

1

Einführung

Dieses Kapitel gibt einen ersten Überblick über die Elemente digitaler und analoger Übertragungssysteme. Daneben gehen wir auch auf die wichtigsten Standardisierungsgremien ein, die dafür sorgen, dass Systeme verschiedener Hersteller miteinander kommunizieren können.

■ 1.1 Nachrichtentechnik – ein Überblick

Zwei Computer sind über ein Kommunikationsnetz verbunden und tauschen Daten aus (Bild 1.1) – dieses Prinzip liegt vielen Anwendungen der Nachrichtentechnik zugrunde. Beispielsweise kann es sich bei einem Computer um den privaten PC zu Hause handeln, der mit einem Server eines Internetanbieters kommuniziert. Es kann sich aber auch um einen Computer in einer Fertigungslinie handeln, der Daten von Sensoren erfasst und an einen Zentralrechner übermittelt. Oder um Steuergeräte für Antrieb, Bremsen usw. in einem Fahrzeug. Entsprechend der Vielzahl dieser Anwendungen kommen viele verschiedene Übertragungssysteme zum Einsatz: Ethernet, WLAN (Wireless Local Area Network), Bluetooth, DSL (Digital Subscriber Line) oder Feldbusse für kürzere Entfernungen und die Übertragung über Lichtwellenleiter, Richtfunk oder Satellit bei großen Entfernungen.



Bild 1.1 Ein Kommunikationssystem

Trotz dieser Vielzahl gibt es grundlegende Funktionen, die den Systemen gemeinsam sind. Bild 1.2 zeigt ein allgemeines Modell eines Übertragungssystems. Im Sender finden wir die Quellen- und Kanalcodierung sowie die Modulation. Der Empfänger besteht aus den entsprechenden Funktionen der Quellen- und Kanaldecodierung und der Demodulation. Sender und Empfänger sind über den Übertragungskanal – oder kurz Kanal – verbunden.

Betrachten wir das System von „innen“ heraus und beginnen mit dem Kanal: Der Kanal ist das physikalische Übertragungsmedium zwischen Sender und Empfänger. Dabei kann es sich z. B. um eine terrestrische oder satellitengebundene Funkstrecke, ein Telefonkabel, einen Lichtwellenleiter oder auch um ein Speichermedium wie die Compact Disc (CD) handeln. Der Kanal dämpft und verzerrt das vom Sender ausgehende Nutzsignal, und es überlagern sich Störungen in Form eines Rauschsignals. Das Verhältnis der Leistung des Nutzsignals zur Leistung

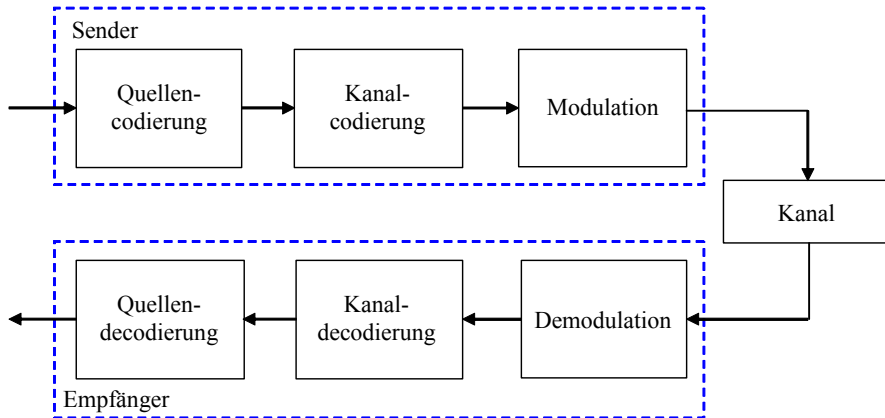


Bild 1.2 Elemente eines Übertragungssystems

des Rauschsignals am Empfängereingang bezeichnet man als Signal-Rausch-Verhältnis. Eine weitere wesentliche Eigenschaft des Kanals ist dessen Bandbreite, d. h. die Größe des für die Übertragung nutzbaren Frequenzbereichs. Bei einem digitalen Übertragungssystem bestimmen das Signal-Rausch-Verhältnis und die Bandbreite die erzielbare Übertragungsrate. Diese wird meist in Bit pro Sekunde (bit/s) angegeben.

