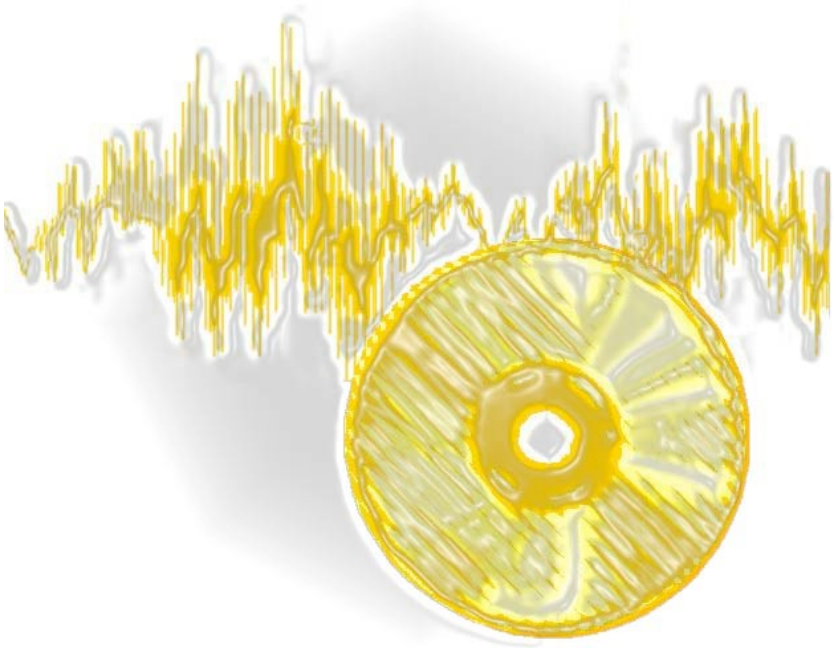
Codierungstheorie



Einführung

Prof. Dr. Dirk W. Hoffmann

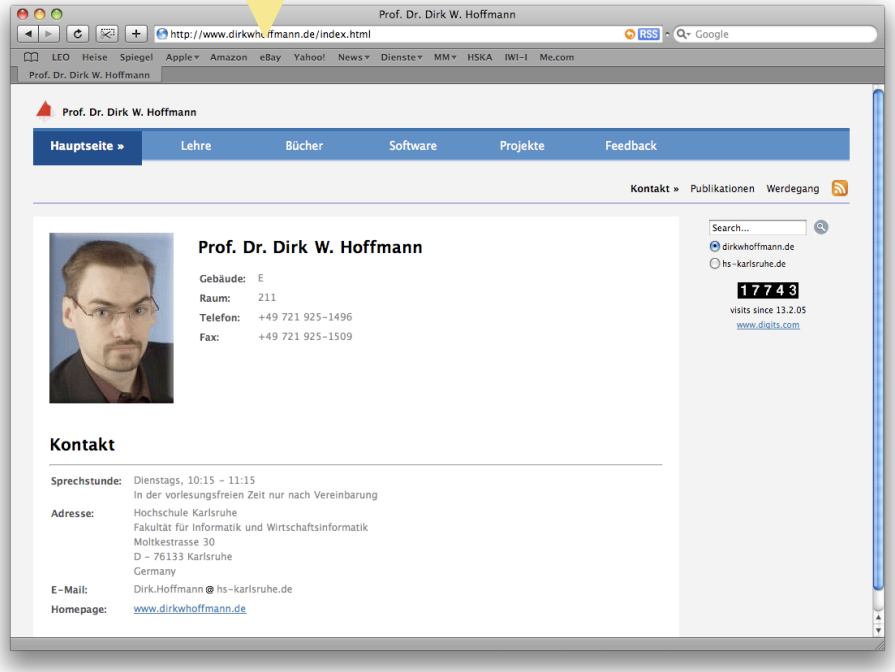
Hochschule Karlsruhe ◆ University of Applied Sciences ◆ Fakultät für Informatik

