

Mobilfunksysteme

Generationsvergleich

wissenschaftliches Paper

Agiles Prozessmanagement

Studenten:	Sami El Aidi	86770
Universität:	Hochschule Karlsruhe – Technik und Wirtschaft	
Studiengang:	Elektro- und Informationstechnik	
Studienvertiefung:	Informationstechnik	
Semester:	Wintersemester 25/26	
Dozent:	Dr.- Ing. Monika Klippert	
	M. Sc. Annika Bastian	
Bearbeitet am:	22. November 2025	

Inhaltsverzeichnis

1	Motivation	1
2	Grundlagen	1
2.1	Diskrete Fourier-Transformation und Spektrum	1
2.1.1	Beispiel: Diskrete Fourier-Transformation eines Cosinuses	2
2.2	Modulation	2
2.2.1	Frequenzmodulation (FM)	2
2.2.2	Gaussian Minimum Shift Keying (GMSK) [4]	3
2.2.3	Phase Shift Keying (PSK)	3
2.2.4	Quadrature Amplitude Modulation (QAM)	4
3	Generationsüberblick	4
4	Forschung - Zukunftsausblick	6
5	Zusammenfassung	6
	Literaturverzeichnis	7
	Abbildungsverzeichnis	8
	Tabellenverzeichnis	8

1 Motivation

„Es braucht eine Beschleunigung von Planungsverfahren nicht nur bei Windrädern, sondern auch für den Ausbau der digitalen Infrastruktur.“ [1] so Bundeskanzler Friedrich Merz 2023 in einem Interview mit dem Fraunhofer-Institut. Auch zwei Jahre später ist der Ausbau der Mobilfunksysteme immer noch ein aktuelles Thema. Die Nachfrage nach immer schnellerem und zuverlässig flächendeckendem Internet steigt stetig an. Laut dem **Bericht des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung** [2] stieg die Anzahl an Smartphone-Nutzern seit 2016 jährlich um 3 Millionen auf einen Stand von 57 Millionen Geräten bis Ende 2018.

Aus diesem Grund ist es wichtig, sich mit den Anforderungen und Probleme des Mobilfunkausbaus auseinanderzusetzen und sich Gedanken zu machen, wie künftige Generationen von Mobilfunksystemen aussehen könnten.

2 Grundlagen

Um die technischen Unterschiede der verschiedenen Mobilfunksysteme zu verstehen, ist es wichtig, einige grundlegende Konzepte der Nachrichtentechnik zu kennen. Dazu zählt das wichtigste mathematische Werkzeug zur Analyse von Signalen, die Fourier-Transformation. Hierbei geht es darum, die Frequenzanteile einzelner Signale zu analysieren um zum Beispiel die Bandbreite zu bestimmen. Relevant wird dies vor allem bei der Nutzung von Funkbändern, da Unternehmen nur begrenzte Frequenzbereiche zur Verfügung haben. Auch bei der Modulation von Signalen ist die Fourier-Transformation hilfreich, da hier Informationen in Wellenformen codiert werden.

2.1 Diskrete Fourier-Transformation und Spektrum

Um zunächst zu verstehen, warum die Fourier-Analyse beziehungsweise die Fourier-Transformation und das dazugehörige Spektrum wichtig für die Signalübertragung ist, muss zunächst geklärt werden, was mit einem komplexen zeitdiskreten Signal gemeint ist. Bei einem komplexen Signal handelt es sich um ein Signal, welches sowohl einen Realteil als auch einen Imaginärteil besitzt:

$$s(t) = I(t) + j \cdot Q(t) \quad (1)$$

Hierbei bezeichnet der Realteil $\text{Re}\{s(t)\} = I(t)$ den In-Phase-Anteil und der Imaginärteil $\text{Im}\{s(t)\} = Q(t)$ den Quadratur-Anteil des Signals. Wenn nun dieses Signal zeitdiskret ist, bedeutet dies, dass es nur zu konkreten Zeitpunkten definiert ist, also in der Regel, ein Signal, welches durch Abtastung eines kontinuierlichen Signals entsteht.

