zwei Slots. Ein Slot besteht aus sieben OFDM-Symbolen, die in der zeitlichen Ebene 0,5 ms belegen. Ein Radioframe (RF) besteht aus zehn Subframes. Dies ist folgend in der Abbildung 7 dargestellt [7].

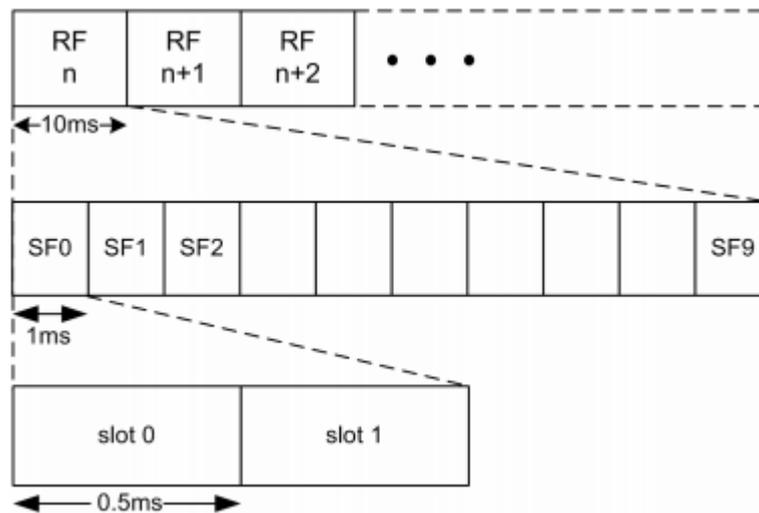


Abbildung 7: Beziehung zwischen Slots, Subframes und Radioframes im Downlink

Quelle: [7]

Pro 1 ms Subframe sind die Daten, die auf allen 12 Subcarrier gesendet werden, für nur ein Endgerät zu empfangen [4].

Die Signale und Kanäle sind bei NB-IoT wie beim LTE benannt und zusätzlich voranstehend mit einem „N“ für NarrowBand versehen.

NB-IoT versorgt das UE im Downlink mit Referenz- und Synchronisationssignalen. Die Synchronisationssignale sorgen dafür, dass das Timing und die Frequenz des UEs stimmen. Dafür verantwortlich sind die Synchronisationssignale NarrowBand Primary Synchronization Signal (NPSS) und das NarrowBand Secondary Synchronization Signal (NSSS) und zusätzlich das Referenzsignal NarrowBand Reference Signal (NRS).

Wie auch bei LTE gibt es bei NB-IoT drei physische Kanäle im Downlink.

Der NarrowBand Physical Broadcast Channel (NPBCH) überträgt in acht 80 ms-Blöcken den NarrowBand Master Information block (dt. Hauptinformationsblock, MIB-NB), der eine zeitliche Länge von 640 ms aufweist.

Für die Übertragung der Benutzerdaten ist der NarrowBand Physical Downlink Shared Channel (NPDSCH) verantwortlich.

Der NarrowBand Physical Downlink Control Channel (NPDCCH) weist dem UE zu, welche Ressource das UE im Uplink verwenden kann und welche Daten im Downlink über den NPDSCH an das UE gerichtet werden [7].

2.2.5 Uplink

Für die Datenübertragung in Uplink Richtung wird wie bei LTE ein 15 kHz Subcarrier Raster und Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA) mit BPSK und QPSK Modulation verwendet [4].

Für die Uplink-Richtung sind im NB-IoT zwei physikalische Kanäle definiert. Der Narrow-Band Physical Uplink Shared Channel (NPUSCH) ist ein schmalbandiger physikalischer Uplink-Kanal. Außerdem ist der NarrowBand Physical Random Access Channel (NPRACH) definiert. Hierbei handelt es sich um einen schmalbandigen physikalischen Direktzugriffskanal.

Der NPUSCH wird verwendet, um die tatsächlichen Daten im Uplink oder um Uplink-Steuerinformationen (UCI) zu transportieren.

Ein Slot besteht aus sieben SC-FDMA-Symbolen [7].

2.2.6 Genutzte Frequenzen

In Deutschland werden für NB-IoT zwei Frequenzbänder genutzt, die in der nachfolgenden Tabelle 1 rot markiert sind.

Tabelle 1: NB-IoT Frequenzbänder

Quelle: [7] und eigene Bearbeitung

Band number	Uplink frequency range / MHz	Downlink frequency range / MHz
1	1920 - 1980	2110 - 2170
2	1850 - 1910	1930 - 1990
3	1710 - 1785	1805 - 1880
5	824 - 849	869 - 894
8	880 - 915	925 - 960
12	699 - 716	729 - 746
13	777 - 787	746 - 756
17	704 - 716	734 - 746
18	815 - 830	860 - 875
19	830 - 845	875 - 890
20	832 - 862	791 - 821
26	814 - 849	859 - 894
28	703 - 748	758 - 803
66	1710 - 1780	2110 - 2200

Vodafone nutzt das Band 20 und die Deutsche Telekom Band 8 und Band 20. Das Band 8 bietet hierbei den Vorteil, dass die Frequenzen höher sind und dadurch die Antenne geringfügig kleiner sein kann. Gerade für kleine IoT-Geräte kann das von Vorteil sein. Band 8 und Band 20 wurden aufgrund ihrer niedrigen Frequenzen ausgewählt. Es ergibt sich eine geringe Gebäudedämpfung. Dadurch ist auch innerhalb von Gebäuden eine Netzwerkverbindung möglich.

Ein einzelnes Frequenzband setzt sich aus vielen kleineren Teilbändern zusammen. Ein Teilband bei NB-IoT ist 200 kHz breit. Bei einer Bandbreite von 35 MHz, wie in Band 8, ergeben sich theoretisch bis zu 175 Teilbänder [6].

2.2.7 HF-Spektrum

Das NB-IoT-Signal im Spektrum wird in der Abbildung 8 dargestellt. Das Signal wurde mit einem Realtime Spektrumanalysator aufgenommen und im Amplitudendichtespektrum dargestellt. In der Aufnahme ist das NB-IoT-Signal von Vodafone im Band 20 anschaulich abgebildet. Durch die eingestellten Marker ist das NB-IoT-Signal mit seiner 180 kHz Bandbreite zu erkennen.

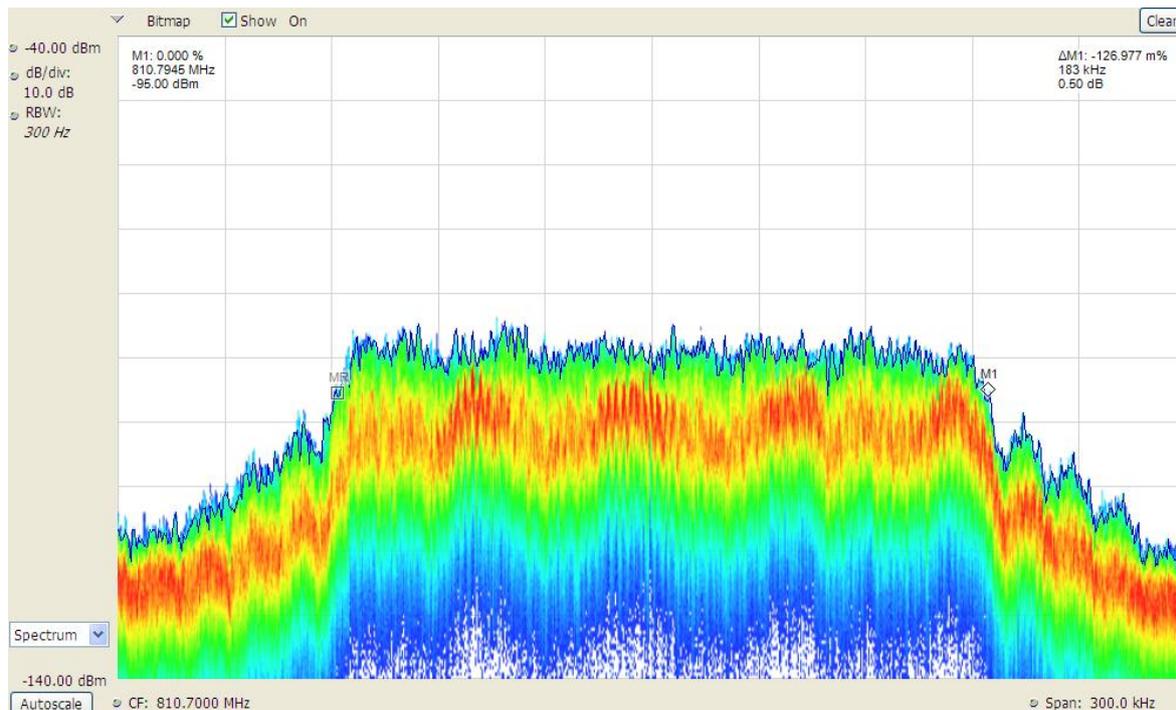


Abbildung 8: NB-IoT-Signal von Vodafone im Spektrum

2.2.8 NB-IoT Stromsparmechanismen

NB-IoT-Module werden im Vergleich zu LTE-Modulen einfacher aufgebaut und es wird auf eine geringe Leistungsaufnahme geachtet, um eine Batterielaufzeit von mehreren Jahren zu gewährleisten [4]. Die Sendeleistung kann bei gutem Empfang reduziert werden, da die NB-IoT Funkmodule die Sendeleistung adaptiv an die Empfangsfeldstärke anpassen können [6]. Um eine Batterielaufzeit von 10 Jahren zu erreichen, wurden unterschiedliche Aktivitätszustände erstellt. Kommuniziert das Modul nicht, so befindet es sich im ‚Idle‘-Zustand (dt. Leerlauf). Hier wird ein Energieverbrauch von 0,015 mW angenommen. In diesem Zustand könnte ein Gerät 38 Jahre lang, durch eine 5 Wh Batterie, mit Energie versorgt werden. Bei der Datenübertragung wird von einem Stromverbrauch von 500 mW ausgegangen. Bei dauerhaften Übertragungen wäre die 5 Wh Batterie nach 10 Stunden entladen. Die Selbstentladungsrate der Batterie wurde nicht berücksichtigt [8].

Nachdem eine Anmeldung eines NB-IoT-Moduls an einer Basisstation einmal durchgeführt wurde, bleibt das Modul bis zu einer Woche lang an der Basisstation registriert, damit der Energieverbrauch für einen erneuten Anmeldeprozess eingespart werden kann. Dabei befindet sich das Funkmodul im Power Saving Mode (PSM). Das Gerät erwacht in festgelegten Zeitabständen aus dem Tiefschlaf und sendet Daten in das Netz. Anschließend kann es Daten empfangen. Ist die Datenübertragung abgeschlossen, geht das Gerät wieder in den Tiefschlaf

über. Durch die Registrierung über einen längeren Zeitraum ist kein erneuter Anmeldeprozess nötig, wenn das Gerät wieder aus dem Tiefschlaf zurückkehrt. Bei einem Übergang von einer Mobilfunkzelle in eine andere Zelle, muss ein NB-IoT Moduls immer eine Neuansmeldung im Mobilfunknetz durchführen [6].

2.2.9 Reichweite

Mit dem LTE-Frequenzbandband 20 im 800 MHz Bereich ist eine große Reichweite möglich, außerdem weist dieses Band von den vorhandenen LTE-Bändern die geringsten Dämpfungseigenschaften auf, was eine hohe Versorgung innerhalb von Gebäuden ermöglicht [4]. NB-IoT verwendet die robuste Modulationsart QPSK und erhöht die Redundanz, um die Reichweite bei kleinem Signalpegel zu verbessern. Bei der QPSK werden vier Phasenlagen (0° , 90° , 180° , 270°) umgetastet. NarrowBand IoT hat eine robustere Übertragung mit einer größeren Reichweite als LTE, so kann eine größere Netzabdeckung erzielt werden. Damit können auch entlegene Orte und durch die hohe Gebäudedurchdringlichkeit Keller und Tiefgaragen versorgt werden. Verglichen mit 2G erreicht NB-IoT in Gebäuden eine um bis zu 20 dB bessere Abdeckung [4].

2.2.10 Signalparameter

Bei den in Kapitel 4 beschriebenen Messungen wurden verschiedene Signalparameter aufgenommen. Es wurden vier Leistungsgrößen mit den Messgeräten aufgezeichnet, um sie nachfolgend beurteilen zu können.

- RSSI
- RSRP
- RSRQ
- SINR

Diese vier Leistungsgrößen werden nachfolgend erläutert, damit sie bei den durchgeführten Messungen nachvollzogen werden können.

Received Signal Strength Indicator (RSSI)

Der Received Signal Strength Indicator (RSSI, dt. Empfangene Signalstärkeindikator) ist ein Indikator für die empfangene Signalstärke und wird in der Einheit dBm angegeben. Der RSSI gibt den linearen Durchschnitt der gesamten Empfangsleistung an. Darunter fallen Quellen wie Nachbarkanalstörungen und Rauschen. Es werden bei der Messung des RSSIs nur die

OFDM-Symbole betrachtet, deren Träger innerhalb des genutzten Frequenzbereichs liegen. Der Antennenanschluss des UEs gilt als Referenzpunkt für das RSSI [9].

Reference Signal Received Power (RSRP)

Die Reference Signal Received Power (RSRP, dt. Empfangene Leistung des Referenzsignals) ist der lineare Durchschnitt über die Leistungsbeträge der Ressourcenelemente und wird in der Einheit dBm angegeben. RSRP bezieht sich auf ein einzelnes RE, die mittlere Leistung aller RS wird durch die Anzahl der RS geteilt. Die REs innerhalb der genutzten Messfrequenzbandbreite werden miteinbezogen. Mit Hilfe der RSRP wird von dem UE entschieden, mit welcher Basisstation eine Verbindung hergestellt werden soll. Außerdem wird anhand des RSRPs die Wahl getroffen, welche CE-Stufe für die Datenübertragung verwendet wird. Der Referenzpunkt für die RSRP ist der Antennenanschluss des UE [9].

Reference Signal Received Quality (RSRQ)

Die Reference Signal Received Quality (RSRQ, dt. Empfangsqualität des Referenzsignals) ist der lineare Durchschnitt der gesamten empfangenen Leistung in dB. N ist die Anzahl der PRBs der Messbandbreite definiert. Wobei die im Zähler und Nenner erfolgten Messungen über dieselbe Anzahl N von PRBs erfolgt.

$$RSRQ = N \cdot \frac{RSRP}{RSSI} [dB] \quad (1)$$

Die RSRQ ist ein Indikator für die Empfangsqualität. Je kleiner die Differenz zwischen RSRP und RSSI ist, desto besser ist die Empfangsqualität. Der Bezugspunkt für die RSRQ ist der Antennenanschluss des UE [9].

Signal-to-interference-plus-noise-ratio (SINR)

Mit dem signal-to-interference-plus-noise-ratio (SINR, dt. Signal-zu-Interferenz-plus-Rausch-Verhältnis), das in dB angegeben wird, kann eine Beurteilung der Empfangsqualität abgegeben werden. Das SINR beschreibt den linearen Leistungsbetrag der Ressourcenelemente geteilt durch den linearen Durchschnitt des Rauschens und Interferenzleistungsbetrags über die Ressourcenelemente innerhalb derselben Frequenzbandbreite. Es handelt sich bei dem SINR um das Verhältnis aus den Leistungen des Nutzsignals S zur Interferenz I und dem Rauschen N.

$$SINR = \frac{S}{I + N} [dB] \quad (2)$$

Aus der Formel (2) ist ersichtlich, je größer die Störungen sind, desto kleiner fällt das SINR aus und dadurch sinkt die Empfangsqualität. Sind die Störungen jedoch klein und das Empfangssignal ist groß, so kommt es zu einem hohen Wert des SINRs und die Empfangsqualität ist besser. Der Bezugspunkt für das SINR ist der Antennenanschluss des UE [9].

Zusätzlich zu den vier Leistungsgrößen wurden weitere Signalparameter detektiert, die für eine korrekte Durchführung und Beurteilung der Messungen erforderlich war.

- CE-Level
- PCI
- Ping replies
- RTT

Diese Signalparameter werden nachfolgend aufgeführt und erläutert.

CE-Level

Um sich den unterschiedlichen Funkbedingungen anzupassen, wird im NB-IoT ein CE-Level (Coverage Enhancement, dt. Verbesserung der Abdeckung) verwendet. Dabei wird in 3 CE-Stufen unterschieden. Es gibt den CE-Level 0, CE-Level 1 und CE-Level 2. Für die normale Abdeckung steht der CE-Level 0 und der CE-Level 2 steht für eine schlechte Abdeckung. Durch die CE-Stufen wird festgelegt, wie oft eine Nachricht wiederholt gesendet werden muss. Durch eine höhere CE-Stufung und damit eine höhere Anzahl an Wiederholungen, nimmt der Energiebedarf zu und die Akkulaufzeit verringert sich. Da sich NB-IoT durch lange Betriebszeiten auszeichnet, ist die CE-Stufung 0 immer wünschenswert, da sich der Wartungsaufwand und damit auch die Kosten gering halten. Das Endgerät entscheidet anhand der vom Netzwerk übermittelten Werte für die RSRP, welcher CE-Level verwendet wird [10].

Physical Cell Identity (PCI)

Bei mehreren Basisstationen kommt es vor, dass sich deren Aussendungsgebiete überlappen. Damit ein UE, eine benachbarte Zellen eindeutig identifizieren und voneinander unterscheiden kann, wird jeder Zelle eine physical cell identity (PCI, dt. physikalische Zellenidentität) zugeordnet. Im gesamten Netzwerk gibt es nur eine endliche Anzahl von IDs, sodass die IDs bei der Zuordnung der eNodeBs mehrfach verwendet werden. Die PCI dient dem UE die Frequenz- und Zeitsynchronisation während der Zellsuchphase zu erlangen. Die PCI zeigt dem UE die primären und sekundären Synchronisationssignale an. Mit der Hilfe der Netzwerkpa-

parameter und Datenbanken im Internet, ist es möglich das Gebiet bis auf wenige Kilometer genau zu bestimmen, in dem sich der UE aufhält [11].

Ping und RTT

Zum Testen der Netzwerkverbindung ist es möglich einen Ping-Test durchzuführen. Dabei sendet das NB-Funkmodul vier Pings an einen Server über eine vorkonfigurierte IP-Adresse. Die vom NB-Funkmodul gesendeten Pings werden wiederum vom Server an das Funkmodul zurückgesendet. Das Funkmodul wertet die Anzahl der erhaltenen und verlorenen Pings aus. Bei dem Ping-Test wird die durchschnittliche Round Trip Time (avg. RTT) gemessen. Die RTT ist die Zeit, die der Ping vom NB-Funkmodul zum Server und wieder zurück zum NB-Funkmodul benötigt. Über die Anzahl der erhaltenen und verlorenen Pings und über die Latenz, die über die RTT abgeschätzt werden kann, kann eine Einschätzung der bestehenden Netzwerkverbindung abgegeben werden.

3 Messungen

Dieses Kapitel befasst sich mit der Messung des NarrowBand-IoT. Die Messung wurde mit einem NB-IoT-Messmodul durchgeführt. Es wurde eine Vergleichsmessung mit der momentan vorhandenen HF-Messtechnik der BNetzA angefertigt.

3.1 Einleitung

Das Ziel der Messungen war, das NB-IoT-Signal mit einem NB-IoT-Messmodul zu detektieren und mit den aktuell bestehenden Messmethoden des PMDs der BNetzA zu vergleichen, um den Pfadverlust in Gebäuden zu ermitteln. Es galt herauszufinden, ob die aktuell bestehende HF-Messtechnik der BNetzA ausreicht, um eine NB-IoT-Störungsbearbeitung korrekt durchzuführen.

Die Messungen erfolgten in der Dienststelle der BNetzA in Hannover im Mai 2021.

3.2 Messaufbau und Methodik

Für die Datenerfassung wurden zwei Messgeräte gleichzeitig eingesetzt. Dabei handelte es sich zum einen um ein NB-IoT-Messmodul und zum anderen kam ein Smartphone der BNetzA von Samsung zum Einsatz. Bei dem Samsung-Gerät handelte sich um ein handelsübliches Smartphone, das mit der NEMO-Software von Keysight zum Messen erweitert wurde. Es wird nachfolgend als NEMO-Handy bezeichnet. Die Messgeräte sind in der Abbildung 9 dargestellt, dabei ist das NB-IoT-Messmodul vorne zu sehen und das NEMO-Handy dahinter.

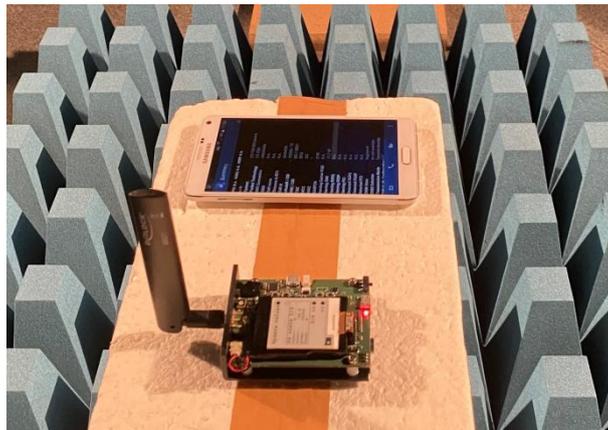


Abbildung 9: Messgeräte für die Vergleichsmessung

Das NB-IoT-Modul verbindet sich dabei über das NarrowBand-IoT mit der Mobilfunkzelle und das NEMO-Handy verwendet dafür das LTE-Signal. Beide Messgeräte müssen bei den

Messungen mit derselben Mobilfunkzelle verbunden sein, um ein gültiges Messergebnis zu erzielen. Die Messungen wurden mit dem NB-IoT-Modul, dem NEMO-Handy und einem FSP Sweepinganalyzer in der Dienststelle der BNetzA Hannover im inneren Bereich des Gebäudes durchgeführt. Im Untergeschoss des Dienstgebäudes konnten in einem Kellerraum, in der sich auch die Schirmkabine befand, die Messungen durchgeführt werden. Durch drei verschiedene Öffnungszustände der Schirmkabinentür, konnte die Empfangsqualität variiert werden. Dadurch war es möglich, eine schlechte Mobilfunkverbindung, beispielsweise in einer Tiefgarage eines Parkhauses oder einem Heizungsraum, zu simulieren. Mit dem Realtime Spektrumanalysator (RSA) wurde im Außenbereich des Erdgeschosses vor dem Gebäude gemessen.

Der schematische Gebäudeaufbau ist in Abbildung 10 dargestellt.

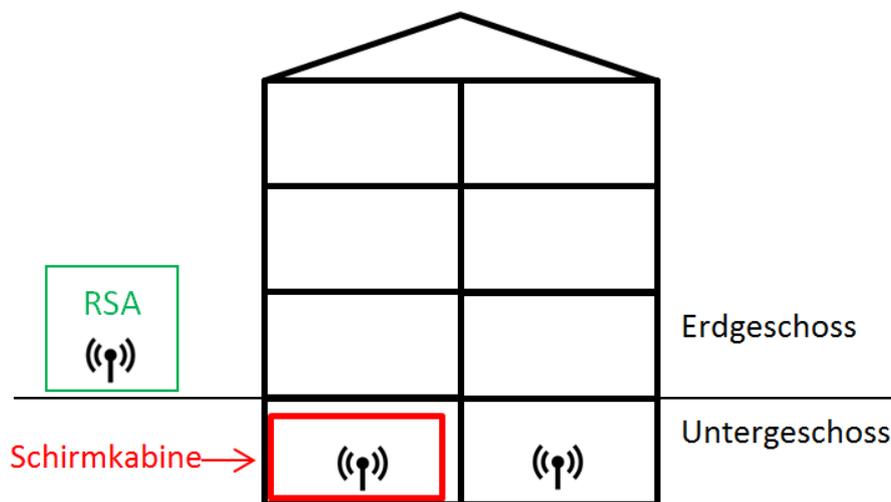


Abbildung 10: Messpunkte im Gebäude

Bei den Messungen sind die Messgeräte und Antennen, die in der Tabelle 2 aufgeführt sind, zum Einsatz gekommen.