Rund um die Vorlesung…

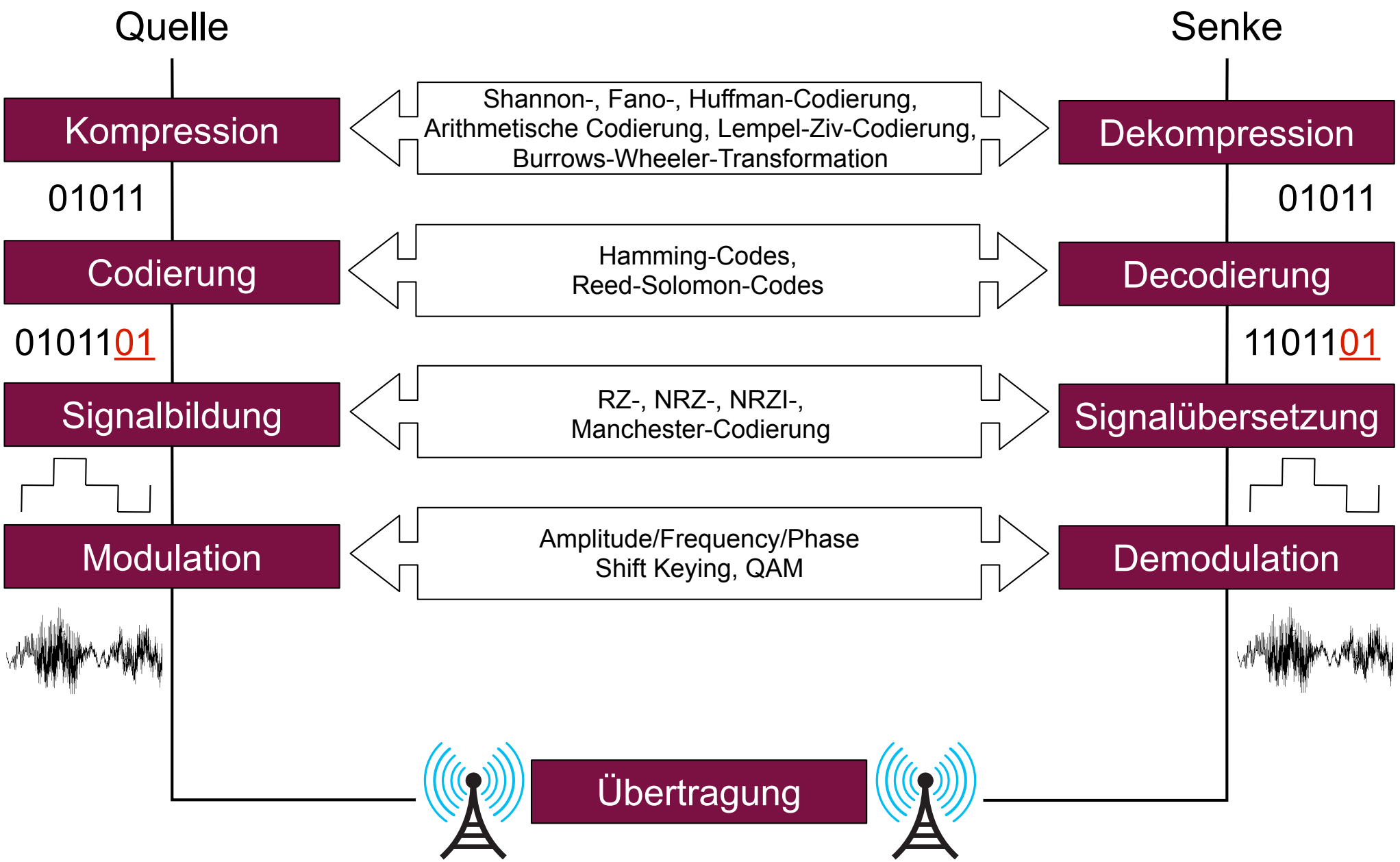
- Vorlesungsmaterialien
  - Folien
  - Passwort
- Übungsblätter
  - 6 Übungsblätter
  - Ca. alle 2 bis 3 Wochen
  - Besprechung der wichtigsten Aufgaben in der Vorlesung
- Klausur
  - 120 Minuten
  - Keine Hilfsmittel

