

## 7 Rechnernetze

Bis in die frühen 80er Jahre waren Computer große und teure Anlagen, zu denen nur wenige Personen direkten Zugang besaßen. Betriebe und Universitäten hatten Rechenzentren eingerichtet, welche die kostbare Rechnerleistung verwalteten. Die Benutzer mussten sich in Terminalräume begeben, wenn sie am Rechner arbeiten wollten. Diese Situation hat sich in den 80er Jahren dramatisch verändert. Personal Computer und Workstations, die direkt auf den Schreibtischen von Entwicklern und Ingenieuren stehen, liefern nicht nur ausreichende Rechenleistung, sie bieten mit ihrer Grafikfähigkeit und ihren Benutzeroberflächen eine viel attraktivere Arbeitsumgebung als frühere Großrechner. Heute sind jene weitgehend verdrängt, und nur noch für bestimmte zentrale Aufgaben finden sie Anwendung. Die Leistungsfähigkeit von Personal Computern ist mittlerweile so weit gediehen, dass auch die Unterscheidung von Workstations und Personal Computern keinen Sinn mehr macht. Wir sprechen daher allgemein von *Rechnern* und meinen damit sowohl Workstations als auch Personal Computer und tragbare Geräte, also Tablet-, Netbook-, Notebook-, Laptop-Computer und Smartphones.

Rechner sind heute fast immer mit einem Netzwerk verbunden. Das Konzept einer dezentralen Rechnerversorgung mit Servern, die die Rolle eines zentralen Datei-Verwalters übernehmen und viele andere Dienste (E-Mail, WWW, Datenbankenbindung, Cloud Computing, etc.) anbieten und Rechnern, die als Klienten diese Dienste in Anspruch nehmen, hat sich jedoch weitgehend durchgesetzt. Wir sind darauf im Kapitel über Betriebssysteme bereits unter dem Stichwort „Client-Server-Systeme“ eingegangen (siehe dazu auch S. 543).

In neuerer Zeit ist zu diesen *Rechnern* noch eine Vielzahl anderer Geräte hinzugekommen, deren Leistungsfähigkeit zum Teil ein ähnliches Niveau erreicht. Der einzige Unterschied liegt darin, dass sie meist auf spezielle Anwendungen ausgerichtet sind. Dazu zählen vor allem *Navigationsgeräte*, *GPS-Empfänger* (Global Positioning System), *persönliche digitale Assistenten* (PDAs) und *mobile Telefone* (Handys) sowie Kombinationen aus diesen Gerätetypen (*Smartphones, etc.*).

Die große Herausforderung ist die Vernetzung all dieser Geräte, wobei in die Netze, in Zukunft noch mehr als heute, Geräte wie Drucker, Scanner, Photo- und Videoapparate, HiFi-Anlagen, Fernseher, Heizungen, Kühlschränke, Waschmaschinen, etc. einbezogen sein werden. Ebenfalls in ein häusliches Netz werden *intelligente Zähler* zur Messung des Strom-, Wasser-, Gas-, und Wärmeverbrauchs integriert sein.

## 7.1 Rechner-Verbindungen

Die Voraussetzung für die Vernetzung von Rechnern aller Art ist die direkte Verbindung von Rechnern untereinander. Ist dieser Schritt erst einmal geschafft, kann man mehrere Rechner zu einem logischen Netz zusammenfassen. Jedes Netz eröffnet vielfältige Möglichkeiten der Kommunikation zwischen den beteiligten Rechnern. Ein nächster nahe liegender Schritt besteht darin, verschiedene Netze untereinander zu verbinden. So entstand auch seit etwa 1970 ein weltumspannendes Netz von Rechnernetzen, das *Internet*, dessen fantastische Möglichkeiten als weltumspannendes Informationssystem erst nach und nach entdeckt werden.

In diesem Kapitel werden wir auf die Techniken der direkten Verbindung von Rechnern untereinander und auf verschiedene Netzwerktechnologien eingehen, bevor wir uns im nächsten Kapitel dem Internet zuwenden.

