



***Fachbereich Angewandte Informatik***

**Bachelor of Science  
in  
Angewandte Informatik - Applied Computer Science  
Digitale Medien (alte PO)  
Internationale Ingenieurwissenschaften**

***Modul Technische Grundlagen der Informatik***

**Teil 2**

# ***Nachrichtentechnik***

**Kurzschrift für das WS2023/24**

**Prof. Dr.-Ing. K. Khakzar**

bearbeitet zum WS 2023/2024 von  
**Dr. Solveig Schüssler**  
solveig.schuessler@et.hs-fulda.de

## **Literaturverzeichnis**

- |     |                     |  |
|-----|---------------------|--|
| /1/ | Herter/Lörcher      | <i>Nachrichtentechnik</i> , Carl Hanser Verlag,<br>ISBN 3-446-16564-9  |
| /2/ | Beuth/Hanebuth/Kurz | <i>Nachrichtentechnik</i> , Vogel Buchverlag,<br>ISBN 3-8023-1401-8  |
| /3/ | Werner, Martin      | <i>Nachrichtentechnik: Eine Einführung für alle<br/>Studiengänge</i> , Vieweg+Teubner Verlag,<br>ISBN 978-3-8348-2581-0 (Online) |
| /4/ | Bossert, Martin     | <i>Einführung in die Nachrichtentechnik</i> , München,<br>Oldenbourg, 2012, ISBN 9783486708806                                   |

## Geschichte der Elektrotechnik und Nachrichtentechnik

### Wichtige Stationen

Wichtige Grundlagenforschung durch *Ampere, Coulomb, Faraday, Gauss, Henry, Galvani, Volta, Kirchhoff, Maxwell, Ohm*

- Mitte 19.Jh. *James Clerk Maxwell* (GB) leitet Gleichungen für den Elektromagnetismus her, Grundlage für die gesamte Elektrotechnik (Maxwell'sche-Gleichungen), theoretische Vorhersage, dass sich elektromagnetische Wellen im Raum ausbreiten können (Licht, Radiowellen)
- 1821 *Faraday* konstruiert ersten Elektromotor
- 1837 *Samuel Morse* (USA) erfindet die Telegraphie, 'digitale' Übertragung über Metallleitungen
- 1843 *S. Morse* richtet erste Telegraphen-Teststrecke entlang der Bahnlinie Washington-Baltimore ein
- 1848 *Werner Siemens* (D) und *J.G.Halske* (D) bauen erste deutsche Telegraphenlinie von Berlin nach Frankfurt/Main
- 1861 *Phillip Reis* (D) macht Versuche zur analogen Telefonie
- 1875 in Deutschland werden 14 Millionen Telegramme über ein Netz von 170.000km befördert
- 1876 praktisch gleichzeitig entwickeln *Alexander Graham Bell* (Can.) unter Mithilfe von *Thomas A. Watson* sowie *Elisha Gray* erste Telefonsysteme für die Übertragung von Sprache
- 1878 erste Handvermittlungsstelle in New Haven, USA
- 1879 *Thomas A. Edison* erfindet Glühbirne
- 1881 erstes öffentliches handvermitteltes Telefonnetz in Deutschland wird in Berlin in Betrieb genommen (48 Teilnehmer)
- 1882 Beginn Aufbau eines Stromnetzes in USA durch *Edison*
- 1884 Beginn Aufbau eines Stromnetzes in Deutschland durch AEG
- 1888 *Heinrich Hertz* erzeugt Radiowellen mit einem Oszillator (31 MHz - 1.25 GHz)
- 1892 erste Selbstwählvermittlungsstelle in La Porte, Indiana, USA
- 1894 *Guglielmo Marconi* (I) entwickelt erstes Funk-Übertragungssystem für eine Strecke von ca. 1km, 1896 erreichte er 3km von Schiffen aufs Land, 1899 erste Übertragung über den Kanal von Frankreich nach Dover, 1902 erste transatlantische Übertragung von England nach Neufundland
- 1895 *H.A. Lorentz* behauptet, dass Ladung nur in diskreten Mengen auftritt, den so genannten 'Elektronen'
- 1897 *J.J.Thompson* beweist experimentell die Existenz von Elektronen
- 1897 *Ferdinand Braun* (Fulda !) baut erste Kathodenstrahlröhre (CRT, Braunsche Röhre), entdeckte vorher Gleichrichtereffekt in Halbleitern (Dioden), 1909 Nobelpreis gemeinsam mit Marconi für Arbeiten zur Funkübertragung
- 1908 erste öffentliche Selbstwählvermittlungsstelle in Deutschland wird in Hildesheim in Betrieb genommen
- 1908 *Lee DeForest* (USA) erfindet die Verstärkerröhre (Triode), erstmals können elektrische Signale verstärkt werden, viele neue Schaltungen werden entwickelt wie, Oszillatoren, Regeneratoren, etc.