- Ressourcen im WWW
  - Foliensätze
  - Übungsblätter
  - Alte Klausuren

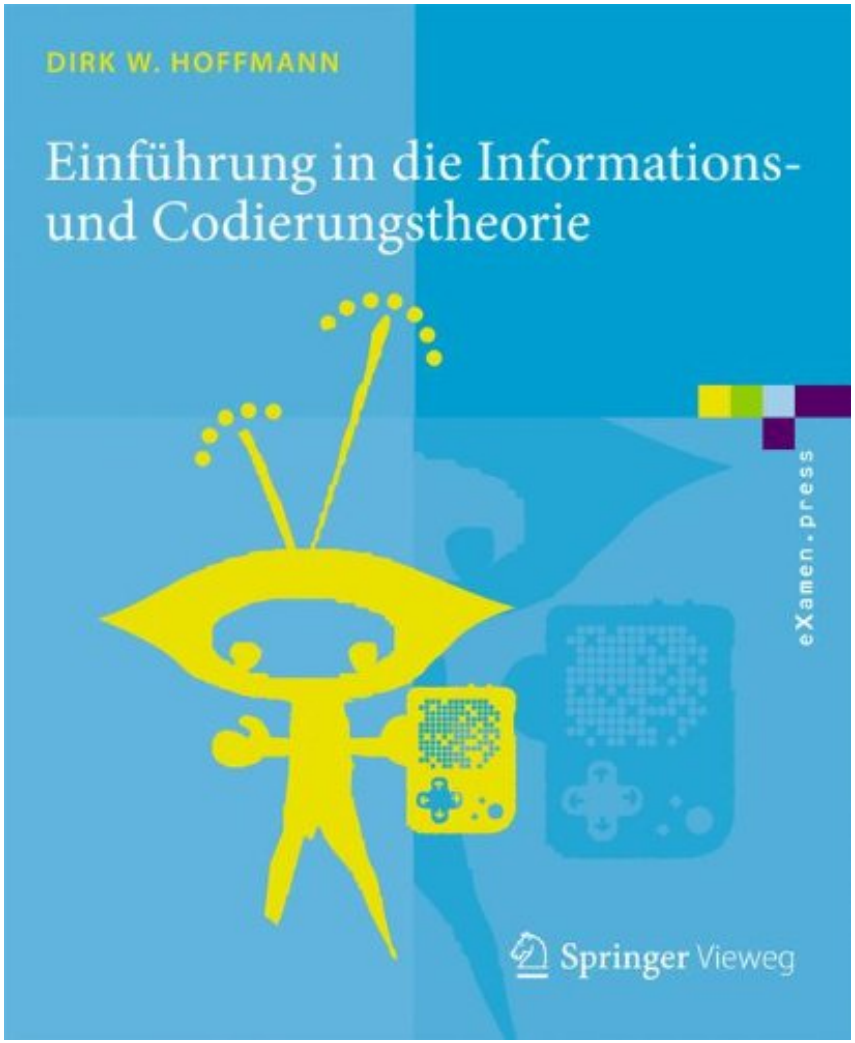
www.dirkwhoffmann.de



Übersicht


Quelle
Senke
Kompression
Shannon-, Fano-, Huffman-Codierung,
Arithmetische Codierung, Lempel-Ziv-Codierung,
Burrows-Wheeler-Transformation
Dekompression
01011
01011
Codierung
Hamming-Codes,
Reed-Solomon-Codes
Decodierung
01011101
11011101
Signalbildung
RZ-, NRZ-, NRZI-,
Manchester-Codierung
Signalübersetzung
Modulation
Amplitude/Frequency/Phase
Shift Keying, QAM
Demodulation
Übertragung

Literatur



Dirk W. Hoffmann

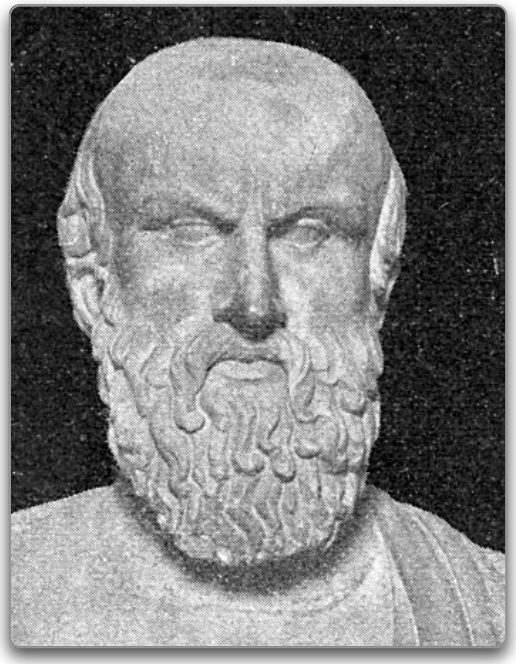
Einführung in die Informations- und Codierungstheorie

Springer Vieweg
ISBN 978-3642540028

Historische Entwicklung der Kommunikationstechnik

Nachrichtenübertragung in der Antike

- Fackelpost des Agamemnon
  - Erwähnt im Drama Agamemnon
  - Erster Teil der Trilogie Orestie des Dichters Aischylos
  - Uraufführung im Jahr 458 v. Chr.