Tabelle 2: Verwendete Geräte und Antennen

<u>Verwendete Geräte/Antennen</u>	<u>Hersteller/Typ/Bezeichnung</u>
Stabantenne	
Logper-Antenne (5 dBi Gewinn)	Schwarzbeck VUSLP
NB-IoT-Messmodul	NB-DESK77 von exelonix
LTE-Messgerät	Samsung-Smartphone mit NEMO-Software von Keysight
Spektrumanalysator	Rohde & Schwarz FSP 30
Realtime Spektrumanalysator	RSA6114A

Für die Messungen wurden die in der Tabelle 3 aufgelisteten Signalparameter aufgenommen. Anhand der erzielten Messergebnisse kann abschließend eine Bewertung der HF-Messgeräte erfolgen.

Tabelle 3: Gemessene Signalparameter

<u>Signalparameter</u>	<u>Beschreibung</u>
PCI	Physical Cell ID
RSRP	Referenz Signal Received Power (Referenzsignal Empfangsleistung) in dBm
RSRQ	Reference Signal Received Quality (Empfangene Qualität des Referenzsignals) in dB
RSSI	Receive Signal Strength Indicator (Empfangssignalstärkeanzeige) in dBm
SINR	Signal-To-Noise ratio (Signal-Rausch-Verhältnis) in dB
CE-Level	Coverage Extension
Ping replies	Empfangene Ping-Pakete / gesendeten Ping-Paketen
RTT	Round Trip Time (Paketumlaufzeit)

3.3 Mobilfunknetzabdeckung

Zu Beginn des Messversuchs wurde die Mobilfunknetzabdeckung getestet. Dafür wurde ermittelt, welche Frequenzbänder zur Verfügung stehen. Die Überprüfung wurde mit dem NB-DESK77 durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Mobilfunknetzabdeckung

PLMN	RAT	Vodafone	Telekom/1NCE
VFLPWA20	NB-IoT	Ja	X
	Cat.M1	Ja	X
VFLPWA08	NB-IoT	X	X
	Cat.M1	X	X
1NCE 20	NB-IoT	X	X
	Cat.M1	X	Ja
1NCE 08	NB-IoT	X	Ja
	Cat.M1	X	X

Mit der SIM-Karte von Vodafone ließ sich im Band 20 eine Netzwerkverbindung über NB-IoT und für Cat.M1 aufbauen. Eine Verbindung mit der SIM-Karte von 1NCE, die das Netz der Deutschen Telekom verwendet, ließ sich im Band 20 mit dem Cat.M1 und im Band 8 mit NB-IoT herstellen.

3.4 Die verwendeten Messgeräte

Im nachfolgenden Kapitel wird ein Überblick über die, bei der Messung verwendeten, Geräten gegeben.

3.4.1 Messungen mit dem DESK77

Bei dem NB-IoT-Messmodul handelt es sich um den NB-DESK77 Rev.1.0 von dem Hersteller exelonix (Abbildung 11). Der NB-DESK77 dient zum Senden und Empfangen von NB-IoT-Daten. Dabei steuert ein STM32-Microcontroller das gesamte Board. Bei dem NB-IoT-Modem handelt es sich um ein Quectel BG-77-Modem. Über einen SMA-Stecker ist eine Antenne mit dem Modul verbunden. Mit einem ePaper-Display und 4 Tasten wird das Modul bedient. Ein LiPo-Akku wird zur Energieversorgung des Gerätes verwendet.

Über die Public Land Mobile Network-Kennung (PLMN) wird der Netzbetreiber dem Gerät hinzugefügt. Hinter der PLMN-Kennung steckt der Access Point Name (APN), der den Zugriff zum gewollten Netzwerk ermöglicht. Über die Radio Access Technology (RAT) kann

die Zugriffsnetzwerktechnik ausgewählt werden. Bei dem verwendeten NB-DESK77 kann die RAT auf NB-IoT oder Cat.M1 eingestellt werden.

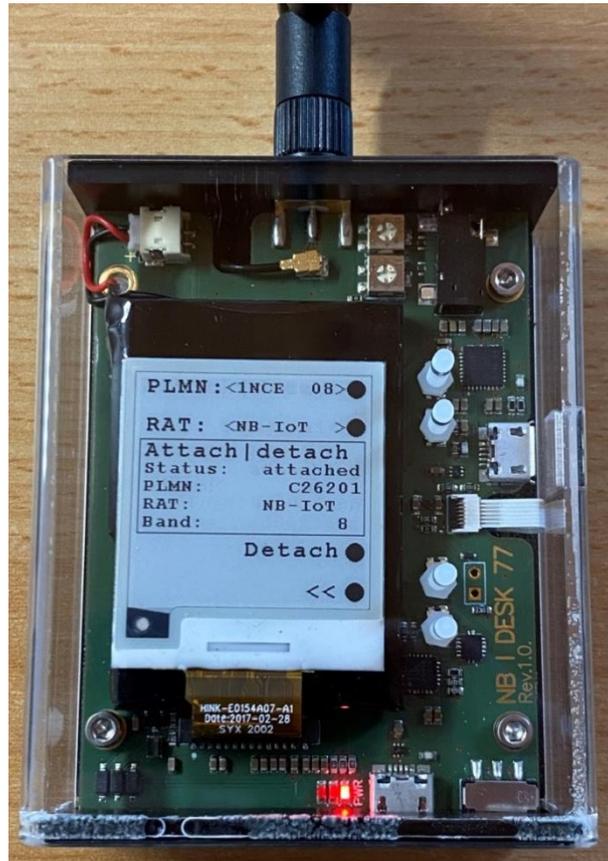


Abbildung 11: NB-DESK77

In der Abbildung 12 wird die NB-DESK77-Architektur des Verbindungsablaufs dargestellt.

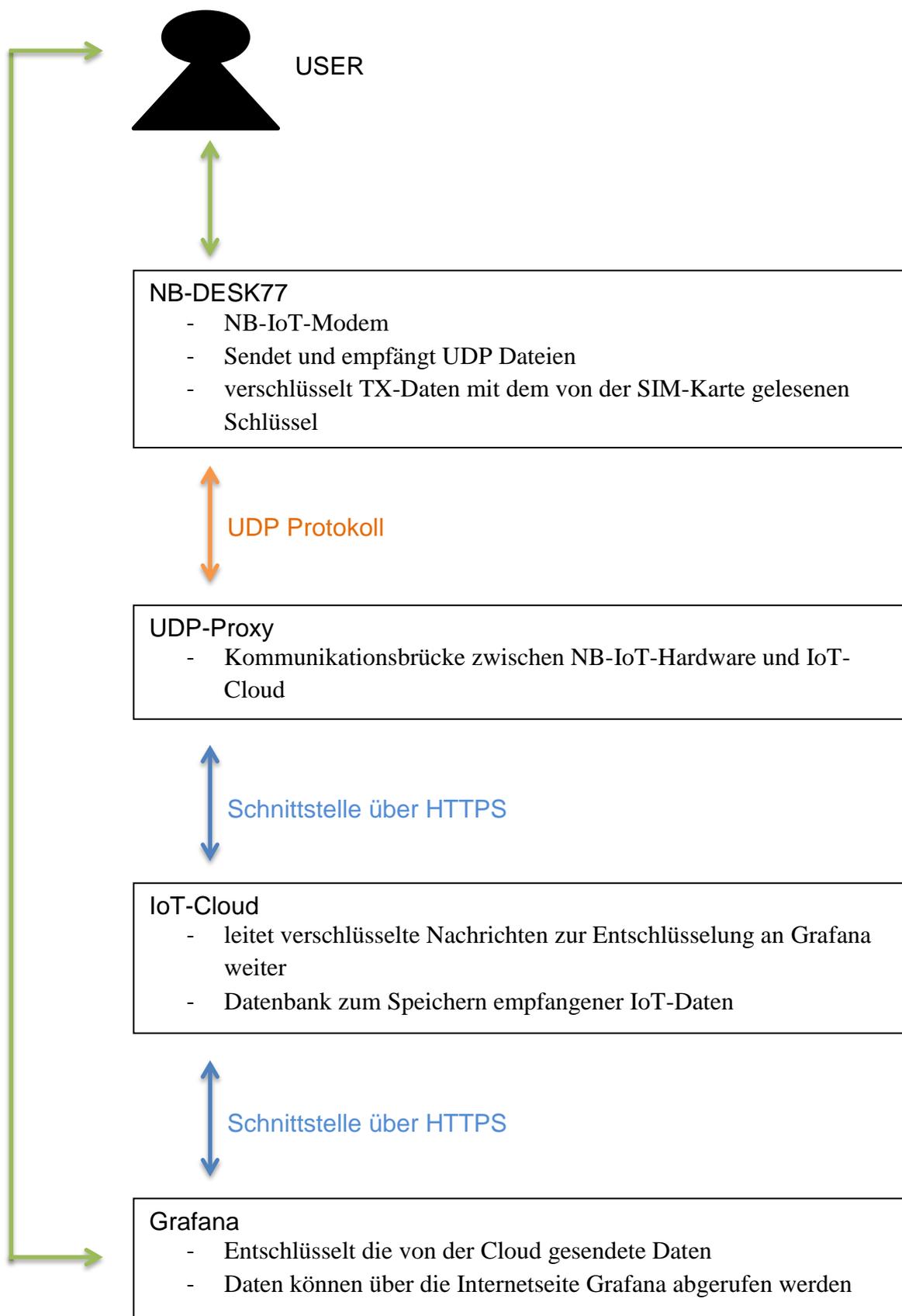


Abbildung 12: Die Architektur des Verbindungsablaufs

Quelle: [12] und eigene Bearbeitung

Das NB-IoT-Modem wird für die Verbindung zum NB-IoT-Netzwerk verwendet. Außerdem ist es für das Senden und Empfangen der Daten verantwortlich. Wenn Zellen-Informationen an die Daten angehängt sind, ist das Modem in der Lage diese auszulesen. Mit einem Test-Transmit lassen sich die TX-Daten übertragen.

Die vom NB-DESK77 gesendeten Daten werden via UDP-Protokoll (User Datagram Protocol) an einen UDP-Proxy gesendet. Der Proxy dient als Kommunikationsbrücke zwischen dem NB-DESK77 und einer IoT-Cloud. Der Proxy wird benötigt, da die IoT-Cloud die UDP-Daten nicht verarbeiten kann. Der Proxy konvertiert die UDP-Daten in das Datenformat JavaScript Object Notation, das die Cloud unterstützt und überträgt die Daten über das Protokoll HTTPS an die IoT-Cloud.

Die übertragenden Daten werden in einer IoT-Cloud gespeichert. Die Cloud dient als Datenbank, in der die Daten durch die eindeutige Geräte-ID strukturiert gespeichert werden. Die Cloud übernimmt die Aufgaben der Speicherung, Verwaltung und Bereitstellung der IoT-Daten.

Bei der Ausführung des Pings, der bei den Messungen durchgeführt wird, wurde die IP-Adresse: 173.212.192.245 aufgerufen.

In der Durchführung gab es beim Verbindungsaufbau lange Zeit Probleme. Der NB-DESK77 zeigte unter dem Menüpunkt Attached/Detached zwar an, dass es für den PLMN der Telekom und auch für Vodafone einige APN gab, jedoch ließ sich keine Verbindung aufbauen. Unter dem PLMN konnte man für Vodafone „VF Live 1“, „VF Live 2“ und „VF Test“ auswählen. Für Telekom stand „Tele.DE“ und „Tele.PL“ zur Auswahl.

Es wurde an verschiedenen Standorten versucht eine Mobilfunkverbindung herzustellen, um ein mögliches Funkloch zu umgehen. Es konnten damit aber keine Erfolge erzielt werden. Anschließend wurde mit dem FSP kontrolliert, ob die NB-IoT-Signale verfügbar waren. Die Aussendung der NB-IoT-Träger der Deutschen Telekom konnte in Band 8 und von Vodafone in Band 20 bestätigt werden.

Wie sich nach längerer Rechercharbeit herausstellte, waren die vorkonfigurierten PLMN nicht mit dem richtigen APN versehen, die für die beiden SIM-Karten nötig waren.

Über den NB-DESK77 können keine Eingaben vorgenommen werden. Es wurde versucht über die Terminalprogramme „PUTTY“ und „m-center“ mit AT-Befehlen das BG77-LPWA-Modul von Quectel direkt anzusprechen und den PLMN zu ändern und einen neuen APN

hinzuzufügen. Dies Unternehmung gelang nicht und es ließ sich auch weiterhin keine Verbindung zum Mobilfunknetz aufbauen.

Nach der Kommunikation mit dem Hardwarehersteller konnte in dem Python-Script der PLMN hinzugefügt und der APN konfiguriert werden. Für Vodafone wurden die PLMN „VFLPWA20“ und „VFLPWA08“ hinzugefügt. Hierfür wurde der APN „lpwa.vodafone.com“ konfiguriert. Für die Telekom Mobilfunkverbindung wurden „1NCE20“ und „1NCE08“ mit dem APN „iot.1nce.net“ in die Liste aufgenommen. Die Zahlen 20 und 08 in den PLMN-Namen stehen für das Band 20 und das Band 8, um die Auswahl bei den Messungen mit dem NB-DESK77 zu erleichtern.

Nachdem es gelungen war die Einstellungen vorzunehmen, war eine Mobilfunkverbindung mit dem NB-DESK77 in das Mobilfunknetz der Deutschen Telekom und von Vodafone möglich. Es ist zu erwähnen, dass es nur einen SIM-Karten-Slot in dem Modul gibt. Beim Bedarf das andere Mobilfunknetz zu verwenden, muss immer die aktuelle SIM-Karte entfernt und die Karte des gewollten Mobilfunkbetreibers eingelegt werden. Anschließend muss für den erfolgreichen Verbindungsaufbau der PLMN richtig eingestellt werden.

3.4.2 Messung mit dem NEMO Handy

Das NEMO-Handy ist ein handelsübliches Smartphone des Herstellers Samsung. Das Samsung-Gerät wurde mit einer Software erweitert, die das Messen der Signalparameter ermöglicht. Bei der Software handelt es sich um die NEMO-Software von Keysight. Die verwendete Software bietet noch keine IoT-Option.

Ein Standard Smartphone verbindet sich mit dem Signal der für sie besten Mobilfunkzelle. Mit einem NEMO-Handy kann man die Zugriffsoptionen individuell einstellen und eine gewollte Datenverbindung aufbauen. Dabei kann die maximale Leistung der Mobilfunkzelle bezogen werden. Mit dem NEMO-Handy der BNetzA kann man aus unterschiedlichen Mobilfunktechnologien (LTE, GSM, UMTS), Mobilfunkbändern und den zur Verfügung stehenden Funkzellen auswählen und dann genau auf die gewünschte Verbindung forcieren. Über die gewählte Verbindung lassen sich dabei verschiedene Signalparameter auslesen.

3.4.3 Messungen mit dem FSP Spektrumanalysator

Bei den Messungen kam der FSP 30 Spectrumanalyzer 9kHz...30GHz von Rohde & Schwarz zum Einsatz. Bei diesem Gerät handelt es sich um einen Sweepinganalyzer.

3.4.4 Messungen mit dem Realtime Spektrumanalysator

Bei den Messungen wurde ein RSA6114A (RSA) verwendet. Der RSA ist ein Realtime Spektrumanalysator. Er erfasst Signale breitbandig innerhalb einer wählbaren Akquisitionszeit und stellt sie unter anderem im Amplitudendichtespektrum dar. Dabei wird aus IQ-Daten das Spektrum über die Fourier-Transformation errechnet. Im Amplitudendichtespektrum werden viele Spektren hintereinander ausgerechnet. Die Amplitudenhöhe wird dabei gemessen und kann als Amplitudenwahrscheinlichkeit dargestellt werden. Dies ist zum besseren Verständnis beispielhaft in Abbildung 13 dargestellt. Rot bedeutet dabei, dass die Wahrscheinlichkeit hoch ist und die Farbe blau steht für unwahrscheinliche oder seltene Amplituden.

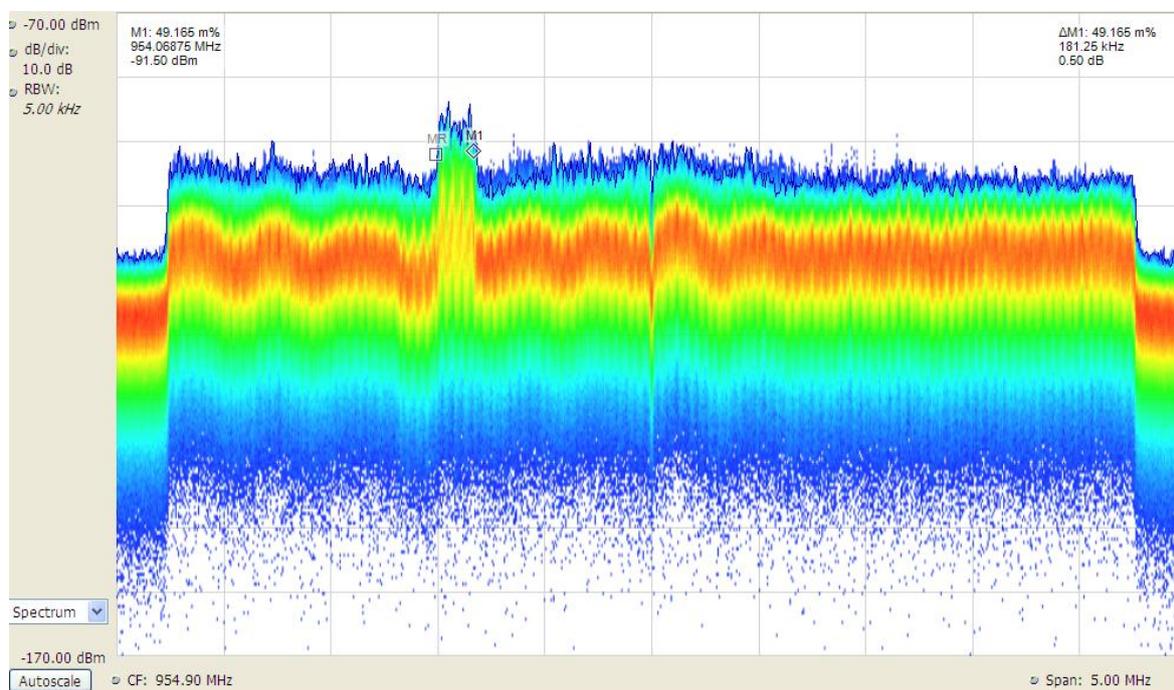


Abbildung 13: Amplitudendichtespektrum mit dem RSA

Eine andere Darstellungsart beim RSA ist das Spektrogramm. In einem Spektrogramm wird die Leistung über die Frequenz (X-Achse) und der Zeit (Y-Achse) dargestellt. Dabei läuft die Zeit mit und die Spektren werden hintereinander abgebildet. Das Spektrogramm des RSA ist beispielhaft in Abbildung 14 dargestellt. Durch die Farbverteilung kann hierbei die Amplitudenhöhe bestimmt werden. Rot steht dabei für einen großen Pegel und blau für einen geringen Pegel. Die Farbe schwarz sagt aus, dass kein Pegel vorhanden ist. Durch das Spektrogramm ist es möglich einzelne Kanäle und Aussendungen zu detektieren.

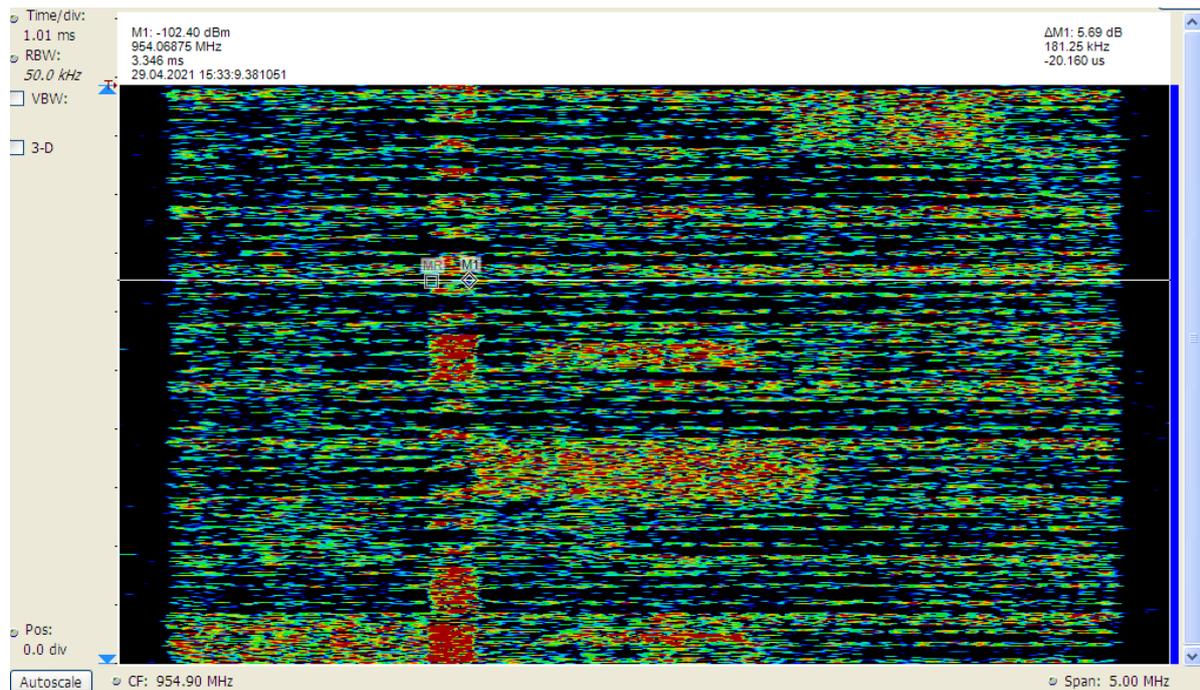


Abbildung 14: Spektrogramm mit dem RSA

Die Messungen mit dem RSA wurden im Erdgeschoss außerhalb des Dienstgebäudes der BNetzA Hannover aufgezeichnet.

3.5 Durchführung der Messungen

In diesem Kapitel wird die Durchführung der Messungen beschrieben. Vor den eigentlichen Vergleichsmessungen zwischen dem NB-DESK77 und dem NEMO-Handy, wurden Messungen mit dem RSA durchgeführt. Bei den Messungen mit dem RSA soll erst ein Überblick über die Signalstruktur der Netzbetreiber von NB-IoT gegeben werden. Anschließend wird auf die Messungen im Untergeschoss eingegangen. Danach werden die Messungen in der Schirmkabine mit den verschiedenen Öffnungswinkeln der Tür aufgezeigt.