Der Block Modulation bildet die zu übertragende Nachricht auf für den Kanal geeignete Signale ab. Modulation und Demodulation können auch Funktionen zur spektralen Formung des gesendeten Signals bzw. zur Entzerrung des Signals im Empfänger, oder im Falle einer optischen Übertragung die elektrisch-optische Wandlung des Signals, beinhalten. Der Begriff Modem leitet sich aus der Zusammenfassung Modulation-Demodulation ab.

Wie die Begriffe Bandbreite, Frequenzbereich und spektrale Formung andeuten, spielen in der Nachrichtentechnik sowohl der Zeit- als auch der Frequenzbereich eine wichtige Rolle. Bild 1.3 zeigt links ein Signal im Zeitbereich. Es handelt sich um ein Sinussignal, dem Rauschen überlagert ist. Bild 1.3 rechts zeigt das Spektrum dieses Signals. Das Spektrum zeigt die Verteilung der Leistung oder der Amplitude über der Frequenz. Die Verbindung zwischen Zeit- und Frequenzbereich stellt die Fourier-Transformation her.

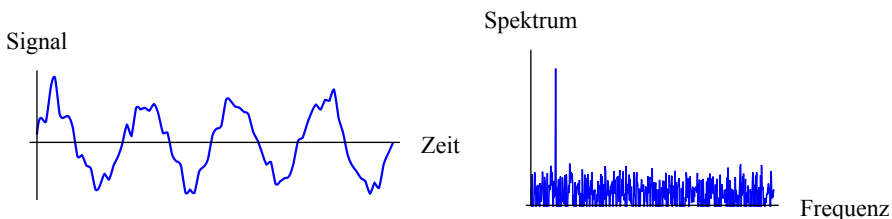


Bild 1.3 Ein Signal im Zeit- und im Frequenzbereich

Bei einem digitalen Übertragungssystem ist die Bitfehlerwahrscheinlichkeit ein wichtiges Qualitätskriterium. Grundsätzlich kommt es durch das dem Nutzsinal überlagerte Rauschen bei der Übertragung zu Bitfehlern. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Bit verfälscht wird, ist umso

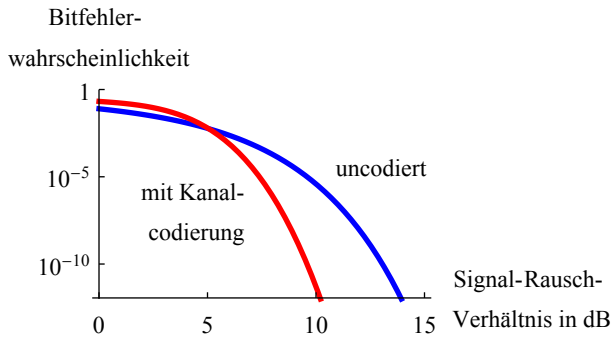


Bild 1.4 Bitfehlerwahrscheinlichkeit und Kanalcodierung

größer, je kleiner das Signal-Rausch-Verhältnis ist. Bild 1.4 zeigt einen typischen Verlauf der Bitfehlerwahrscheinlichkeit als Funktion des Signal-Rausch-Verhältnisses.

Mithilfe der Kanalcodierung lassen sich nun Bitfehler, die durch Störungen und auch durch Verzerrungen im Übertragungskanal verursacht werden, korrigieren. Dies geschieht, indem sendeseitig eine Zusatzinformation in Form von Redundanzbits zu der zu übertragenden Information hinzugefügt wird. Durch Auswertung der Redundanzinformation wird der Kanaldecodierer des Empfängers in die Lage versetzt, Bitfehler korrigieren zu können. Bild 1.4 zeigt die Verbesserung, die mit einer Kanalcodierung erzielt wird. Die Verbesserung drückt sich dadurch aus, dass bei gleicher Bitfehlerwahrscheinlichkeit mit Kanalcodierung ein geringeres Signal-Rausch-Verhältnis erforderlich ist als bei uncodierter Übertragung. Der steile Verlauf bei einem großen Signal-Rausch-Verhältnis ist typisch für digitale Übertragungssysteme. Er weist darauf hin, dass bei zunehmenden Störungen die Bitfehlerwahrscheinlichkeit stark ansteigt und die Übertragungsqualität schlagartig abnimmt. Wie man allerdings erkennt, schneiden sich die Kurven für codierte und uncodierte Übertragung. Links vom Schnittpunkt, also bei einem sehr kleinen Signal-Rausch-Verhältnis, ist die Bitfehlerwahrscheinlichkeit bei codierter Übertragung sogar größer als bei uncodierter Übertragung. Dies ist auf die zusätzlich zu übertragende Redundanzinformation zurückzuführen.