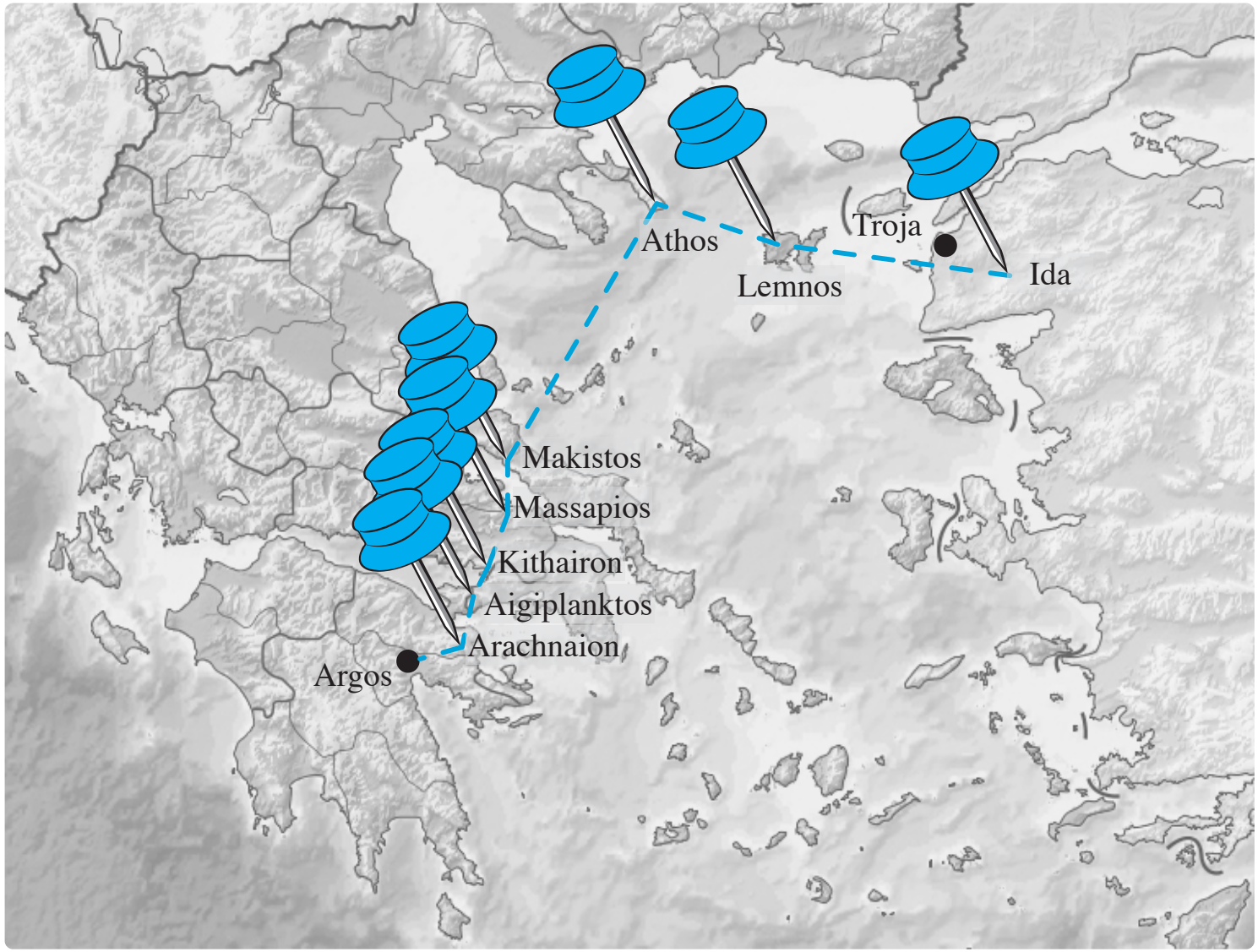


- Dem Drama zu Folge wird der Fall Trojas über Signalfeuer an den königlichen Palast zu Argos übermittelt

Aischylos (525 - 465 v. Chr)