3.5.1 Messungen mit dem Realtime Spektrumanalysator

In der Abbildung 15 ist das Amplitude-Dichte-Spektrum des LTE900 der Deutschen Telekom zu sehen, das mit dem RSA detektiert wurde. Die Mittenfrequenz ist auf 954 MHz eingestellt und der Span beträgt 5 MHz, damit der komplette LTE-Kanal ausreichend betrachtet werden kann. Aus dem 5 MHz breiten LTE-Block sieht man das 180 kHz breite NB-IoT-Signal herausragen. Es ist zu erkennen, dass die Deutsche Telekom den Inband-Betrieb verwendet. Der NB-IoT-Träger wurde so in das breitbandige LTE-Signal eingebettet, dass weiterhin eine Nutzung des LTE-Trägers möglich ist. In dem Amplitude-Dichte-Spektrum wird die

Amplitudenwahrscheinlichkeit dargestellt. Die Farbe rot steht dabei für eine hohe Wahrscheinlichkeit und blau für eine seltene oder geringe Wahrscheinlichkeit. Über die Dichteverteilung lässt sich das Spektrum gut analysieren.

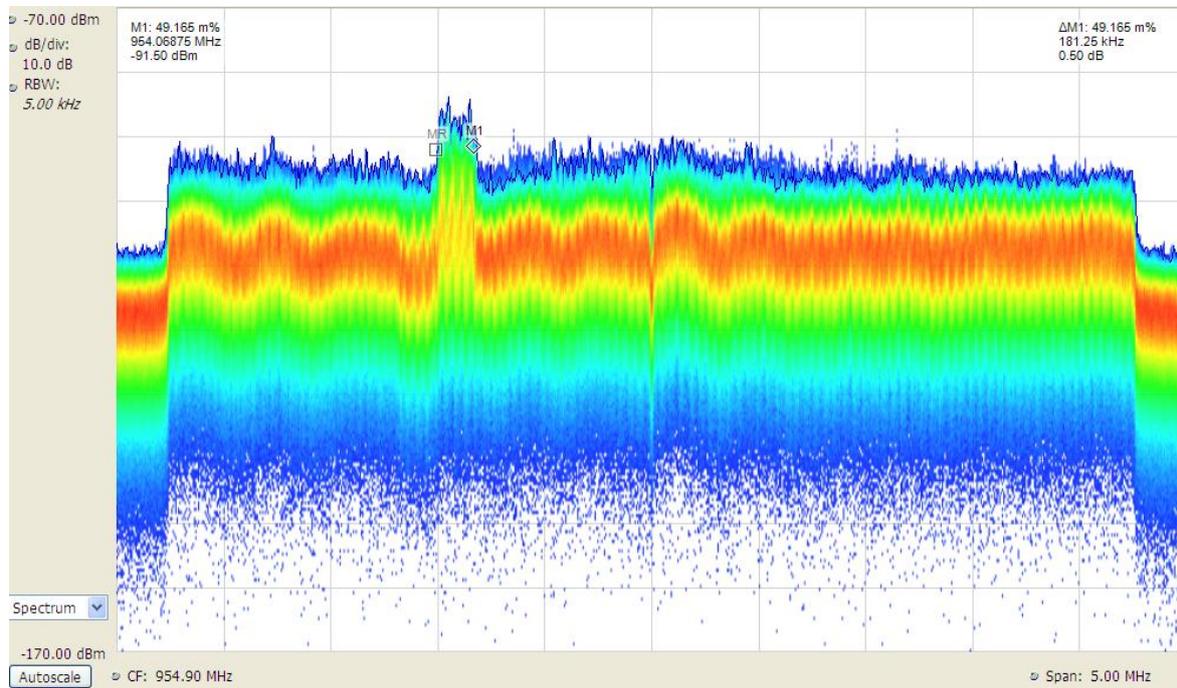


Abbildung 15: LTE-Kanal der Telekom im Spektrum

Die Aufnahme in Abbildung 16 mit dem RSA zeigt noch einmal das Spektrum der Deutschen Telekom im LTE900, jedoch wird hier ein Spektrogramm dargestellt. Es ist wieder der 5 MHz breite LTE-Kanal zu sehen. Die eingestellten Marker zeigen das 180 kHz breite NB-IoT-Signal. Das NB-IoT-Signal ist durch die höhere Amplitude, im Vergleich zum LTE-Signal, gut in roter Farbe zu erkennen. Rot bedeutet in dem Spektrogramm, dass ein großer Pegel vorliegt, blau steht für wenig Pegel und bei schwarz liegt gar kein Pegel vor.

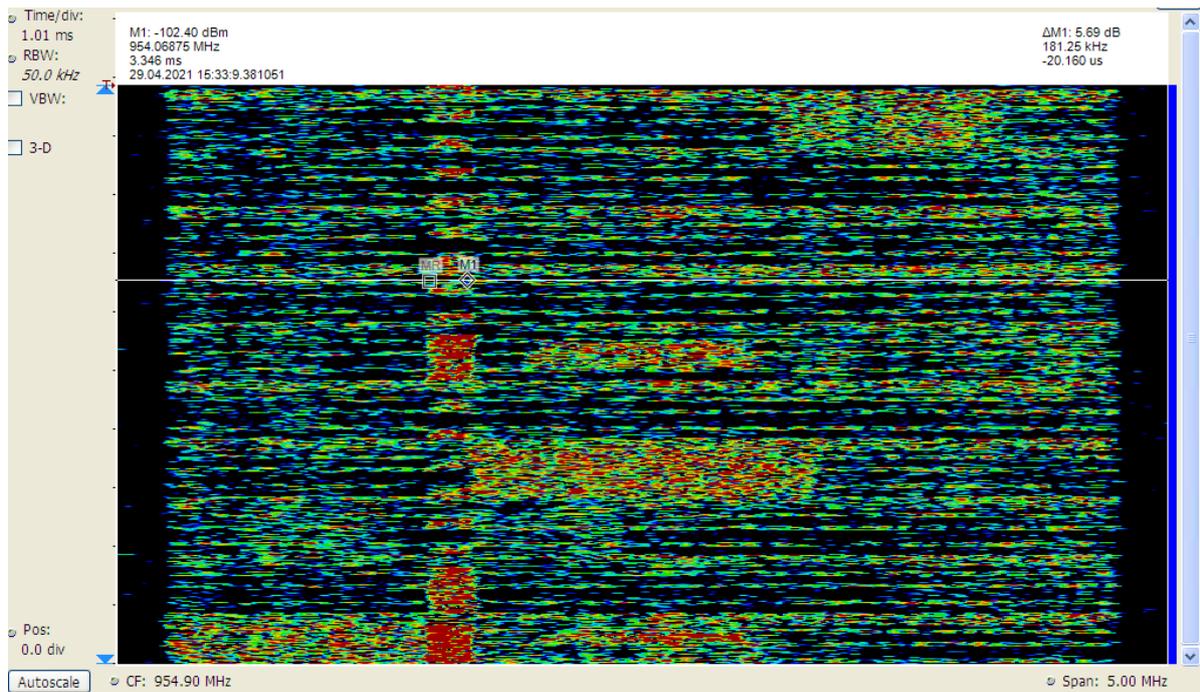


Abbildung 16: LTE-Kanal der Telekom im Spektrogramm

In Abbildung 17 ist das LTE900 der Deutschen Telekom im Spektrogramm dargestellt. Hierbei sind die Marker so eingestellt, dass ein halber Radioframe abgebildet ist. Wie schon in den Grundlagen des NB-IoT-Signals erwähnt wurde, besitzt der Radioframe eine zeitliche Länge von 10 ms.

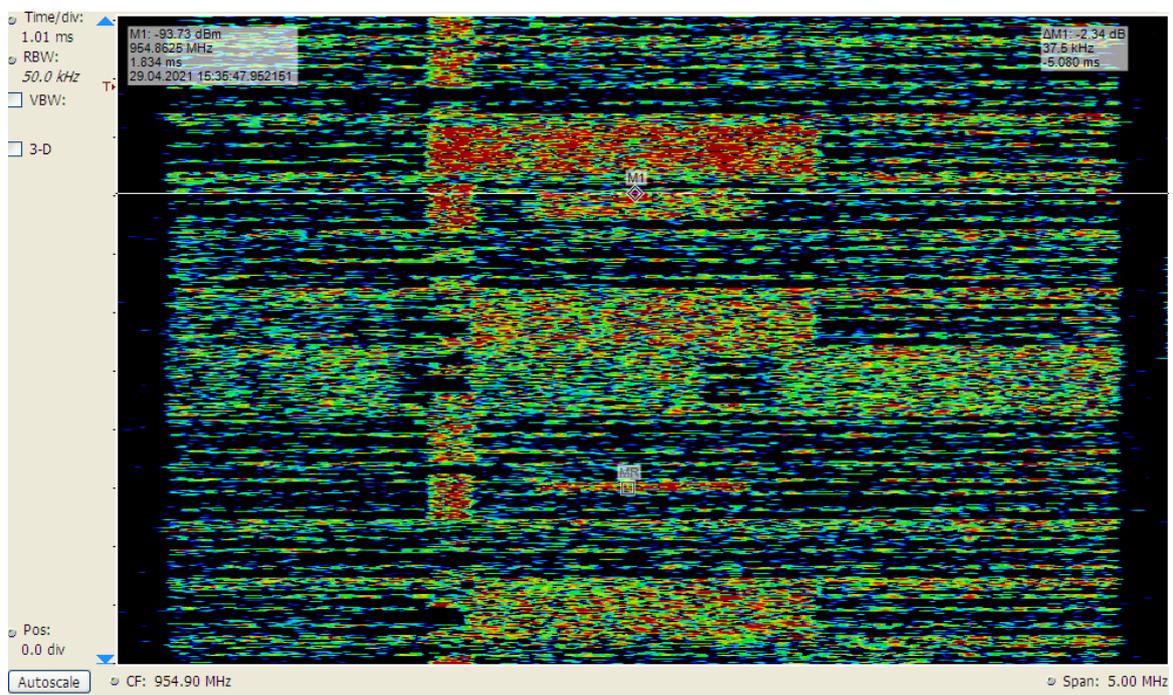


Abbildung 17: Halber Radioframe im LTE-Kanal der Telekom im Spektrogramm

Das Spektrum in der Abbildung 18 zeigt das NB-IoT-Signal im LTE900 der Deutschen Telekom mit einem Span von 300 kHz, damit der NB-IoT gut mit dem RSA betrachtet werden kann. Durch die eingestellten Marker ist das 180 kHz breite Signal zu erkennen.

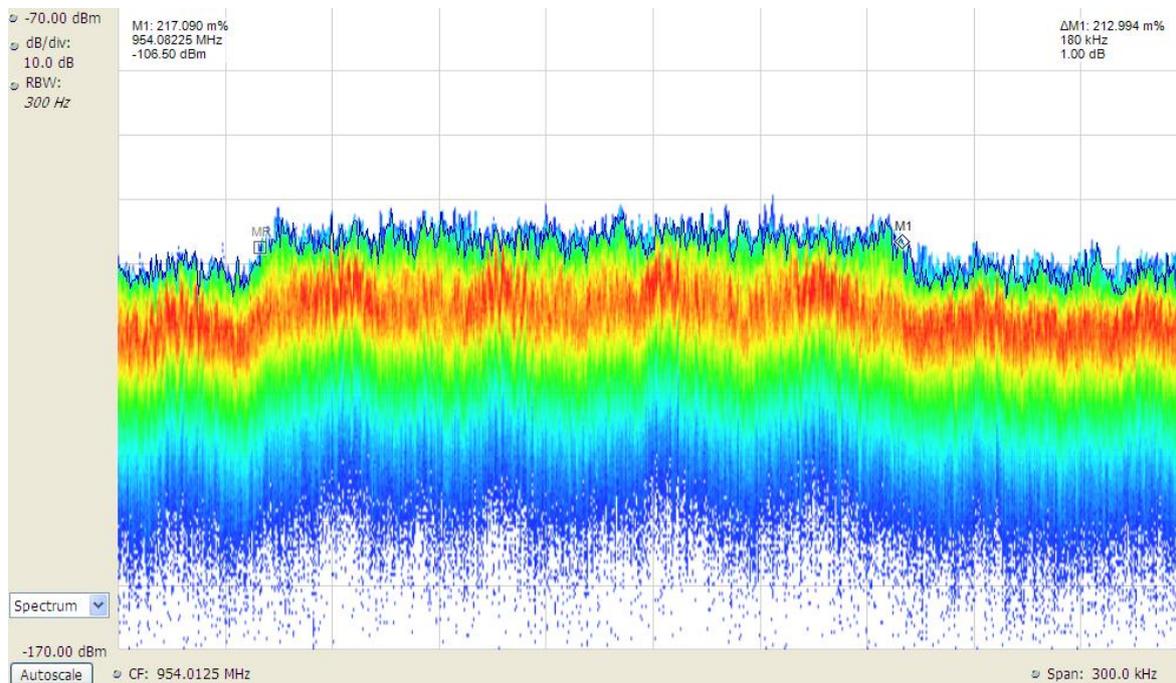


Abbildung 18: NB-IoT-Träger der Telekom im Spektrum

In der Abbildung 19 ist nochmal das NB-IoT-Signal der Deutschen Telekom mit 300 kHz Span als Spektrogramm zu sehen. Die Marker zeigen das 180 kHz breite Signal.

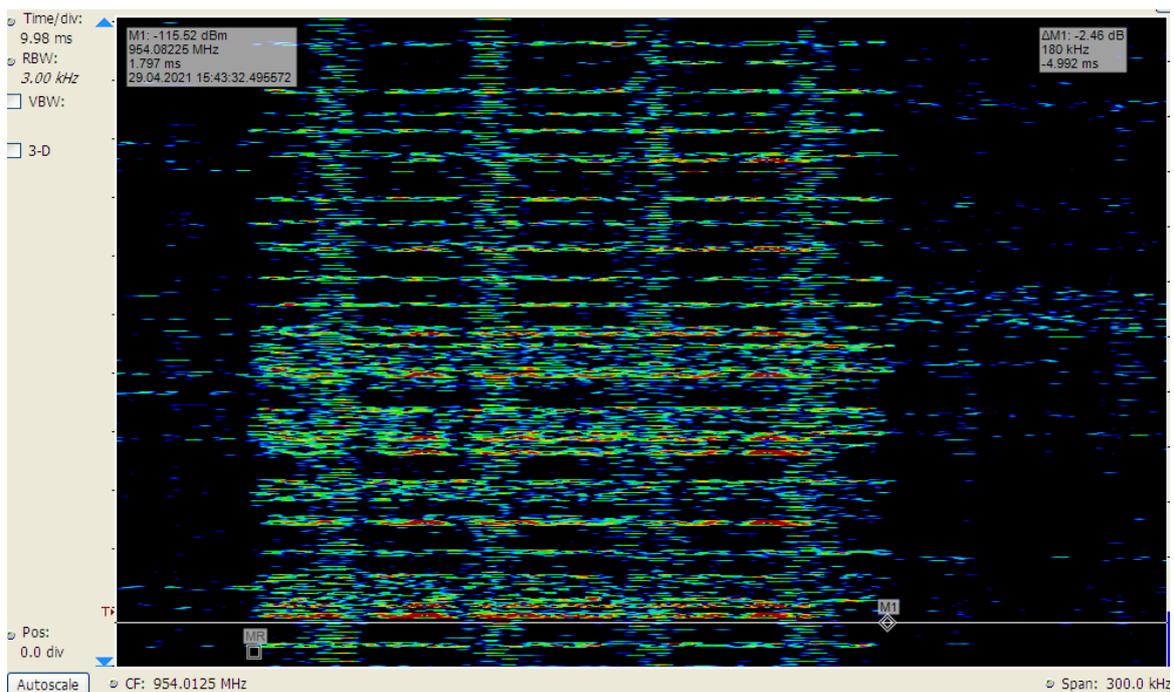


Abbildung 19: NB-IoT-Träger der Telekom im Spektrogramm

Nachdem das NB-IoT-Signal der Deutschen Telekom untersucht wurde, wird nachfolgend das NB-IoT-Signal von Vodafone analysiert.

In der Abbildung 20 wird das LTE-Signal Vodafone dargestellt. Das LTE-Signal befindet sich im LTE800 Bericht im Band 20. Das Signal wird mit 10 MHz Span angezeigt. Es ist zu erkennen, dass sich der 180 kHz breite NB-IoT-Träger oberhalb im Frequenzspektrum des LTE-Kanals befindet. Vodafone verwendet bei NB-IoT den Schutzbandbetrieb. Dabei wird NB-IoT in den Schutzabstandslücken der LTE-Bänder betrieben.

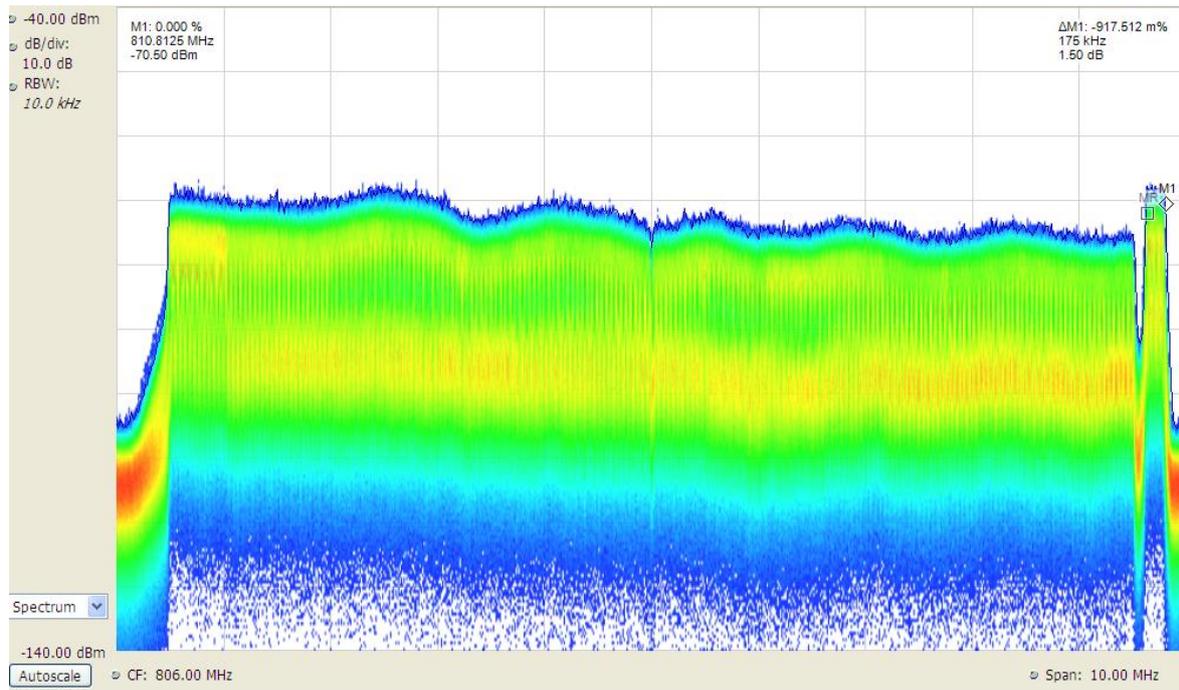


Abbildung 20: LTE-Kanal von Vodafone im Spektrum

Die Abbildung 21 zeigt wieder das LTE-Signal im Band 20 von Vodafone mit 10 MHz Span. Das Signal wird jedoch als Spektrogramm abgebildet. Im oberen Frequenzbereich ist der 180 kHz breite NB-IoT-Träger zu erkennen. Die beiden Marker verdeutlichen das NB-IoT-Signal.

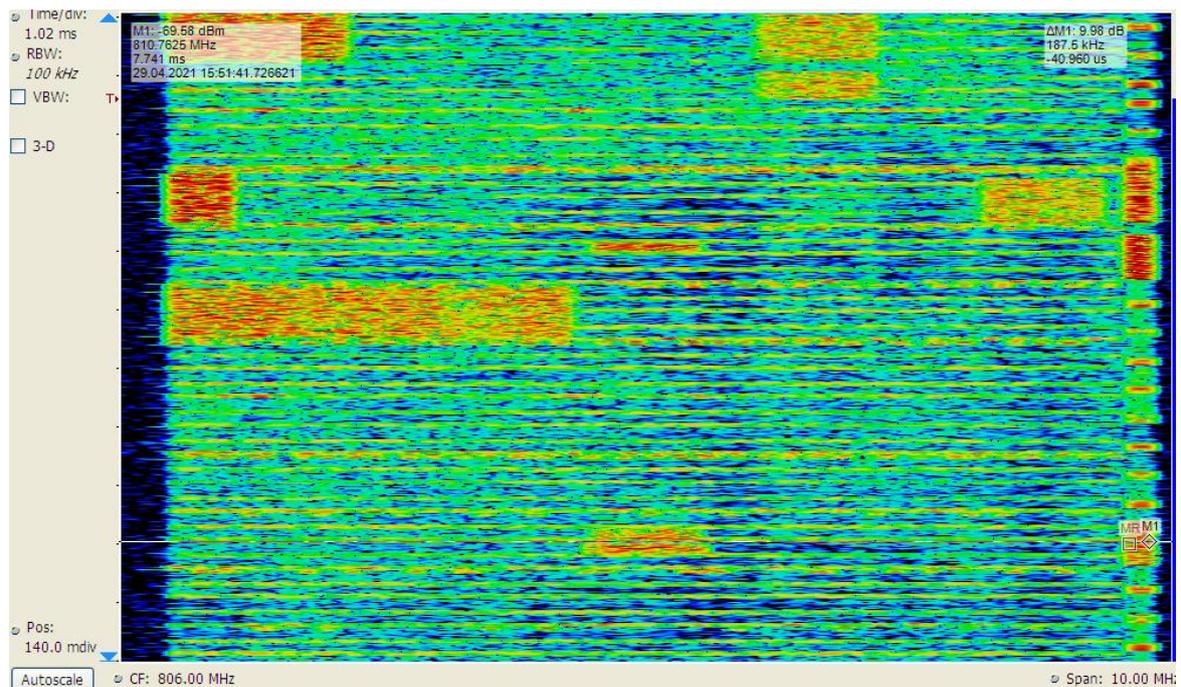


Abbildung 21: LTE-Kanal von Vodafone im Spektrogramm

In der Aufnahme des Spektrogramms des LTE-Kanals von Vodafone in Abbildung 22 ist, wie auch in Abbildung 17, ein halber Radioframe mit einer zeitlichen Länge von 5 ms dargestellt. Das Spektrogramm wird über einen Span von 10 MHz abgebildet.