### 7.1.1 Signalübertragung

Signale sind elektrische oder optische Repräsentationen von Daten. Auf der untersten Ebene verstehen wir Daten als Bitfolgen. Angenommen wir wollen das ASCII-Zeichen „b“, also die Bitfolge 01100010, übertragen. Wir stellen diese durch einen Spannungsverlauf mit fester Amplitude dar, indem wir dem Bit 0 die Spannung 0 V zuordnen und dem Bit 1 die Spannung 1 V. Der Spannungsverlauf ist eine Rechteckkurve wie in der folgenden (mithilfe von „gnuplot“ erzeugten) Abbildung dargestellt.

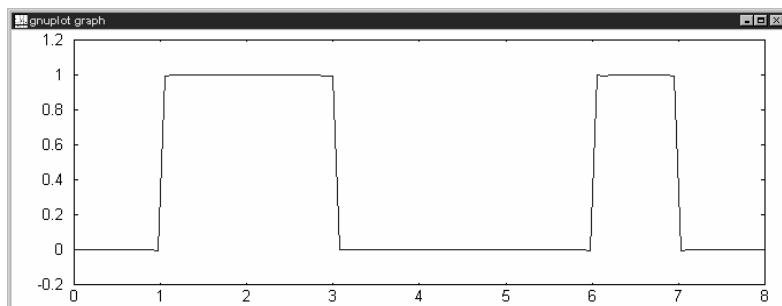


Abb. 7.1: Rechteckkurve für das Bitmuster 01100010

Bei der Übertragung durch elektromagnetische Wellen setzt sich jedes Signal  $s(t)$  als unendliche Summe von *harmonischen Schwingungen* zusammen. Der  $k$ -te Summand ist dabei die harmonische Schwingung  $a_k \cdot \cos(k \cdot \omega \cdot t) + b_k \cdot \sin(k \cdot \omega \cdot t)$  mit der Frequenz  $f = k \cdot \omega / (2\pi)$ . Die Amplituden  $a_k$  und  $b_k$  des Cosinus- und Sinusanteils heißen auch die „Fourierkoeffizienten“. Wie man sie rechnerisch bestimmt, soll hier nicht näher erläutert werden. Die Fourier-Darstellung der kompletten Signalfunktion  $s(t)$  ist dann die unendliche Summe

$$s(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cdot \cos(k \cdot \omega \cdot t) + b_k \cdot \sin(k \cdot \omega \cdot t)).$$

Bricht man diese Summation nach endlich vielen Schritten ab, so erhält man bereits eine recht gute Approximation an das wahre Signal. In Abb.7.1 haben wir die gewünschte Rechteckkurve durch die ersten 1000 Summanden der Fourierreentwicklung angenähert. Bricht man schon viel früher ab, so enthält man ungenauere Approximationen. In der folgenden Abbildung haben wir zum Vergleich sukzessiv bessere Approximationen an das wahre Signal in einem gemeinsamen Schaubild dargestellt. Die relativ flache Funktion in der Mitte zeigt die Approximation nach einem Schritt. Nach  $k = 3$  Schritten sind bereits zwei peaks zu erkennen, aber noch nicht, ob das Bitmuster 01100110 oder 01100010 herauskommen wird. Nach  $k = 10$  Schritten ist das Bitmuster bereits klar ersichtlich, und nach  $k = 100$  Schritten hat man fast die perfekte Rechteckkurve, nur an den scharfen Ecken gibt es noch leichte Verzerrungen, so genannte „Überschwinger“.