Ferdinand Braun

- 1912 erster Einsatz von Röhren in Telefon- und Funksystemen
- 1919 erstes Röhren-Flip-Flop in England
- 1920 Rundfunkstationen in den USA nehmen regelmäßigen Betrieb auf (Detroit und Pittsburgh), Amplitudenmodulation (AM)
- 1923 erstmals werden in Deutschland Ferngespräche zu benachbarten Ortsvermittlungsstellen durch Selbstwahl möglich
- 1930 erste Schwarz/Weiß-Fernsehsysteme
- 1930 erster elektromechanischer Rechner, IBM unter Leitung von Prof. *Iken*, Harvard University, IBM Mark I (17m lang, 3m hoch)
- 1933 das erste Telex-(Fernschreib)-Selbstwählsystem-System wird zwischen Berlin und Hamburg eingerichtet
- 1939 Erste Sender verwenden Frequenzmodulation (FM), die 1933 durch *Edwin H. Armstrong* (USA) erfunden wird
- 1941 *Konrad Zuse* (Hünfeld) baute den ersten funktionsfähigen, frei programmierbaren, auf dem binären Zahlensystem (Gleitkomma) basierenden Rechner der Welt Z3 vollständig aus Relais (600 im Rechenwerk und 1800 im Speicher)
- 1946 erster elektronischer Rechner, ENIAC (18.000 Röhren, Platzbedarf 10m x 13m)
- 1948 Erfindung des Transistors (Germanium) in den Bell Telephone Laboratories durch *William Shockley*, *Walter Brattain* und *John Bardeen* (USA), in den folgenden Jahren wird der Transistor die Röhre fast vollständig ersetzen
- 1948 *Shannon* (USA) und *Kotelnikov* (SU) leitet die Grundlagen der Informationstheorie her
- 1950 erste Farbfernsehsysteme werden entwickelt
- 1954 erste Produktion von Silizium-Transistoren (bipolar)
- 1956 *Cray* entwickelt ersten Transistor-Computer (für spezielle Aufgaben)
- 1958 *Kilby* (USA) entwickelt erste Integrierte Schaltung
- 1959 IBM stellt ersten allgemein einsetzbaren Transistor-Rechner vor (Rechner der 2.Generation)
- 1960 *Th. Maiman* entwickelt erste Laser (Festkörperlaser)
- 1960 erste MOS-Transistor (metal-oxide-semiconductor), inzwischen häufigster Transistortype
- 1961 Aufnahme der Produktion von Integrierten Schaltungen (USA)
- 1962 Funkverbindungen über Satelliten
- 1963 *C.Kao*, Erfinder der optischen Nachrichtenübertragung, beginnt sich mit dem Thema optische Lichtwellenleiter zu beschäftigen
- 1965 selbstgewählte Verbindungen zwischen Deutschland und USA werden möglich
- 1969 *M.E. Hoff* (Intel) entwickelt ersten Mikroprozessors
- 1970 brauchbare Halbleiterlaser und dämpfungsarme Lichtwellenleiter stehen zur Verfügung
- 1970 Halbleiterspeicher (RAM) werden in Rechnern eingesetzt (Computer der 3. Generation)
- 1981 IBM stellt den ersten PC vor, den IBM Personal Computer 5150

Konrad Zuse



1982	Compaq entwickelt den ersten Portable PC
1983	Der erste nachgebaute PC aus Japan entsteht
1983	IBM beginnt mit dem PC-Vertrieb in Deutschland
1983	Der erste IBM-PC mit erweiterter Technologie (XT) kommt raus
1984	Deutsche Bundespost setzt erstmals digitale, rechnergesteuerte Vermittlungssysteme ein
1984	Apple Macintosh bringt als erster kommerzieller Rechner mit grafischer Benutzeroberfläche Farbe in die PC-Industrie
1987	Einführung von ISDN
1989	Der erste tragbare Apple Macintosh setzt neue Maßstäbe
1991	Dell nimmt die Produktion eines Notebooks auf
1991	Finne Linus Torvalds beginnt mit der Entwicklung der Unix-Variante Linux
1992	IBM steigt mit Thinkpad in den Notebook-Markt ein
1993	Der erste Pentium-Chip von Intel entsteht
1993	Apple stellt die Produktion des Apple II ein
1995	Microsoft belebt mit neuem Windows 95 den PC-Markt
1996	Palm Pilot erzielt als "Persönlicher Digitaler Assistent" erste Markterfolge
1998	Apple bringt den farbigen Designcomputer "iMac" heraus
2001	Von über 625 Millionen Computer-Anwendern weltweit benutzen rund 95 Prozent einen PC

### Entwicklung der Mikroelektronik:

**Integrationsdichte** (in Transistoren pro Chip):

1951	1960 (SSI)	1966 (MSI)	1969 (LSI)	1975 (VLSI)	1985	1990	1995	2000	2007	2010
1	<100	100-1.000	1.000-10.000	>10.000	> 500.000	>10 Mio.	>50 Mio.	>100Mio.-1.000Mio	>1 Mrd.	>2 Mrd.

**Kleinste Strukturabmessung auf dem Chip:**

1961	1980	1990	1995	2000	2003	2010	2015
25µm	2,2µm	1µm	0,5µm	130 nm	50 nm	20 nm	14 nm

