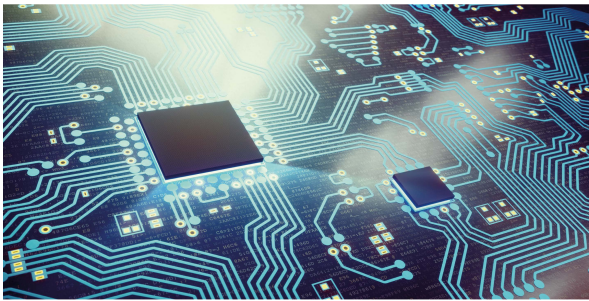




Katharina Kolb (Autor)

# Hochintegrierte Millimeterwellen-Frontends für Beamsteering-Anwendungen in 5G-Repeater-Systemen



Hochintegrierte Millimeterwellen-Frontends  
für Beamsteering-Anwendungen  
in 5G-Repeater-Systemen

Katharina Kolb



Cuvillier Verlag Göttingen  
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag

<https://cuvillier.de/de/shop/publications/8900>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentzsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,  
Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: [info@cuvillier.de](mailto:info@cuvillier.de), Website: <https://cuvillier.de>

Die vorliegende Arbeit zeigt Entwurf, Implementierung und Charakterisierung eines hochintegrierten Beamsteering-Frontends im Millimeterwellenfrequenzbereich als Kernkomponente eines analogen Repeaters der fünften Mobilfunkgeneration (5G), welcher Reichweite und Abdeckung drahtloser Festnetzzugänge (Fixed Wireless Access, FWA) verbessern soll. Die Herausforderung bei der Implementierung stellen die Kernanforderungen einer hohen Datenrate, einer hohen Energieeffizienz sowie eines robusten und flächeneffizienten Designs dar. In Anbetracht dessen liegt der Fokus auf der Implementierung einer Beamsteering-Funktionalität, welche das Abstrahl- und Empfangsverhalten des Repeaters auf die Position der Nutzer anpasst.

Die vorliegende Dissertation basiert auf Ergebnissen des Projektes „TowARds Advanced bicos NanoTechnology platforms for rf and thz applicatiOns (TARANTO)“ [1], das von 2017 bis 2021 durch die Europäische Union sowie das Bundesministerium für Bildung und Forschung gefördert wurde. Das für diese Arbeit relevante Teilvorhaben wurde in enger Zusammenarbeit mit Nokia Bell Labs, Nokia Mobile Networks, Infineon Technologies, dem Institut für Hochfrequenztechnik und Elektronik des Karlsruher Instituts für Technologie, dem Lehrstuhl für Hochfrequenzsysteme in der Kommunikationstechnik der Bergischen Universität Wuppertal und dem IHP bearbeitet.

## **1.1 Motivation**

Angetrieben durch den wachsenden Bedarf datenintensiver Anwendungen wie Videostreaming, autonomes Fahren, Augmented Reality (AR), Virtual Reality (VR) sowie das Internet der Dinge (Internet of Things, IoT) steigt der weltweite Datenverkehr rapide an [2, 3]. Einer Prognose von Ericsson aus dem Juni 2021 zufolge wird der weltweite mobile Datenverkehr, der Ende 2020 bei 58 Mrd. GB pro Monat lag, bis ins Jahr 2026 um mehr als das Fünffache auf über 300 Mrd. GB pro Monat steigen [4]. Abbildung 1.1 zeigt die prognostizierte Entwicklung des weltweiten mobilen Datenverkehrs einschließlich des Datenverkehrs durch FWA für die nächsten Jahre. Daraus wird ersichtlich, dass der neue Mobilfunkstandard 5G, der als Nachfolger der vierten Mobilfunkgeneration (4G) aktuell ausgerollt wird,