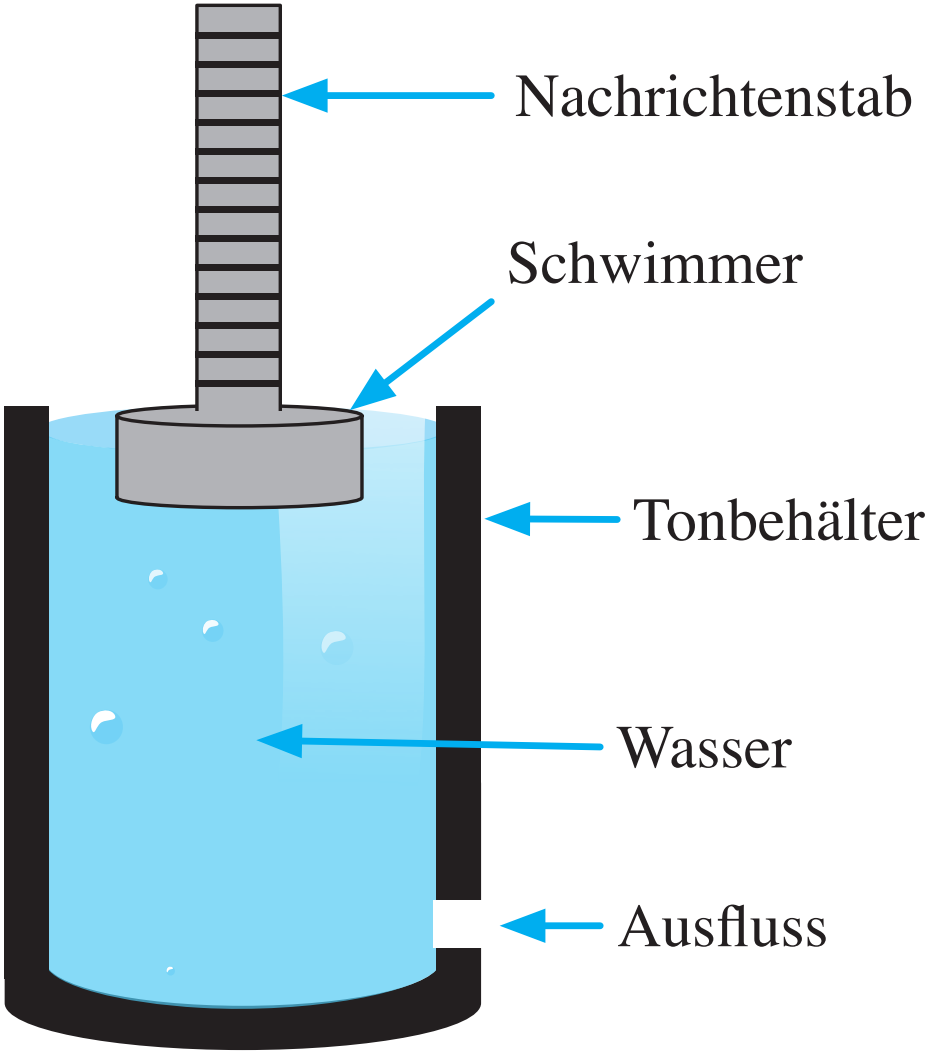
Nachrichtenübertragung in der Antike

Berichtete Signalstrecke von Ida nach Argos



Synchrontelegraf des Aineias

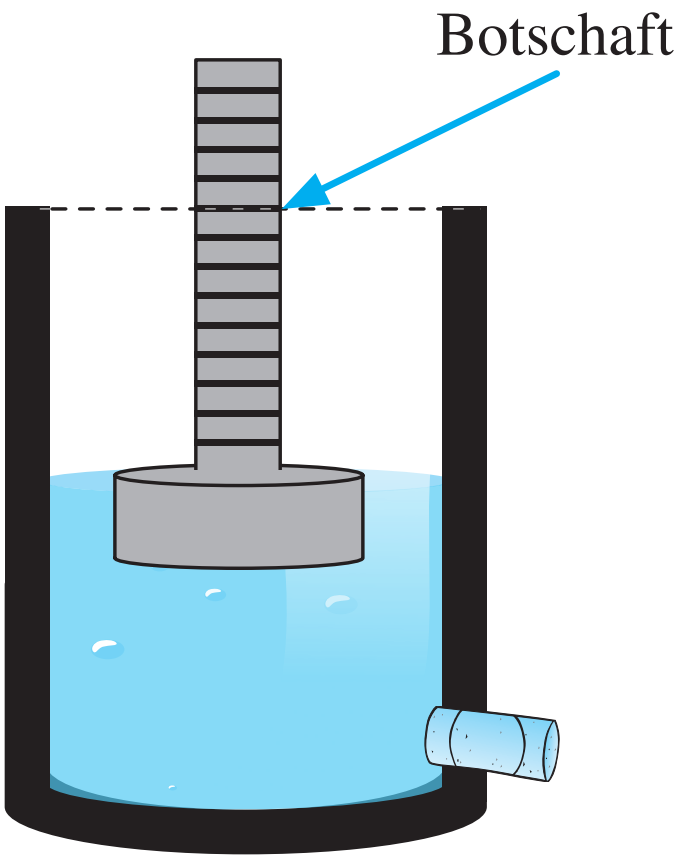
- Synchrontelegraf des Aineias



[Aineias] sagt, dass sich diejenigen, die wichtige Nachrichten mit Hilfe von Feuerzeichen austauschen wollen, tönerne Gefäße beschaffen sollen, deren Durchmesser und Höhe auf das Genaueste gleich sein sollen, [...]. Wenn dies geschehen ist, sollen beide Gefäße sorgfältig angebohrt werden, so dass kleine Ausflüsse entstehen, durch die [Wasser] gleich schnell abfließen kann.

Synchrontelegraf des Aineias

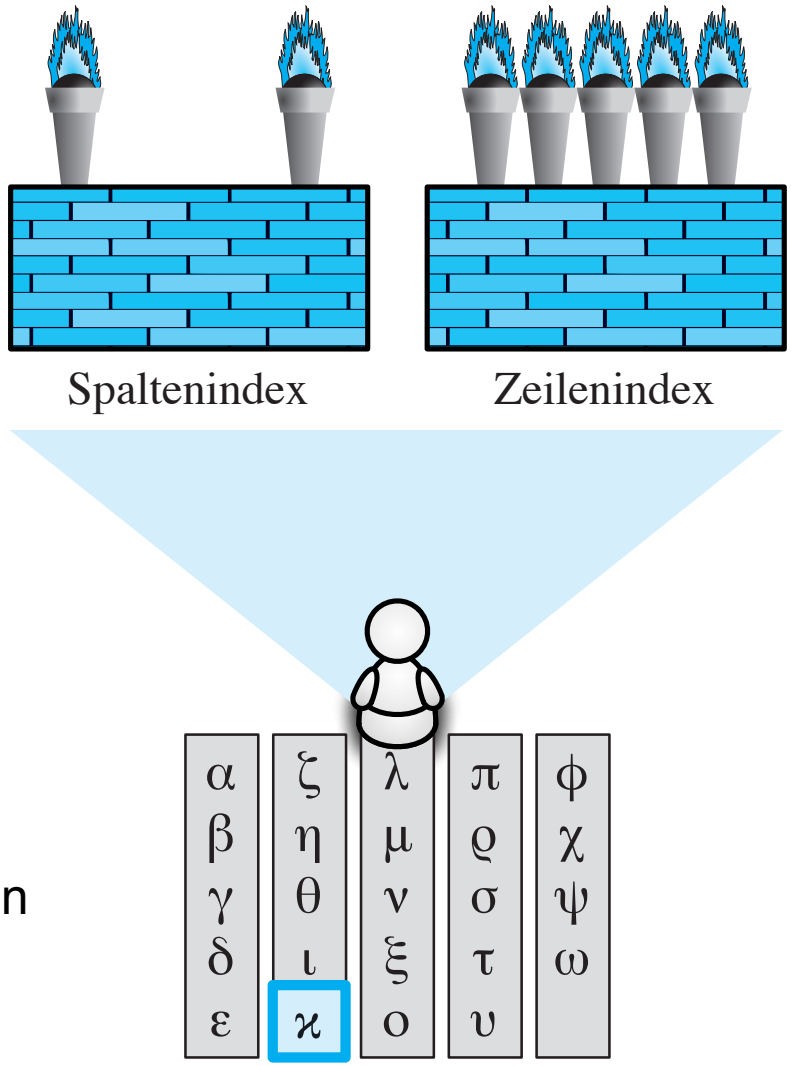
- Synchrontelegraf des Aineias



[Aineias] sagt, dass sich diejenigen, die wichtige Nachrichten mit Hilfe von Feuerzeichen austauschen wollen, tönerne Gefäße beschaffen sollen, deren Durchmesser und Höhe auf das Genaueste gleich sein sollen, [...]. Wenn dies geschehen ist, sollen beide Gefäße sorgfältig angebohrt werden, so dass kleine Ausflüsse entstehen, durch die [Wasser] gleich schnell abfließen kann.