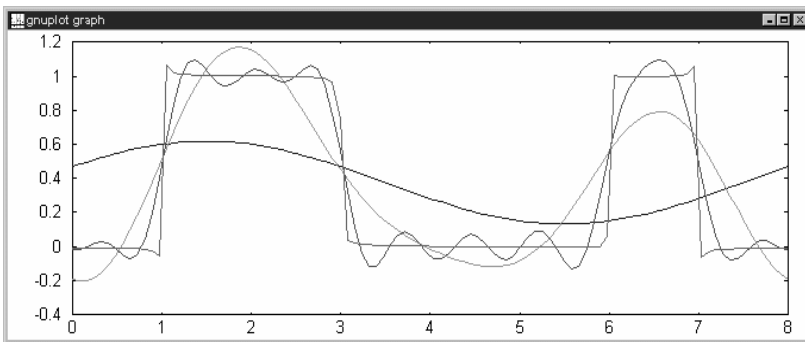


Abb. 7.2: Approximationen der Rechteckkurve aus Abb. 7.1 mit  $k = 1, 3, 10, 100$

Der für die approximative Darstellung eines Signals verwendete Frequenzbereich ist die *effektive Bandbreite* des Signals. Allgemein verstehen wir unter dem Begriff *Bandbreite* einen Frequenzbereich oder die Differenz zwischen der höchsten und niedrigsten Frequenz eines solchen Bereiches. Wenn wir also unser Signal bei einer Grundfrequenz  $f$  durch die ersten  $k$  Fouriersummanden approximieren, so nutzen wir eine Bandbreite von  $k \cdot f - f = (k - 1) \cdot f$  aus. Bei  $f = 1 \text{ MHz} = 10^6 \text{ Hz}$  und  $k = 10$  benötigen wir eine Bandbreite von 9 MHz. Dabei wird das Signal, hier ein Byte, in der Zeit  $T = 1/f = 10^{-6} \text{ s} = 1 \mu\text{s}$  übertragen. Wollen wir die Datenrate verdoppeln, so heißt das, dass wir  $T$  halbieren. Wir wählen also  $2 \cdot f$  als Grundfrequenz. Jetzt benötigen wir aber die doppelte Bandbreite, nämlich  $k \cdot (2f) - (2f) = 2 \cdot (k - 1) \cdot f$ .

Für  $k = 10$  und  $f = 1 \text{ MHz}$  wären dies 18 MHz.

Solche Überlegungen sind deswegen relevant, weil sich in jedem elektromagnetischen Übertragungsmedium nur eine gewisse Bandbreite zur Signalübertragung nutzen lässt. Außerhalb dieser Bandbreite werden die Signale zu stark gedämpft. Bei genügend großer nutzbarer Bandbreite lässt sich diese noch in disjunkte (nicht überlappende) Bereiche, *Kanäle* genannt, unterteilen. Innerhalb jedes Kanals kann eine unabhängige Datenübertragung stattfinden. Von

der Radioübertragung ist uns die Methode wohlbekannt. Die Bandbreite der Radiosender eines Wellenbereiches ist in Kanäle aufgeteilt, die jeweils einem Sender zur Verfügung stehen. Dabei entsteht die Optimierungsaufgabe, möglichst viele Kanäle zu schaffen, die sich untereinander nicht stören, andererseits jedem Kanal genügend Bandbreite zur Verfügung zu stellen, so dass die Signale unverzerrt übertragen werden können.

## 7.1.2 Physikalische Verbindung

Die einfachste physikalische Verbindung zwischen zwei Rechnern geschieht durch ein Paar von Kupferdrähten, das möglichst noch verdreht sein sollte. Die Verdrehung verringert die Störanfälligkeit.



Abb. 7.3: Verdrehte Kabel

Nicht abgeschirmte verdrehte Kabel (*UTP = Unshielded twisted Pair*) sind die billigste und einfachste Verdrahtungsmöglichkeit. Sie sind in Rechnernetzen und im Bereich der Telefonie sehr weit verbreitet und erlauben heute, z.B. bei ISDN, Datenübertragungsraten von 150 kBit/s über größere Strecken. Auf mittleren Distanzen sind Datenübertragungsraten von über 10 MBit/s erreichbar. Diese Möglichkeit wird von der DSL-Technologie (siehe S. 610) genutzt. Noch höhere Datenübertragungsraten sind auf kurzen Distanzen erzielbar, z.B. beim Gigabit-Ethernet.

*Kupferkoaxialkabel* bestehen aus einem isolierten Kupferdraht, der zur Ausschaltung von Störungen mit einer leitenden Abschirmung umhüllt ist.