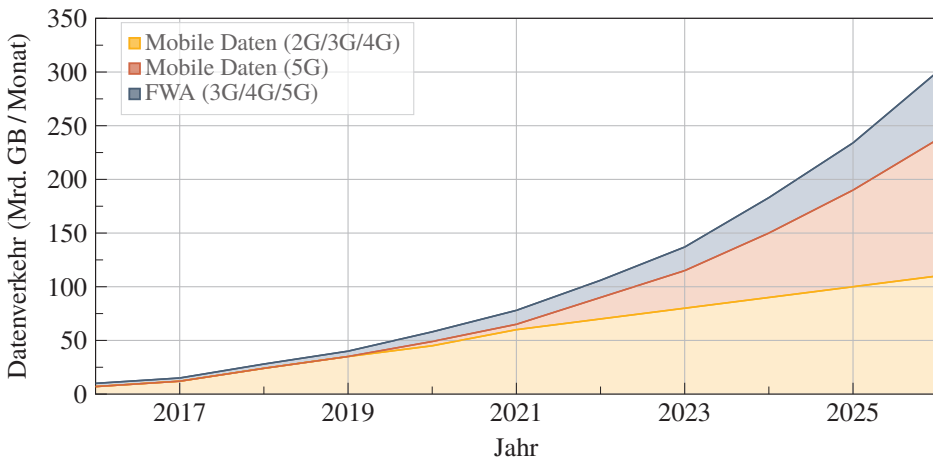


Abbildung 1.1: Prognostizierte Entwicklung des weltweiten mobilen Datenverkehrs einschließlich des Datenverkehrs durch FWA (Daten: [4]).

bis zum Jahr 2026 die Hälfte des gesamten mobilen Datenverkehrs weltweit abdecken wird [4]. Während auch die Zahl der mobilen Internetnutzer weltweit rasant ansteigt [5], müssen immer neue, zukunftsweisende Technologien im Mobilkommunikationsbereich entwickelt werden, um die Anforderungen der datenintensiven Anwendungsszenarien erfüllen zu können. 5G übertrifft seinen Vorgänger 4G nicht nur im Hinblick auf Datenraten, sondern bringt auch eine Verbesserung von Latenzzeiten, Konnektivität, Netzuverlässigkeit und Energieeffizienz mit sich [2]. Das neue Mobilfunkkonzept 5G ermöglicht damit eine ganze Reihe neuartiger Anwendungen, die sich hinsichtlich ihrer Anforderungen an Funktionalität und Leistungsfähigkeit stark unterscheiden und sich im Wesentlichen in folgende Anwendungsprofile unterteilen lassen [2, 6]:

- 1. Enhanced Mobile Broadband (eMBB):** Mobile Breitbanddienste stehen im Fokus bei der Entwicklung von 5G und sollen sowohl bei flächendeckender Versorgung als auch bei hoher Nutzerdichte verfügbar sein. Für den Fall der flächendeckenden Versorgung liegt der Schwerpunkt des Anforderungsprofils auf einer lückenlosen Abdeckung, einer hohen relativen Bewegungsgeschwindigkeit sowie einer verbesserten Nutzerdatenrate [2, 6]. Für Hotspots wird vor allem eine hohe Verkehrskapazität benötigt, während die Anforderung an die relative Bewegungsgeschwindigkeit eher gering ist. Zusätzlich ist die geforderte Nutzerdatenrate für den Hotspot-Fall noch einmal deutlich höher als bei einer flächendeckenden Versorgung [2, 6]. Zu den typischen Anwendungen zählen Videostreaming, AR und VR.

2. **Ultra-Reliable Low-Latency Communications (URLLC):** Dieses Profil stellt strenge Anforderungen an Zuverlässigkeit, Latenz und Verfügbarkeit und eignet sich daher für zeitkritische Anwendungen. Zu den typischen Anwendungen zählen unter anderem intelligente Verkehrssysteme, Vehicle-to-Everything (V2X), Anwendungen im medizinischen Bereich sowie intelligente Stromnetze [2, 6].
3. **Massive Machine-Type Communications (mMTC):** Der Schwerpunkt bei diesem Anwendungsprofil liegt anders als bei URLLC darauf, eine große Anzahl von Geräten gleichzeitig, ohne besonderes Augenmerk auf Anforderungen an Latenz und Zuverlässigkeit, betreiben zu können. Vielmehr geht es um eine energiesparende Kommunikation, die möglichst lange Batterielebensdauern ermöglicht [2, 6]. Ein typisches Anwendungsszenario stellt dabei das IoT dar.

Die spezifischen Anforderungen an Funktionalität und Leistungsfähigkeit der Technologien im Mobilkommunikationsbereich unterscheiden sich also je nach Anwendung. Auch wenn nicht für jeden Anwendungsfall alle Zielvorgaben gleichzeitig erfüllt werden können, sollen dennoch auch sehr unterschiedliche 5G-Anwendungen dasselbe Netz und oft auch dieselbe Infrastruktur nutzen können [7].

