



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:	19. 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
3.1 1G — Analogfunk	4
3.2 2G — Digitale Sprachübertragung	4
3.3 3G — Mobile Datenübertragung	4
3.4 4G — Breitbandmobilfunk	4
3.5 5G — Vernetzung und IoT	4
4 Forschung — Zukunftsausblick	4
5 Ergebnisse	4
6 Diskussion	4
7 Zusammenfassung	4
8 Ausblick	4
Literaturverzeichnis	5
Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	5

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:

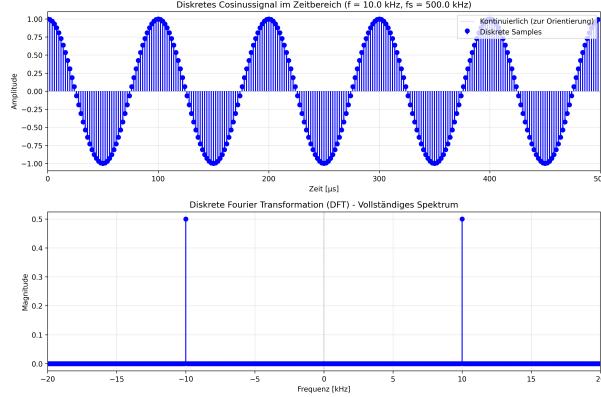


Abbildung 1: Diskrete Fourier-Transformation eines 10kHz Cosinussignals

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.

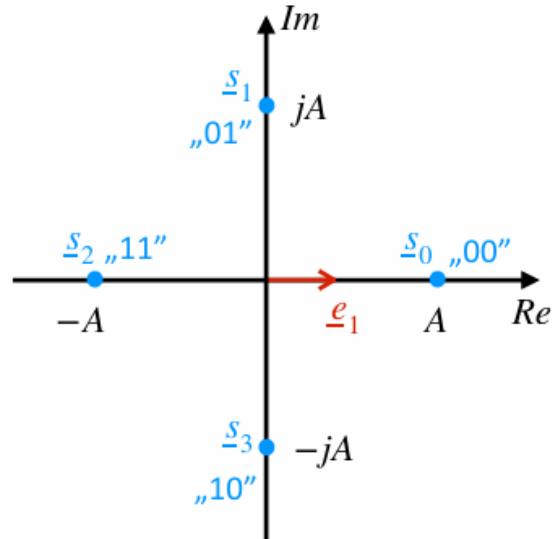


Abbildung 2: Beispiel einer QPSK-Konstellation

2.3.4 Quadrature Amplitude Modulation (QAM)

3 Generationsüberblick

3.1 1G — Analogfunk

3.2 2G — Digitale Sprachübertragung

3.3 3G — Mobile Datenübertragung

3.4 4G — Breitbandmobilfunk

3.5 5G — Vernetzung und IoT

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/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*, Nr. 03, 2025.

Abbildungsverzeichnis

1	Diskrete Fourier-Transformation eines 10kHz Cosinussignals	2
2	Beispiel einer QPSK-Konstellation	3

Tabellenverzeichnis