Am Eingang unseres Übertragungssystems in Bild 1.2 finden wir die Quellencodierung. Aufgabe der Quellencodierung ist es, die zu übertragende Nachricht mit einer möglichst geringen Anzahl von Bits darzustellen. Dazu wird die in der Nachricht enthaltene redundante Information minimiert. Die Trennung von Quellen- und Kanalcodierung geht auf die grundlegenden Arbeiten zur Informationstheorie von Claude Shannon aus dem Jahr 1948 zurück. Bekannte Quellencodierungsverfahren sind beispielsweise MPEG (Moving Picture Experts Group) für Videosignale und AAC (Advanced Audio Coding) für Audiosignale.

■ 1.2 Digitale und analoge Übertragung

Bei der großen Mehrzahl der heutigen Übertragungssysteme handelt es sich um digitale Systeme. Analoge Verfahren findet man im Bereich des Hörfunks, aber auch z. B. in der Sensorik. Eine Funktion, die sowohl in digitalen als auch in analogen Systemen zu finden ist, ist die Modulation eines Basisbandsignals auf einen sinusförmigen Träger. Ein Basisbandsignal ist das

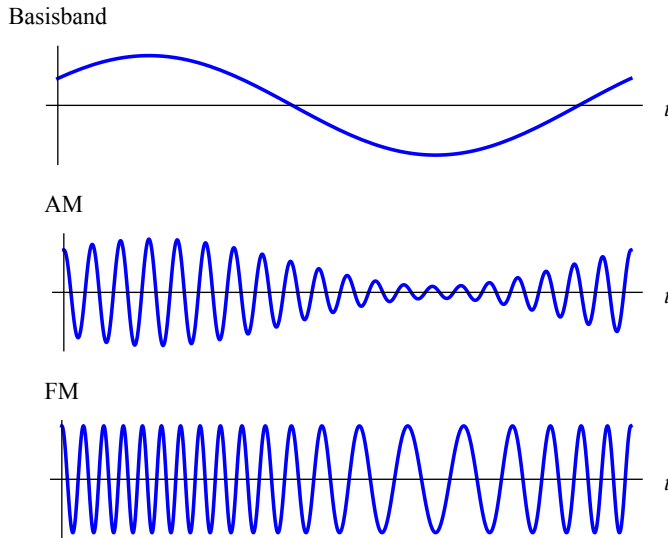


Bild 1.5 Analoge Modulationsverfahren

Quellensignal in seiner ursprünglichen Lage bei niedrigen Frequenzen. Durch die Modulation wird es zu höheren Frequenzen hin verschoben. Die wichtigsten analogen Modulationsverfahren sind die Amplitudenmodulation (AM) und die Frequenzmodulation (FM). Bei der AM ändert sich die Amplitude des Trägersignals in Abhängigkeit vom Basisbandsignal, und bei der FM ändert sich dessen Frequenz (Bild 1.5).

Bei den digitalen Modulationsverfahren repräsentiert das Basisbandsignal die zu übertragende Binärfolge (Bild 1.6). Bei der Amplitudenumtastung (Amplitude-Shift Keying, ASK) ändert sich die Amplitude in Abhängigkeit vom Basisbandsignal. Bei der Phasenumtastung (Phase-Shift Keying, PSK) ändert sich entsprechend die Phase und bei der Frequenzumtastung (Frequency-Shift Keying, FSK) die Frequenz.

Digitale Übertragungssysteme enthalten viele analoge Komponenten, und auch umgekehrt findet sich bei analogen Systemen die digitale Signalverarbeitung. Der Übergang von analogen zu digitalen – oder genauer zeitdiskreten Signalen – erfolgt mithilfe eines Analog-Digital (A/D)- bzw. Digital-Analog (D/A)-Wandlers. Bild 1.7 zeigt eine typische Aufteilung von digitaler und analoger Signalverarbeitung in einem Übertragungssystem. Ein analoges Quellensignal wird mit einem A/D-Wandler digitalisiert. Anschließend wird das modulierte Signal mithilfe der digitalen Signalverarbeitung erzeugt und in ein analoges Signal gewandelt. Auf den D/A-Wandler folgen weitere analoge Komponenten, typischerweise ein Mischer, mit dem das Signal auf die gewünschte Frequenz umgesetzt wird, und ein Leistungsverstärker. Der Empfänger besteht aus einer entsprechenden Signalverarbeitungskette.