Relevant für die Signalübertragung ist nun die Tatsache, dass komplexe zeitdiskrete Signale durch die Fourier-Transformation in ihre Frequenzanteile zerlegt werden können. Dadurch ist es möglich, die Modulation einfacher durchzuführen und die Eigenschaften wie die Bandbreite und die Frequenznutzung zu analysieren:

$$S[k] = \sum_{n=0}^{N-1} s[n] \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}kn} \quad \text{für } k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2)$$

2.1.1 Beispiel: Diskrete Fourier-Transformation eines Cosinuses

Um das abstrakte Konzept der Diskreten Fourier-Transformation besser zu verstehen, wird im folgenden ein einfaches grafisches Beispiel gezeigt. Anhand einer Cosinusfunktion mit einer Frequenz von 10kHz ist der Nutzen der DFT zur Analyse der Frequenzanteile dargestellt:

$$s(t) = \cos(2 \cdot \pi \cdot 10.000 \cdot t) \quad S(f) = \frac{1}{2} [\delta(f - 10.000) + \delta(f + 10.000)] \quad (3)$$

Grafisch dargestellt sieht dies wie folgt aus:

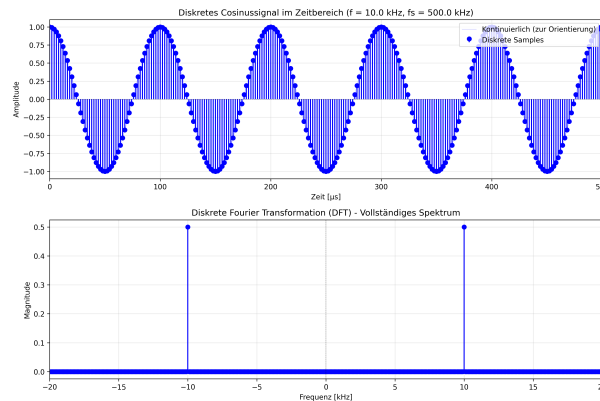


Abbildung 1: Diskrete Fourier-Transformation eines 10kHz Cosinussignals

In der Abbildung 1 ist im oberen Teil das Cosinussignal im Zeitbereich dargestellt und im unteren Teil das dazugehörige Spektrum. Relevant ist, dass das Spektrum zwei Peaks bei $\pm 10 \text{ kHz}$ aufweist, genau die Frequenz des ursprünglichen Cosinussignals.

2.2 Modulation

Wenn Informationen in Form von Bits übertragen werden sollen, müssen diese zunächst zu Symbolen zusammengefasst werden. Bei diesen Symbolen handelt es sich um diskrete Einheiten, die schlussendlich in Wellenformen codiert werden müssen. Wenn man von einer m-wertigen Modulation spricht, bedeutet dies, dass es insgesamt $m = 2^k$ Symbole mit k Bits pro Symbol gibt.

Nun ist es so, dass bei den verschiedenen Mobilfunkgenerationen unterschiedliche Anforderungen an die Effizienz, die Fehleranfälligkeit und die Komplexität gestellt werden. Deshalb ist es wichtig, die grundlegenden Modulationsverfahren zu kennen, die in der verschiedenen Mobilfunkgenerationen verwendet werden.

2.2.1 Frequenzmodulation (FM)

Bei der Frequenzmodulation handelt es sich um ein analoges Modulationsverfahren. Hierbei wird die Frequenz der Trägerwelle im Verhältnis zur Amplitude A_c des Informationssignals variiert. Mathematisch beschrieben wird dies folgendermaßen:

$$s(t) = A_c \cdot \cos(\omega_c \cdot t + \beta \cdot \sin(\omega_m \cdot t)) \quad (4)$$

Bei β handelt es sich um den Modulationsindex, welcher die Abweichung der Frequenz vom Mittelwert beschreibt. Besonders durch die Einfachheit und der im Vergleich zu anderen analogen Modulationsverfahren hohe Störfestigkeit ist die Frequenzmodulation für die Audioübertragung geeignet.[3]

2.2.2 Gaussian Minimum Shift Keying (GMSK) [4]

Das Gaussian Minimum Shift Keying (kurz GMSK) ist ein Sonderfall des Frequency-Shift Keying (kurz FSK), genauer gesagt eine 2-FSK. Die Symbole werden hier durch zwei verschiedene Vektoren im Konstellationsdiagramm dargestellt. Zu beachten ist, dass die beiden Vektoren orthogonal, also in einem rechten Winkel zueinander stehen müssen:

$$1. \text{ Symbol 0: } s_1 = A \cdot \cos(2\pi \cdot f_1 \cdot t)$$

$$2. \text{ Symbol 1: } s_2 = A \cdot \cos(2\pi \cdot f_2 \cdot t)$$

Der Frequenzabstand Δf zwischen den beiden Frequenzen f_1 und f_2 ist so gewählt, dass der kleinste Modulationsabstand η für die orthogonalität erreicht wird:

$$\eta = \frac{\Delta f}{f_s} \quad (5)$$

Für den Fall der GMSK-Modulation in der Modulationsabstand $\eta = \frac{1}{2}$. Verwendung findet GSMK hauptsächlich bei robusten Verfahren mit einer kleinen Symbolrate f_s ($< 10k\text{Baud}$).