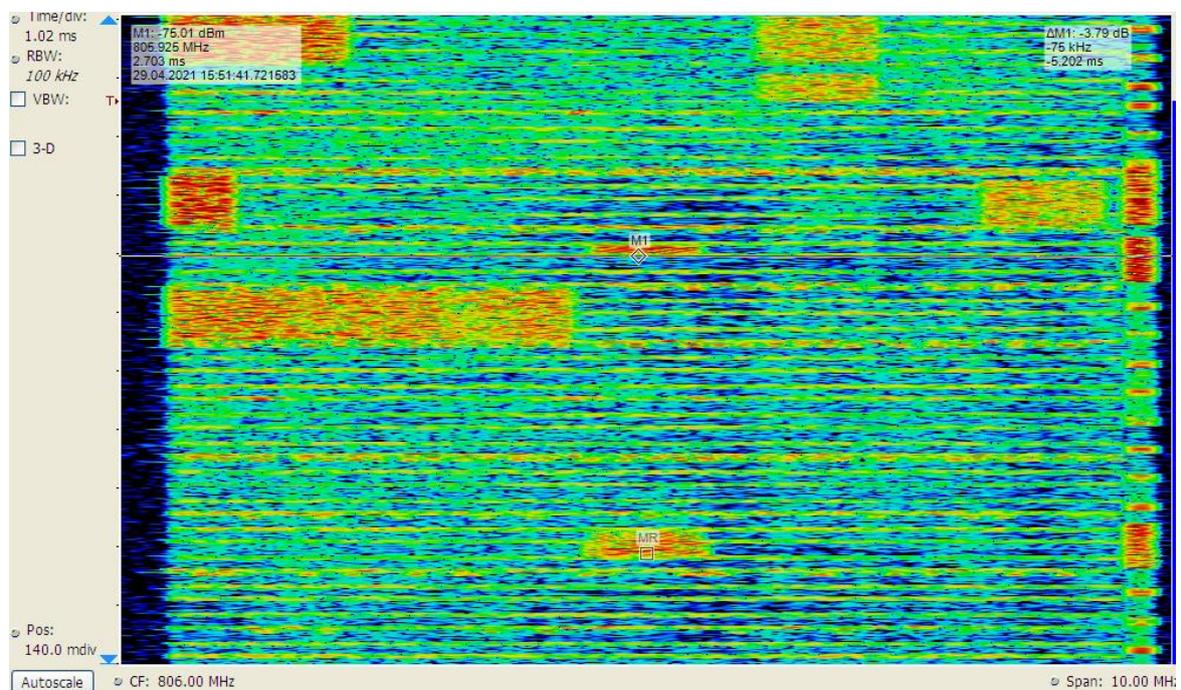


Abbildung 22: Halber Radioframe im LTE-Kanal von Vodafone im Spektrogramm

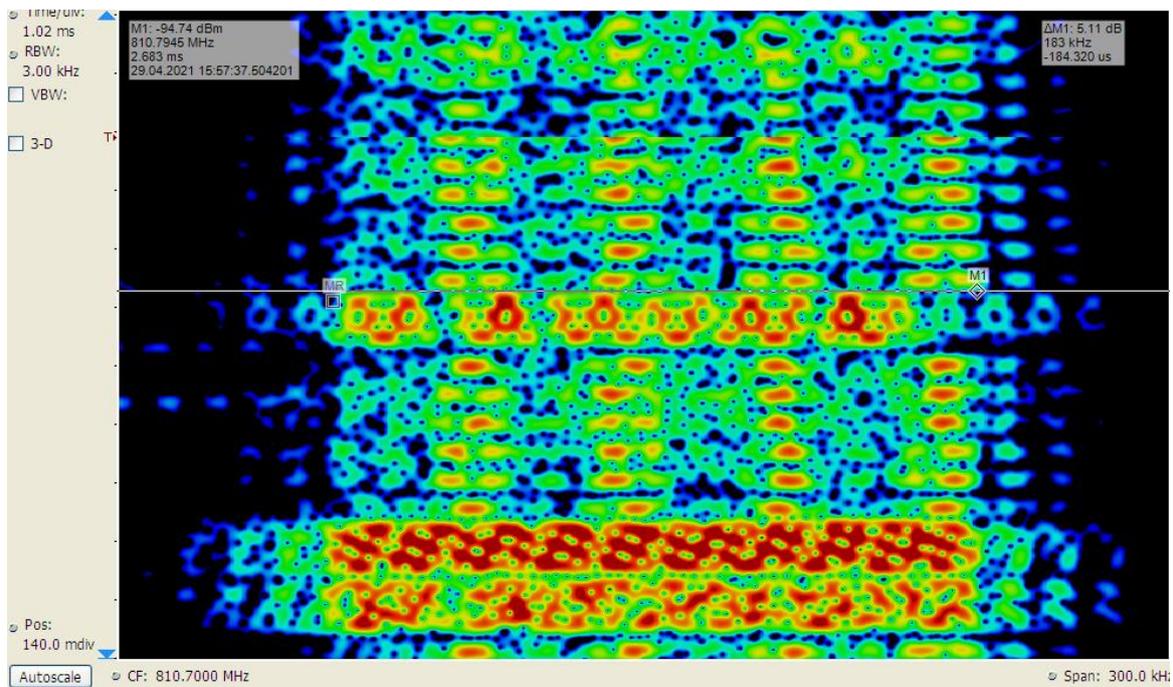


Abbildung 24: NB-IoT-Träger von Vodafone im Spektrogramm

3.5.2 Messungen im Untergeschoss

Bei den Messungen im 1. Untergeschoss des Gebäudes wurde in einem gewöhnlichen Keller-raum gemessen. Dabei wurden der NB-DESK77, das NEMO-Handy und die Stabantenne, die mit dem FSP verbunden war, nah beieinander auf einem Tisch aufgestellt, um möglichst den gleichen Bedingungen ausgesetzt zu sein. Bei der Stabantenne handelte es sich um eine breitbandige Antenne mit 0 dB Gewinn, die für den Frequenzbereich ausgelegt war. Die Abbildung 25 zeigt den Messaufbau. Zu sehen ist gerade, wie das NB-IoT-Signal im LTE900 der Deutschen Telekom (Band 8) analysiert wird.

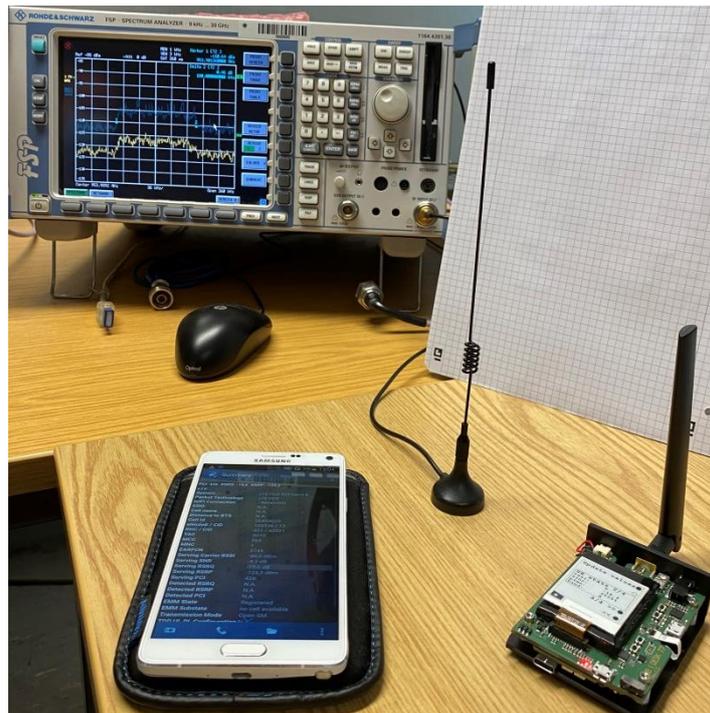


Abbildung 25: Messaufbau im Untergeschoss

Im Untergeschoss ergaben die Messungen für das Mobilfunknetz der Deutschen Telekom die Signalparameter in der nachfolgenden Tabelle 5. Es wurde eine Vergleichsmessung zwischen dem NB-DESK77 und dem NEMO-Handy durchgeführt. Dabei wurde mit beiden Messgeräten zeitgleich in der gleichen Mobilfunkzelle gemessen.

Tabelle 5: Vergleichsmessung im Mobilfunknetz der Deutschen Telekom im Untergeschoss

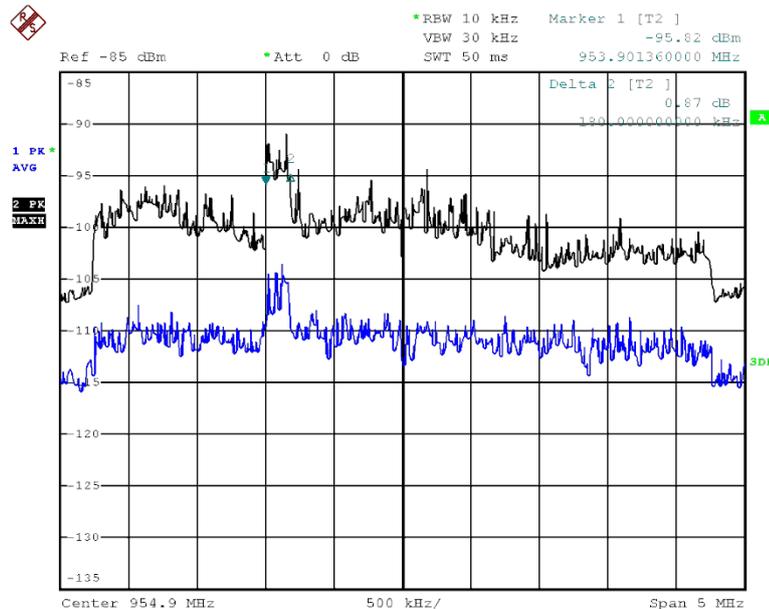
Signalparameter	DESK77	Nemo
PCI	370	370
RSRP [dBm]	-122	-118,4
RSRQ [dB]	-20	-14,7
RSSI [dBm]	-91	-89,2
SINR [dB]	-19	
CE-Level	1	

Der NB-DESK77 lieferte folgende Ergebnisse bei der Messung des Pings im Mobilfunknetz der Deutschen Telekom.

Tabelle 6: Ping im Mobilfunknetz der Deutschen Telekom im Untergeschoss

replies	4 von 4
RTT (avg.)	1101 ms

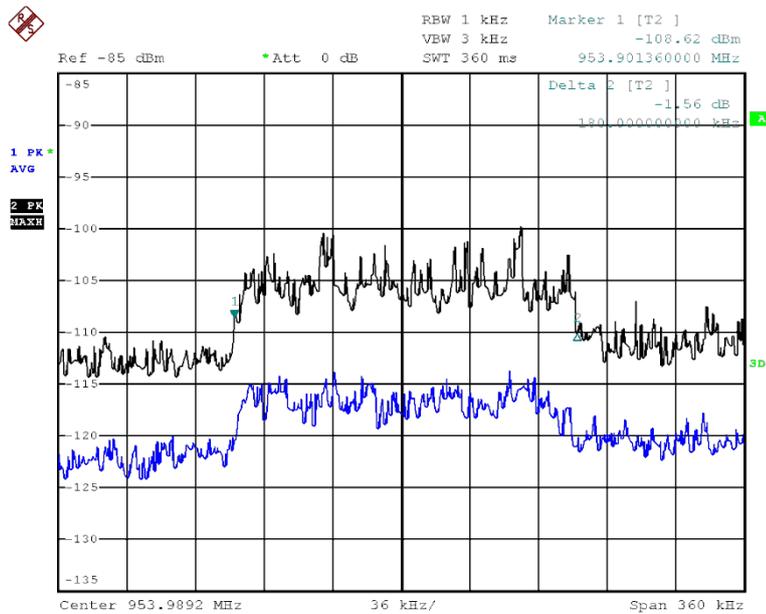
In der Abbildung 26 ist zu sehen wie mit dem FSP Spektrumanalysator und einer Stabantenne das Spektrum des NB-IoT-Signals im Mobilfunknetz der Deutschen Telekom aufgezeichnet wurde. Es wird der gesamte LTE-Kanal in Band 8 dargestellt, der eine Bandbreite von 5 MHz besitzt. Mit den eingestellten Markern ist die Bandbreite des NB-IoT-Signals von 180 kHz ersichtlich. Es ist zu erkennen, dass die Deutsche Telekom den NB-IoT-Träger im Inbandbetrieb verwendet. Die blaue Kurve zeigt einen aktuellen, die schwarze Kurve den maximalen Pegelwert (Max Hold).



Date: 29.APR.2021 12:09:11

Abbildung 26: LTE-Signal der Deutschen Telekom mit NB-IoT-Träger im Untergeschoss

Die Abbildung 27 zeigt das NarrowBand-IoT-Signal bei 953,9 MHz der Deutschen Telekom in Band 8. Der Span ist jetzt auf 360 kHz eingestellt, damit man nur noch den NB-IoT-Träger betrachten kann. Die Marker sind wieder auf der schwarzen Kurve, dem maximalen Pegelwert, eingestellt und kennzeichnen das NB-IoT-Signal mit der 180 kHz Bandbreite. Da das NB-IoT-Signal im Inbandbetrieb verwendet wird, ist neben dem NB-IoT-Träger nicht das Rauschen zu sehen, sondern das LTE-Signal. Beide Übertragungstechniken können miteinander koexistieren, weil beim Inbandbetrieb NB-IoT auf den Frequenzen betrieben wird, die nicht mehr vom LTE verwendet werden.



Date: 29.APR.2021 12:00:13

Abbildung 27: NB-IoT-Träger der Deutschen Telekom im Untergeschoss

Der Messvorgang wurde mit der SIM-Karte von Vodafone im Vodafone-Mobilfunknetz wiederholt durchgeführt. Auch hier wurden die Signalparameter für eine Vergleichsmessung zwischen dem NB-DESK77 und dem NEMO-Handy zeitgleich in der gleichen Mobilfunkzelle aufgenommen.

Tabelle 7: Vergleichsmessung im Mobilfunknetz von Vodafone im Untergeschoss

Signalparameter	DESK77	Nemo
PCI	5	5
RSRP [dBm]	-78	-98
RSRQ [dB]	-11	-6,6
RSSI [dBm]	-68	-72
SINR [dB]	-17	
CE-Level	0	

Tabelle 8: Ping im Mobilfunknetz von Vodafone im Untergeschoss

replies	4 von 4
RTT (avg.)	327 ms

In der Abbildung 28 ist der ganze LTE-Kanal von Vodafone im Band 20 abgebildet. Die Messungen wurden wieder mit dem FSP Spektrumanalysator und der Stabantenne durchgeführt. Der LTE-Kanal weist eine Bandbreite von 10 MHz auf. Das 180 kHz breite NB-IoT-

Signal ist auf der rechten Seite des Bildes zu erkennen. Die eingestellten Marker zeigen den 180 kHz breiten NB-IoT-Träger auf der schwarzen Max Hold Kurve. Die blaue Kurve zeigt den aktuellen Pegelwert der Messung über den 10 MHz Span an. Bei dieser Abbildung stellt man fest, dass Vodafone NarrowBand-IoT im Schutzbandbetrieb betreibt. Beide Übertragungstechniken können gleichzeitig ausgesendet werden, da NB-IoT in dem Schutzband des LTE-Kanals betrieben wird. Das heißt, dass dort kein Leistungspegel von LTE ausgesendet wird.

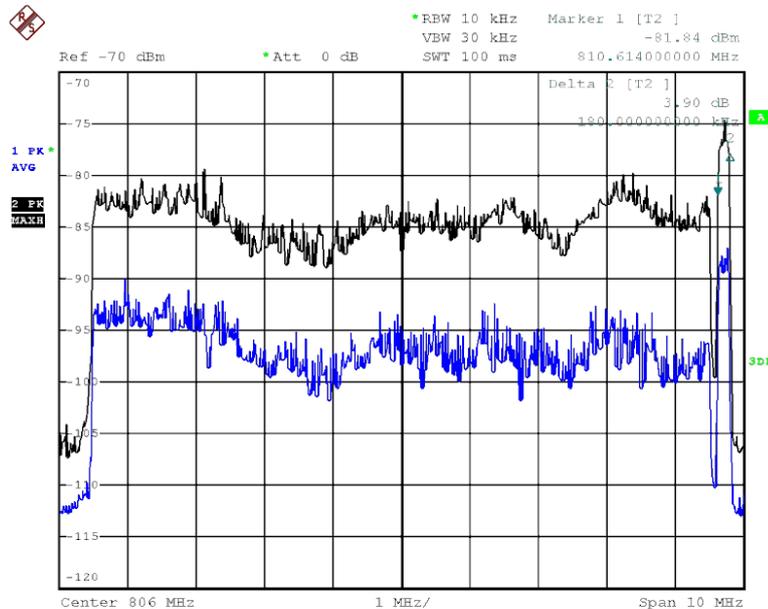
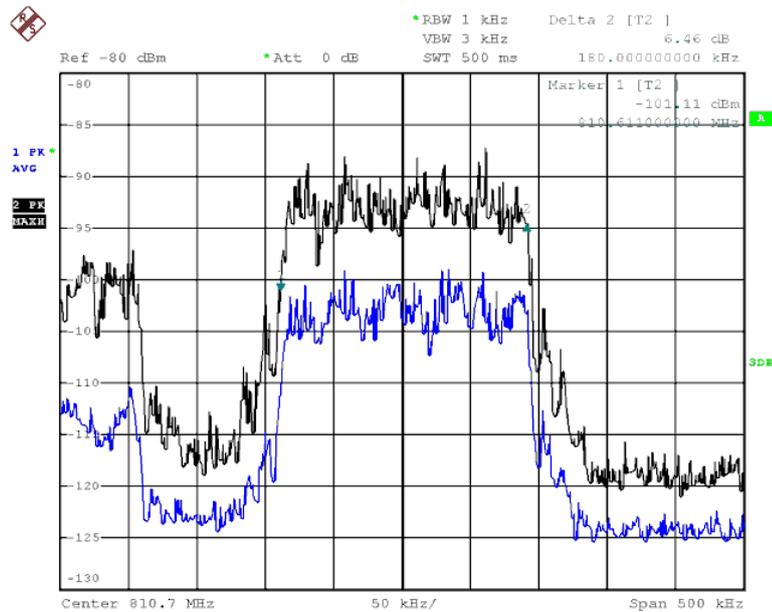


Abbildung 28: LTE-Signal von Vodafone mit NB-IoT-Träger im Untergeschoss

In der Abbildung 29 ist das NB-IoT-Signal bei 810,7 MHz zu sehen. Es wird das Band 20 von Vodafone dargestellt. Der Span wurde auf 500 kHz eingestellt, um den NB-IoT-Träger genauer betrachten zu können. Dieser ist gut ersichtlich durch die Marker auf der schwarzen Max Hold Kurve. Die Marker zeigen das NB-IoT-Signal mit 180 kHz Bandbreite. Auf der linken Seite, im unteren Frequenzbereich der Aufnahme, ist das Vodafone LTE-Signal zu erkennen. Zwischen dem LTE-Signal und dem NB-IoT-Signal liegt ein Schutzabstand, um die beiden Signale vor Störungen zu schützen. Auf der rechten Seite, dem höheren Frequenzbereich, sieht man keine Leistungspegel, nur Rauschen.



Date: 29.APR.2021 13:37:29

Abbildung 29: NB-IoT-Träger von Vodafone im Untergeschoss

3.5.3 Messungen in der Schirmkabine

Es wurden Messungen in einer Schirmkabine der BNetzA durchgeführt. Die Schirmkabine befand sich im 1. Untergeschoss des Gebäudes. Bei den Messungen in der Schirmkabine wurden die Öffnungszustände der Tür variiert, um unterschiedliche Verbindungsqualitäten zu simulieren.

Die folgende Abbildung 30 zeigt den Messaufbau in der Schirmkabine. Für die Messungen mit dem FSP innerhalb der Schirmkabine wurde eine logper-Antenne (logarithmisch-periodische Antenne) mit ca. 5 dBi Antennengewinn verwendet. Der Gewinn gleicht etwa den Dämpfungsverlust des Antennenkabels zum FSP aus. Es wurde auch bei den Messungen in der Schirmkabine darauf geachtet, dass die Messempfänger möglichst unter den gleichen Bedingungen empfangen können. Der NB-DESK77 und das NEMO-Handy befinden sich auf der linken Seite des Bildes auf einer Styroporablage.



Abbildung 30: Messaufbau in der Schirmkabine

Tür geöffnet

Zunächst wurden die Messungen durchgeführt, bei denen die Tür der Schirmkabine vollständig geöffnet war. In der Abbildung 31 sind noch einmal der Messaufbau und die geöffnete Tür zu sehen.



Abbildung 31: Messaufbau in der Schirmkabine mit geöffneter Tür

Im Mobilfunknetz der Deutschen Telekom wurden mit dem NB-DESK77 und dem NEMO-Handy die Ergebnisse erzielt, die nachträglich in der Tabelle 9 und Tabelle 10 aufgeführt sind.

Tabelle 9: Vergleichsmessung im Mobilfunknetz der Deutschen Telekom in der Schirmkabine

Signalparameter	DESK77	Nemo
PCI	370	N.A.
RSRP [dBm]	-118	N.A.
RSRQ [dB]	-13	N.A.
RSSI [dBm]	-105	N.A.
SINR [dB]	-18	
CE-Level	2	

Tabelle 10: Ping im Mobilfunknetz der Deutschen Telekom in der Schirmkabine

Ping: 1	replies	keine
	RTT (avg.)	keine

Ping: 2	replies	3 von 4
	RTT (avg.)	3001 ms

Der erste Ping-Versuch ist gescheitert, deshalb wurde ein zweiter Versuch durchgeführt.

Anschließend wurden auch im Mobilfunknetz von Vodafone die Messung in der Schirmkabine bei geöffneter Tür durchgeführt. Die gemessenen Ergebnisse sind in den Tabelle 11 und Tabelle 12 aufgelistet.

Tabelle 11: Vergleichsmessung im Mobilfunknetz von Vodafone in der Schirmkabine

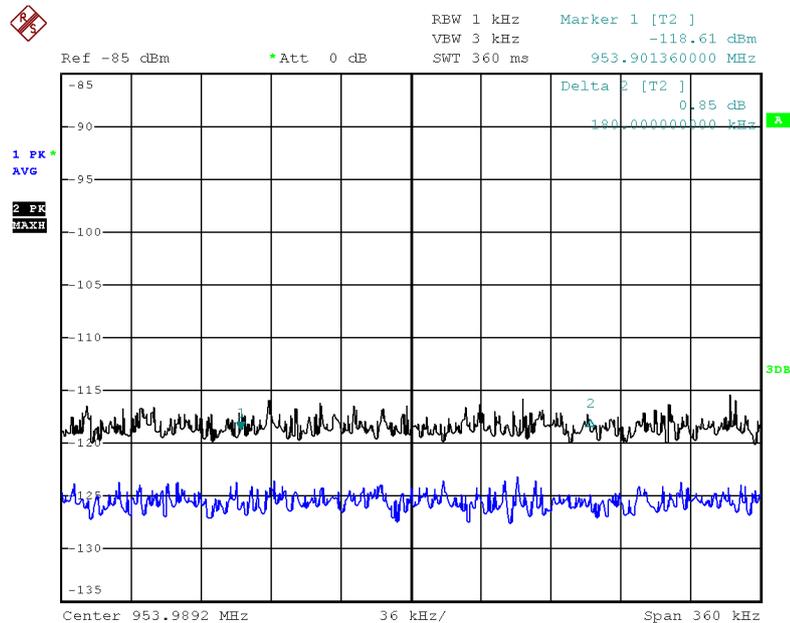
Signalparameter	DESK77	Nemo
PCI	5	5
RSRP [dBm]	-108	-119,8
RSRQ [dB]	-8	-7,8
RSSI [dBm]	-98	-89,9
SINR [dB]	-16,2	
CE-Level	0	

Tabelle 12: Ping im Mobilfunknetz von Vodafone in der Schirmkabine

replies	4 von 4
RTT (avg.)	207 ms

Die Messung mit dem FSP und der logper-Antenne, die sich innerhalb der Schirmkabine befand, ist in Abbildung 32 abgebildet. In der Aufnahme sind eine schwarze Kurve, die den ma-

ximalen Pegelwert anzeigt, und eine blaue Kurve, die den aktuellen Pegelwert angibt, zu sehen. Beide Kurven zeigen jedoch an, dass kein Signal, weder NB-IoT noch LTE, detektiert werden kann. Es wird lediglich das Rauschen bei der Messung in der Schirmkabine mit geöffneter Tür angezeigt. Es ist nicht möglich mit dem FSP ohne weitere Vorverstärker ein NB-IoT-Signal zu detektieren.