**RAM-Speicher-Größe** (in bit):

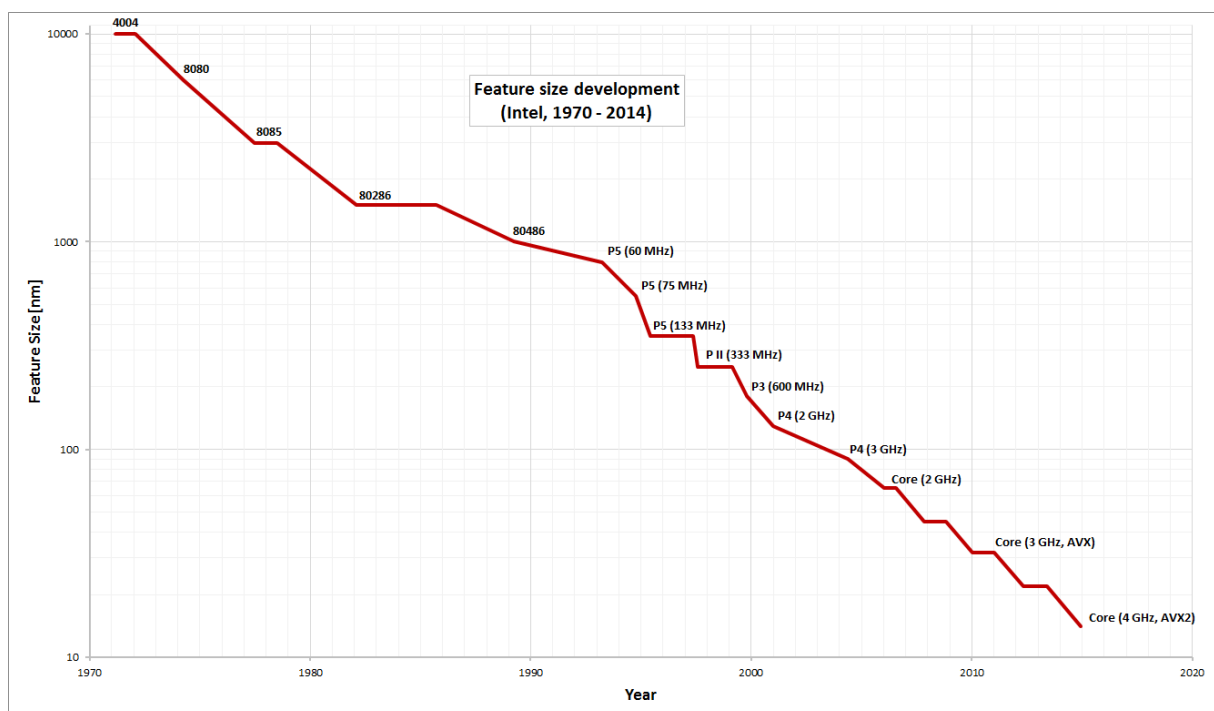
1970	1973	1978	1982	1986	1990	1995	2000	2005	2015
1kbit	10kbit	64kbit	288kbit	1Mbit	16Mbit	64Mbit	256Mbit	2 GBit	256 GBit

### Moore's Law (1965)

Anzahl der Transistoren per Chip verdoppelt sich alle 18 Monate.

YEAR	GENERATION	CHIP COST	RAM SIZE	COST OF 1 GIG OF RAM
1966	-4	\$512	1 bit	\$512,000,000,000.00
1967	-3		4 bit	\$256,000,000,000.00
1968	-2		16 bit	\$64,000,000,000.00
1969	-1		64 bit	\$8,000,000,000.00
1970	0	\$256	256 bit	\$2,000,000,000.00
<b>KILOBIT</b>				
1973	1	\$128	1 Kilobit	\$256,000,000.00
1976	2		4 kilobit	\$128,000,000.00
1979	3		16 kilobit	\$32,000,000.00
1982	4	\$64	64 kilobit	\$4,000,000.00
1985	5		256 kilobit	\$1,000,000.00
<b>MEGABIT</b>				
1988	6	\$32	1 Megabit	\$128,000.00
1991	7		4 Megabit	\$64,000.00
1994	8		16 Megabit	\$16,000.00
1997	9	\$16	64 Megabit	\$2,000.00
2000	10		256 Megabit	\$500.00
<b>GIGABIT</b>				
2003	11	\$8	1 Gigabit	\$64.00
2006	12		4 Gigabit	\$32.00
2009	13		16 Gigabit	\$8.00
2012	14	\$4	64 Gigabit	\$1.00
2015	15		256 Gigabit	\$0.25
<b>PETABIT</b>				
2018	16	\$2	1 Petabit	\$0.03
2021	17		4 Petabit	\$0.02
2024	18		16 Petabit	\$0.004
2027	19	\$1	64 Petabit	\$0.0005
2030	20		256 Petabit	\$0.0001

Quelle: <http://winfuture.de/infografik/10957/Entwicklung-von-Arbeitsspeicher-und-Prozessor-1412680182.html>

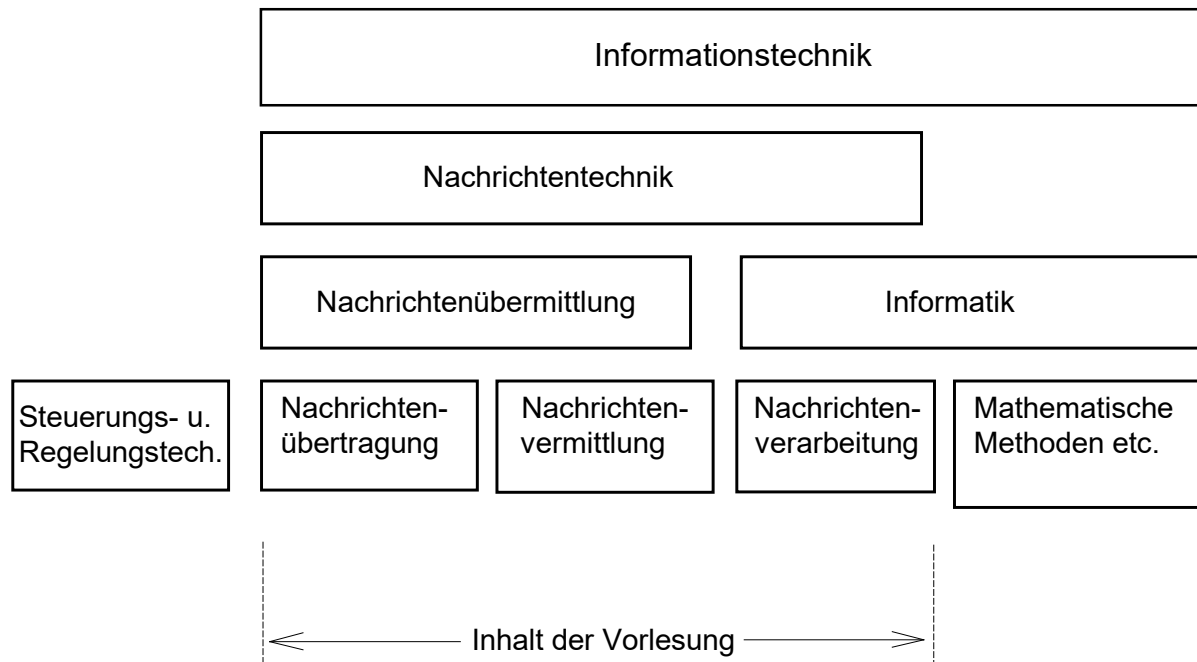


Quelle: <https://de.wikipedia.org/wiki/Strukturgr%C3%B6%C3%9Fe#/media/File:IntelFeatureSize.png>