2.2.3 Phase Shift Keying (PSK)

Um das Prinzip der Phasenmodulation zu erklären, wird im Folgenden das Beispiel einer QPSK-Modulation betrachtet. Bei dieser Modulation werden 4 Symbole mit jeweils 2 Bits pro Symbol codiert. Allgemein gilt, dass bei einer M-PSK $M = 2^k$ Symbole mit jeweils k Bits pro Symbol codiert werden, mit jeweils 2^k unterschiedlichen Wellenformen:

$$s_m(t) = A \cdot \cos\left(2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot t + \frac{2 \cdot \pi}{M} \cdot m\right) \quad (6)$$

Der Vorteil an einer komplexwertigen Amplitudenmodulation wie der PSK ist, dass die Information in den Koeffizienten der Linearkombination der Basisfunktionen codiert wird. Durch eine zusätzliche Zuordnung der Bits im Gray-Code (nur ein Bit ändert sich pro Symbolwechsel) kann die Bitfehlerwahrscheinlichkeit weiter reduziert werden, wobei die Symbolfehlerwahrscheinlichkeit konstant bleibt.

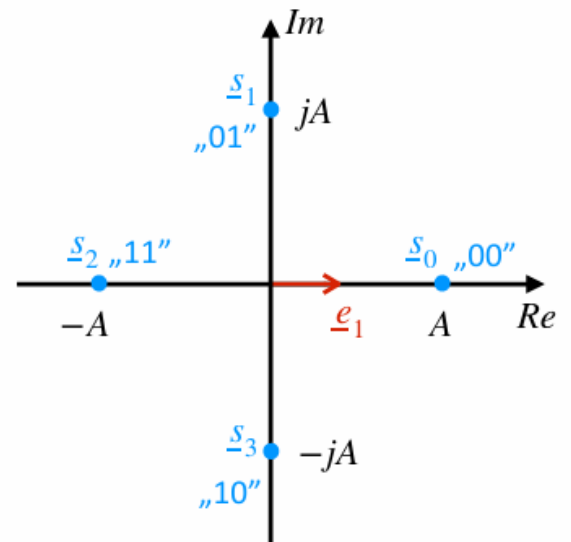


Abbildung 2: Beispiel einer QPSK-Konstellation

2.2.4 Quadrature Amplitude Modulation (QAM)

Gerade bei neueren Mobilfunkstandards wie LTE und 5G ist die Quadrature Amplitudenmodulation (QAM) weit verbreitet. Als Beispiel verwendet LTE eine 256-QAM Modulation, was bedeutet, dass 256 Symbole mit jeweils 8 Bit codiert werden. Dies grafisch darzustellen ist aufgrund der hohen Symbolanzahl schwierig, weshalb in Abbildung 3 als Beispiel ein 16-QAM Konstellationsdiagramm gezeigt wird.

Mathematisch wird die QAM folgendermaßen beschrieben:

$$s'_m(t) = I_m \cdot g(t) \text{ mit } I_m = a_m + j \cdot b_m \quad (7)$$

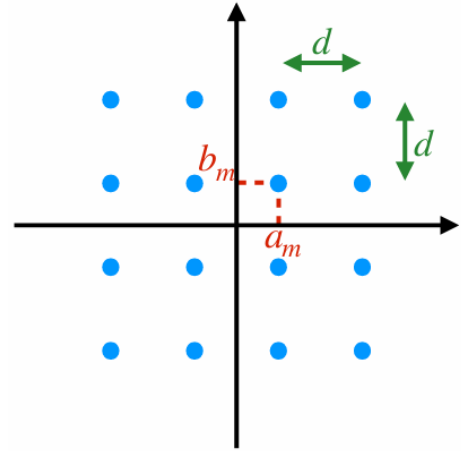


Abbildung 3: Beispiel einer 16-QAM[4]

Durch Gleichung 7 wird beschrieben, dass jedes Symbol $s'_m(t)$ durch eine Linearkombination aus einer komplexen Amplitude I_m und einer Pulsformung $g(t)$ bestimmt wird. Die Pulsformung bestimmt hierbei über die Bandbreiteneffizienz. In einer wie hier gezeigten rechteckigen Konstellation haben alle Symbole den gleichen Abstand d zueinander. Dadurch, dass der minimale Abstand zwischen den direkt benachbarten Symbolen maximiert wird, ist die QAM effizient in der Bandbreitennutzung und gleichzeitig auch bei der Fehleranfälligkeit robust [5].