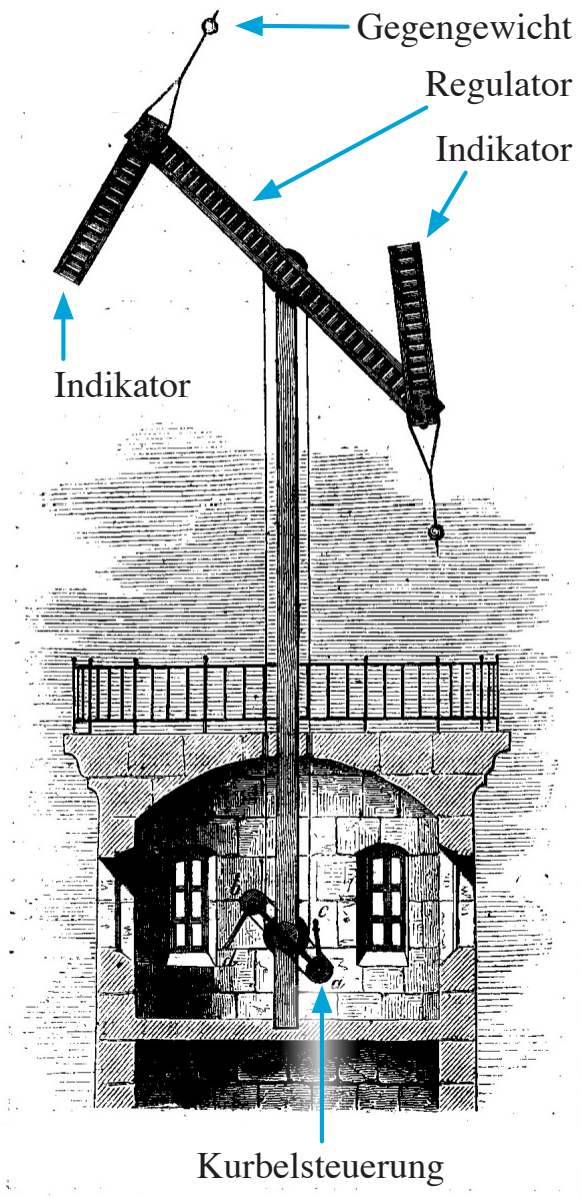
Fackelcode des Polybios

- Fackelpost des Polybios
  - Buchstabenweise Codierung von Nachrichten
  - Sendeseite
    - Zwei Sichtblenden mit je 5 Fackeln
  - Empfängerseite
    - Sichtröhre
    - Fackeln codieren Tabelleneintrag
    - Anzahl der Fackeln hinter der linken Sichtblende entspricht der Spaltennummer
    - Anzahl der Fackeln hinter der rechten Sichtblende entspricht der Zeilennummer
  - Erster Zeichencode der Welt
  - Trotzdem kaum praktische Anwendung
    - Das Fernrohr war noch lange nicht erfunden
    - Reichweite daher beschränkt