Date: 29.APR.2021 12:02:28

Abbildung 32: NB-IoT-Signal der Deutschen Telekom in der Schirmkabine

Tür zur Hälfte geöffnet

Die Messungen in der Schirmkabine mit der zur Hälfte geöffneten Tür fanden nach dem gleichen Messaufbau statt, der auch in Abbildung 30 dargestellt ist. Der Messaufbau ist bis auf den Öffnungswinkel der Tür unverändert geblieben. Bei den Messungen im Mobilfunknetz von Vodafone wurden die Ergebnisse erzielt, die in Tabelle 13 und in Tabelle 14 aufgelistet sind. Da bereits bei den Messungen mit der vollständig geöffneten Tür der Schirmkabine im Mobilfunknetz der Deutschen Telekom mit dem NEMO-Handy (Tabelle 9) keine Messergebnisse für die Vergleichsmessung erzielt wurden, wurde nachfolgend darauf verzichtet diese Werte aufzunehmen.

Tabelle 13: Vergleichsmessung im Mobilfunknetz von Vodafone in der Schirmkabine mit halb geöffneter Tür

Signalparameter	DESK77	Nemo
PCI	5	5
RSRP [dBm]	-117	-124,8
RSRQ [dB]	-12	-9,2
RSSI [dBm]	-106	-89,9
SINR [dB]	-17,8	
CE-Level	1	

Tabelle 14: Ping im Mobilfunknetz von Vodafone in der Schirmkabine mit halb geöffneter Tür

replies	4 von 4
RTT (avg.)	292 ms

Tür geschlossen

Die letzte Messung in der Schirmkabine fand mit komplett geschlossener Tür statt. Der Messaufbau und der Messempfänger ist identisch geblieben. Es wurde lediglich der Öffnungswinkel der Tür verändert. Die daraus resultierenden Messergebnisse im Mobilfunknetz von Vodafone sind in den Tabelle 15 und Tabelle 16 aufgeführt.

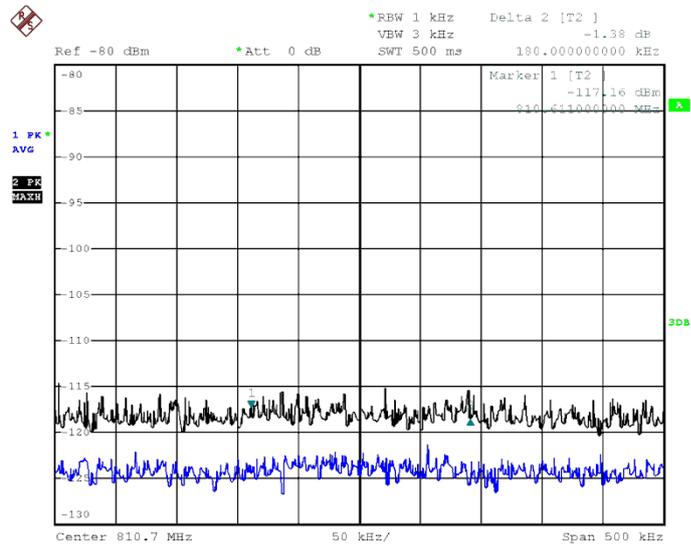
Tabelle 15: Vergleichsmessung im Mobilfunknetz von Vodafone in der Schirmkabine mit geschlossener Tür

Signalparameter	DESK77	Nemo
PCI	5	N.A.
RSRP [dBm]	-110	N.A.
RSRQ [dB]	-8	N.A.
RSSI [dBm]	-100	N.A.
SINR [dB]	-16	
CE-Level	1	

Tabelle 16: Ping im Mobilfunknetz von Vodafone in der Schirmkabine mit geschlossener Tür

replies	keine
RTT (avg.)	keine

Die Abbildung 33 zeigt die Messung mit dem FSP und der logper-Antenne bei geschlossener Tür in der Schirmkabine. Sowohl bei der blauen Kurve mit dem aktuellen Pegelwert, als auch bei der schwarzen Kurve mit dem maximalen Pegelwert, ist kein LTE- oder NB-IoT-Signal zu erkennen. Auf dem FSP wird nur noch das Rauschen angezeigt. Es ist nicht möglich mit dem FSP ein NB-IoT-Signal zu detektieren.



Date: 29.APR.2021 13:38:24

Abbildung 33: NB-IoT-Signal von Vodafone in der Schirmkabine

4 Schulungsunterlage NB-IoT

Die Aufgabe der BNetzA ist es, unter anderem, die technische Aufsicht über das Frequenzspektrum zu führen und auf die Einhaltung des Frequenzplans zu achten, sodass eine effiziente und störungsfreie Frequenznutzung möglich ist. Damit ein störungsfreier Betrieb auf den Frequenzen des NB-IoT sichergestellt werden kann, wurde im Zuge dieser Arbeit für die BNetzA eine Vorgehensweise zur NB-IoT-Störungsbearbeitung mit dem NB-DESK77 und eine Schulungsunterlage NB-IoT zum internen BNetzA-Lehrgang „Digitale Übertragung Teil 2 Systeme“ angefertigt. Diese beiden Skripte wurden auf der Grundlage dieser Arbeit mit dem gesammelten Wissen und den, bei den Messungen, erzielten Ergebnissen und gewonnenen Erkenntnissen angefertigt.

4.1 Vorgehensweise zur NB-IoT-Störungsbearbeitung mit dem NB-DESK77

In der „Vorgehensweise zur NB-IoT-Störungsbearbeitung mit dem NB-DESK77“ wird der Umgang mit diesem Modul gelehrt. Dabei wird zum Anfang in einer Kurzanleitung der schnelle Umgang mit dem Gerät stichpunktartig vermittelt. Es wird gezeigt, wie eine Mobilfunkverbindung in das gewünschte Netz hergestellt werden kann und wie über diese Mobilfunkverbindung Testdatenpakete und Test-Pings versendet werden. Außerdem wird beschrieben, wie die dabei übermittelten Daten abgerufen werden. Zusätzlich zu der Kurzanleitung ist in der Vorgehensweise auch noch gründlicher beschrieben, wie mit dem NB-DESK77 umzugehen ist. Es wird ausführlich auf die Punkte in der Kurzanleitung eingegangen und noch einige Zusatzinformationen gegeben. Des Weiteren gibt es Anwendungsbeispiele in der Praxis mit Messergebnissen, an denen sich orientiert werden kann, wie die Qualität der Mobilfunkverbindung einzuschätzen ist. Die Vorgehensweise zur NB-IoT-Störungsbearbeitung mit dem NB-DESK77 ist in dieser Arbeit in den Anlagen hinterlegt und im Kapitel A. zu finden.

4.2 Schulungsunterlage NB-IoT für das Skript zum Lehrgang: Digitale Übertragung Teil 2 Systeme

Neben der Vorgehensweise zur Bearbeitung von NB-IoT-Störungen wurde eine Schulungsunterlage für NB-IoT erstellt. Dieser NB-IoT-Abschnitt ergänzt das LTE-Kapitel im Lehrgang „Digitale Übertragung Teil 2 Systeme“ der BNetzA. Der Lehrgang ist für die Messbeamten des PMDs der BNetzA vorgesehen und soll sie im richtigen Umgang mit den Übertragungstechniken vertraut machen. Der NB-IoT-Abschnitt in der Schulungsunterlage enthält eine

Einführung in NB-IoT. Anschließend werden die NB-IoT-Grundlagen der HF-Eigenschaften und der Signalstruktur im Downlink und im Uplink vermittelt. Abschließend wird NB-IoT im Spektrum erläutert. Die Schulungsunterlage NB-IoT für das Skript zum Lehrgang der BNetzA ist in dieser Arbeit in den Anlagen hinterlegt und im Kapitel B. zu finden.

4.3 Evaluation

Zur Überprüfung des Skripts „Vorgehensweise zur NB-IoT-Störungsbearbeitung mit dem NB-DESK77“ wurde es noch einmal begutachtet. Diese Begutachtung fand am 17.07.2021 im Dienstgebäude der BNetzA Hannover statt.

Bei der Überprüfung wurden zwei Messbeamte des PMDs Hannover zur Hilfe herangezogen. Sie sollten mit ihrem fachkundigen Wissen eine Einschätzung und Beurteilung der Vorgehensweise abgeben. Durch ihre Arbeit im PMD der BNetzA, können sie mit ihrem Urteilsvermögen eine genaue Bewertung vorlegen. Sie wissen, auf was es bei den Messungen in der Praxis ankommt und wie ein Handlungsskript sinnvoll aufgebaut ist. Für die Evaluierung des Handlungsskriptes wurden ein jüngerer und ein erfahrener Messbeamte des PMDs ausgewählt, um verschiedene Blickwinkel und Ansatzpunkt zu dem Skript zu erhalten. Wichtig bei der Auswahl der Prüfer war außerdem, dass beide noch keine Berührungspunkte mit NB-IoT hatten. So konnte genau beurteilt werden, wie verständlich und sinnvoll die Vorgehensweise geschrieben aufgebaut ist.

Die beiden Messbeamten führten die Überprüfung selbstständig und getrennt voneinander durch, sodass mögliche Verständnisprobleme der Anweisung sofort aufgedeckt werden konnten. Sie bekamen anfangs nur den NB-DESK77, um sich mit dem Modul vertraut zu machen. Anschließend erhielten sie das Skript „Vorgehensweise zur NB-IoT-Störungsbearbeitung mit dem NB-DESK77“. Mit Hilfe der Kurzanleitung konnte das Gehäuse des Moduls geöffnet werden, ohne dass Taster oder andere Bauteile beschädigt wurden. Die SIM-Karte wurde entnommen und gegen die SIM-Karte des geforderten Mobilfunkanbieters ausgetauscht. Durch die genaue Beschreibung in der Vorgehensweise war das Verbinden mit dem Mobilfunknetz, nach der Aktivierung des Moduls, kein Problem für die Messbeamten. Sie wählten die richtigen PLMN und RAT aus und bauten die Mobilfunkverbindung auf. Mit Hilfe der Kurzanleitung stellte auch der Test-Transmit keine Hürde für die beiden Messbeamten dar. Sie konnten sicher durch das Menü und die Einstellungen geführt werden und manuelle und automatische Test-Transmits senden und anschließend die übermittelten Daten auf dem NB-DESK77 abrufen. Nachdem die übermittelten Daten erfolgreich abgerufen werden konnten, navigierte die Kurzanleitung die PMD-Messbeamten zum Ping-Test. Der Ping-Test konnte erfolgreich

durchgeführt werden. Abschließend wurde über einen Computer Grafana geöffnet und die übermittelten Signalparameter wurden begutachtet und diskutiert.

Bei der gesamten Durchführung traten dank der sinnvoll aufgebauten Vorgehensweise keine Komplikationen auf. Beide Messbeamten hatten keine Probleme sich mit dem Handlungsskript auseinanderzusetzen und den NB-DESK77 zu bedienen. Die beiden Messbeamten des PMDs waren mit der der Vorgehensweise sehr zufrieden. Inhaltlich wurden keine Kritikpunkte gefunden und auch der Aufbau bzw. Ablauf erschien ihnen sinnvoll. Lediglich einzelne persönliche Empfindungen wurden geäußert. Beispielsweise wurde der Wunsch genannt, dass zum besseren Verständnis die Bedienknöpfe des NB-DESK77 in den Bildern farblich gekennzeichnet werden sollten. Des Weiteren kam der Vorschlag, ein Bild hinzuzufügen, auf dem ersichtlich ist, wo sich der SIM-Karten-Slot befindet. Die Kommentare und Wünsche der Messbeamten wurden berücksichtigt und bestmöglich umgesetzt, sodass die Vorgehensweise im Messbetrieb verwendet werden kann.

Nach Rücksprache mit den Messbeamten konnte festgehalten werden, dass beide mit diesem Handlungsskript sehr zufrieden sind und diese Vorgehensweise bei einer Überprüfung im Bereich NB-IoT zur Hilfe heranziehen und verwenden würden.

5 Auswertung

In diesem Kapitel wird auf die durchgeführten Messungen eingegangen. Es werden die gewonnenen Ergebnisse und Erkenntnisse aus den Messungen im Untergeschoss und aus der Schirmkabine mit den unterschiedlichen Öffnungszuständen der Tür diskutiert. Als Grundlage für die weiteren Untersuchungen werden am Anfang die Messungen mit dem RSA ausgewertet.

5.1 Auswertung der Messungen mit dem Realtime Spektrumanalysator

In den Messungen mit dem RSA ist ersichtlich, dass es möglich ist ein NB-IoT-Signal im LTE-Kanal der Deutschen Telekom zu erkennen. Die Abbildung 15 bis Abbildung 19 zeigen das LTE-Signal der Deutschen Telekom mit dem NB-IoT-Signal und das 180 kHz breite NB-IoT-Signal einzeln dargestellt. Ebenso war es möglich das NB-IoT-Signal im LTE-Kanal von Vodafone auszumachen. Auch hier kann das NB-IoT-Signal deutlich erkannt werden. Dies ist in den Abbildung 20 bis Abbildung 24 zu erkennen.

Mit dem RSA lässt sich ein NB-IoT-Signal in einem LTE-Kanal detektieren. Mit Hilfe des Amplitudendichtespektrums kann auch eine kurzzeitige Störaussendung erkannt und aufgezeichnet werden. Der RSA kann für die Störungsbearbeitung im Bereich NB-IoT eine große Hilfe sein, jedoch ist es mit dem RSA nicht möglich, das NB-IoT-Signal zu decodieren und Signalparameter auszulesen. Der RSA ist für eine vollumfängliche und korrekte Störungsbearbeitung des PMDs im Bereich NB-IoT nicht ausreichend geeignet.

5.2 Auswertung zu den Messungen im Untergeschoss

Bei den Messungen im Untergeschoss der Dienststelle der BNetzA wurden Vergleichsmessungen zwischen dem NB-DESK77 und einem NEMO-Handy der BNetzA durchgeführt. Begleitet wurden die Vergleichsmessungen mit einem FSP, der über eine Stabantenne gemessen hat.

Die Messung im Mobilfunknetz der Deutschen Telekom (Tabelle 5) im Band 8 ergaben folgende Erkenntnisse. Der RSRP ist um 3,6 dB, der RSRQ um 5,3 dB und der RSSI um 1,8 dB beim NEMO-Handy besser als beim NB-DESK77. Auffällig ist, dass bereits in einem gewöhnlichen Kellerraum der CE-Level 1 beim NB-DESK77 erreicht wird. Es wird eine erhöhte Anzahl an Wiederholungen benötigt, um die Daten korrekt übertragen zu können. Eine höhere Wiederholungszahl hat einen größeren Energiebedarf und eine verringerte Akkulaufzeit

zur Folge. Beim Ping-Versuch (Tabelle 6) wurden alle 4 versendeten Pakete auch wieder empfangen. Dies geschah in einer durchschnittlichen RTT von 1101 ms.

Im Mobilfunknetz von Vodafone (Tabelle 7) wurde beim Vergleich der Messungen vom NB-DESK77 und vom NEMO-Handy festgestellt, dass der NB-DESK77 beim RSRP einen um 20 dB und beim RSSI einen um 4 dB besseren Wert erreicht, als das NEMO-Handy. Beim RSRQ erreicht das NEMO-Handy einen um 4,4 dB höheren Wert. Bei der Durchführung des Pings (Tabelle 8) wurden mit einer durchschnittlichen RTT von 327 ms alle 4 gesendeten Pakete auch wieder empfangen.

Die Vergleichsmessungen wurden mit dem FSP begleitet. Mit diesem war es möglich, in beiden Mobilfunknetzen, das NB-IoT-Signal im LTE-Band auszumachen. Es war jedoch nicht möglich das Signal genauer zu analysieren. Mit dem FSP konnte nur die Bandbreite des NB-IoT-Signals detektiert werden. Dies ist in den Abbildung 26 bis Abbildung 29 zu erkennen.

Zusammenfassend lässt sich über die Messungen im Untergeschoss feststellen, dass das NEMO-Handy das bessere Messgerät im Vergleich zum NB-DESK77 war. Jedoch war es sowohl mit dem NEMO-Handy als auch mit dem FSP nicht möglich, die NB-IoT-Signale auszulesen. Mit der aktuellen HF-Technik kann lediglich festgestellt werden, ob ein NB-IoT-Signal vorhanden ist.

5.3 Auswertung zu den Messungen in der Schirmkabine

Die Messungen in der Schirmkabine fanden bei drei verschiedenen Öffnungszuständen der Tür statt, um verschiedene Mobilfunkbedingungen zu simulieren. Bei diesen Messungen wurde mit dem NB-DESK77 gemessen und als Vergleich parallel dazu mit dem NEMO-Handy. Zusätzlich wurden die Messungen mit dem FSP, an den eine logper-Antenne angeschlossen war, begleitet.

Auswertung für die Messungen in der Schirmkabine bei geöffneter Tür

Obwohl die Tür bei dieser Messung in der Schirmkabine geöffnet war, gelang es nicht mit dem NEMO-Handy eine Verbindung in das Mobilfunknetz der Deutschen Telekom (Tabelle 9) aufzubauen. Das NEMO-Handy konnte unter den gegebenen Bedingungen nicht mehr mit LTE versorgt werden. Dem NB-DESK77 hingegen war es möglich über NB-IoT eine Mobilfunkverbindung in das Netz der Deutschen Telekom herzustellen. Dabei wurden die folgenden Werte erreicht. Der RSRP lag bei -118 dBm, der RSRQ bei -13 dB und der RSSI bei -105 dBm. Es fällt auf, dass bei der Übertragung mit dem NB-DESK77 schon ein CE-Level von 2 erreicht wurde. Die Ping-Übertragung (Tabelle 10) gelang mit dem NB-DESK77

beim ersten Versuch nicht. Bei einem anschließenden zweiten Versuch gelang es 3 der 4 verschickten Ping-Pakete wieder zu empfangen. Dies war unter einer hohen durchschnittlichen RTT von 3001 ms möglich.

Im Mobilfunknetz von Vodafone (Tabelle 11) gelang es dem NEMO-Handy über LTE eine Verbindung aufzubauen. Ebenso gelang es dem NB-DESK77 eine Mobilfunkverbindung in das Netz von Vodafone herzustellen. Dabei konnte der NB-DESK77 einen um 11,8 dBm höheren RSRP als das NEMO-Handy vorweisen. Der NB-DESK77 hatte einen um 0,2 dB kleineren RSRQ und einen um 8,1 dBm geringeren RSSI im Vergleich zum NEMO-Handy. Der CE-Level lag bei der Übertragung mit dem NB-DESK77 noch bei 0. Des Weiteren wurde auch bei dem Ping-Versuch (Tabelle 12) alle 4 versendeten Pakete wieder empfangen und das in einer kurzen durchschnittlichen Zeit von 207 ms.

Wie dem NEMO-Handy im Mobilfunknetz der Telekom, gelang es auch dem FSP mit der logper-Antenne nicht, ein Mobilfunksignal zu empfangen. Die Abbildung 32 veranschaulicht, dass das Signal im Rauschen verschwunden ist.

Auswertung für die Messungen in der Schirmkabine bei zur Hälfte geöffneter Tür

Die Messungen erfolgten in der Schirmkabine bei zur Hälfte geöffneter Tür. Der NB-DESK77 erzielte im Mobilfunknetz von Vodafone (Tabelle 13) mit einem RSRP von -117 dBm einen um 7,8 dB besseren RSRP. Das NEMO-Handy maß beim RSRQ mit -9,2 dB einen um 2,8 dB besseren RSRQ und beim RSSI mit -89,9 dBm einen um 16,1 dB besseren RSSI als der NB-DESK77. Der CE-Level stieg bei der Übertragung mit dem NB-DESK77 auf 1 an, was eine höhere Wiederholungsanzahl und daraus folgend, eine kürzere Akkulebensdauer hat.

Bei der Durchführung des Pings im Vodafone-Mobilfunknetz (Tabelle 14) war es möglich alle 4 gesendeten Pakete, in einer durchschnittlichen RTT von 292 ms, wieder zu empfangen.

Auswertung für die Messungen in der Schirmkabine bei geschlossener Tür

Bei geschlossener Tür der Schirmkabine war es nicht möglich mit dem NEMO-Handy eine LTE-Verbindung in das Mobilfunknetz von Vodafone (Tabelle 15) aufzubauen. Der NB-DESK77 war in der Lage, eine funktionierende Mobilfunkverbindung über NB-IoT herzustellen. Bei dem durchgeführten Test-Transmit wurden dabei ein RSRP von -110 dBm, ein RSRQ von -8 dB und ein RSSI von -100 dBm erzielt. Der CE-Level blieb auf dem der Stufe 1. Der Versuch einen Ping durchzuführen gelang nicht (Tabelle 16). Es konnten keine Pakete gesendet oder empfangen werden.

Wie in der Abbildung 33 zu sehen ist, war es auch mit dem FSP in der geschlossenen Schirmkabine nicht möglich, ein Mobilfunksignal zu detektieren.

6 Fazit und Ausblick

Die Vergleichsmessungen beim PMD der BNetzA in Hannover haben einige wertvolle Erkenntnisse aufgezeigt. Es konnte der Pfadverlust unter verschiedenen Bedingungen mit unterschiedlichen Messgeräten aufgezeigt werden. Dabei stellte sich heraus, dass der NB-DESK77 unter Bedingungen noch Daten mit Signalparametern übermitteln kann, bei denen die aktuelle HF-Messtechnik der BNetzA an ihre Grenzen stößt. Der FSP und auch das NEMO-Handy verloren in der Schirmkabine ihre Signale und konnten keine Mobilfunkverbindung aufbauen und Informationen abrufen. Mit dem RSA gelang es außerhalb der Dienststelle die LTE- und NB-IoT-Signale zu empfangen, jedoch war es nicht weiter möglich die NB-IoT-Signalparameter auszulesen und so das Signal genauer zu analysieren. Lediglich der NB-DESK77 von exelonix war bei diesen Versuchen in der Lage, die NB-IoT-Signalparameter auszulesen und der NB-DESK77 war außerdem das einzige Messgerät, das in der Schirmkabine bei fast geschlossener Tür noch Daten übermitteln konnte. Dies könnte an einer hohen Messempfindlichkeit des NB-DESK77 liegen. Des Weiteren ist die aktuelle HF-Technik des PMDs nicht in der Lage, die Signalparameter von NB-IoT zu decodieren und auszulesen.

Nebensächlich fällt bei den durchgeführten Messungen auf, dass eine bessere Mobilfunkverbindung im Netz von Vodafone vorhanden ist. Bei der Deutschen Telekom wird die Übertragung beeinträchtigt, sobald sich die Messgeräte NB-DESK77 und das NEMO-Handy in der Schirmkabine befinden. Auch außerhalb der Schirmkabine beim Vergleich der Mobilfunkanbieter mit den Aufnahmen des FSP und RSA fällt auf, dass die Vodafone-Signale einen höheren Pegel als die der Deutschen Telekom haben. Dieser Pegelunterschied der beiden Mobilfunkbetreiber könnte durch unterschiedliche Entfernungen vom Messpunkt zu den jeweiligen Basisstationen gekommen sein. Eine Vodafone-Station liegt näher an der Dienststelle der BNetzA Hannover, als eine Basisstation der Deutschen Telekom.

Mit zukünftig weiter fallenden Preisen für NB-IoT-Funkmodule, sowie einem rasanten fortschreitenden Ausbau des NB-IoT-Funknetzes und vielen weiteren Vorteilen von NB-IoT, wird die Vernetzung von Sensoren und Aktoren mit NB-IoT in naher Zukunft weite Verbreitung finden.