## 1.2 Stand der Technik

Ein wichtiger Schritt bei der Einführung von 5G ist die erstmalige Nutzung von Spektrum im Millimeterwellenfrequenzbereich, da die größeren Bandbreiten, die bei diesen Frequenzen verfügbar sind, höhere Datenraten ermöglichen. Die kleineren Wellenlängen machen wiederum den Einsatz von kompakten Beamsteering-Lösungen attraktiv [7]. Der folgende Abschnitt gibt einen Überblick über den aktuellen Stand der Forschung im Bereich von Beamsteering-Frontends sowie FWA für 5G-Kommunikationssysteme im Millimeterwellenfrequenzbereich. Detailliertere Informationen zum Stand der Technik der einzelnen Implementierungsformen folgen in den weiteren Kapiteln der Arbeit.

### 1.2.1 Beamsteering-Frontends für 5G

Die Entwicklung von Phased-Array-Antennen reicht bis in die 1950er und 1960er Jahre zurück [7]. Erste Publikationen auf Halbleiterebene folgten jedoch erst nach der Jahrtausendwende beginnend mit einem vollständig integrierten Phased-Array-Empfänger in Siliziumgermanium (SiGe) für das 24 GHz Industrial, Scientific and Medical (ISM)-Band [8]. In den folgenden Jahren konnte die Leistungsfähigkeit

der Phased-Arrays im Millimeterwellenfrequenzbereich verbessert und deren Komplexität erhöht werden [7]. Während Phased-Arrays viele Jahre lang hauptsächlich für Verteidigungsanwendungen und in der Satellitenkommunikation eingesetzt wurden, mussten ihre Kosten für den Einsatz in Kommunikationsanwendungen deutlich gesenkt werden [9]. Dies erfordert die Verwendung integrierter Schaltkreise (Integrated Circuit, IC) auf Grundlage von Siliziumtechnologien wie SiGe oder komplementäre Metall-Oxid-Halbleiter (Complementary Metal-Oxide Semiconductor, CMOS) [9]. Standardisierungen für 60 GHz-Kommunikationssysteme ließen ICs für den Millimeterwellenfrequenzbereich in den Fokus der Forschung rücken [7]. Es folgten, wie in [7] gezeigt, eine ganze Reihe von Publikationen bei einer Betriebsfrequenz von 60 GHz hauptsächlich für Anwendungen in Innenräumen mit großer Bandbreite [10–19]. Trotz verbesserter Leistung und steigender Komplexität waren diese Systeme noch auf wenige Anwender und Reichweiten unter 20 m beschränkt [7]. Im Dezember 2017 wurde schließlich der, vom 3rd Generation Partnership Project (3GPP) entwickelte, Mobilfunkstandard 5G New Radio (NR) veröffentlicht und mehrere Frequenzbänder im Millimeterwellenfrequenzbereich definiert [7]. Daraufhin folgten erste Phased-Array-Transceiver-Produktentwicklungen bei 28 GHz [20, 21]. Bis heute folgten eine ganze Reihe an Publikationen für Anwendungen als 5G-Basisstationen in SiGe [9, 21, 22] und CMOS [20, 23–27].

### 1.2.2 FWA für 5G

FWA ist ein Konzept für die Bereitstellung von Breitbanddiensten für stationäre Nutzer aus dem Anwendungsprofil eMBB. Dies bietet sich insbesondere dann an, wenn keine Infrastruktur vorhanden ist, um kabelgebundene Breitbanddienste über Kupfer, Glasfaser oder Hybridlösungen bereitzustellen [28]. Das FWA-Konzept wurde bereits in früheren Mobilfunkgenerationen und den Standards der Wireless Fidelity (WiFi) verwendet. Jedoch sind deren Geschwindigkeiten und Latenzzeiten nicht mit denen von Glasfaser-Breitbandnetzen vergleichbar [29]. 5G-FWA kann auf Grund der hohen Datenraten, der geringen Latenz und den niedrigen Kosten einen Internetzugang mit verbesserter Dienstqualität und höherer Nutzerakzeptanz bieten und ermöglicht damit den Einsatz kosteneffizienter FWA-Lösungen für stationäre Anwender [29]. Auf Grund dieser Vorteile haben die Mehrheit der Dienstanbieter auf der ganzen Welt 5G-FWA eingeführt. Zwischen Mai und November 2021 ist die Zahl der Dienstanbieter, die 5G-FWA-Dienste anbieten, von 46 % auf 57 % gestiegen, was einem Wachstum von fast 25 % entspricht [30]. Auf Grund der hohen Ausbreitungsverluste im Millimeterwellenfrequenzbereich, insbesondere bei fehlender Sichtverbindung (Non Line of Sight, NLoS) zwischen Basisstation und Endnutzern, sind die Zellengrößen jedoch sehr klein [28, 29, 31, 32]. Um die Reichweite zu erhöhen und damit die Systemabdeckung zu verbessern, zeigt [33] ein passives Repeater-Array auf. Dieses besteht aus einer zusätzlichen