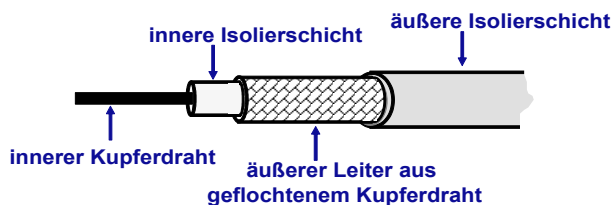


Abb. 7.4: Kupferkoaxialkabel

Mit Kupferkoaxialkabeln lassen sich Übertragungsraten von 100 MBit/s im *Basisbandverfahren* erzielen. Dieser Begriff bezeichnet die direkte Übertragung von Bits durch verschiedene Spannungsniveaus, bzw. durch verschiedene optische Niveaus im Falle der gleich zu besprechenden Glasfaserkabel. Im Gegensatz dazu wird bei einer *Breitbandübertragung* das eigentliche Signal auf eine hochfrequente elektrische Welle aufmoduliert. Durch die Definition

verschiedener Frequenzbereiche (FDM = frequency division multiplexing) lassen sich mehrere unabhängige Übertragungskanäle einrichten, so dass sich die Datenübertragungsrate entsprechend vervielfacht. Während bei verdrehten Kupferdrähten und Koaxialkabeln in lokalen Netzen die Basisbandübertragung vorherrscht, wird bei Funkverbindungen und vermehrt auch bei optischen Verbindungen die Breitbandübertragung eingesetzt.

*Glasfaserkabel* zeichnen sich durch Unempfindlichkeit gegen äußere Störungen und höchstmögliche Übertragungsraten aus. Nachteilig sind der hohe Aufwand für Sender und Empfänger sowie die relativ hohen Kosten des Mediums. Bei einer *Multimode* Glasfaser reflektiert das übertragene Licht am inneren Rand der Glasfaser. Auf diese Weise folgt es auch den Biegungen der Faser. Allerdings werden die von einer Lichtquelle ausgehenden Strahlen, je nach Eintrittswinkel in die Faser, verschieden oft reflektiert, so dass sich unterschiedliche Weglängen ergeben. Ein Strahl entlang des Zentrums kommt früher an als einer, der oft reflektiert wird. Ein eintretender kurzer Lichtpuls wird auf diese Weise zeitlich „verschmiert“, was wiederum eine verringerte Datenübertragungsrate zur Folge hat.

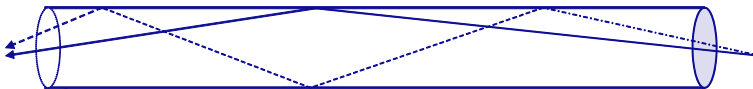


Abb. 7.5: Strahlengänge in einer Glasfaser

Man kann diesem Effekt entgegenwirken, indem man den Brechungsindex der Faser vom Zentrum zum äußeren Rand verringert. Ein höherer Brechungsindex bedeutet gleichzeitig eine geringere Fortpflanzungsgeschwindigkeit, so dass ein Strahl entlang des Zentrums zwar seltener reflektiert wird, aufgrund des höheren Brechungsindex in der Mitte aber verlangsamt wird.

Eine bessere Lösung besteht darin, die Dicke der Faser auf eine Größenordnung zu reduzieren, die der Wellenlänge des verwendeten Lichtes nahekommt. In einer solchen *Singlemode* Glasfaser wandert das Signal weitgehend unreflektiert auf einem einzigen Pfad durch die Faser. Singlemode Glasfasern erlauben die höchsten Übertragungsraten. Heute sind bis zu 100 GBit/s pro Wellenlänge üblich. Durch die gleichzeitige Nutzung mehrerer Wellenlängen (DWDM = dense wavelength division multiplexing) können heute bis zu 88 Wellenlängen pro Faser gleichzeitig genutzt werden. Daraus resultiert eine Gesamtdatenrate von 8800 GBit/s pro Faser.