Durch die Versuche und Messungen wurde aufgezeigt, dass die BNetzA, für eine korrekte Störungsbearbeitung im Bereich NB-IoT, den PMD mit geeigneter HF-Messtechnik ausrüsten sollte. Es empfiehlt sich die HF-Messtechnik auf den Messwagen des PMDs um den NB-DESK77 zu erweitern, um auch zukünftig eine vollumfängliche Störungsbearbeitung durchführen zu können.

II. Abkürzungsverzeichnis

3GPP	3rd Generation Partnership Project
APN	Access Point Name
BNetzA	Bundesnetzagentur
BPSK	Binary Phase Shift Keying
CDMA	Code Division Multiple Access
CE-Level	Coverage Enhancement
dB	Dezibel
dBm	Dezibel Milliwatt
eNodeB	Basisstation im LTE
EPS	Evolved Packet System
E-UTRAN	Evolved Universal Terrestrial Access Network
FDD	Frequency Division Duplex
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FSP	Spektrumanalysator
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communications
HF	Hochfrequenz
IoT	Internet of Things
IP	Internet-Protokoll
kHz	Kilohertz
logper-Antenne	logarithmisch-periodische Antenne
LPWA	Low-Power-Wide-Area
LTE	Long Term Evolution

MHz	Megahertz
MIB-NB	NarrowBand Master Information block
MIMO	Multiple Input Multiple Output
NB-IoT	Narrow-Band Internet of Things
NPBCH	NarrowBand Physical Broadcast Channel
NPDCCH	NarrowBand Physical Downlink Control Channel
NPDSCH	NarrowBand Physical Downlink Shared Channel
NPRACH	NarrowBand Physical Random Access Channel
NPSS	NarrowBand Primary Synchronization Signal
NPUSCH	NarrowBand Physical Uplink Shared Channel
NRS	NarrowBand Reference Signal
NSSS	NarrowBand Secondary Synchronization Signal
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplex
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access
PBCH	Physical Broadcast Channel
PCI	physical cell identity
PDCCH	Physical Downlink Control Channel
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel
PLMN	Public Land Mobile Network
PMD	Prüf- und Messdienst
PRACH	Physical Random Access Channel
PRB	Physical Resource Block
PSM	Power Saving Mode
PSS/SSS	Primary/ Secondary Synchronisation Signal
PUCCH	Physical Uplink Control Channel

PUSCH	Physical Uplink Shared Channel
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying Modulation
RAT	Radio Access Technology
RE	Ressourcenelement
RF	Radioframe
RS	Referenzsignal
RSA	Realtime Spektrumanalysator
RSRP	Reference Signal Received Power
RSRQ	Reference Signal Received Power
RSSI	Received Signal Strength Indicator
RTT	Round Trip Time
SC-FDMA	Single Carrier Frequency Division-Multiplex- Access
SF	Subframe
SINR	signal-to-interference-plus-noise-ratio
TDD	Time Division Duplexing
TDMA	Time Division Multiple Access
TX	Test-Transmit
UCI	Uplink Control Information
UDP	User Datagram Protocol
UE	User Equipment
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
WCDMA	Wideband Code Division Multiple Access

III. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Netzwerklösungen von GSM zu LTE	5
Abbildung 2: OFDMA und SC-FDMA.....	6
Abbildung 3: X2- und S1-Schnittstellen	9
Abbildung 4: LTE-Kanal der Telekom im Spektrum	10
Abbildung 5: Die drei NB-IoT-Betriebsarten	12
Abbildung 6: Downlink-Gitter: 12 Träger mit einem Abstand von 15	13
Abbildung 7: Beziehung zwischen Slots, Subframes und Radioframes im Downlink.....	14
Abbildung 8: NB-IoT-Signal von Vodafone im Spektrum	17
Abbildung 9: Messgeräte für die Vergleichsmessung	22
Abbildung 10: Messpunkte im Gebäude	23
Abbildung 11: NB-DESK77	26
Abbildung 12: Die Architektur des Verbindungsablaufs.....	27
Abbildung 13: Amplitudendichtespektrum mit dem RSA	30
Abbildung 14: Spektrogramm mit dem RSA.....	31
Abbildung 15: LTE-Kanal der Telekom im Spektrum	32
Abbildung 16: LTE-Kanal der Telekom im Spektrogramm	33
Abbildung 17: Halber Radioframe im LTE-Kanal der Telekom im Spektrogramm.....	33
Abbildung 18: NB-IoT-Träger der Telekom im Spektrum	34
Abbildung 19: NB-IoT-Träger der Telekom im Spektrogramm	34
Abbildung 20: LTE-Kanal von Vodafone im Spektrum	35
Abbildung 21: LTE-Kanal von Vodafone im Spektrogramm	36
Abbildung 22: Halber Radioframe im LTE-Kanal von Vodafone im Spektrogramm	36
Abbildung 23: NB-IoT-Träger von Vodafone im Spektrum	37
Abbildung 24: NB-IoT-Träger von Vodafone im Spektrogramm	38
Abbildung 25: Messaufbau im Untergeschoss	39
Abbildung 26: LTE-Signal der Deutschen Telekom mit NB-IoT-Träger im Untergeschoss	40
Abbildung 27: NB-IoT-Träger der Deutschen Telekom im Untergeschoss.....	41
Abbildung 28: LTE-Signal von Vodafone mit NB-IoT-Träger im Untergeschoss	42
Abbildung 29: NB-IoT-Träger von Vodafone im Untergeschoss	43
Abbildung 30: Messaufbau in der Schirmkabine.....	44
Abbildung 31: Messaufbau in der Schirmkabine mit geöffneter Tür.....	44
Abbildung 32: NB-IoT-Signal der Deutschen Telekom in der Schirmkabine	46
Abbildung 33: NB-IoT-Signal von Vodafone in der Schirmkabine.....	48

IV. Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: NB-IoT Frequenzbänder</i>	16
<i>Tabelle 2: Verwendete Geräte und Antennen</i>	24
<i>Tabelle 3: Gemessene Signalparameter</i>	24
<i>Tabelle 4: Mobilfunknetzabdeckung</i>	25
<i>Tabelle 5: Vergleichsmessung im Mobilfunknetz der Deutschen Telekom im Untergeschoss</i>	39
<i>Tabelle 6: Ping im Mobilfunknetz der Deutschen Telekom im Untergeschoss</i>	39
<i>Tabelle 7: Vergleichsmessung im Mobilfunknetz von Vodafone im Untergeschoss</i>	41
<i>Tabelle 8: Ping im Mobilfunknetz von Vodafone im Untergeschoss</i>	41
<i>Tabelle 9: Vergleichsmessung im Mobilfunknetz der Deutschen Telekom in der Schirmkabine</i>	45
<i>Tabelle 10: Ping im Mobilfunknetz der Deutschen Telekom in der Schirmkabine</i>	45
<i>Tabelle 11: Vergleichsmessung im Mobilfunknetz von Vodafone in der Schirmkabine</i>	45
<i>Tabelle 12: Ping im Mobilfunknetz von Vodafone in der Schirmkabine</i>	45
<i>Tabelle 13: Vergleichsmessung im Mobilfunknetz von</i>	47
<i>Tabelle 14: Ping im Mobilfunknetz von Vodafone</i>	47
<i>Tabelle 15: Vergleichsmessung im Mobilfunknetz von</i>	47
<i>Tabelle 16: Ping im Mobilfunknetz von Vodafone</i>	47

V. Literaturverzeichnis

- [1] „Vodafone IoT-Geräte,“ Vodafone, 02 24 2020. [Online]. Available: <https://www.vodafone.de/business/featured/technologie/iot-geraete-diese-arten-gibt-es-und-so-funktionieren-sie/>. [Zugriff am 19 10 2020].
- [2] M. Nohrborg, 3GPP, [Online]. Available: <https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>. [Zugriff am 09 02 2021].
- [3] Bundesamt für Strahlenschutz, „Bundesamt für Strahlenschutz, elektromagnetische Felder, LTE - Long Term Evolution,“ 07 06 2019. [Online]. Available: <https://www.bfs.de/DE/themen/emf/kompetenzzentrum/mobilfunk/basiswissen/lte.html>. [Zugriff am 20 01 2021].
- [4] M. Sauter, Grundkurs Mobile Kommunikationssysteme: LTE-Advanced Pro, UMTS, HSPA, GSM, GPRS, Wireless LAN und Bluetooth, Köln: Springer Vieweg, 2018.
- [5] T. Hasenpusch, Skript zum Lehrgang: Teil 1: Grundlagen Digitale Übertragung, München: Bundesnetzagentur, 2020.
- [6] J. Riedel, „NB-IoT in der Praxis Ein Anwenderbericht,“ Muldenhammer, 2019.
- [7] Rohde&Schwarz, „Narrowband Internet of Things Measurements 1MA296,“ Rohde&Schwarz, 02 11 2019. [Online]. Available: https://www.rohde-schwarz.com/ca/applications/narrowband-internet-of-things-measurements-application-note_56280-449089.html. [Zugriff am 11 02 2021].
- [8] Elektronik Kompendium, „Elektronik Kompendium,“ 18 01 2021. [Online]. Available: <https://www.elektronik-kompendium.de/sites/kom/2203161.htm>. [Zugriff am 18 01 2021].
- [9] 3GPP, ETSI TS 136 214 V16.1.0, 2020.
- [10] J. Schlien und D. Raddino, „Narrowband Internet of Things Whitepaper,“ Rohde&Schwarz, [Online]. Available: https://scdn.rohde-schwarz.com/ur/pws/dl_downloads/dl_application/application_notes/1ma266/1MA266_0e_NB_IoT.pdf. [Zugriff am 11 06 2021].
- [11] Y. Wei, „Automatic Distributing Schemes of Physical Cell Identity for Self-Organizing Networks,“ Hindawi Publishing Corporation, 16 09 2012. [Online]. Available: <https://journals.sagepub.com/doi/pdf/10.1155/2012/973713>. [Zugriff am 11 06 2021].
- [12] Exelonix, [Online]. Available: <https://exelonix.atlassian.net/wiki/spaces/TD/pages/402554916/NB+DESK+Ciphering>. [Zugriff am 22 06 2021].
- [13] C. Rauscher, Grundlagen der Spektrumanalyse, München: Rohde&Schwarz, 2011.
- [14] T. Hasenpusch, Skript zum Lehrgang: Digitale Übertragung Teil 2: Systeme, München: Bundesnetzagentur, 2019.

VI. Anhangsverzeichnis

A.	Vorgehensweise zur NB-IoT-Störungsbearbeitung mit dem NB-DESK77.....	57
A.1	<i>Kurze Einleitung.....</i>	58
A.2	<i>Kurzanleitung für den NB-DESK77.....</i>	58
A.2.1	<i>Mit dem Mobilfunknetz verbinden und trennen</i>	59
A.2.2	<i>Test-Transmit</i>	59
A.2.3	<i>Test-Transmit-Daten abrufen.....</i>	60
A.2.4	<i>Ping-Test.....</i>	61
A.2.5	<i>Troubleshooting</i>	61
A.3	<i>Hintergrundinformationen.....</i>	63
A.3.1	<i>Einleitung.....</i>	63
A.3.2	<i>Gerätebeschreibung.....</i>	64
A.4	<i>Bedienungsanleitung für den NB-DESK77</i>	67
A.5	<i>Grafana</i>	74
A.6	<i>Anwendung in der Praxis.....</i>	75
B.	Schulungsunterlage NB-IoT für das Skript zum Lehrgang: Digitale Übertragung Teil 2 Systeme	78
B.1	<i>NarrowBand Internet of Things.....</i>	78
B.1.1	<i>Einführung.....</i>	78
B.1.2	<i>HF-Eigenschaften.....</i>	78
B.1.3	<i>Signalstruktur</i>	79
B.1.3.1	<i>Downlink.....</i>	80
B.1.3.2	<i>Uplink.....</i>	82
B.1.4	<i>Anmeldung in NB-IoT</i>	83
B.1.5	<i>HF-Spektrum</i>	84

A. Vorgehensweise zur NB-IoT-Störungsbearbeitung mit dem NB-DESK77



A.1 Kurze Einleitung

Dieses Handlungsskript dient dem Prüf- und Messdienst (PMD) der Bundesnetzagentur (BNetzA) bei der Störungsbearbeitung im Bereich NarrowBand Internet of Things (NB-IoT).

Zum Anfang ist eine Kurzanleitung aufgeführt. Dort wird beschrieben, wie NB-IoT mit dem NB-DESK77 zu messen ist. Es soll dem Messbeamten des PMDs die Möglichkeit geben, das Gerät schnell einsatzbereit zu machen und die Überprüfung zu starten.

Sollte die Kurzanleitung nicht zur Störungsbearbeitung ausreichen, so werden in den nachfolgenden Kapiteln das Troubleshooting und weitere Hintergrundinformationen zu dem NB-DESK77 und NB-IoT erläutert.

A.2 Kurzanleitung für den NB-DESK77

Bevor der NB-DESK77 für die Störungsbearbeitung eingesetzt wird, sollte überprüft werden, ob die richtige SIM-Karte eingelegt ist. Falls nicht bekannt ist, welche SIM-Karte eingesteckt ist, muss das Gerät, wie nachfolgend beschrieben, geöffnet werden. Es ist von außen nicht einzusehen, welche SIM-Karte eingelegt ist. Falls eine SIM-Karte eines anderen Mobilfunknetzanbieters eingelegt ist, so ist diese zu wechseln.

- Antenne demontieren.
- **Wichtig:** Bevor das Plexiglas aufgeschoben wird, **müssen die vier Knöpfe hochgezogen werden** (Die Knöpfe sind in Abbildung A.1 rot markiert), da sonst Schäden an den Tastern entstehen können.
- Plexiglaskasten aufschieben (eventuell vorsichtig mit einem Schraubendreher das Plexiglas ein wenig aufhebeln, da es anfangs sehr fest am Gehäuse sitzt).
- Die vier Schrauben lösen und die Platine abnehmen.
- Auf der Rückseite der Platine befindet sich der SIM-Karten-Slot.
- SIM-Karte austauschen.
- Das Gerät in umgekehrter Reihenfolge zusammensetzen. Dabei besonders auf das Flachbandkabel achten.

Ist die SIM-Karte des zu überprüfenden Mobilfunknetzanbieters eingelegt, so kann mit einem Schiebeschalter an der vorderen Seite des Gerätes der NB-DESK77 gestartet werden.

Während das Modem initialisiert, kann es nicht bedient werden. Bitte warten, bis der Status „detached“ auf dem ePaper-Display angezeigt wird.

A.2.1 Mit dem Mobilfunknetz verbinden und trennen

- Aus dem Hauptmenü wird der Menüpunkt „Attach/detach“ aufgerufen.
- Unter diesem Menüpunkt werden das Netzwerk und die Netzwerktechnologie ausgewählt. Dafür werden mit dem 1. und 2. Knopf die Spalten durchgeblättert, bis die gewünschten Einstellungen zutreffen.
 - Vodafone: PLMN: VFLPWA20
RAT: NB-IoT
 - Telekom: PLMN: 1NCE 08
RAT: NB-IoT
- Mit „Attach“ wird der Verbindungsaufbau zum Mobilfunknetz gestartet.
 - Während des Verbindungsaufbaus, kann das Gerät nicht bedient werden. Bitte warten, bis der Status „attached“ auf dem ePaper-Display angezeigt wird.
- Weitere Funktionen sind nur möglich, wenn eine Verbindung zum Mobilfunknetzwerk aufgebaut wurde.
- Über die zwei Pfeile „<<“ kann in das Hauptmenü zurückgekehrt werden.

Soll die bestehende Verbindung wieder getrennt werden, so ist der Menüpunkt „Attach/detach“ im Hauptmenü wieder aufzurufen, sofern dieser Untermenüpunkt verlassen wurde.

- Mit „Detach“ wird die Verbindung getrennt.
 - Während der Verbindungstrennung, kann das Gerät nicht bedient werden. Bitte warten, bis der Status „detached“ auf dem ePaper-Display angezeigt wird.

A.2.2 Test-Transmit

- Im Hauptmenü wird der Punkt „Transmit“ aufgerufen.
- Im Untermenü Transmit kann der Modus „manual“ und „auto“ ausgewählt werden, in dem mit dem 1. Knopf die Spalte „Mode“ durchgeblättert wird.

- Mit „manual“ wird der Test-Transmit einmalig durchgeführt indem man „Start TX“ betätigt. Anschließend werden die Signalparameter übermittelt.
- Wird „auto“ ausgewählt, so befindet sich das Gerät im automatischen Modus. Hier kann zusätzlich in der Spalte „Int.“ ein Intervall, in dem gesendet werden soll, ausgewählt werden. Mit dem 2. Knopf lässt sich die Intervallzeit auf 2, 5, 15, 30 oder 60 Minuten einstellen. Der automatische Modus wird mit „Start auto TX“ gestartet.
- Während des Test-Transmits, kann das Gerät nicht bedient werden. Bitte warten, bis der Status „tx ok“ auf dem ePaper-Display angezeigt wird.
- Über die zwei Pfeile „<<“ kann in das Hauptmenü zurückgekehrt werden.

A.2.3 Test-Transmit-Daten abrufen

- Die beim Test-Transmit übertragenen Daten, dies sind die gemessenen Signalparameter, können direkt mit dem NB-DESK77 abgerufen werden oder über die Internetseite Grafana an einem Computer (Grafana wird in der nachfolgenden ausführlichen Anleitung beschrieben).
- Sollen die Daten direkt mit dem NB-DESK77 ausgelesen werden, so wird im Hauptmenü die zweite Seite über die Taste „1/2“ aufgerufen.
- Über den Menüpunkt „Show UE stats“ wird ein Untermenü aufgerufen, in dem sich über „Update values“ die aktuellen Werte des Test-Transmit abrufen lassen.
 - Während des Vorgangs, kann das Gerät nicht bedient werden. Bitte warten, bis die aktuellen Werte auf dem ePaper-Display angezeigt werden.
- Über den 3. Knopf lassen sich vier Seiten durchblättern, auf denen die aktuellen Werte des Test-Transmits dargestellt werden, die für eine Beurteilung der Verbindungsqualität notwendig sind.

- Auf dem NB-DESK77 kann immer nur der aktuelle Test-Transmit angezeigt werden. Für einen Vergleich aus mehreren Test-Transmits, beispielsweise im automatischen Modus mit einem Intervall von 5 Minuten, lässt sich der Verlauf in Grafana anzeigen.
- Über die zwei Pfeile „<<“ kann in das Hauptmenü zurückgekehrt werden.

A.2.4 Ping-Test

- Aus dem Hauptmenü wird der Menüpunkt „Ping“ aufgerufen.
- In diesem Untermenü ist es möglich, in der ersten Spalte zwischen vier vordefinierten IP-Adressen zu wählen.
 - 173.212.192.245
 - 213.136.85.114
 - 8.8.8.8
 - 8.8.8.42 (Diese IP-Adresse ist nicht erreichbar. Sie dient dazu, die Pingfunktion zu testen)
- Der Netzwerkping wird über „Start ping“ durchgeführt.
 - Während des Pings, kann das Gerät nicht bedient werden. Bitte warten, bis der Status „finished“ auf dem ePaper-Display angezeigt wird.
- Es kann abgelesen werden, wie viele der vier ausgesendeten Testdatenpakete auch wieder empfangen wurden und es wird die durchschnittliche Zeit ausgegeben, in der diese Pakete unterwegs waren.
- Der Errorcode „IP 0“ heißt, dass der Ping erfolgreich durchgeführt wurde.
- Über die zwei Pfeile „<<“ kann in das Hauptmenü zurückgekehrt werden.

A.2.5 Troubleshooting

Sollte der Fall eintreten, dass Sie einen völlig neuen NB-DESK77 bekommen, so ist zu beachten, dass die vorkonfigurierten PLMN nicht die richtigen sein könnten. Dafür ist im Haupt-

menü der Punkt „Attach/detach“ aufzurufen und zu überprüfen, ob sich eine Mobilfunkverbindung aufbauen lässt. Ist es nicht möglich eine Verbindung aufzubauen, so könnte das an dem falschen PLMN mit dem nicht übereinstimmenden APN liegen.

Wird unter dem Punkt „Attach/detach“ die PLMN für Vodafone „VF Live 1“, „VF Live 2“ und „VF Test“ angezeigt und für die Telekom „Tele.DE“ und „Tele.PL“, so handelt es sich um die Standardkonfiguration des Hardwareherstellers. Diese vorkonfigurierten PLMN stimmen mit den PLMN der SIM-Karten, die die BNetzA verwendet, nicht überein.

Über den NB-DESK77 können keine Eingaben vorgenommen werden. Es muss im Python-Script der PLMN hinzugefügt und der APN konfiguriert werden. Für Vodafone müssen die PLMN „VFLPWA20“ und „VFLPWA08“ hinzugefügt werden. Hierfür wird der APN „lpwa.vodafone.com“ konfiguriert. Für die Telekom Mobilfunkverbindung werden „1NCE20“ und „1NCE08“ mit dem APN „iot.1nce.net“ in die Liste aufgenommen. Die Zahlen 20 und 08 in den PLMN-Namen stehen für das Band 20 und das Band 8, um die Auswahl bei den Messungen mit dem NB-DESK77 zu erleichtern.

A.3 Hintergrundinformationen

Nachdem bislang nur ein kurzer Einblick in die Funktionsweise des NB-DESK77 gegeben wurde, um dem Messbeamten des PMDs eine schnelle Bearbeitung der Störung zu ermöglichen, wird nachfolgend genauer auf das Gerät NB-DESK77, sowie auf die Bedienung und Funktionsweise eingegangen. Anschließend wird erläutert, wie Grafana zu verwenden ist. Abschließend wird der Bezug zur Praxis hergestellt.

A.3.1 Einleitung

Das NarrowBand Internet of Things (NB-IoT) ist eine LPWA-Übertragungstechnik (Low Power Wide Area), die dafür ausgelegt ist eine nur kleine Datenmenge zu übertragen. NB-IoT zeichnet sich durch zuverlässige Übertragung, geringe Stück- und Betriebskosten und hohe Effizienz aus. Bei NB-IoT liegt der Fokus auf niedrigen Datenraten und einer gering benötigten Bandbreite von 180 kHz. Diese Parameter sind ideal für einfache, statische Sensoren-Anwendungen geeignet, wie z.B. Smart-Meter, Landwirtschaft oder Smart-Home. Durch die geringe Anzahl an Aussendungen eines Moduls, kann eine Akkulaufzeit von bis zu zehn Jahren erreicht werden.

NB-IoT ist eine der vielversprechendsten Übertragungstechniken im Bereich Internet of Things. Aus diesem Grund wird damit gerechnet, dass sich die Anzahl der NB-IoT-Module zukünftig stetig erhöht. Mit der voraussichtlichen Zunahme der Geräte, steigt wahrscheinlich auch die Anzahl an Störungen in Verbindung mit NB-IoT. Aus diesem Grund ist es für die Bundesnetzagentur (BNetzA) von Interesse, wie die Störungsbearbeitung im Zusammenhang mit NB-IoT aussehen kann.

Dieses Skript soll das Handlungsskript für die Störungsbearbeitung der BNetzA im Bereich NB-IoT darstellen. Bei der NB-IoT-Störungsbearbeitung kommt dabei der NB-DESK77 von exelonix zum Einsatz. Dieses Skript stellt eine Bedienungsanleitung für den NB-DESK77 dar. Zuerst wird das Gerät erklärt und nachfolgend wird beschrieben, wie es bei der Störungsbearbeitung zu bedienen ist. Außerdem wird darauf eingegangen, wie die übermittelten Daten aufgerufen und ausgelesen werden können, damit eine richtige Beurteilung durch die Messbeamten des Prüf- und Messdienstes abgegeben werden kann. Die genaueren technischen Eigenschaften von NB-IoT sind dem Skript Digitale Übertragung Teil 2: Systeme in dem Kapitel NB-IoT zu entnehmen.