# **1 Einführung**

## **1.1 Teilgebiete der Informationstechnik**

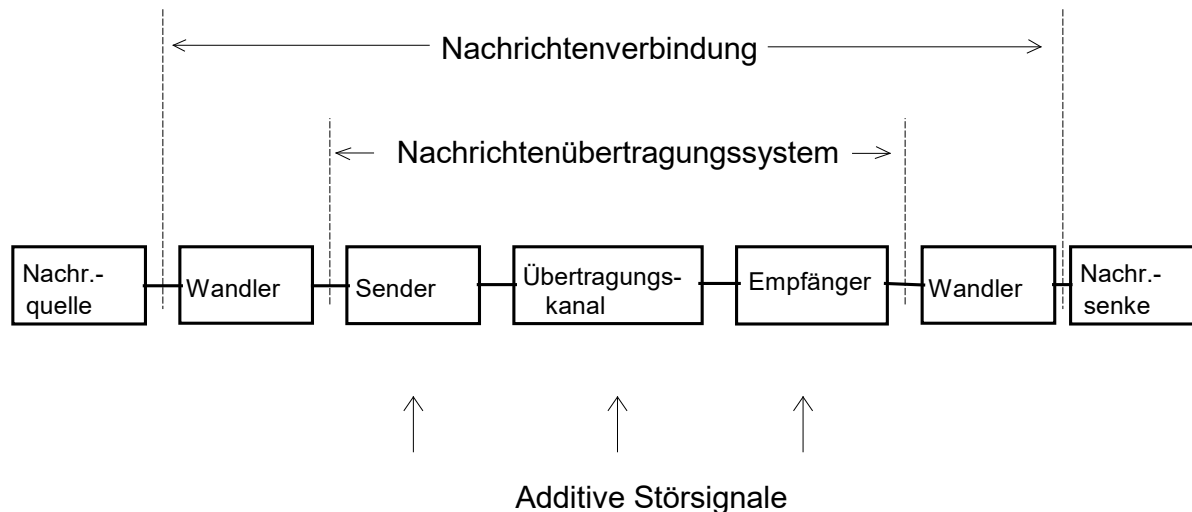
### Einteilung und Abgrenzung der Informationstechnik



**Ergänzung und Einordnung:** Die Nachrichtentechnik ist, wie auch die Steuerungs- und Regelungstechnik, ein Teilgebiet der Elektrotechnik.

## **1.2 Grundbegriffe und Elemente der Informationstechnik**

### **Blockschaltbild einer Nachrichtenverbindung**



Über eine Nachrichtenverbindung werden Nachrichten bzw. Informationen von der Quelle zu einer oder mehreren Senken übertragen. Das eigentliche physikalische Medium, über das/ mit dem die Information transportiert wird, ist der Übertragungskanal. Sender und Empfänger stellen die Schnittstellen zu diesem Kanal dar. Wandler auf beiden Seiten sorgen dafür, dass die Nachricht jeweils so aufbereitet wird, dass Sie vom Übertragungskanal übertragen werden und von der Senke verstanden werden kann. Die Umwandlung der Quellen-Information für den Übertragungskanal und übertragenen Signals für die Senke erfolgt mit speziell an Quelle, Senke, Kanal angepassten Wandlern.

Dieses grundsätzlich einfache Prinzip kann z.B. je nach notwendigem Aufwand zu Wandlung zwischen den einzelnen Komponenten, beabsichtigter Übertragungsqualität oder Verwendung mehrerer unterschiedlicher Übertragungskanäle schnell sehr aufwändig werden. Ein Beispiel finden Sie am Ende dieses Abschnittes.

### **Erklärungen zu den Blöcken**

Nachricht oder Information: jede Art von Mitteilungen und Reizen

z.B.

- Sprache
- geschriebener Text
- Bilder
- Messwerte (z.B. Temperatur, Druck, Position,...)
- Steuerungsbefehle
- Inhalt einer Datenbank
- etc.



Nachrichtenquelle, -senke:      Ursprung bzw. Ziel einer Nachricht

z.B.

- Mensch
- maschinelle Einrichtung
- gedruckter Text, Bild
- Nachrichtenspeicher, Datenbank
- etc.

Übertragungskanal :      Medium, über das Nachrichten transportiert werden

z.B.

- Drahtleitung
- Funkstrecke
- Lichtwellenleiter, Glasfaser
- Verstärker
- Modulationsgeräte
- etc.

Wandler :      Schnittstelle zwischen Quelle bzw. Senke und dem Übertragungssystem

z.B.

- Mikrophon
- Lautsprecher
- Bildröhre
- Anzeige
- Bildabtaster (Scanner)
- Ohr, Stimmbänder

Signal :      Darstellung einer Nachricht durch physikalische Größen

z.B. durch

- elektromagnetische Felder im Raum
- Ströme auf Leitungen
- Lichtwellen in Glasfasern
- Schallwellen in Gasen
- elektrische Erregung von Nervenbahnen
- etc.

Sender und Empfänger : Anpassung des Nachrichtensignals an die Eigenschaften des Übertragungskanals

z.B. durch

- Modulation/Demodulation
- Codierung/Decodierung
- Verstärkung auf Sende- und Empfangsseite
- etc.