Antennenstruktur, welche die einfallende Leistung in einem bestimmten Winkel reflektieren kann. Des Weiteren schlägt [34] einen analogen Repeater ohne Basisband-signalverarbeitung vor, der drahtlose 39 GHz-Fronthauling-Signale in gerichtete 28 GHz-Beamsteering-Signale umsetzt. Erste Outdoor-Tests mit einem vereinfachten diskreten Aufbau haben gezeigt, dass auch bei einer Fronthauling-Streckenlänge von 270 m eine ausreichende Linearität problemlos erreicht werden kann. Darüber hinaus zeigten Messungen mit hoher Bandbreite mit pre-5G-Testsignalen, dass die hohen Datenraten für zukünftige 5G-Festnetzzugangssysteme erreicht werden können [34]. Bislang ist jedoch kein integrierter analoger Repeater für FWA-Kommunikation publiziert, der eine Remote-Beamsteering-Funktionalität vorsieht.

### 1.3 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist der Entwurf, die Implementierung und die Charakterisierung eines monolithisch integrierten Beamsteering-Frontends als Teil eines analogen 5G-Repeater im Millimeterwellenfrequenzbereich. Das entsprechende Anwendungsszenario basiert auf dem Konzept aus [34] und ist in Abbildung 1.2 dargestellt. Ein Repeater mit Beamsteering-Funktionalität stellt dabei eine energie- und kosteneffiziente Möglichkeit dar, Signalqualität und Reichweite von 5G-FWA zu erhöhen [34, 35]. Dazu stellt dieser 5G-FWA für eine Reihe von stationären Anwendern als gerichtete Verbindung bei einer Frequenz von 28 GHz bereit. Das Fronthauling zwischen Basisstation und Repeater erfolgt über eine direkte Sichtverbindung (Line of Sight, LoS) bei einer Frequenz von 39 GHz [34, 35]. Das integrierte Beamsteering-Frontend wird in einem SiGe-Bipolar-CMOS (BiCMOS)-Prozess realisiert, welcher ein hochperformantes und kosteneffizientes Millimeterwellen-Kommunikationssystem mit integrierter digitaler Signalverarbeitung ermöglicht [35].

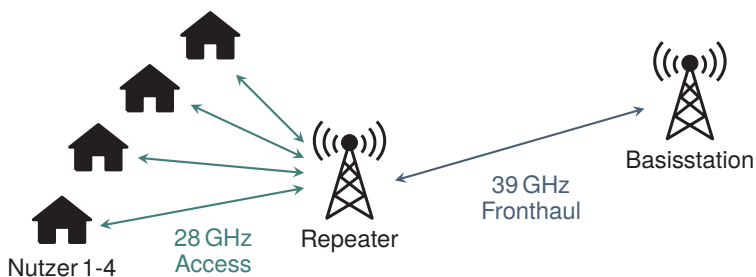


Abbildung 1.2: Anwendungsszenario eines Beamsteering-Repeater zur Verbesserung der Signalqualität und Erhöhung der Reichweite von 5G-FWA (Konzept: [34]).