A.3.2 Gerätebeschreibung

Bei dem NB-IoT-Messmodul handelt es sich um den NB-DESK77 Rev.1.0 des Herstellers exelonix. Das Gerät wird in Abbildung A.1 dargestellt. Der NB-DESK77 dient zum Senden und Empfangen von NB-IoT-Daten. Zusätzlich beherrscht das Modul den Standard Cat.M1, der hier jedoch nicht weiter behandelt werden soll. Dabei steuert ein STM32-Microcontroller das gesamte Board. Bei dem NB-IoT-Modem handelt es sich um ein Quectel BG-77-Modem. Über einen SMA-Stecker ist eine Antenne mit dem Modul verbunden. Mit einem ePaper-Display und 4 Tasten (weiße Kunststoffschrauben, in der Abbildung A.1 mit rotem Pfeil gekennzeichnet) wird das Modul bedient. Ein LiPo-Akku wird zur Energieversorgung des Gerätes verwendet.



Abbildung A.1: NB-DESK77 von exelonix

In der Abbildung A.2 wird die NB-DESK77-Architektur des Verbindungsablaufs dargestellt.

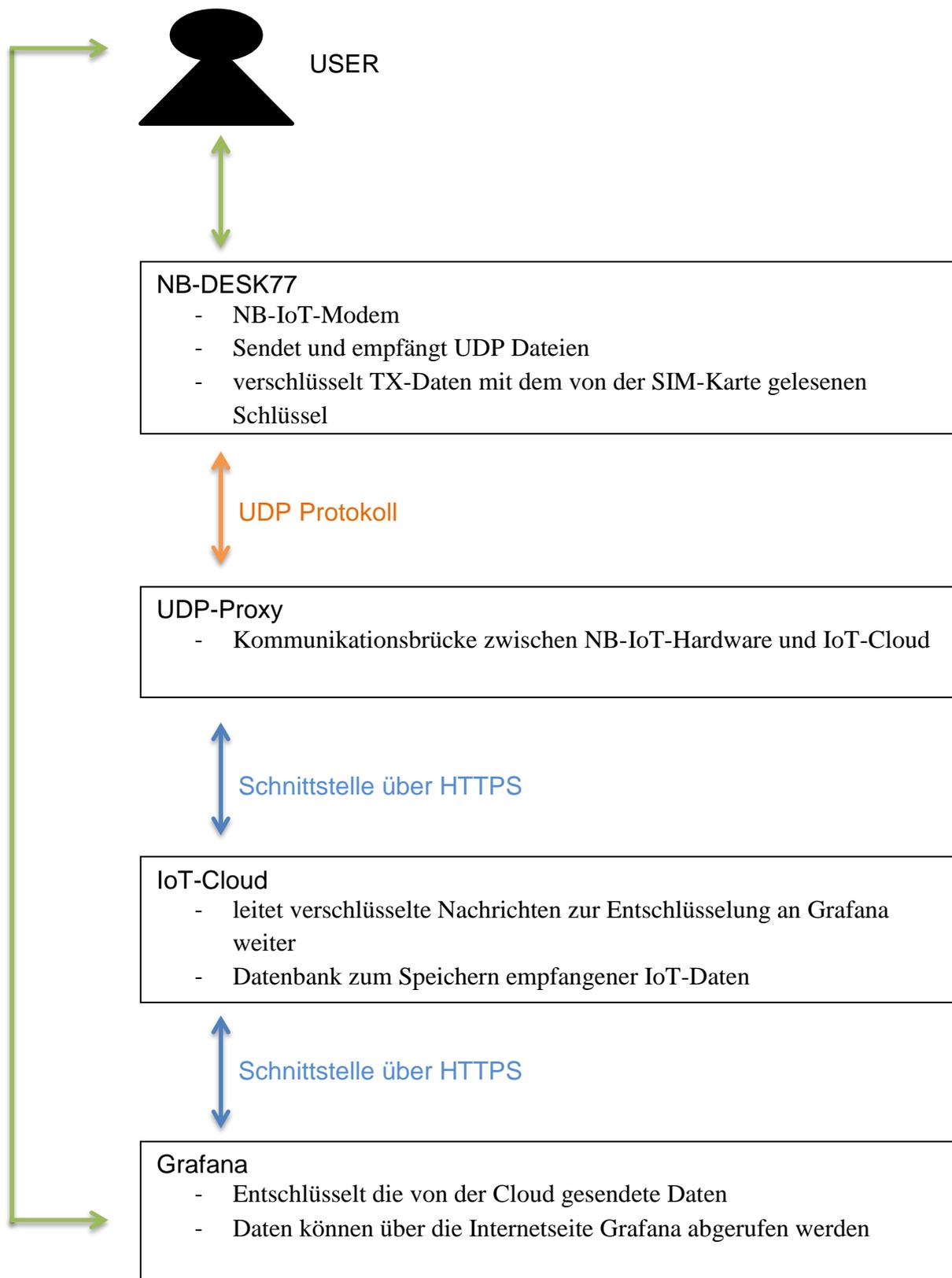


Abbildung A.2: Die Architektur des Verbindungsaufbaus

Quelle: [12] und eigene Bearbeitung

Das NB-IoT-Modem wird für die Verbindung zum NB-IoT-Netzwerk verwendet. Außerdem ist es für das Senden und Empfangen der Daten verantwortlich. Wenn Zellen-Informationen an die Daten angehängt sind, ist das Modem in der Lage, diese auszulesen. Mit einem Test-Transmit lassen sich die TX-Daten übertragen.

Die vom NB-DESK77 gesendeten Daten werden via UDP-Protokoll (User Datagram Protocol) an einen UDP-Proxy gesendet. Der Proxy dient als Kommunikationsbrücke zwischen dem NB-DESK77 und einer IoT-Cloud. Der Proxy wird benötigt, da die IoT-Cloud die UDP-Daten nicht verarbeiten kann. Der Proxy konvertiert die UDP-Daten in das Datenformat JavaScript Object Notation, das die Cloud unterstützt und überträgt die Daten über das Protokoll HTTPS an die IoT-Cloud.

Die übertragenen Daten werden in einer IoT-Cloud gespeichert. Die Cloud dient als Datenbank, in der die Daten durch die eindeutige Geräte-ID strukturiert gespeichert werden. Die Cloud übernimmt die Aufgaben der Speicherung, Verwaltung und Bereitstellung der IoT-Daten.

Die übertragenen Testdaten und die damit übermittelten Signalparameter können über die Internetseite Grafana aufgerufen und ausgelesen werden. Für die BNetzA wird ein eigenständiger Account bei Grafana angelegt. Die dazugehörige E-Mail-Adresse ist bei dem Hardwarehersteller für den NB-DESK77 angemeldet. Es ist nicht ohne weiteres möglich, sich ein eigenständiges Konto zu erstellen und dieses mit dem NB-DESK77 zu verknüpfen. Die Anmeldedaten sind auf Anfrage eines Messbeamten des PMDs erhältlich.

A.4 Bedienungsanleitung für den NB-DESK77

Es ist vorab zu erwähnen, dass der NB-DESK77 beim Booten (Hochfahren), Initialisieren (Ladevorgang) oder der Durchführung von Datenübertragungen (Verbindungsauf- und -abbau, Test-Transmit, Pingtest) nicht bedient werden kann. Es muss gewartet werden, bis der aktuelle Prozess abgeschlossen ist, um weitere Bedienbefehle einzugeben.

Um mit dem NB-DESK77 erstmalig Messungen durchführen zu können, müssen einige Vorkehrungen getroffen und Konfigurationen durchgeführt werden. Zu Beginn wird die Antenne des NB-DESK77 demontiert, um das Gehäuse aus Plexiglas entfernen zu können. Dabei muss darauf geachtet werden, dass die vier Knöpfe im Gehäuse hoch gezogen werden, da sonst Schäden beim Aufschieben des Plexiglas an den Tastern entstehen können. Es werden die vier Schrauben gelöst, damit die Platine aus dem Kunststoffgehäuse herausgenommen werden kann. Anschließend wird eine SIM-Karte, die vorher von 2FF (Mini-SIM) auf 3FF (Micro-SIM) verkleinert wurde, eingesteckt. Der SIM-Kartenslot ist in der Abbildung A.3 mit einem roten Pfeil gekennzeichnet. Das Gehäuse wird in umgekehrter Reihenfolge wieder vollständig verschlossen und die Antenne wieder montiert. Gestartet wird das Gerät mit einem Schiebeschalter an der Vorderseite des Gehäuses.



Abbildung A.3: SIM-Kartenslot auf der Unterseite der Platine

In der Abbildung A.4 ist das Hauptmenü des NB-DESK77 zu sehen. Es ist das ePaper-Display, das auf den LiPo-Akku geklebt wurde, und die vier Knöpfe für die Bedienung sind zu erkennen. Im Menü kann man über die Knöpfe zu den Unterpunkten Attach/Detach, Transmit und Ping kommen. Über den untersten Knopf lässt sich eine zweite Seite aufrufen, auf der man sich die Messdaten des Gerätes anzeigen lassen kann.



Abbildung A.4: NB-DESK77 Hauptmenü

Unter dem Menüpunkt Attach/Detach lässt sich eine Verbindung zum Mobilfunknetz aufbauen. Hierfür müssen die PLMN und die RAT richtig ausgewählt werden, um sich mit dem verfügbaren Mobilfunknetz zu verbinden. In der Abbildung A.5 war die SIM-Karte von 1NCE, die das Mobilfunknetz der Deutschen Telekom verwendet, eingelegt. Die Deutsche Telekom betreibt NB-IoT im Band 8. Es ist an dem Status „detached“ (dt. getrennt) zu erkennen, dass noch keine Mobilfunkverbindung aufgebaut wurde. Mit dem Knopf Attach wird mit dem Verbindungsaufbau begonnen. Um mit den jeweiligen SIM-Karten erfolgreich eine NB-IoT Verbindung aufzubauen, muss für die 1NCE-SIM-Karte der PLMN „1NCE 08“ und die RAT „NB-IoT“ eingestellt werden. Für eine NB-IoT Verbindung in das Vodafone Mobilfunknetz muss der PLMN „VFLPWA 20“ und die RAT „NB-IoT“ verwendet werden.



Abbildung A.5: NB-DESK77 Verbindungsaufbau

Über die PLMN-Kennung (Public Land Mobile Network) wird der Netzbetreiber dem Gerät hinzugefügt. Hinter der PLMN-Kennung steckt der APN (Access Point Name), der den Zugriff zum gewollten Netzwerk ermöglicht. Über die RAT (Radio Access Technology) kann die Zugriffsnetzwerktechnik ausgewählt werden. Bei dem verwendeten NB-DESK77 kann die RAT auf NB-IoT oder Cat.M1 eingestellt werden.

Zusätzlich beherrscht der NB-DESK77 den Standard Cat.M1. Die theoretischen Grundlagen werden hier nicht weiter ausgeführt, sondern nur die vorzunehmenden Einstellungen beschrieben. Für eine erfolgreiche Cat.M1 Verbindung in das Mobilfunknetz der Deutschen Telekom der PLMN „1NCE 20“ und die RAT „Cat.M1“ einzustellen. Für eine Vodafone Mobilfunkverbindung wird der PLMN „VFLPWA 20“ und die RAT „Cat.M1“ gewählt.

In der Abbildung A.6 ist nun zu erkennen, dass sich der NB-DESK77 erfolgreich über den PLMN „1NCE 08“ und RAT „NB-IoT“ mit dem Mobilfunknetz der Deutschen Telekom im Band 8 verbinden konnte. Dies ist am Status „attached“ (dt. verbunden) zu erkennen. Nachdem erfolgreich eine Mobilfunkverbindung aufgebaut werden konnte, ist es möglich einen Transmittest durchzuführen. Dabei wird eine Verbindung zu einer Cloud aufgebaut und es können Testdatenpakete versendet werden.



Abbildung A.6: NB-DESK77 erfolgreiche Mobilfunkverbindung

Der in Abbildung A.7 gezeigte Transmittest wurde manuell durchgeführt. Es kann aber auch ein automatischer Transmissionsmodus eingestellt werden, so dass der NB-DESK77 das Senden alle 1, 5, 10, 15 oder 60 Minuten wiederholt. Der automatische Transmissionsmodus ermöglicht Langzeitüberprüfungen. Mit Hilfe des automatischen Transmissionsmodus kann der PMD bei der Störungsbearbeitung bei einem Kunden überprüfen, ob sich über einen längeren Zeitraum eine NB-IoT-Verbindung zum Mobilfunknetz herstellen lässt. Wenn sich über den Zeitraum wiederholt eine erfolgreiche Verbindung aufbauen lässt, so



Abbildung A.7: NB-DESK77 Transmittest

ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass die Versorgungsfeldstärke des NB-IoT-Signals ausreicht und es sich ggf. um eine defekte NB-IoT-Hardware des Kunden handelt.

Ist es dem NB-DESK77 auch wiederholt nicht möglich eine erfolgreiche Mobilfunkverbindung aufzubauen, so ist der betroffene Bereich schlecht mit NB-IoT versorgt und für die Verwendung von NB-IoT-Modulen ungeeignet.

Ist eine erfolgreiche Mobilfunkverbindung möglich, dann werden bei dem Transmittest Testdatenpakete über die Mobilfunkverbindung versendet und an eine Cloud übermittelt. Die gesendeten Daten können in der Cloud ausgelesen werden. Mit der Internetseite des Hardwareherstellers „Grafana“ ist es möglich, die übermittelten Signalparameter mit einem Computer abzurufen. Dies ist in der Abbildung A.8 beispielhaft dargestellt. Mit Grafana lassen sich unter anderem das Datum, die Uhrzeit der Übertragung, der aktuelle Batteriestand, den PLMN, die Cell ID, die physical Cell ID, das verwendete Frequenzband, den RSSI, die RSRP, die RSRQ, das SINR und den CE-Level auslesen.

Time	IMEI	Battery	PLMN	Cell Id	Physical Cell Id	EARFCN
2021-05-26 13:38:20	866349040036695	4.09 V	26201	34619652	472	3740

Tracking Area Code	Band	RSSI	RSRP	RSRQ	SINR	PSM TAU	PSM ACT	celevel	ul
56090	8	-58 dBm	-69 dBm	-10 dB	-17 dB	3600	60	0	0

Abbildung A.8: Signalparameter bei Grafana abgerufen

So lässt sich nicht nur direkt vor Ort, vorausgesetzt der Computer selbst hat eine Mobilfunkverbindung, eine schnelle Beurteilung abgeben, sondern es können auch aus der Entfernung, beispielsweise in einem Büro der BNetzA, die Daten beurteilt werden. Bei dem automatischen Transmissionsmodus werden die Daten bei jedem Transmit-Test in der Cloud gespeichert. Dadurch kann auch die Verbindung über einen längeren Zeitraum kontrolliert und dokumentiert werden. Die IP-Adresse für den Transmit-Test ist dabei im Gerät vorkonfiguriert und kann nicht ohne weiteres geändert oder eine neue IP-Adresse hinzugefügt werden.

Die übermittelten Signalparameter müssen nicht zwangsläufig über die Cloud abgerufen werden. Sie können auch direkt auf dem NB-DESK77 betrachtet werden. Das bietet den Vorteil einer schnellen Beurteilung. Dafür muss die zweite Seite im Hauptmenü und anschließend der Punkt „Show UE stats“ aufgerufen werden. Mit „Update values“ können die aktuellen Werte bezogen werden. Die wichtigsten Signalparameter können auf dem ePaper-Display auf vier Seiten abgerufen werden. Beispielhaft wird in Abbildung A.9 die Seite 2 dargestellt, auf der die RSSI, SINR, PLMN und das Band angezeigt werden. Ein Verlauf der Signalparameter wird auf dem NB-DESK77 nicht gespeichert. Es kann immer nur der aktuelle Stand der Werte dargestellt werden. Für den Verlauf der Werte muss die Cloud aufgerufen werden.

Zur weiteren Überprüfung und Beurteilung der Mobilfunkverbindung ist es möglich, dass ein Ping versendet wird. Die Ping-Übertragung ist in der Abbildung A.10 ersichtlich. Der Ping kann an eine von vier vorkonfigurierten IP-Adressen gesendet werden. Hierbei wird der Ping an die IP-Adresse 173.212.191.24 gesendet. Dabei ist zu erwähnen, dass die IP-Adresse 8.8.8.42 nicht zu erreichen ist, um auch das Verhalten im Fehlerfall zu überprüfen.



Abbildung A.9: Signalparameter mit dem NB-DESK77 abgerufen



Abbildung A.10: NB-DESK77 Ping-Übertragung

War der Ping Versuch erfolgreich, so wird auf dem ePaper-Display der Status „finished“ angezeigt und es kann die Anzahl der erfolgreich empfangenen Ping-Pakete und die durchschnittliche Round Trip Time (RTT avg.) abgelesen werden. In dem gezeigten Beispielping in Abbildung A.11 ist die Anzahl der empfangenen Ping-Pakete 4 von 4. Jedes der ausgesendeten Pakete wurde auch wieder empfangen. Die durchschnittliche RTT der 4 Pakete liegt dabei bei 694 ms. Der Error Code „IP 0“ steht dabei für die erfolgreiche Übertragung.

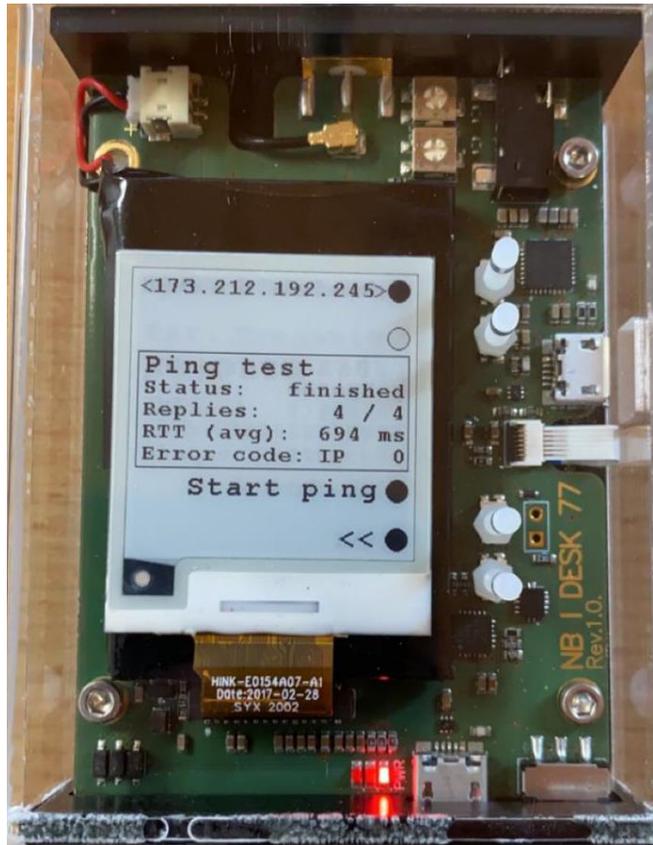


Abbildung A.11: NB-DESK77 erfolgreiche Ping-Übertragung

A.5 Grafana

Über den Link „<https://obre.exelonix.com/login>“ wird die Seite für die Anmeldung aufgerufen. Über „Mit Exelonix anmelden“ gelangt man zur Anmeldung und Autorisierung. Die Anmeldedaten werden bei der Ausgabe des NB-DESK77 in den Unterlagen übergeben.

Sind die Anmeldedaten richtig eingegeben, wird die Grafana-Seite der Bundesnetzagentur aufgerufen. Dort muss zunächst der verwendete NB-DESK77 ausgewählt werden. Dies geschieht über den Button, auf den der rote Pfeil zeigt, in der Abbildung A.12. Auf der

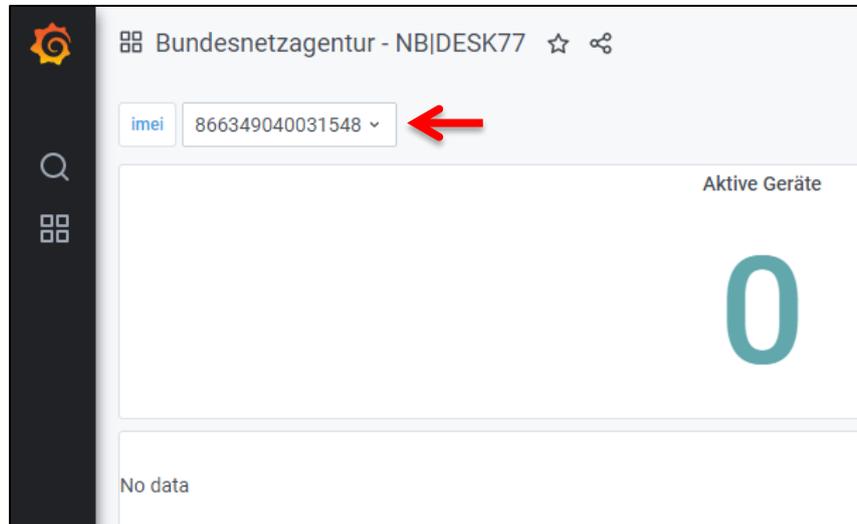


Abbildung A.12: NB-DESK77 Auswahl bei Grafana

Internetseite befindet sich dieser Button in der linken oberen Ecke. Die Nummer des verwendeten NB-DESK77 ist den Unterlagen zu entnehmen.

Anschließend kann man über den Button, auf den in der Abbildung A.13 der grüne Pfeil zeigt, den Zeitraum, in dem gemessen wurde, einstellen. Auf der Internetseite befindet sich dieser Button in der rechten oberen Ecke.

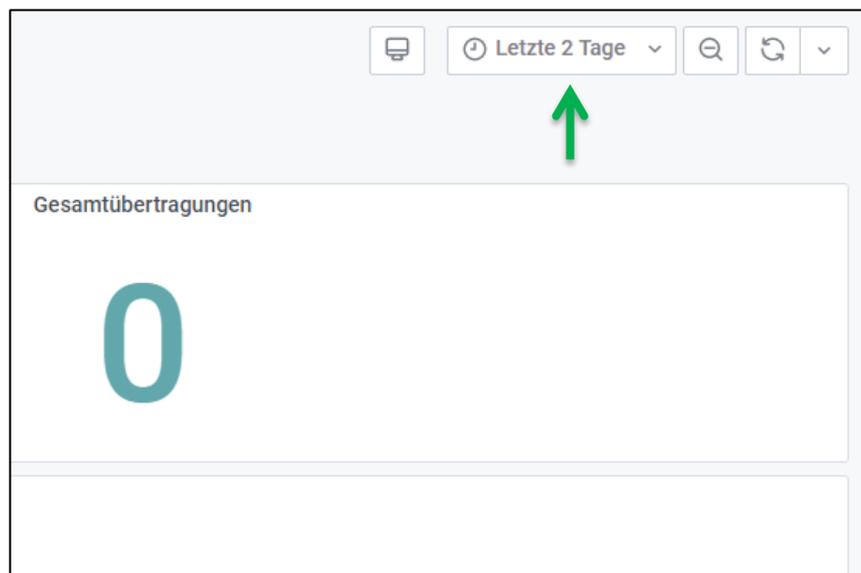


Abbildung A.13: Zeitraumauswahl bei Grafana

Betätigt man auf der Tastatur nun die Taste „v“ für View, so wird eine Gesamtansicht der erzielten Messdaten aufgerufen. Die Gesamtansicht ist in der Abbildung A.14 dargestellt.