Nachrichtennetz : Gesamtheit der nachrichtentechnischen Anlagen zur Übertragung und Vermittlung von Nachrichten

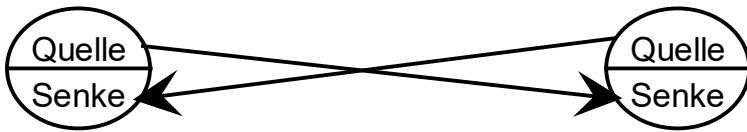
Dazu zählen z.B.

- Endgeräte
- Vermittlungsanlagen
- Übertragungsanlagen
- notwendige Bauten, Stromversorgung
- etc.

Beispiele für Nachrichtennetze:      analoges Telefonnetz  
ISDN (Diensteintegrierendes digitales Netz)  
Internet

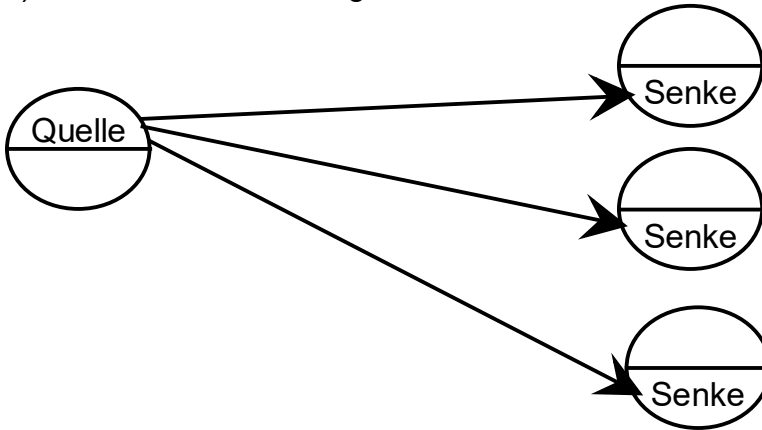
Kommunikationsformen :

a) Dialog (interaktive Kommunikation)