Kapitel 1 gibt einen Überblick über den Stand der Forschung in Bezug auf Beamsteering-Frontends und FWA für 5G im Millimeterwellenfrequenzbereich und erläutert die Zielsetzung und den Aufbau der Arbeit. Kapitel 2 fasst die wichtigsten Grundlagen von 5G-Transceivern zusammen. Diese umfassen Anforderungen und Systemziele sowie Eckpunkte der Standardisierung. Des Weiteren folgt ein Abschnitt über das Beamsteering und eine Betrachtung der Anforderungen auf Systemebene. Abschließend folgt ein Vergleich von Halbleitertechnologien sowie ein kurzer Überblick über den in dieser Arbeit verwendeten Prozess. Kapitel 3 diskutiert, ausgehend vom Anwendungsszenario des Beamsteering-Repeater, die Vor- und Nachteile der verwendeten Transceiver-Architektur und umfasst eine Spezifikation des Gesamtsystems. Kapitel 4 beschreibt die Einzelkomponenten des Gesamtsystems jeweils im Stand der Technik, der Implementierung und der messtechnischen Charakterisierung. Kapitel 5 zeigt die Messergebnisse des Beamsteering-Systems. Dazu wird in einem ersten Schritt die Charakterisierung eines einzelnen Transceiver-Kanals durchgeführt und anschließend die Messergebnisse des Gesamtsystems bestehend aus acht Transceiver-Kanälen anhand von zwei Demonstratoren diskutiert. Kapitel 6 beschreibt eine Möglichkeit zur Kalibrierung des Systems. Dazu wird der bestehende Transceiver-Kanal um eine Schnittstelle zur Extraktion von Phasen- und Amplitudeninformation erweitert. In Kapitel 7 folgt abschließend eine Zusammenfassung der Arbeit und ein Ausblick auf weiterführende Forschungsansätze.

# Grundlagen von 5G-Transceivern

Der Mobilfunkstandard 5G zielt auf höhere Datenübertragungsraten, größere Reichweiten, höhere Zuverlässigkeit sowie geringere Reaktionszeiten ab. Um diese Anforderungen auf System- und Schaltungsebene umsetzen und in eine Spezifikation überführen zu können, ist es essentiell, die 5G-Grundlagen sowie die möglichen Fehlerquellen bei der Implementierung in realen Hochfrequenz (HF)-Systemen zu betrachten. Dieses Kapitel fasst daher die wichtigsten Grundlagen von 5G-Transceivern zusammen. Abschnitt 2.1 beschreibt die Anforderungen und Systemziele von 5G. Dann zeigt Abschnitt 2.2 die Eckpunkte der Standardisierung sowie die zugewiesenen Frequenzbänder auf. Anschließend erfolgt in Abschnitt 2.3 ein Überblick über das Prinzip und die Implementierungsmöglichkeiten von Beamsteering sowie eine kurze Analyse der verwendeten Beamsteering-Architektur. Daraufhin folgt in Abschnitt 2.4 eine Betrachtung der Anforderungen an 5G-Schaltungen auf Systemebene. Abschließend liefert Abschnitt 2.5 einen Einblick in die verwendete Halbleitertechnologie sowie die wichtigsten Transistorparameter.

## 2.1 Anforderungen und Systemziele

Um eine Reihe neuer Anwendungsszenarien aus den Bereichen eMBB, URLLC und mMTC zu erfüllen, hat die International Telecommunication Union einige Leistungsanforderungen für den Mobilfunkstandard 5G NR definiert. Die wichtigsten Anforderungen lassen sich Abbildung 2.1 entnehmen. Wie daraus ersichtlich, verbessert sich die Leistungsfähigkeit von 5G-Systemen im Vergleich zu 4G-Mobilfunksystemen in folgenden Punkten [6, 7, 36]:

1. Die maximale Datenübertragungsrate unter idealen Bedingungen steigt von 1 GBit/s auf 20 GBit/s.
2. Die Datenrate am Rand der Funkzelle steigt von 2 MBit/s auf 1 GBit/s.
3. Die spektrale Effizienz steigt von 2 Bit/s/Hz auf 10 Bit/s/Hz.
4. Die relative Bewegungsgeschwindigkeit, bis zu der eine definierte Dienstqualität gewährleistet werden kann, steigt von 350 km/h auf 500 km/h.



5. Die Kosteneffizienz, welche die Anzahl der übertragenen Bit pro Kosteneinheit angibt, verbessert sich um den Faktor 10.
6. Die maximale Anzahl der verbundenen Endgeräte pro Flächeneinheit steigt von  $10^5$  auf  $10^6$  Endgeräte pro Quadratkilometer.
7. Die Latenz zwischen Senden und Empfangen eines Datenpakets sinkt von 10 ms auf 1 ms.

