



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:	21. November 2025	

Inhaltsverzeichnis

1 Motivation	1
2 Grundlagen	1
2.1 Diskrete Fourier-Transformation und Spektrum	1
2.2 Beispiel: Diskrete Fourier-Transformation eines Cosinuses	2
2.3 Modulation	2
2.3.1 Frequenzmodulation (FM)	2
2.3.2 Gaussian Minimum Shift Keying (GMSK) [4]	3
2.3.3 Phase Shift Keying (PSK)	3
2.3.4 Quadrature Amplitude Modulation (QAM)	4
3 Generationsüberblick	4
4 Forschung — Zukunftsausblick	5
5 Ergebnisse	5
6 Diskussion	5
7 Zusammenfassung	5
8 Ausblick	5
Literaturverzeichnis	6
Abbildungsverzeichnis	6
Tabellenverzeichnis	6

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 Problemen 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 erklärt 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:

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

2.2 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:

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

Grafisch dargestellt sieht dies wie folgt aus:

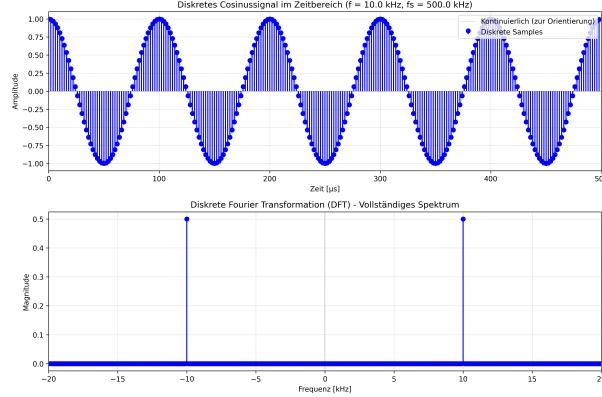


Abbildung 1: Diskrete Fourier-Transformation eines 10kHz Cosinussignals

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.

2.3 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 den verschiedenen Mobilfunkgenerationen verwendet werden.

2.3.1 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]

2.3.2 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, als in einem rechten Winkel zueinander stehen müssen:

1. Symbol 0: $s_1 = A \cdot \cos(2\pi \cdot f_1 \cdot t)$
2. Symbol 1: $s_2 = A \cdot \cos(2\pi \cdot f_2 \cdot t)$

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

2.3.3 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.

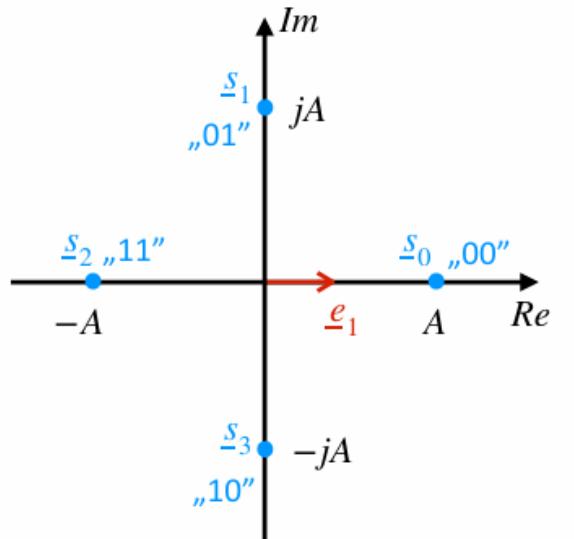


Abbildung 2: Beispiel einer QPSK-Konstellation

2.3.4 Quadrature Amplitude Modulation (QAM)

Gerade bei neueren Mobilfunkstandards wie LTE und 5G ist die Quadrature Amplituden Moduation (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:

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

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].

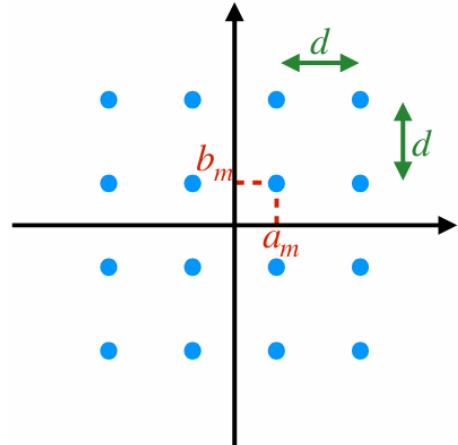


Abbildung 3: Beispiel einer 16-QAM[4]

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 Zusammenassung 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 aufbauend 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, als das mobile Internet eingeführt. Durch den im Jahr 2012 beschlossenen „Long Term Evolution“ (LTE) Standard kam nun ein verbesserte Datenrate, flächendeckenden guten 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 allen 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.

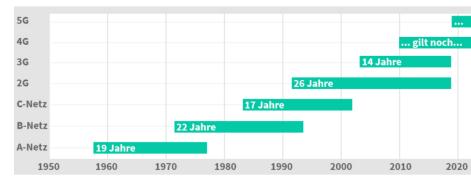


Abbildung 4: Lebenszyklen [6]

4 Forschung — Zukunftsausblick

5 Ergebnisse

6 Diskussion

7 Zusammenfassung

8 Ausblick

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/g1/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/g1/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*, 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>.

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
---	--	---