Die grundlegenden Funktionen der A/D-Wandlung sind die Abtastung und die Quantisierung des analogen Signals (Bild 1.8). Durch die Abtastung des analogen Signals $x(t)$ mit der Abtastrate f_A erhalten wir das zeitdiskrete Signal $x(n)$. Die Punkte in der Darstellung von $x(n)$ markieren die äquidistanten Abtastwerte im Abstand $T_A = 1/f_A$. Unter Quantisierung versteht man die Abbildung der Amplitude der Abtastwerte auf eine endliche Anzahl von diskreten Werten.

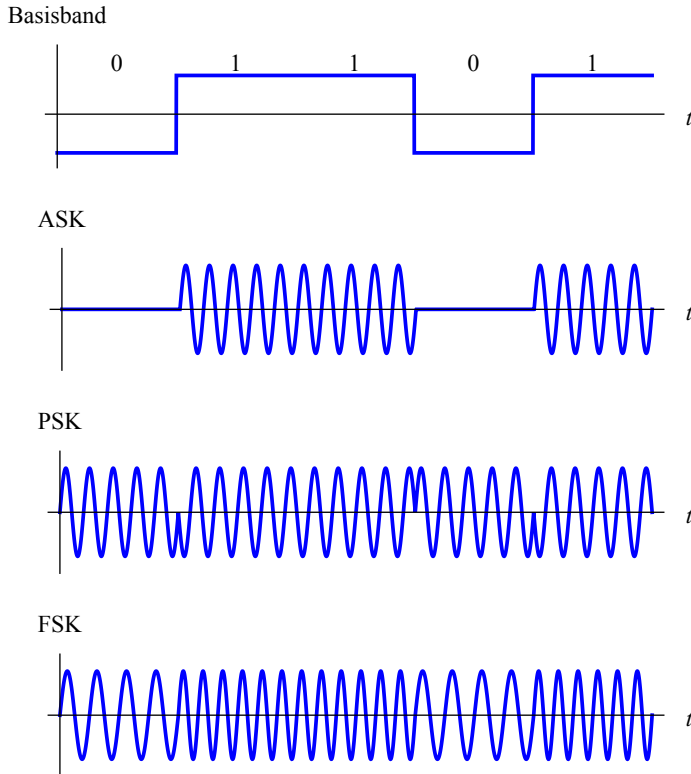


Bild 1.6 Digitale Modulationsverfahren

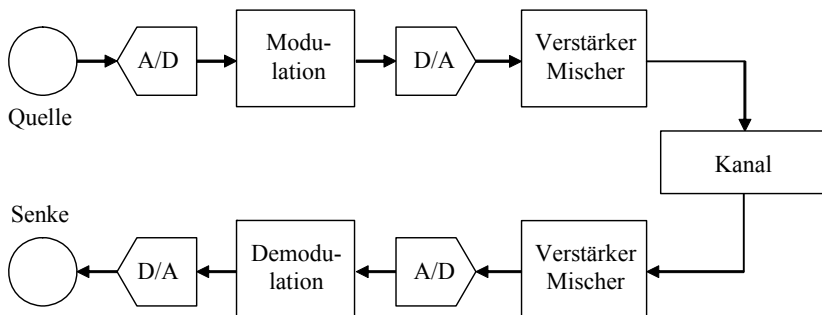


Bild 1.7 Digitale und analoge Signalverarbeitung

In der Nachrichtentechnik haben wir es in der Regel mit einer Echtzeitverarbeitung der Daten zu tun, bei der die Signalverarbeitung in einer fest begrenzten Zeit ausgeführt werden muss. Während man im Audibereich mit Abtastraten von einigen 10 kHz arbeitet, findet man in digitalen Übertragungssystemen Abtastraten bis zu 100 MHz und darüber hinaus. Beispielsweise muss bei der Filterung eines Audiosignals, das mit 44,1 kHz abgetastet wurde (diese Abtastrate