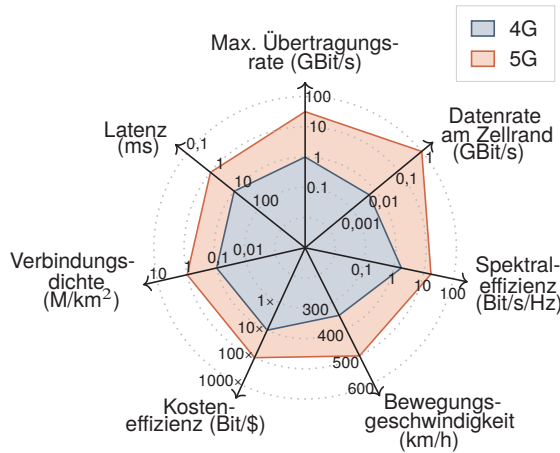


Abbildung 2.1: Anforderungen an die Leistungsfähigkeit von 5G-Systemen im Vergleich zu Systemen des vorherigen Mobilfunkstandards 4G [36].

## 2.2 Frequenzbereich und Standardisierung

Ein wichtiges Systemziel für 5G ist die massive Erhöhung der maximalen Datenrate. Die theoretische Obergrenze für die Kanalkapazität  $C$  eines Transceiver-Kanals ergibt sich dabei aus dem Shannon-Hartley-Gesetz in Abhängigkeit von der Bandbreite  $B$  sowie dem Verhältnis aus Signalleistung  $S$  und Rauschleistung  $N$  zu [37]

$$C = B \log_2 \left( 1 + \frac{S}{N} \right). \quad (2.1)$$

Ein wichtiger Schritt zur Verbesserung der Kanalkapazität für 5G ist folglich die Nutzung von Spektrum im Millimeterwellenfrequenzbereich, da bei höheren Frequenzen mehr Bandbreite verfügbar ist [2]. Wie in Abbildung 2.2 dargestellt, unterteilt 5G NR das definierte Spektrum in zwei Frequenzbereiche. Frequenzbereich 1 umfasst dabei die Frequenzen von 450 MHz bis 6 GHz und Frequenzbereich 2 die Frequenzen von 24,25 GHz bis 52,6 GHz. Zusätzlich zu mehreren

Bändern unterhalb von 6 GHz werden drei Time Division Duplex (TDD)-Bänder von 26,6 bis 29,5 GHz, 24,25 bis 27,5 GHz und 37,0 bis 40,0 GHz für den neuen Mobilfunkstandard definiert [7]. Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Fokus auf der Implementierung von ICs im Millimeterwellenfrequenzbereich.

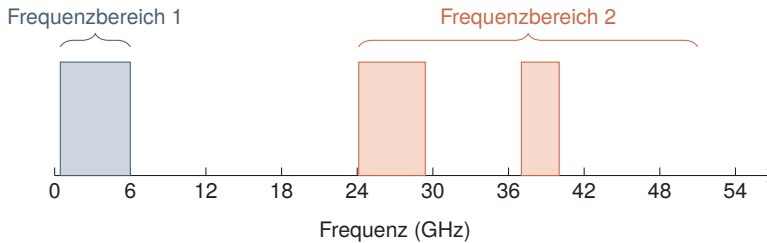


Abbildung 2.2: Definierte Frequenzbereiche für 5G NR.

Sowohl im Uplink (UL) als auch im Downlink (DL) ist bis mindestens 52,6 GHz Cyclic Prefix (CP)-Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM) mit skalierbarer Numerologie als Signalform vorgesehen [38]. Im Gegensatz zum Standard 4G, der nur für Übertragungen im DL CP-OFDM und im UL Discrete Fourier Transformation Spread (DFTS)-OFDM verwendet, ist bei 5G lediglich eine Option für DFTS-OFDM im UL für Szenarien mit begrenzter Abdeckung vorgesehen. Für alle anderen Szenarien vereinfacht die Verwendung von nur einer Signalform in beiden Richtungen das Gesamtdesign, insbesondere im Hinblick auf drahtloses Backhauling [38, 195]. Die technische Spezifikation gibt Numerologien  $\mu$  vor, aus denen sich die skalierbaren Subträgerabstände  $\Delta f$  als Vielfache des in 4G verwendeten Subträgerabstands von 15 kHz angeben lassen als [39]

$$\Delta f = 2^\mu \cdot 15 \text{ kHz}. \quad (2.2)$$

Je nach Numerologie  $\mu$  ist entweder ein CP-Overhead von 7% oder ein erweiterter CP definiert. Zusätzlich werden für verschiedene Frequenzbänder unterschiedliche Numerologien festgelegt [39]. Für alle Numerologien ist die Anzahl