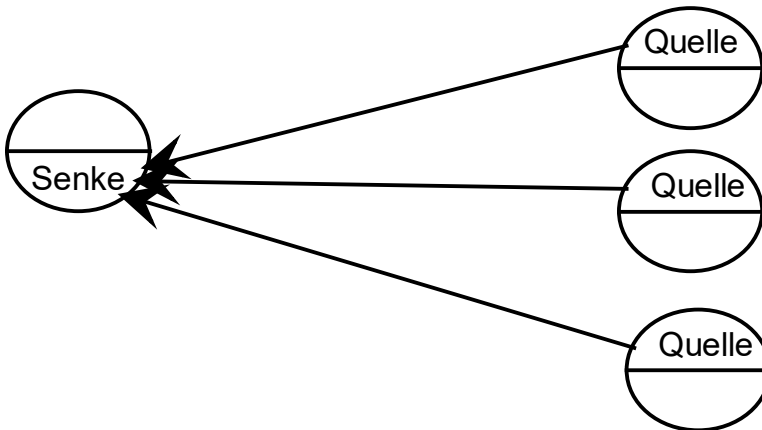


z.B. Telefonnetz

b) Informationsverteilung

z.B. Rundfunk,  
Kabelfernsehtz

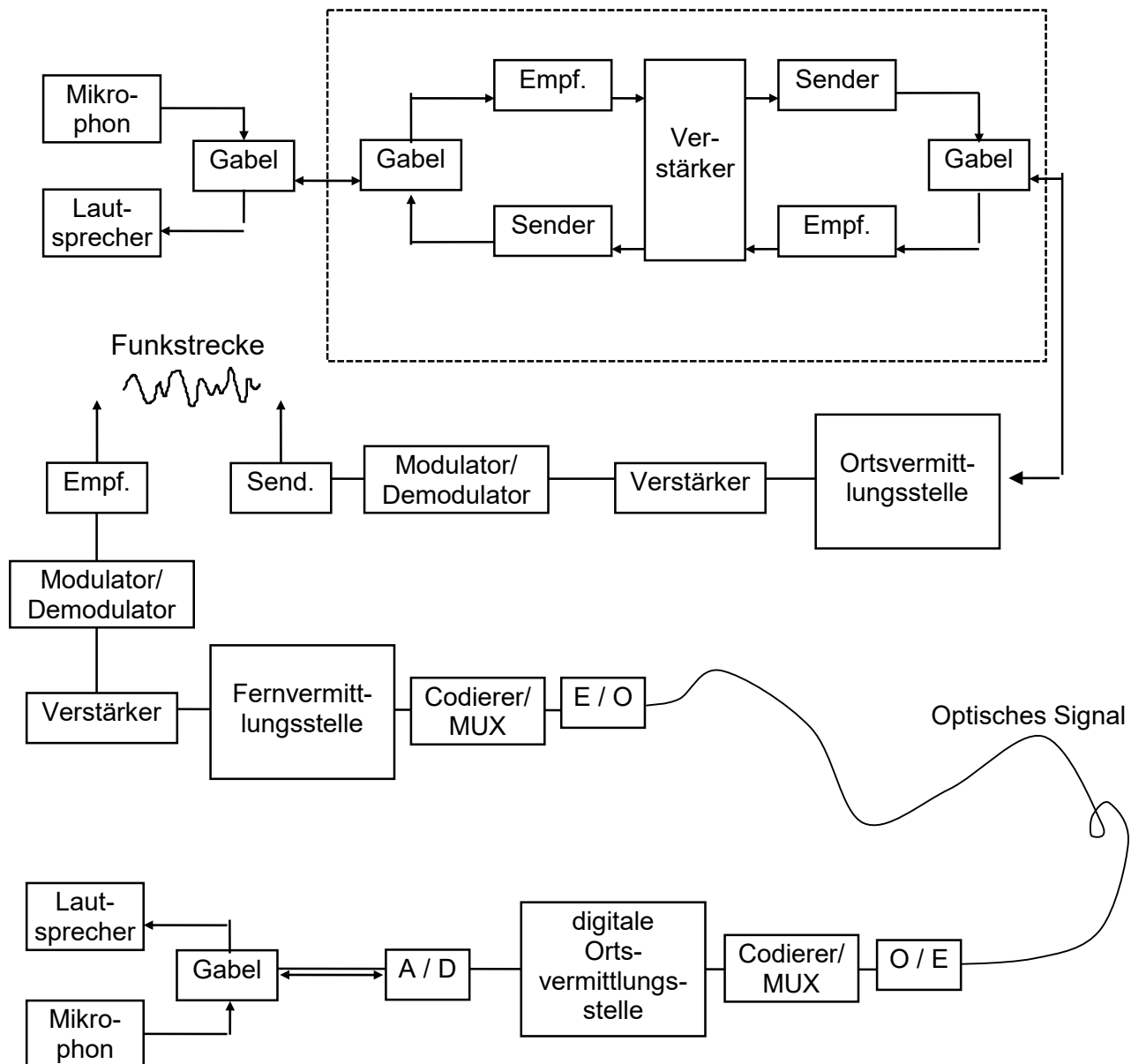
c) Informationssammlung



z.B. Zählerablesung

hier wichtig: Quelle schickt zur Unterscheidbarkeit Identitätskennung mit

Beispiel: einfaches Blockschaltbild zum Nachrichtenaustausch über das öffentliche, analoge Telefonnetz



### Einige theoretische Grundlagen der Nachrichtentechnik:

- Informationstheorie: Analyse des Informationsgehalts von Nachrichten
- Systemtheorie: mathematische Beschreibung von Signalen und Systemen
- Codierungstheorie: mathematische Theorie der fehlererkennenden und fehlerkorrigierenden Codes

### Einige Teilgebiete der Nachrichtentechnik:

Elektronische Datenverarbeitung, Übertragungstechnik, Signalverarbeitung, Rechnernetze, Digitale Signalverarbeitung, Funk- und Radartechnik, Filtertechnik...

## 2 Grundlagen der Informationstheorie

### 2.1 Aufgaben der Informationstheorie

Ziel der Informationstheorie ist die qualitative und quantitative Beschreibung von Information und Nachrichten.

Wichtige Erkenntnis: Information bzw. Informationsgehalt ist **messbar** !

- Berechnung mit Methoden der Wahrscheinlichkeitsrechnung (C. Shannon (USA) und Kotelnikov (SU), ca. 1948)
- Voraussetzung für den Informationsaustausch sind Regeln und Absprachen zwischen den kommunizierenden Partnern

Beispiel: a) Gespräch zwischen zwei Menschen

→ Sprache, Worte, Alphabet, Grammatik

b) Textübertragung

→ Übertragungsgeschwindigkeit, Alphabet, Codierung

### 2.2 Grundbegriffe

Anhand des einfachen Beispiels Telex werden die wichtigsten Grundbegriffe der Informationstheorie erklärt.

Das Telexsystem/-netz (Telex = Telegraphy Exchange, auch Fernschreibnetz))

- Separates Telekommunikationsnetz zur Übermittlung von Textnachrichten (in Deutschland 1933 – 2007)
- Wichtiges Kommunikationsmittel für Unternehmen und Behörden
- in Deutschland, ca. 140.000 Teilnehmer, weltweit ca. 1,7 Mio. Teilnehmer

Prinzip: Jedem Buchstaben wird ein digitales Zeichen aus 5 Elementen (Bit) zugeordnet. (→ Internationales Telegraphenalphabet, siehe unten)  
Es gibt hierbei nur 2 Zustände:

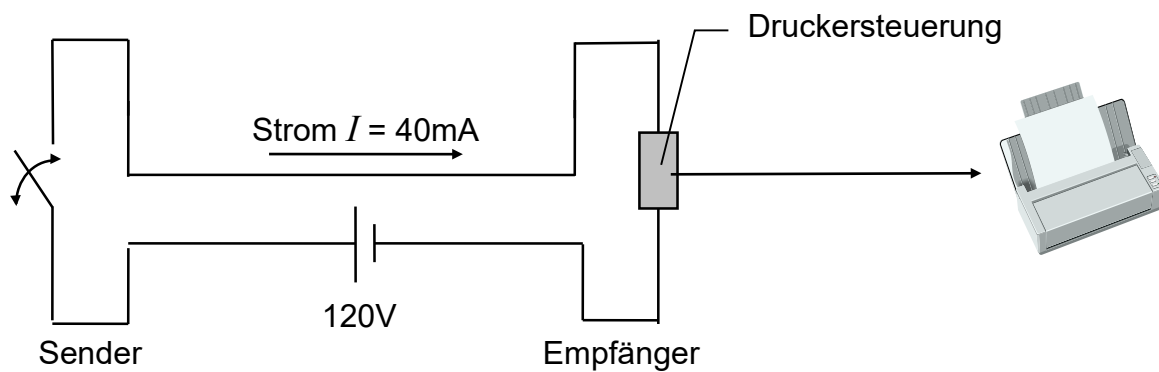
●                      ○  
logisch '1'      logisch '0'

Man spricht daher von einem binären Code-Element [Bit = binary digit].  
Physikalisch werden die Code-Elemente durch den elektrischen Strom repräsentiert. Es gilt folgende Zuordnung:

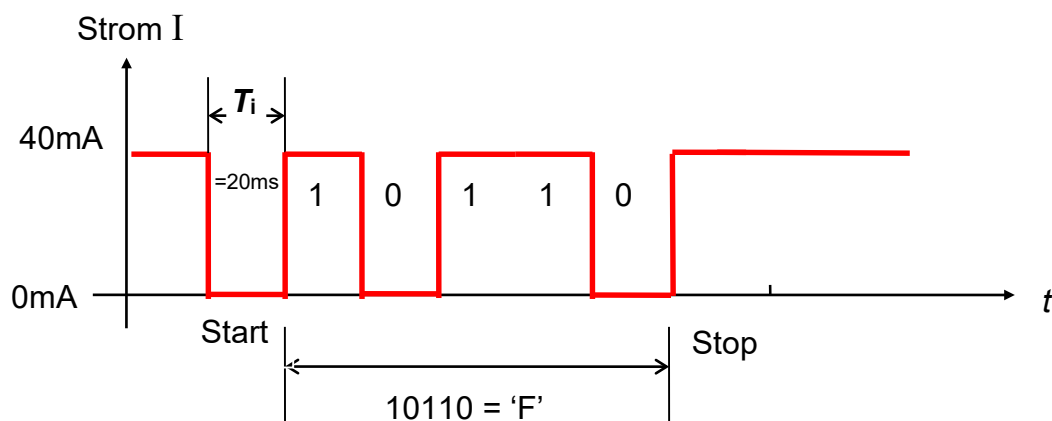
logisch '0'  $\hat{=}$  kein Strom

logisch '1'  $\hat{=}$  Strom ( $I = 40\text{mA}$ )

- **Prinzip der technische Umsetzung:**



- Durch Öffnen und Schließen des Schalters kann der Strom  $I$  gesteuert werden. Auf der Empfangsseite steuert der Strom einen Drucker.
- Asynchrone Datenübertragung mit Startbit (Dauer:  $T_i$ ) und Stop-Bit (Dauer  $1,5 T_i$ )





**Definitionen:****Codeelement**

einfachstes Element zur Darstellung von Information  
(1 Codeelement entspricht 1 Schritt)

Beispiel:

Telex: ein Codeelement entspricht Strom bzw. kein Strom (für eine Dauer von 20ms)

**Codezeichen oder Codewort**

zusammengehörige Gruppe von Codeelementen. Insgesamt existiert eine endliche Menge von unterschiedlichen Codezeichen.

Beispiel:

Telex: 5 Codeelemente bilden hier ein Codewort

**Stufenzahl  $n$** 

Anzahl verfügbarer, unterschiedlicher Codeelemente (pro Schritt)

Beispiel a)

Telex:  $n = 2$  (binäre Codierung)

$I = 0A$  (logisch '0') und  $I = 40mA$  (logisch '1')

Beispiel b)

fiktives Beispiel:  $n=4$

- es können 4 verschiedene Stufen „eigestellt“ werden, z.B. 4 verschiedene Ströme oder Spannungen



**Stellenzahl  $m$** 

Anzahl der Codeelemente pro Codezeichen/Codewort

Telex:  $m = 5$

**Codezeichenvorrat  $N_0$** 

endliche Menge von Codezeichen, die mit  $n$  Stufen und  $m$  Stellen prinzipiell dargestellt werden können. Es gilt:  $N_0 = n^m$

Beispiel:

Telex:  $N_0 = 2^5 = 32$  Codezeichen

**Alphabet**

geordneter Zeichenvorrat

**Code**

Vorschrift für die eindeutige Zuordnung der Zeichen eines Zeichenvorrats zu denjenigen eines anderen Zeichenvorrats.

Beispiel: Internationales Telegraphenalphabet Nr. 2

**Schrittdauer  $T_i$** 

Dauer für die Übertragung eines Codeelements (entspricht einem Schritt)

Beispiel:

Telex:  $T_i = 20\text{ms}$

**Schrittgeschwindigkeit  $v_s$** 

$$v_s = \frac{1}{T_i} \quad [\text{Bd}]$$

Beispiel:

$$\text{Telex: } v_s = \frac{1}{20\text{ms}} = 50\text{Bd}$$

**Übertragungsgeschwindigkeit  $v_{\ddot{u}}$  (Bitrate)**

$$v_{\ddot{u}} = v_s \cdot \lg(n) \quad [\text{bit/s}]$$

Beispiel a)

$$\text{Telex: } n = 2 \Rightarrow \lg(2) = 1 \Rightarrow v_{\ddot{u}} = v_s$$

$\Rightarrow$  für binäre Übertragung gilt stets:  $v_{\ddot{u}} = v_s$

Beispiel b)

$$n = 4: \lg(4) = 2 \Rightarrow v_{\ddot{u}} = 2 \cdot v_s$$

## 2.3 Wichtige Beziehungen der Informationstheorie

**Informationsgehalt  $I_i$**

logarithmisches Maß für den Überraschungswert eines Zeichens  $x_i$

$$I_i = \log \frac{1}{p(x_i)} \quad [\text{bit/Zeichen}]$$

$p(x_i)$  : Wahrscheinlichkeit für das Auftreten des Zeichens  $x_i$

### Entscheidungsgehalt $H_0$

Anzahl der Binärentscheidungen zur Auswahl eines Zeichens aus dem Zeichenvorrat  $N_0$  (bei gleicher Wahrscheinlichkeit der Zeichen in  $N_0$ .)

$$H_0 = ld(N_0) = m \cdot ld(n) \quad [\text{bit}]$$

Erläuterung: Der Entscheidungsgehalt  $H_0$  eines Zeichens gibt an, wie viele Ja/Nein-Fragen (Binärentscheidungen) nötig sind, um das Zeichen aus dem Zeichenvorrat  $N_0$  zu bestimmen.