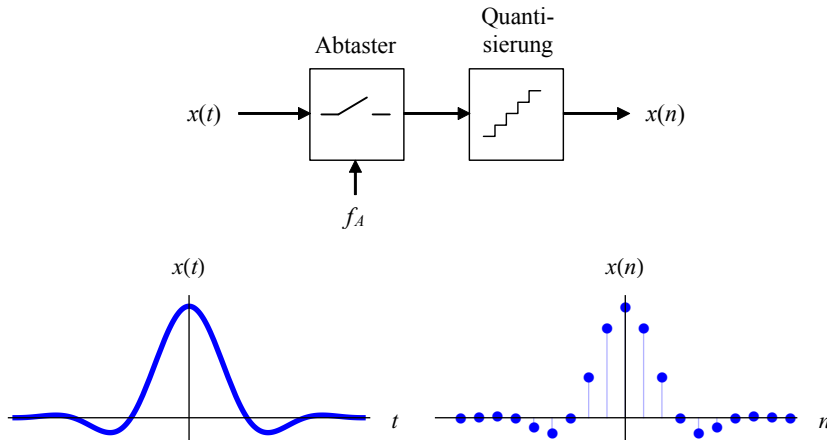


Bild 1.8 Ein zeitdiskretes Signal entsteht durch Abtastung eines analogen Signals

wird bei der Audio-CD verwendet), die digitale Filterfunktion alle $1/44,1 \text{ kHz} = 22,67 \mu\text{s}$ einen neuen Ausgangswert berechnen. Bei einer Abtastung mit 100 MHz stehen dagegen nur 10 ns für die Verarbeitung eines Abtastwertes zur Verfügung.

1.3 Standardisierung

Standards sind in der Nachrichtentechnik von großer Bedeutung, da nur durch sie gewährleistet wird, dass Systeme verschiedener Hersteller miteinander kommunizieren können. Standardisierungsgremien erarbeiten offene Standards, die allen Herstellern zur Verfügung stehen, um konforme Produkte zu entwickeln. Die Standardisierung ist einerseits oft Voraussetzung, aber andererseits keine Garantie für erfolgreiche Entwicklungen.

Das weltweit wichtigste Standardisierungsgremium ist die *International Telecommunication Union* (ITU, www.itu.int). Die ITU ist eine Untergruppe der Vereinten Nationen und gliedert sich in drei Sektoren:

- ITU-T (Telecommunication Standardization Sector)
- ITU-R (Radiocommunication Sector)
- ITU-D (Telecommunication Development Sector)

Die ITU-T ist aus der CCITT (Comité Consultatif International de Télégraphique et Téléphonique) und die ITU-R aus der CCIR (Comité Consultatif International des Radiocommunications) hervorgegangen. Die ITU-R reguliert die weltweite Nutzung von Radiofrequenzen, und die ITU-D ist für Entwicklungsländer zuständig. Die für Telekommunikationsstandards zuständige ITU-T erarbeitet international gültige Empfehlungen (Recommendations). Diese sind in durch Buchstaben gekennzeichnete Serien geordnet. Beispielsweise befasst sich die G-Serie mit Übertragungssystemen (Transmission systems and media, digital systems and networks).

Die *International Organization for Standardization* (ISO, www.iso.org) ist die Dachorganisation der nationalen Normenausschüsse. Dies sind beispielsweise in Deutschland das DIN

(Deutsches Institut für Normung) und in den USA das ANSI (American National Standards Institute). Die ISO stimmt die von den einzelnen Ländern vorgeschlagenen Standards ab und ist z. B. für die ISO-9000-Serie im Bereich des Qualitätsmanagements bekannt. Im Bereich der Telekommunikation ist insbesondere die OSI-Architektur der ISO von Bedeutung.

Das *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI, www.etsi.org) wurde von der Europäischen Gemeinschaft gegründet und hat für die Normung im Bereich der Telekommunikation in Europa große Bedeutung. Ein überaus erfolgreicher ETSI-Standard im Mobilfunk ist GSM (Global System for Mobile Communications).

Das *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE, www.ieee.org) erarbeitet Normen auf dem Gebiet der Elektrotechnik und Informatik und ist insbesondere für die Standards der IEEE-802-Reihe für lokale Rechnernetze bekannt.

Für den Bereich des Internets ist die *Internet Engineering Taskforce* (IETF, www.ietf.org) das wichtigste Gremium, obwohl auch die ITU in den letzten Jahren hier verstärkt (in der Y-Serie) tätig wurde. Die IETF wurde 1989 als Untergruppe des IAB (Internet Architecture Board) gegründet und erarbeitet Standards für das Internet. Diese heißen RFCs (Request for Comments) und sind frei verfügbar.

■ 1.4 Zum Inhalt dieses Buches

Kapitel 2 beschreibt Signale und deren Übertragung über lineare, zeitinvariante Systeme. Die hier behandelten Themen wie Impulsantwort und Faltung, Fourier-Transformation, Übertragungsfunktion und die Beschreibung von Zufallssignalen sind wichtige Grundlagen für die folgenden Kapitel.