3 Generationsüberblick

Generation	Jahr	Datenrate	Modulation	Frequenzband
1G	ab 1978	—	—	kein Spezielles
2G (GSM)	ab 1990	max. 9,6 kbit/s	GMSK	900 MHz, 1800 MHz
3G (UMTS)	ab 2003	384 kbit/s	QPSK	1920–2170 MHz
4G (LTE)	ab 2012	300 MBit/s	64-QAM	700–2700MHz
5G	ab 2019	10 GBit/s	256-QAM	700MHz, 3.5GHz, 24GHz

Tabelle 1: Übersicht Technische Daten der Mobilfunkgenerationen [6]

Um eine schnelle Übersicht über die verschiedenen Mobilfunkgenerationen zu erhalten, ist in Tabelle 1 zunächst eine kurze Zusammenfassung der wichtigsten technischen Kenngrößen dargestellt. Ergänzend zu Tabelle 1 ist zu erwähnen, dass die verschiedenen Mobilfunkgenerationen unterschiedliche Aufgabenbereiche abdecken. Die erste Generation ist hierbei die ersten Anläufe der Telefonie über analoge Kabelnetze. Darauf aufbauen mit dem Global System for Mobile Communications (GSM) Standard wurde die Übertragung von SMS und einfache mobile Kommunikation ermöglicht. Mit dem UMTS Standard der dritten Generation wurde die mobile Datenübertragung, also das mobile Internet eingeführt. Durch den im Jahr 2012 beschlossenen „Long Term Evolution“ (LTE) Standard kam nun eine verbesserte Datenrate, flächendeckender guter Empfang mit einer deutlich geringeren Latenzzeit hinzu. Aufgrund der hohen Nachfrage und der immer digita-

ler ausgelegten Gesellschaft wurde 2016 der neue 5G Standard eingeführt. Hierbei wird vor allem die Datenrate drastisch erhöht, mit bis zu dem zehnfachen des LTE Standards. Ein interessanter Aspekt bei der Betrachtung der verschiedenen Mobilfunkgenerationen ist deren Lebensdauer. Die verschiedenen Lebenszyklen sind in Abbildung 4 visuell dargestellt. Zu beachten ist, dass sich der GSM Standard viel länger gehalten hat, als sein eigentlicher Nachfolger UMTS. Zudem erwähnenswert ist, dass immer eine gewisse Zeitliche Überlappung der einzelnen Generationen besteht, da die Infrastruktur und die Geräte nicht sofort auf den neusten Stand gebracht werden können.

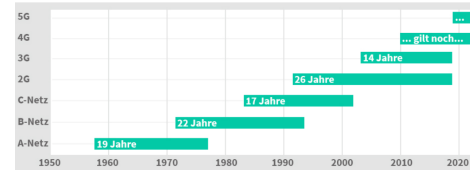


Abbildung 4: Lebenszyklen [6]

Eng mit den Lebenszyklen verknüpft, ist die Verfügbarkeit und die Erschwinglichkeit für die Breite Masse. Gerade zu Beginn der Telefonie war dies nur den wohlhabenderen Einwohner vorbehalten, mit Preisen bis zu 15.000 DM. Ihren Höhepunkt erreicht die analoge Telefonie mit der Einführung des C-Netzes und einem Höchststand von 800.000 Nutzern [7]. Mit der Einführung des ersten digitalen Mobilfunkstandards GSM, wurde der wohl prägenste Schritt in der Mobilkommunikation getroffen, der sich bis heute noch aktiv genutzt wird. Mit über 76 Millionen Nutzern in Deutschland (Stand Ende 2005 [7]), wurde hiermit erstmals die Breite Masse der Bevölkerung abgedeckt. Auch wenn der neue UMTS Standard eine deutlich bessere Datenrate im Vergleich zu GSM bot, konnte sich dieser nicht durchsetzen. Der UMTS Standard wurde bereits im Jahr 2021 abgestellt, währenddessen der GSM Standard weiterhin für die flächendeckende Grundversorgung in Deutschland zuständig ist. Gründe dafür sind zum einen der Frequenzbedarf. Die Frequenzen die UMTS nutzte werden derzeit für die Ausbau des 4G und 5G Netzes gebraucht. Zum anderen ist die die Flächendeckung durch GSM bereits gegeben und auch Systeme wie das Notrufsystem beruht noch auf GSM. Wie auch schon in der Einführung erwähnt, ist der Ausbau des 4G und 5G Standards in Deutschland eher schleppend. Nach einem Ranking von der Strategie- und Innovationsberatung Arthur D. Litte aus dem Jahr 2019 „liegt Deutschland zwischen Lettland und Norwegen auf dem 18. von 43 Plätzen“ [8]. Als mögliche Gründe dafür, kann mitunter zwar auch die Politik und die Netzbetreiber aufgeführt werden, allerdings ist es Gerade in Deutschland durch das gegebene Terrain und die weniger geballten bewohnten Flächen eine Herausforderung, flächendeckend und den größtmöglichen Teil der Bevölkerung abzudecken.