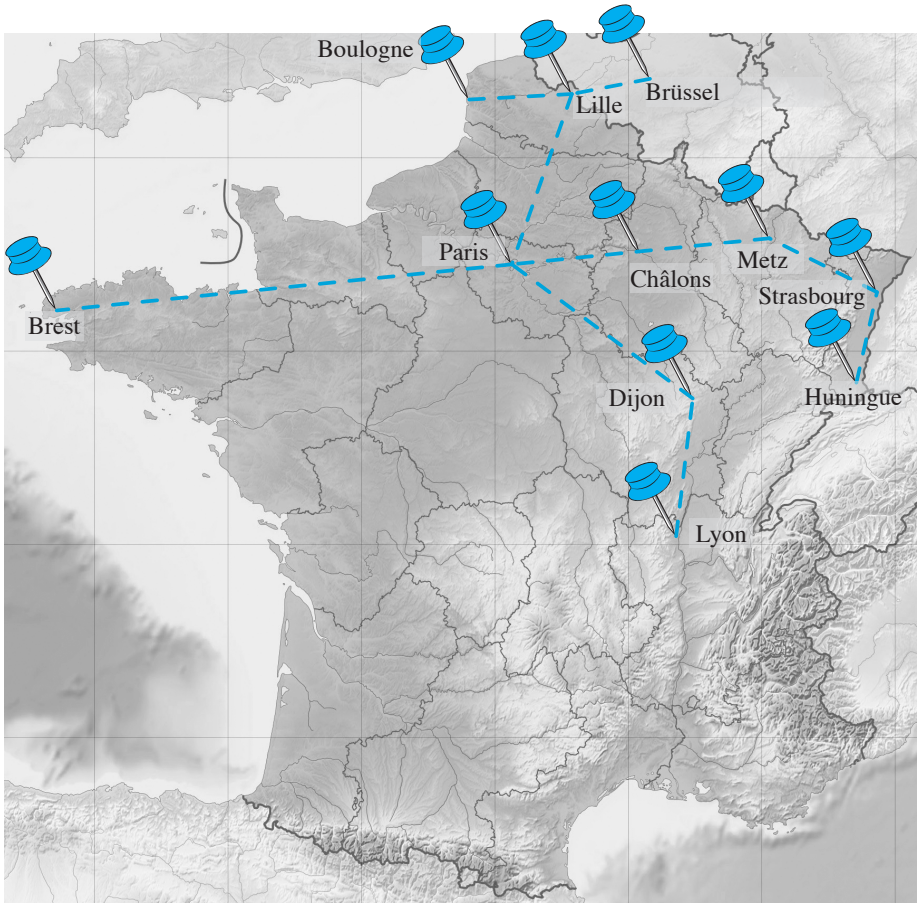


Das mechanische Internet

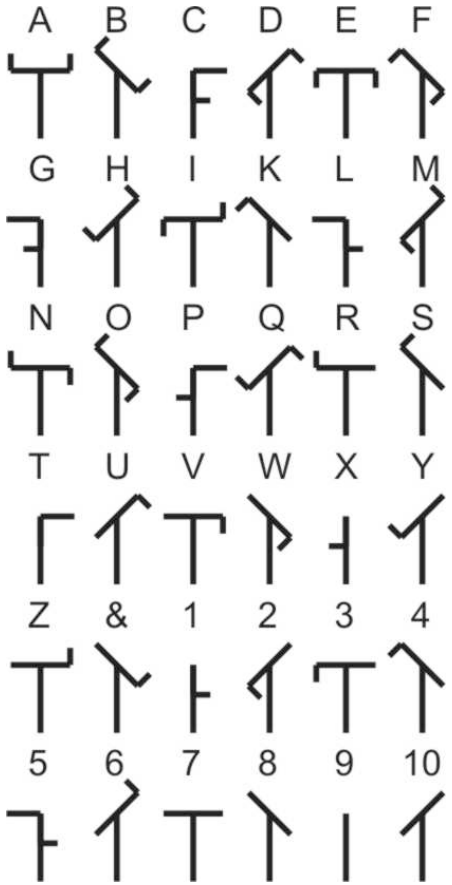
- Semaphoren-Telegraf von Claude Chappe
  - Sendestation bestand aus
    - einem beweglichen Mittelbalken, dem Regulator
    - zwei beweglichen Seitenbalken, den Indikatoren
  - Position lässt sich über Kurbeln einstellen
  - Nachricht wurde
    - zunächst über Wörterbücher,
    - später zeichenweise codiert
  - 1793 Beginn des Baus einer Teststrecke
  - 1794 Bau der Telegraphenlinie Paris - Lille
  - Ab jetzt wird das Netz kontinuierlich erweitert und in den Folgejahren entsteht ein großflächiges optischen Telegrafennetz