Kapitel 3 und 4 befassen sich mit der Signalabtastung und Quantisierung als Grundlage der Analog-Digital-Wandlung sowie der digitalen Signalverarbeitung. Das Abtasttheorem ist für die Arbeit mit zeitdiskreten Signalen von fundamentaler Bedeutung. Wir gehen auch auf die für die Nachrichtentechnik wichtige Abtastung von Bandpasssignalen ein, bei der durch eine Unterabtastung die Abtastrate reduziert werden kann. Viele Verfahren der Nachrichtentechnik gehen von zeitdiskreten Signalen aus. Bei der digitalen Signalverarbeitung konzentrieren wir uns auf die aus Sicht der Nachrichtentechnik wichtigen Themen.

Kapitel 5 behandelt die digitale Nachrichtenübertragung im Basisband, und **Kapitel 6** beschäftigt sich mit Modulationsverfahren. Auch bei der Verwendung eines Modulationsverfahrens erfolgt die Signalverarbeitung weitgehend im Basisband, sodass die Konzepte von Kapitel 5 von grundlegender Bedeutung sind. Wir behandeln analoge und digitale Modulationsverfahren und zuvor als gemeinsame Grundlage die Darstellung von Bandpasssignalen durch ihr äquivalentes Tiefpasssignal.

Gegenstand von **Kapitel 7** sind Kanalcodierungsverfahren und deren Decodierung, und in **Kapitel 8** gehen wir auf einige Aspekte von Kommunikationsnetzen ein, die über die Nachrichtenübertragung zwischen zwei Punkten hinausgehen.

Bei vielen Themen musste eine Auswahl getroffen werden. Am Ende jedes Kapitels finden sich daher weiterführende Hinweise mit Anmerkungen zu den Aspekten, die nicht behandelt wurden, und entsprechende Literaturhinweise. Ferner wird auf Veröffentlichungen hingewiesen, die zu den Klassikern in der Nachrichtentechnik gehören. Und wir blicken hier gelegentlich

auf aktuelle Forschungstrends und mit der Nachrichtentechnik verwandte Themen, in denen interessante Entwicklungen zu beobachten sind.

Für die Vertiefung des Stoffes finden sich am Ende jedes Kapitels Übungsaufgaben, die Lösungen dazu stehen im Anhang. Dort findet man auch nützliche Formeln und Tabellen. Neben Aufgaben, die mit Papier und Bleistift bearbeitet werden können, ist die Simulation von Übertragungssystemen sehr hilfreich, um Zusammenhänge verständlich zu machen oder um komplexere Systeme zu entwerfen. Als Simulationswerkzeuge bieten sich MATLAB und (als kostenfreie Alternativen) Scilab und Python an.

Auf den Internetseiten zum Buch

<https://plus.hanser-fachbuch.de/> und

<https://www.hs-schmalkalden.de/nachrichtentechnik>

stehen daher MATLAB-, Scilab- und Python-Dateien zur Verfügung, um ein einfaches Übertragungssystem zu simulieren und die als Ausgangspunkt für eigene Simulationen dienen können. Ebenso werden dort die Bilder aus dem Buch sowie interaktive Mathematica-Notebooks, u. a. zu den Themen Faltung, Abtasttheorem und diskrete Fourier-Transformation, bereitgestellt. Im einzelnen sind folgende Materialien verfügbar:

- Die **Bilder** des Buches als PDF-Datei
- Simulationen mit **MATLAB** und **Scilab**
- Simulationen mit **Python**
- Interaktive **Mathematica-Notebooks**

Zu den Simulationen gehört jeweils eine Beschreibung als PDF-Dokument und die MATLAB-, Scilab- und Python-Dateien. Der Python-Code steht in Form eines Jupyter-Notebooks zur Verfügung. Die Simulationen beinhalten:

- Basisband-Übertragung und Empfänger mit signalangepasstem Filter
- QPSK-Übertragungsstrecke und Empfänger mit signalangepasstem Filter
- QPSK-Übertragungsstrecke mit Mehrwegekanal und Empfänger mit T/2-Entzerrer

Die Mathematica-Notebooks können mit der kostenlosen Wolfram-Player-Software geöffnet werden. Auf eine englische Online-Version kann man beim Wolfram Demonstrations Project zugreifen. Die Notebooks sind zu folgenden Themen verfügbar:

- Faltung
- Abtasttheorem
- Diskrete Faltung
- Diskrete Fourier Transformation
- Analoge Modulation
- Digitale Modulation (QPSK)