Um noch einmal auf die Übersicht aus Tabelle 1 zurückzukommen, ist es offensichtlich in einem Generationenvergleich auch auf die für den Endnutzer am wichtigste Kenngröße, die Datenrate zu schauen. Hierbei ist allerdings auch den den Verwendungszweck und die Zeitepoche zu berücksichtigen. In einer Zeit, in der Streamingdienste und digitale Kommunikation immer relevanter sind, ist eine höhere Datenrate nötig im Vergleich zu den Beginn des GSM Standards, in welcher lediglich einfache SMS verschickt werden sollten. Dennoch sind die Sprünge, gerade der von UMTS auf LTE und der von LTE auf 5G mit bis zu der 10fachen Datenrate positiv hervorzuheben.

Als letzter Vergleichspunkt wird die genutzte Modulationsart im Bezug auf deren Signalzu-

Rausch-Verhältnis (SNR) für eine bestimmte Bitfehlerrate (BER) betrachtet. Hierbei beschreibt

Modulation	SNR für BER = 10^{-6}	Referenz
GMSK	8 - 9dB (für BER = 10^{-3})	[9]
QPSK	9.5 - 10dB	[10]
64-QAM	18 - 22dB	[9]
256-QAM	25 - 30dB	[9]

Tabelle 2: Übersicht SNR für verschiedene Modulationsarten bei BER = 10^{-6}

das SNR das Verhältnis zwischen Signalleistung und Rauschleistung. Einfach ausgedrückt, je höher das SNR, desto besser ist die Signalqualität. Die hier referenzierte Bitfehlerrate (BER) ist ein Maß, wie viele Bits falsch sind, im Verhältnis zu den gesamten gesendeten Bits. Hier gilt, je kleiner das BER, desto besser die Singalqualität. Tabelle 3 zeigt deutlich, den Zusammenhang zwischen der Anzahl der verfügbaren Bits und der Notwendigkeit für robustheit gegenüber Störungen wie Rauschen. Daraus abzuleiten ist ebenfalls, dass die Technik hinter den Sendern und Empfänger immer besser und robuster werden muss um die immer Höheren Datenraten zu unterstützen.

4 Forschung - Zukunftsausblick

Natürlich wird derzeit von vielen verschiedenen Instituten an neuen 6G Standards geforscht. Spezieller Fokus liegt hierbei vor allem auf den europäischen Zielsetzungen, beschrieben im White Paper „European vision for the 6G network ecosystem“[11]. Als die wichtigsten Punkte, neben dem immer existenten Ziel der Nachhaltigkeit, ist vor allem eine schnelleren Latenzzeit (von $< 1ms$) und eine perfekte Flächenabdeckung, durch eine Kombination aus Basisstationen und Satelliten. Zusätzlich sollen Peak-Datenraten von bis zu 1Tbis/s, durch Nutzung von Frequenzen im Terahertzbereich, ermöglicht werden. Gerade im Automobilbereich und der Industrie werden Themen wie **Edge-Computing** und **Zero-Trust-KI-Architekturen**, die massiv von den Vorteilen der 6G Standards profitieren, einen großen Einfluss auf die geplanten Standards haben.