*Funkübertragung* wurde früher hauptsächlich bei Weitverkehrsnetzen, mit Satelliten als Relaisstationen, eingesetzt. Bei einer Breitbandübertragung im Mikrowellenbereich stehen in jedem Kanal ca. 500 MBit/s zur Verfügung.

Funkübertragung erlaubt im Nahbereich den Aufbau von kabellosen Netzen. Im Bereich von bis zu 100 Metern hat sich die WLAN-Technologie etabliert. Im Bereich von wenigen Metern kann man mit kabellosen Mäusen, Tastaturen, Druckern etc. arbeiten. Oft wird dabei der *Bluetooth*-Standard verwendet. Dieser definiert ein Protokoll für die kabellose Kommunikation zwischen

Geräten im Nahbereich bis zu 10 Metern und hat die *Infrarot-Übertragung*, bei der das Signal auf infrarotes Licht aufmoduliert wird, fast völlig verdrängt.

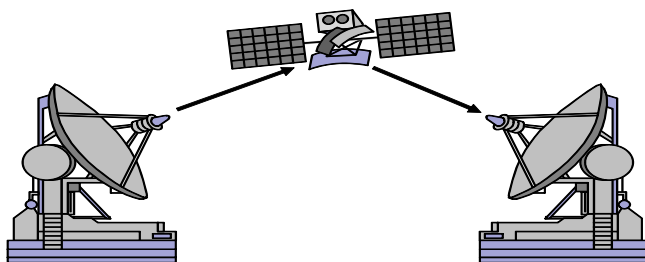


Abb. 7.6: Funkübertragung mit Satelliten

Technologien wie z.B. *UPnP (Universal Plug'n Play)* befassen sich mit der spontanen Einbindung von Geräten in ein Netz – etwa wenn sich ein Mensch mit seinem Notebook-Computer einem Drucker nähert, oder wenn er sich, etwa in einer Firma oder einer öffentlichen Einrichtung bewegt ohne die Netzeinbindung und damit den Zugang zu allen gewohnten Ressourcen zu verlieren. Die Ausdehnung solcher Ideen auf umfassendere technische Bereiche werden mit Begriffen wie *ubiquitous computing*, *pervasive computing* oder *ambient intelligence* umschrieben.

### 7.1.3 Synchronisation

Bei einer *asynchronen* Datenübertragung werden die Daten in kleinen Paketen übertragen (meist jeweils 1 Byte lang), die durch ein Start- und ein Stopbit markiert sind. Das Startbit signalisiert dem Empfänger, dass Daten folgen, ein eventuell vorhandenes Stopbit zeigt das Ende der Übertragung an. Allerdings ist eine solche Art der Übertragung nicht sehr effektiv. Es bietet sich an, größere Datenblöcke auf einmal zu senden. Dabei entsteht aber die Schwierigkeit, dass die Uhren von Sender und Empfängern auseinanderdriften können, was besonders bei der Übertragung langer Blöcke des gleichen Bits zu Fehlern führen kann.

Das Problem lässt sich vermeiden, wenn man Sender und Empfänger durch eine zusätzliche Taktleitung verbindet, über die ihre Uhren im Gleichlauf gehalten werden können; man spricht von einer *synchronen* Datenübertragung. Als Alternative zu der aufwändigen zusätzlichen Taktleitung, kann man die Synchronisation zwischen Sender und Empfänger auch durch eine geschickte Codierung der übertragenen Daten erreichen, wie sie im folgenden Abschnitt dargestellt wird.

### 7.1.4 Bitcodierungen

Die einfachste Methode, ein Bit elektrisch über eine Leitung zu übertragen, ist die Darstellung von 0 bzw. 1 durch verschiedene Spannungsniveaus. Beispielsweise könnte eine 0 durch 0 Volt und eine 1 durch 5 Volt codiert sein – oder umgekehrt. Diese Kodierung heißt auch *NRZ-L (non-return to Zero-Level)*. Eine Variation hiervon, *NRZI (nonreturn zero inverted)*, interpretiert eine *Spannungsänderung* als 1 und eine gleichbleibende Spannung als 0. Driften die Uhren von Sen-