$\mu$	$\Delta f$ (kHz)	CP-Länge	Frequenzbereich	$B_{\max}$
0	15	normal	1	50 MHz
1	30	normal	1	100 MHz
2	60	normal, erweitert	1, 2	200 MHz
3	120	normal	2	400 MHz
4	240	normal	n/a	n/a
5	480	normal	n/a	n/a
6	960	normal	n/a	n/a

Tabelle 2.1: Übersicht der in 5G NR spezifizierten Numerologien [195, 39].

der aktiven Subträger auf 3300 begrenzt [40]. Tabelle 2.1 gibt einen Überblick über die resultierenden maximalen Bandbreiten für die in 5G NR spezifizierten Numerologien. Speziell in Frequenzbereich 2 wird die maximal mögliche Bandbreite im Vergleich zu 4G auf bis zu 400 MHz erhöht [40]. Die Organisation der Übertragungen erfolgt im Frequenzbereich in Gruppen von jeweils 12 Subträgern, die als physikalische Ressourcenblöcke bezeichnet werden. Ein einzelner Subträger in einem OFDM-Symbol wird dabei als Ressourcenelement bezeichnet [40]. Im Zeitbereich erfolgt die Organisation der Übertragung, wie Abbildung 2.3 dargestellt, in Frames, Subframes und Slots. Jeder Frame hat dabei, unabhängig von der verwendeten Numerologie, eine Länge von 10 ms und besteht aus 10 Subframes mit einer Länge von 1 ms [195, 40]. Ein Subframe besteht aus einem oder mehreren benachbarten Slots, wobei jeder Slot 14 OFDM-Symbole enthält. Einzige Ausnahme stellt die Numerologie  $\mu = 2$  bei Verwendung des erweiterten CPs dar. In diesem Fall bestehen die Slots aus jeweils 12 OFDM-Symbolen. Die Zeitdauer eines Slots skaliert mit der gewählten Numerologie  $\mu$ , da die Dauer eines OFDM-Symbols umgekehrt proportional zu seinem Subträgerabstand ist [195, 40].

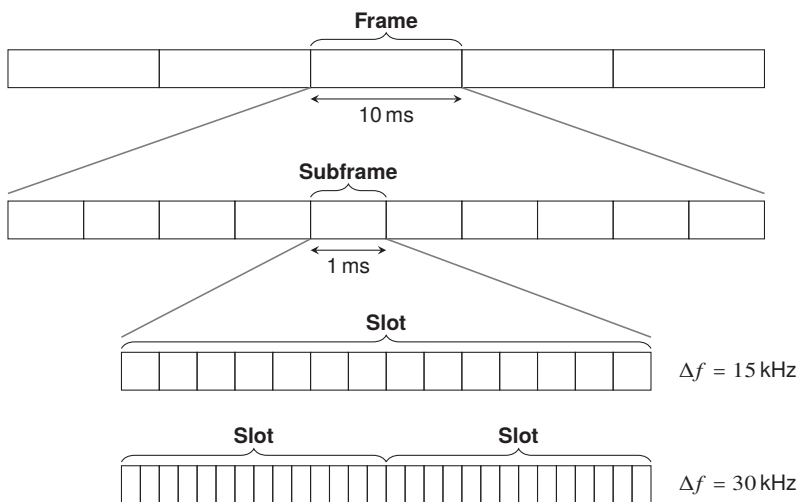


Abbildung 2.3: Framestruktur von 5G NR im Zeitbereich [40].

## 2.3 Prinzip und Architekturen für Beamsteering

Bei der Diskussion von Architekturen millimeterwellenbasierter Kommunikationssysteme ist es unerlässlich, die Effekte der höheren Frequenzen auf die Verbindungsqualität zu betrachten. Die Empfangsleistung  $P_e$  an einer Antenne im