Beispiel:      Telex:  $N_0 = 32$        $\rightarrow$       5 Ja/Nein-Fragen reichen aus  
z.B.      1. Bit   1 - ja/nein ?   ...  
            2. Bit   1 - ja/nein ?   ...  
            3. Bit   1 - ja/nein ?   ...  
            4. Bit   1 - ja/nein ?   ...  
            5. Bit   1 - ja/nein ?   ...

### **Mittlerer Informationsgehalt oder Entropie $H$**

Mittlere kleinstmögliche Anzahl von Binärentscheidungen zur Bestimmung eines Zeichens des Zeichenvorrates.

$$H = \sum_i p(x_i) \cdot I_i = \sum_i p(x_i) \cdot \log_2 \frac{1}{p(x_i)} \quad [\text{bit/Zeichen}]$$

Bemerkungen: Der mittlere Informationsgehalt gibt den Durchschnittswert des Informationsgehalts der Zeichen eines Zeichenvorrates  $N_0$ , bei unterschiedlichen Auftretswahrscheinlichkeiten an. Er ist unabhängig von der Codierung und gilt damit für die theoretisch optimale Codierung.

Beispiel: In einer Urne liegen Kugeln in den Farben rot, schwarz, blau und grün. Eine Kugel wird gezogen, ohne dass die Farbe zunächst bekannt ist. Mit möglichst wenigen ja/nein Fragen soll die Farbe bestimmt werden. Zwei Fälle sollen unterschieden werden.

Fall a) Gleichverteilung, d.h. beim Ziehen einer Kugel ist die

Auftretswahrscheinlichkeit aller Farben (R,S,B,G) gleich groß  $\left( p(x_i) = \frac{1}{4} \right)$ .

Fall b) keine Gleichverteilung (mit  $p_R = \frac{1}{2}$  ;  $p_G = \frac{1}{4}$  ;  $p_B = \frac{1}{8}$  ;  $p_S = \frac{1}{8}$ )

**Redundanz  $R$** 

Differenz zwischen Entscheidungsgehalt  $H_0$  und Entropie  $H$

$$R = H_0 - H \geq 0 \quad [\text{bit/Zeichen}]$$

**Relative Redundanz  $r$  :** 
$$r = \frac{H_0 - H}{H_0} \geq 0$$

**Beispiel:** Deutsche Sprache  $\rightarrow N_0 = 26$

theoretisch bei Gleichverteilung

$$H_0 = \log 26 \text{ bit/Zeichen} = 4,7 \text{ bit/Zeichen}$$

unter Berücksichtigung der tatsächlichen Häufigkeiten ( $p('e') \gg p('x')$ )

$$H = 4,1 \text{ bit/Zeichen}$$

unter Berücksichtigung der Reihenfolge (z.B. nach 'a' eher 'n' als 'o'  
oder nach 'sc' fast immer 'h' )

$$H = 1,3 \text{ bit/Zeichen} \quad \text{d.h. praktisch kein Informationsgehalt}$$

$$R = 4,7 \text{ bit/Zeichen} - 1,3 \text{ bit/Zeichen} = 3,4 \text{ bit/Zeichen}$$

$$r = 73 \%$$

**Folge:**

$\rightarrow$  Übertragungszeit länger, aber Erkennen und Korrigieren von Fehlern möglich

**Informationsfluss  $F$** 

$$F = \frac{H}{T_m} \quad [\text{bit/s}] \quad T_m = \text{mittlere Dauer für die Übertragung eines Zeichens}$$

$$T_m = \sum_i p(x_i) \cdot T_{x_i} \quad \text{Übertragungsdauer von } x_i$$

häufiger Spezialfall: alle Zeichen sind gleichlang  $\rightarrow T_{x_i} = \text{const} = T$

$$\Rightarrow F = \frac{H}{T} \quad [\text{bit/s}]$$

Beispiel a) Sprache (deutsch) mit Telex übertragen

$$T = 7,5 \cdot 20\text{ms} = 150 \text{ ms/Zeichen}$$

$$H = 1,3 \text{ bit/Zeichen}$$

$$\Rightarrow F = 8,67 \text{ bit/s}$$

Beispiel b)

**Kanalkapazität**

maximaler Informationsfluss, der auf einem Kanal fehlerfrei übertragen werden kann

$$C = F_{\max} = \left(\frac{H}{T_m}\right)_{\max}$$

In der Realität ist die Kanalkapazität immer beschränkt. Technische Beschränkungen sind z.B.:

- Maximale Schrittgeschwindigkeit des Kanals, z.B. wie oft sich die Spannung in einer gegebenen Zeitspanne überhaupt ändern kann
- Signal-Rausch-Verhältnis: entstehende oder „eingefangene“ Störungen begrenzen Anzahl der sicher empfangbaren /sicher unterscheidbaren Symbole

Im Shanon-Hartley-Gesetz wird dies mathematisch beschrieben.

Beispiele für technisch mögliche Übertragungsraten sind:

- ISDN : 2x 64kbit/s Daten und 16 kbit/s Steuerinformationen
- ADSL2+ : 25Mbit/s im Download
- Serial ATA : bis 1,5Gbit/s
- USB 3.1 : bis 10Gbit/s
- Fast Ethernet : bis 100Mbit/s
- 3G Mobilfunk : bis 42Mbit/s
- 4G Mobilfunk (LTE) : 500Mbit/s bis Gigabit-Bereich
- 5G Mobilfunk: bis mehrere Gbit/s
- Lichtwellenleiter : bis Tbit/s

Beispiele:

Kanalart	Bandbreite	C (für realistische Signal/Rauschabstände)
analoges Fernsprechen	3,1 kHz	$4,0 \cdot 10^4$ bit/s = 40kbit/s
Rundfunk	15 kHz	$3,0 \cdot 10^5$ bit/s = 300kbit/s
Fernsehen	5000 kHz	$7,5 \cdot 10^7$ bit/s = 75Mbit/s
Informationsaufnahme des Menschen		?