Time	IMEI	Battery	PLMN	Cell Id	Physical Cell Id	EARFCN
2021-05-26 13:38:20	866349040036695	4.09 V	26201	34619652	472	3740

Tracking Area Code	Band	RSSI	RSRP	RSRQ	SINR	PSM TAU	PSM ACT	celevel	ul
56090	8	-58 dBm	-69 dBm	-10 dB	-17 dB	3600	60	0	0

Abbildung A.14: Gesamtansicht der Messdaten bei Grafana

A.6 Anwendung in der Praxis

Nachdem der Aufbau, Ablauf und die Bedienung des NB-DESK77 erläutert wurde, werden praktische Fälle bei der Störungsbearbeitung noch einmal aufgegriffen.

Meldet ein Kunde bei der BNetzA eine Störung seines NB-IoT-Moduls, so kann dies mit dem NB-DESK77 überprüft werden.

Fall 1:

Am gestörten NB-IoT-Modul vor Ort kann mit dem NB-DESK77 zunächst versucht werden eine Verbindung zum Mobilfunknetz herzustellen. Ist es nicht möglich mit dem NB-DESK77 eine Mobilfunkverbindung aufzubauen, so ist der Standort nicht mit NB-IoT versorgt und für das Betreiben eines NB-IoT-Moduls ungeeignet.

Lässt sich eine Verbindung in das Mobilfunknetz aufbauen, so kann über die Test-Transmission ein Test-Datenpaket abgesendet werden. Über die Cloud oder den NB-DESK77 direkt kann der Messbeamte anhand der Signalparameter den Standort beurteilen und die Verbindungsqualität einschätzen.

Zusätzlich kann ein Ping-Test durchgeführt werden, der anhand der erfolgreich gesendeten und empfangenen Pakete und der Round Trip Time (RTT) weitere Auskunft über die Qualität der Verbindung geben kann.

Fall 2:

Ist es nicht möglich mit dem NB-DESK77 eine Mobilfunkverbindung aufzubauen, so kann standardmäßig ein Spektrumanalysator zur Überprüfung herangezogen werden. Mit dem Spektrumanalysator kann das Frequenzspektrum auf eine mögliche Störung durch eine andere Störquelle überprüft werden.

Fall 3:

Ist der Fall 1 durchgeführt und die drei Punkte

- Verbindung zum Mobilfunknetz
- Test-Transmission mit Beurteilung der Signalparameter
- der Ping-Test

sind abgearbeitet worden, so liegt es wahrscheinlich nicht an dem NB-IoT-Signal, sondern an einer defekten Hardware des Kunden.

Um dies noch einmal genauer zu überprüfen, bietet sich hier der automatische Transmissionsmodus an. Der NB-DESK77 wird am zu überprüfenden Ort aufgestellt und die automatische Transmission wird auf 2, 5, 10, 15 oder 60 Minuten eingestellt. Durch eine Akkulaufzeit von einem Jahr, laut Hersteller, ist es möglich, dass der Ort für einen längeren Zeitraum überwacht werden kann. Es kann beispielsweise eine 24 h Langzeitüberprüfung durchgeführt werden. Die übermittelten Signalparameter lassen sich dann mit Grafana aufrufen und auslesen.

Der Messbeamte kann so eine Einschätzung abgeben, ob das NB-IoT-Signal das Problem ist, oder ob es sich um eine defekte Hardware des NB-IoT-Moduls des Kunden handelt.

Um dem Messbeamten die Einschätzung der Verbindungsqualität zu erleichtern, sind in der nachfolgenden Tabelle A.1 Richtwerte aufgelistet. Diese Werte wurden bei einer Testmessung in der Dienststelle der BNetzA in Hannover detektiert. Die Messwerte wurden in einem gut versorgten Gebiet aufgenommen und zeigen damit gute Ergebnisse auf.

Tabelle A.1: Gute Messergebnisse einer Testmessung

Signalparameter	NB-DESK77
RSRP [dBm]	-78
RSRQ [dB]	-11
RSSI [dBm]	-68
SINR [dB]	-17
CE-Level	0

In der Tabelle A.2 wurden zur Einschätzung für den Messbeamten, Messergebnisse dargestellt, die in einer Schirmkabine aufgezeichnet wurden. Mit der Messung in der Schirmkabine wurden schlechte Messbedingungen, wie beispielsweise in einer Tiefgarage, simuliert.

Tabelle A.2: Schlechte Messergebnisse einer Testmessung

Signalparameter	NB-DESK77
RSRP [dBm]	-118
RSRQ [dB]	-13
RSSI [dBm]	-105
SINR [dB]	-18
CE-Level	2

B. Schulungsunterlage NB-IoT für das Skript zum Lehrgang: Digitale Übertragung Teil 2 Systeme

B.1 NarrowBand Internet of Things

B.1.1 Einführung

Als treibende Kraft der gegenwärtigen und zukünftigen drahtlosen Kommunikation gilt das Internet der Dinge (Internet of Things, IoT). Auf der ganzen Welt werden Objekte mit Sensoren und Software ausgerüstet, um Daten zu erfassen und auszutauschen. Für IoT-Anwendungen eignen sich Low-Power-Wide-Area-Systeme (LPWA) besonders gut. Es gibt zwar bestehende Mobilfunktechnologien, diese sind jedoch nicht für IoT-Anwendungen optimiert, da bei IoT häufig nur kleine Datenmengen ausgetauscht werden. Um bei IoT-Anwendungen die unterschiedlichen Anforderungen abdecken zu können, wurden im LTE-Bereich Erweiterungen spezifiziert. Der Standard NarrowBand Internet of Things (NB-IoT, LTE Cat-NB1) von der 3rd Generation Partnership Project (3GPP) ist eine Erweiterung des LTE-Radionetzwerkes. NB-IoT ist für Machine-Type Traffic optimiert. Hierbei wurde auf lange Batterielaufzeiten (Batterielaufzeit von bis zu 10 Jahren), große Reichweiten und eine hohe Gebäudedurchdringung Wert gelegt, um auch bei schlechter Netzabdeckung kommunizieren zu können. NB-IoT nutzt die existierende LTE-Infrastruktur, um eine direkte Verbindung zum Mobilfunknetz herzustellen. NB-IoT wird in die bestehenden Frequenzbänder und -kanäle des LTEs eingebettet [4].

B.1.2 HF-Eigenschaften

NarrowBand IoT integriert sich in das von LTE verwendete Zugriffsverfahren Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access (OFDMA) ein und belegt genau einen Physical Resource Block (PRB) von 180 kHz Breite und 1 ms Dauer [4].

NB-IoT verwendet die robuste Modulationsart Quadrature Phase Shift Keying Modulation (QPSK) und erhöht die Redundanz, um die Reichweite bei kleinen Signalpegeln zu verbessern. NarrowBand IoT hat eine robustere Übertragung mit einer größeren Reichweite als LTE. Es kann eine größere Netzabdeckung erzielt werden. So können auch entlegene Orte, wie Keller und Tiefgaragen, durch die hohe Gebäudedurchdringung versorgt werden [4].

In Deutschland werden für NB-IoT zwei Frequenzbänder genutzt, die in der nachfolgenden Tabelle B.1 rot markiert sind. Vodafone nutzt das Band 20 und die Deutsche Telekom verwendet Band 8 und Band 20.

Tabelle B.1: NB-IoT Frequenzbänder

Quelle: [7] und eigene Bearbeitung

Band number	Uplink frequency range / MHz	Downlink frequency range / MHz
1	1920 - 1980	2110 - 2170
2	1850 - 1910	1930 - 1990
3	1710 - 1785	1805 - 1880
5	824 - 849	869 - 894
8	880 - 915	925 - 960
12	699 - 716	729 - 746
13	777 - 787	746 - 756
17	704 - 716	734 - 746
18	815 - 830	860 - 875
19	830 - 845	875 - 890
20	832 - 862	791 - 821
26	814 - 849	859 - 894
28	703 - 748	758 - 803
66	1710 - 1780	2110 - 2200

B.1.3 Signalstruktur

Im Release 13 von 3GPP wurde spezifiziert, dass der Duplexmodus für NB-IoT Halbduplex-FDD vom Typ B ist. Das bedeutet, dass Uplink und Downlink in verschiedenen Frequenzkanälen gesendet werden. Das UE darf trotzdem nicht gleichzeitig senden und empfangen. Zwischen jedem Wechsel von Uplink zu Downlink und andersherum, wird ein Guard-Subframe eingefügt, das dem UE die Zeit gibt, zwischen dem Senden und Empfangen umzuschalten [7]. Die Kommunikation wird immer vom Endgerät initiiert, sodass es nicht möglich ist, vom Server oder einer Cloud direkt Kontakt zum Modul aufzunehmen [6].

NB-IoT kann in drei Betriebsarten unterschieden werden. Diese sind in der Abbildung B.1 dargestellt.

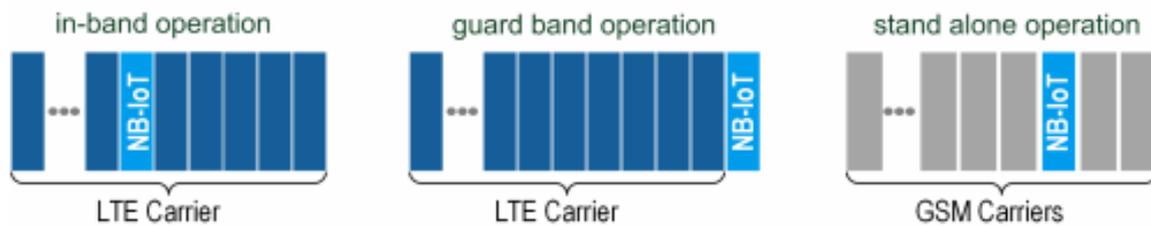


Abbildung B.1: Die drei NB-IoT-Betriebsarten

Quelle: [7]

Bei der Betriebsart in-band operation (dt. Inband-Betrieb) wird das Trägersignal in das breitbandige LTE-Signal eingebettet. Dabei ist die reguläre Nutzung eines LTE-Trägers ebenso möglich, der Scheduler reserviert für NB-IoT einen Resource Block. Es wird eine Koexistenz mit dem normalen LTE-Signal gewährleistet.

Bei der guard band operation (dt. Schutzbandbetrieb) wird NB-IoT in die Schutzabstände zwischen den LTE-Kanälen eingebettet.

Des Weiteren gibt es die Betriebsart stand alone operation (dt. Alleinstehender-Betrieb). Auf Kanälen, die zuvor beispielsweise für GSM verwendet wurden, kann NB-IoT unabhängig arbeiten. Der 180 kHz breite NB-IoT Kanal passt in die 200 kHz GSM-Kanalbandbreite und bietet auf beiden Seiten 10 kHz Schutzpuffer zu den benachbarten GSM-Kanälen. NB-IoT kann so schrittweise eingeführt werden, wo GSM nicht mehr benötigt wird [7].

B.1.3.1 Downlink

NB-IoT verwendet wie LTE in Downlink-Richtung Orthogonal Frequency Division Multiple Access (OFDMA) mit Quadrature Phase Shift Keying Modulation (QPSK, 2 Bits pro Übertragungsschritt) [4].

Wie in einem LTE Physical Resource Block (PRB) verwendet NB-IoT zwölf 15 kHz Unterträger [4]. In der Abbildung B.2 wird das erzeugte Gitter dargestellt. Ein Ressourcenelement (RE) ist ein Unterträger in einem OFDM-Symbol. Ein RE wird als ein Quadrat dargestellt.

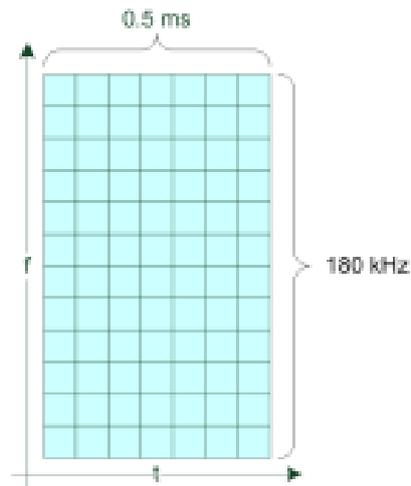


Abbildung B.2: Downlink-Gitter: 12 Träger mit einem Abstand von 15

Quelle: [7]

In einem Subframe (SF) (dt. Unterrahmen) gibt es zwei Slots. Ein Slot besteht aus sieben OFDM-Symbolen, die in der zeitlichen Ebene 0,5 ms belegen. Ein Radioframe (RF) besteht aus zehn Subframe. Dies ist folgend in der Abbildung B.3 dargestellt [7]. Pro 1 ms Subframe sind die Daten, die auf allen 12 Subcarrier gesendet werden, für nur ein Endgerät zu empfangen [4].

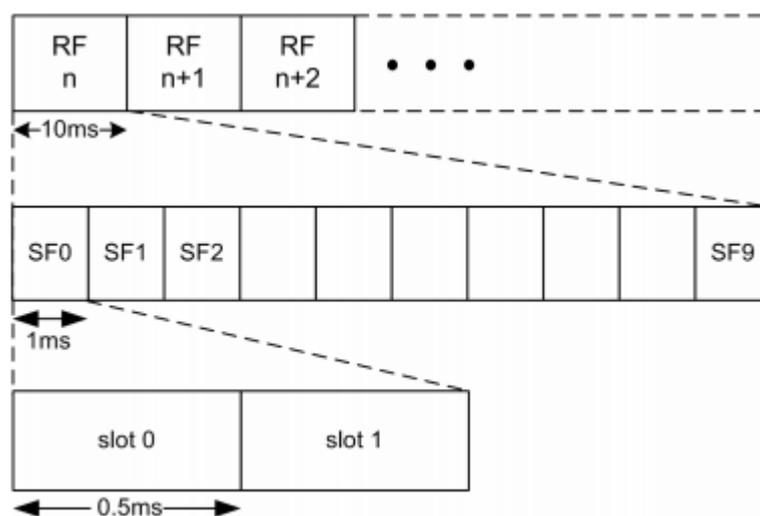


Abbildung B.3: Beziehung zwischen Slots, Subframes und Radioframes im Downlink

Quelle: [7]

Die Signale und Kanäle sind bei NB-IoT wie beim LTE benannt, zusätzlich voranstehend mit einem „N“ für NarrowBand versehen.

NB-IoT versorgt das UE im Downlink mit Referenz- und Synchronisationssignalen. Die Synchronisationssignale sorgen dafür, dass das Timing und wie Frequenz des UEs stimmen. Dafür verantwortlich sind die Synchronisationssignale NarrowBand Primary Synchronization Signal (NPSS) und das NarrowBand Secondary Synchronization Signal (NSSS) und zusätzlich das Referenzsignal NarrowBand Reference Signal (NRS).

Wie auch bei LTE gibt es bei NB-IoT drei physische Kanäle im Downlink.

Der NarrowBand Physical Broadcast Channel (NPBCH) überträgt in acht 80 ms Blöcken den NarrowBand Master Information block (dt. Hauptinformationsblock, MIB-NB), der eine zeitliche Länge von 640 ms aufweist.

Für die Übertragung der Benutzerdaten ist der NarrowBand Physical Downlink Shared Channel (NPDSCH) verantwortlich.

Der NarrowBand Physical Downlink Control Channel (NPDCCH) weist dem UE zu, welche Ressource das UE im Uplink verwenden kann und welche Daten im Downlink über den NPDSCH an das UE gerichtet werden [7].

B.1.3.2 Uplink

Für die Datenübertragung in Uplink Richtung wird wie bei LTE ein 15 kHz Subcarrier Raster und Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA) mit BPSK und QPSK Modulation verwendet [4].

Für die Uplink-Richtung sind im NB-IoT zwei physikalische Kanäle definiert. Der NarrowBand Physical Uplink Shared Channel (NPUSCH) ist ein schmalbandiger physikalischer Uplink-Kanal. Außerdem ist der NarrowBand Physical Random Access Channel (NPRACH) definiert. Hierbei handelt es sich um einen schmalbandigen physikalischen Direktzugriffskanal.

Der NPUSCH wird verwendet, um die tatsächlichen Daten im Uplink oder um Uplink-Steuerinformationen (UCI) zu transportieren.

Ein Slot besteht aus sieben SC-FDMA-Symbolen [7].

B.1.4 Anmeldung in NB-IoT

Nachdem die Anmeldung eines NB-IoT-Moduls an einer Basisstation einmal durchgeführt wurde, bleibt das Modul bis zu einer Woche lang an der Basisstation registriert, damit der Energieverbrauch für einen erneuten Anmeldeprozess eingespart werden kann. Das Gerät erwacht in festgelegten Zeitabständen aus dem Tiefschlaf und sendet Daten in das Netz. Anschließend kann es Daten empfangen. Ist die Datenübertragung abgeschlossen, geht das Gerät wieder in den Tiefschlaf über. Durch die Registrierung über einen längeren Zeitraum ist kein neuer Anmeldeprozess nötig, wenn das Gerät wieder aus dem Tiefschlaf zurückkehrt.

Bei einem Übergang von einer Mobilfunkzelle in eine andere Zelle, muss ein NB-IoT Modul immer eine Neuanmeldung im Mobilfunknetz durchführen [6].

B.1.5 HF-Spektrum

In der Abbildung B.4 ist das NB-IoT-Signal der Deutschen Telekom dargestellt. Es wird der gesamte LTE-Kanal in Band 8 dargestellt, der eine Bandbreite von 5 MHz besitzt. Mit den eingestellten Markern ist die Bandbreite des NB-IoT-Signals von 180 kHz ersichtlich. Es ist zu erkennen, dass die Deutsche Telekom den NB-IoT-Träger im Inbandbetrieb verwendet.

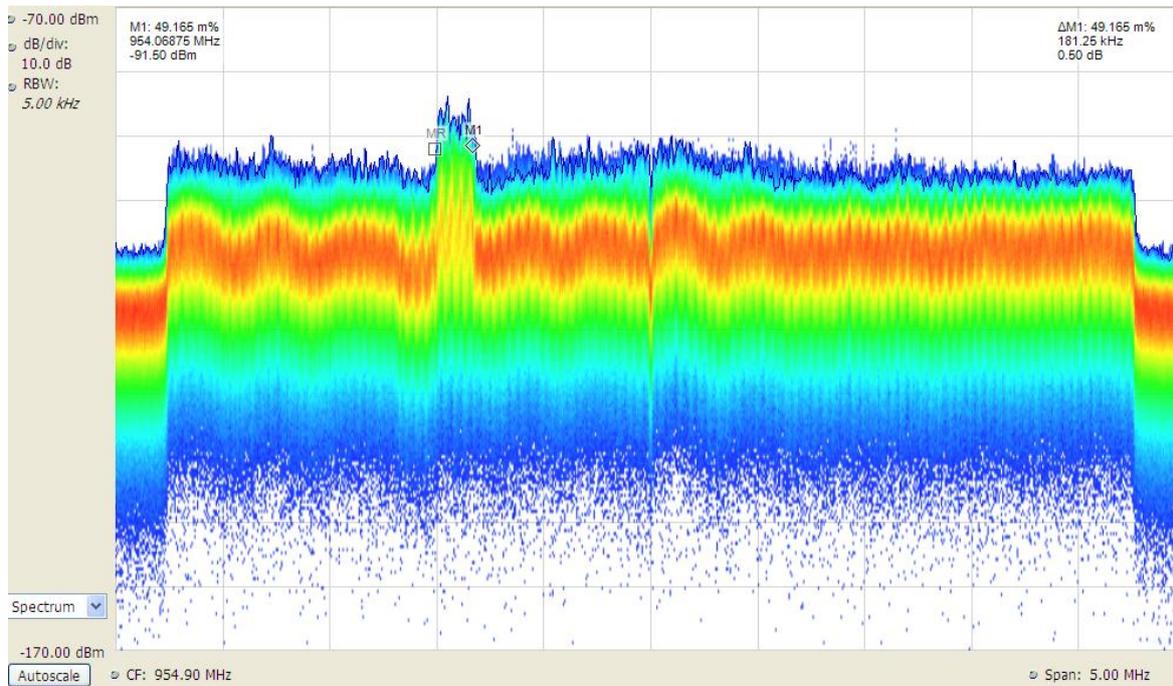


Abbildung B.4: LTE-Kanal der Telekom in Band 8 mit NB-IoT-Signal

In der Abbildung B.5 ist der ganze LTE-Kanal von Vodafone im Band 20 abgebildet. Das 180 kHz breite NB-IoT-Signal ist auf der rechten Seite des Bildes zu erkennen. Die eingestellten Marker zeigen den 180 kHz breiten NB-IoT-Träger. Bei dieser Abbildung stellt man fest, dass Vodafone NarrowBand-IoT im Schutzbandbetrieb betreibt.

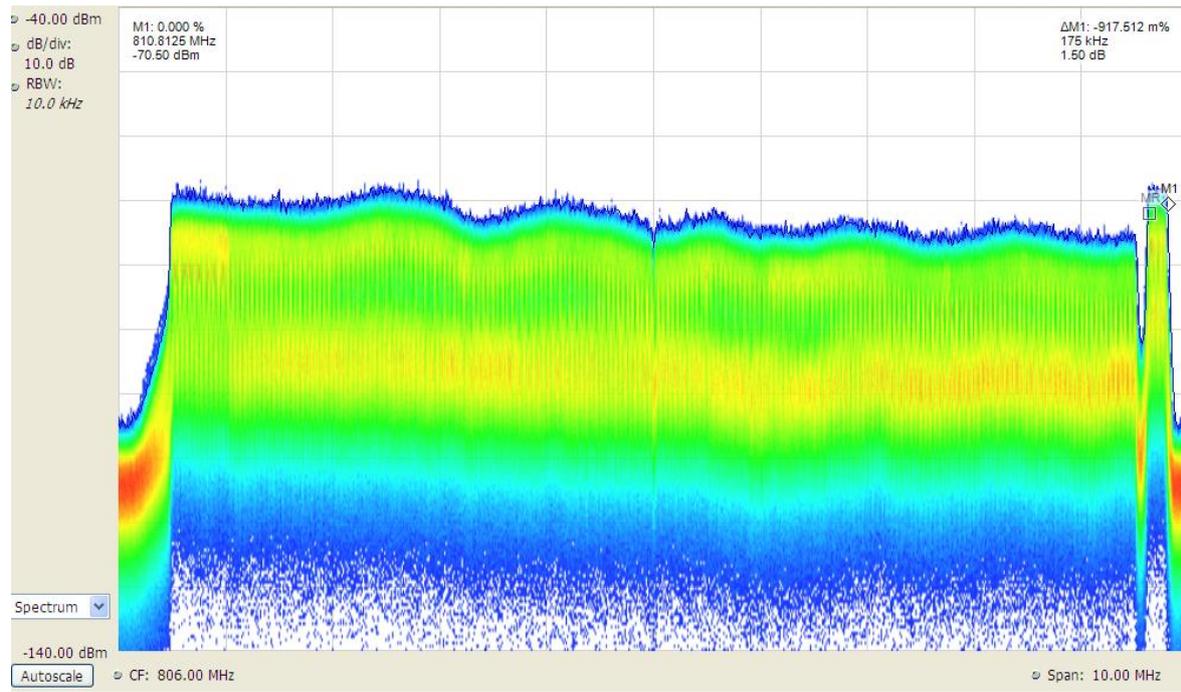


Abbildung B.5: LTE-Kanal von Vodafone in Band 20 mit NB-IoT-Signal