5 Zusammenfassung

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass gerade in den letzten zwei Jahrzehnten große Sprünge in der Verfügbarkeit und der Effizienz der Mobilfunksysteme gemacht wurden. Von teuren einzelnen analogen Endgeräten, hin zu flächendeckenden digitalen und schnellen Mobilfunk. Dennoch ist die Nachfrage und Forschung zu immer schnelleren und noch effizienteren Mobilfunksystemen so potent wie nie zuvor. Gerade in Deutschland wird der 5G Ausbau stark gefördert. Allerdings kommen hier auch Gegenstimmen, wie CDU-Ministerin Karliczek auf. Diese sagte in einem Interview mit der FAZ: „5G nicht an jeder Milchkanne notwendig“[12]. Gemeint ist hiermit, dass nicht jede Region in Deutschland unbedingt mit 5G versorgt werden muss, was eine weiterführende Debatte auch in Zukunft über die Verfügbarkeit von 6G eröffnet.

Literaturverzeichnis

- [1] F.-I. für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO. „Interview mit Friedrich Merz. “Adresse: <https://www.fraunhofer.de/de/forschung/aktuelles-aus-der-forschung/interview-mit-friedrich-merz.html>
- [2] D. Bundestag, „Bericht des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung, “ *Drucksache*, Jg. 18. Ausschuss, Nr. 20/5646, 2023.
- [3] IBL-Editors. „Frequenzmodulation (FM). “Adresse: [https://ib-lenhardt.com/de/wissen/gl/frequenzmodulation#:~:text=Die%20Frequenzmodulation%20\(Frequency%20Modulation%2C%20FM\)%20ist%20ein,bei%20der%20%C3%9Cbertragung%20von%20Sprache%20und%20Musik.](https://ib-lenhardt.com/de/wissen/gl/frequenzmodulation#:~:text=Die%20Frequenzmodulation%20(Frequency%20Modulation%2C%20FM)%20ist%20ein,bei%20der%20%C3%9Cbertragung%20von%20Sprache%20und%20Musik.)
- [4] N. Zeller, „Digitale Nachrichtenübertragung,“ *Vorlesung Nachrichtentechnik*, Jg. 1, Nr. 03, 2025.
- [5] T. Webb, L. Hanzo, T. Keller und B. Luy, *Modern Quadrature Amplitude Modulation: Principles and Applications for fixed and wireless channels: one*, 1. Aufl. Stadt: IEEE Press - John Wiley, 1994.
- [6] Delock. „Mobilfunkstandards - Van den Anfängen bis heute. “Adresse: <https://www.delock.de/infothek/Mobilfunkstandards/mobilfunkstandards.html>
- [7] W. Filensky, „Entwicklung des öffentlichen Mobilfunks in Deutschland,“ *Vierteljährliche Information der Forschungsgemeinschaft Funk e.V.*, Nr. G 14514, 2006.
- [8] O. Falck, V. Lindlacher, W. Eschweiler, D. Wössner und M. Heinz, „Versteigerung der 5G-Lizenzen in Deutschland – ein Meilenstein auf dem Weg in die digitale Zukunft?“ *ifo Schnelldienst*, Jg. 72, Nr. 21, S. 3–14, 2019, ISSN: 0018-974X.
- [9] D. Singh, A. K. Kesarwani und M. Yadav, „Performance of Digital Modulation Techniques on Basis of Bit Error Rate and Signal to Noise Ratio,“ *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) ENCADEMS*, Jg. 8, Nr. 10, 2020.
- [10] M. A. Masud, M. Samsuzzaman und M. A. Rahman, „Bit Error Rate Performance Analysis on Modulation Techniques of Wideband Code Division Multiple Access,“ *Journal of Telecommunications*, Jg. 1, Nr. 2, März 2010.
- [11] 6G-IA Vision Working Group, „European Vision for the 6G Network Ecosystem,“ 6G Smart Networks und Services Industry Association (6G-IA), White Paper, Version 2.0, Nov. 2024, Accessed: 2024-11-22. DOI: 10.5281/zenodo.13708424 Adresse: <https://doi.org/10.5281/zenodo.13708424>
- [12] A. Karliczek, „Interview zum 5G-Ausbau,“ *Frankfurter Allgemeine Zeitung*, Nov. 2018.

Abbildungsverzeichnis

1	Diskrete Fourier-Transformation eines 10kHz Cosinussignals	2
2	Beispiel einer QPSK-Konstellation	3
3	Beispiel einer 16-QAM[4]	4
4	Lebenszyklen [6]	5

Tabellenverzeichnis

1	Übersicht Technische Daten der Mobilfunkgenerationen [6]	4
2	Übersicht SNR für verschiedene Modulationsarten bei $\text{BER} = 10^{-6}$	6