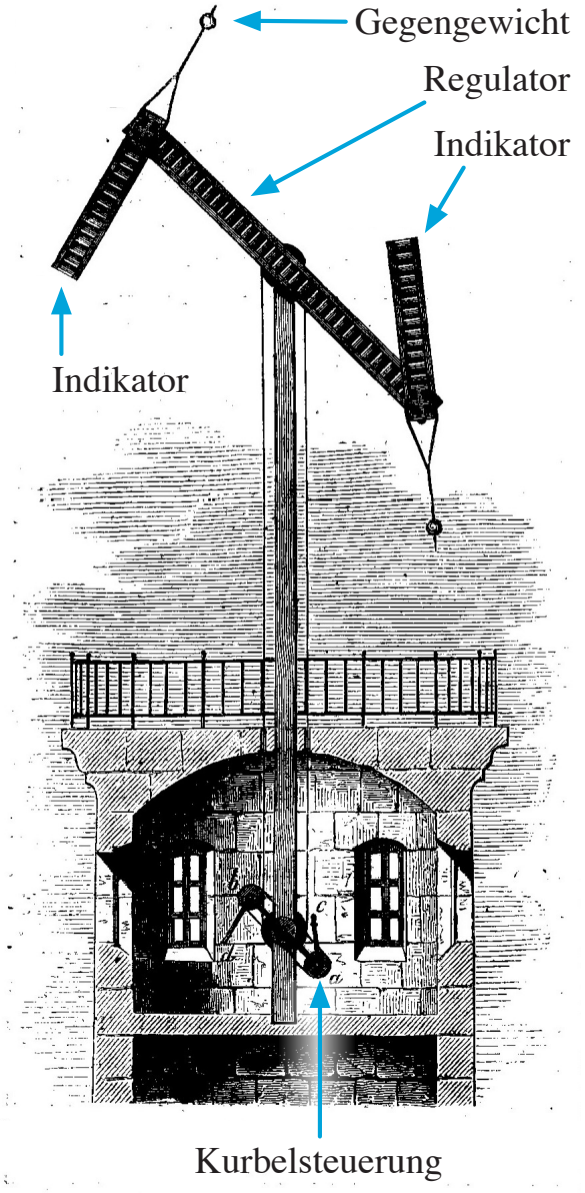


Das mechanische Internet



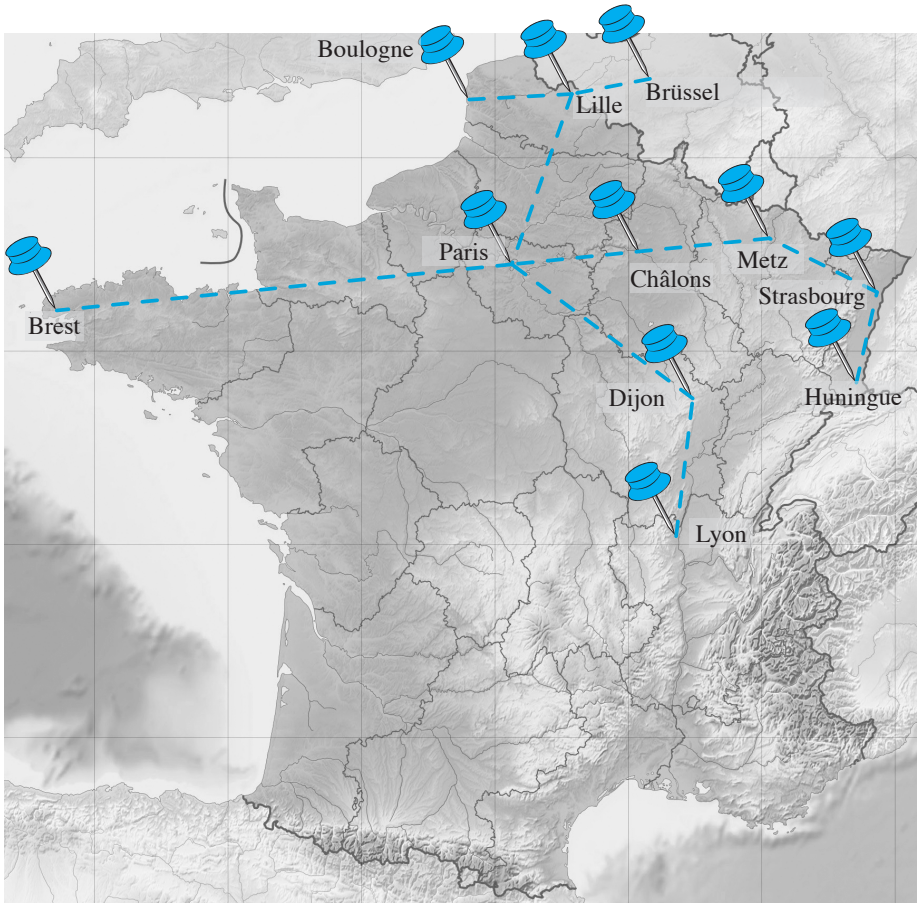
Telegrafennetz um 1805



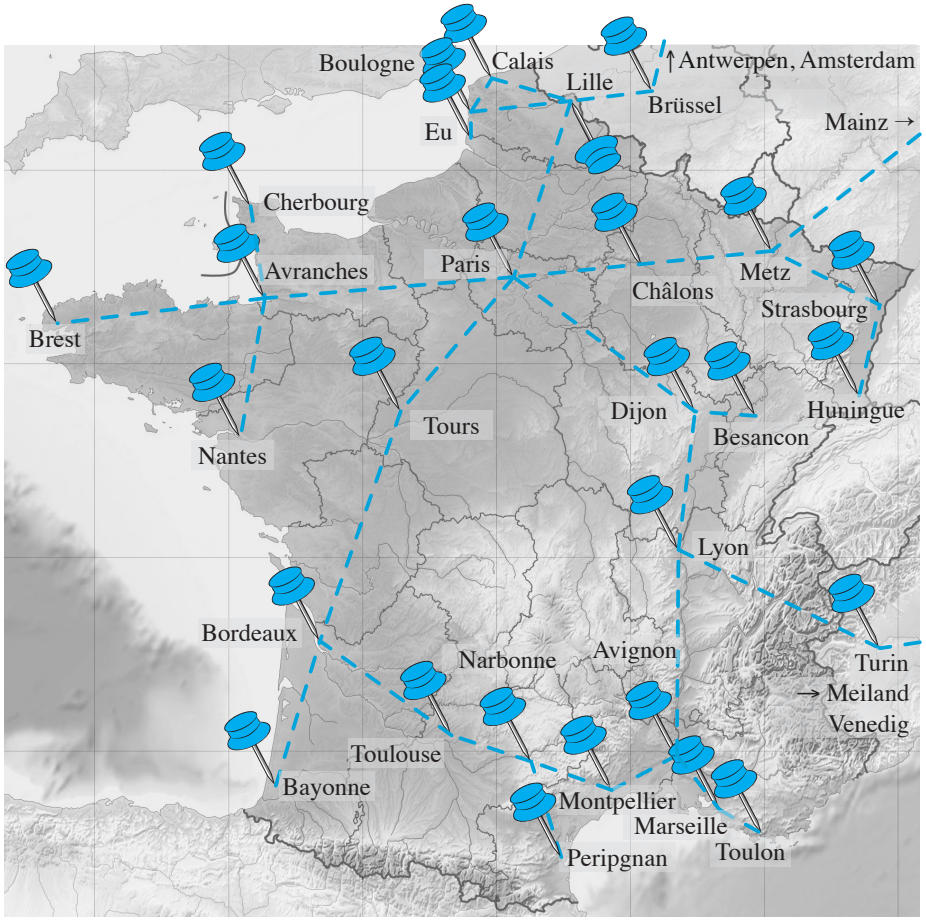


Das mechanische Internet

Der Chappe-Telegraf wird zu einem großflächigen Netz ausgebaut



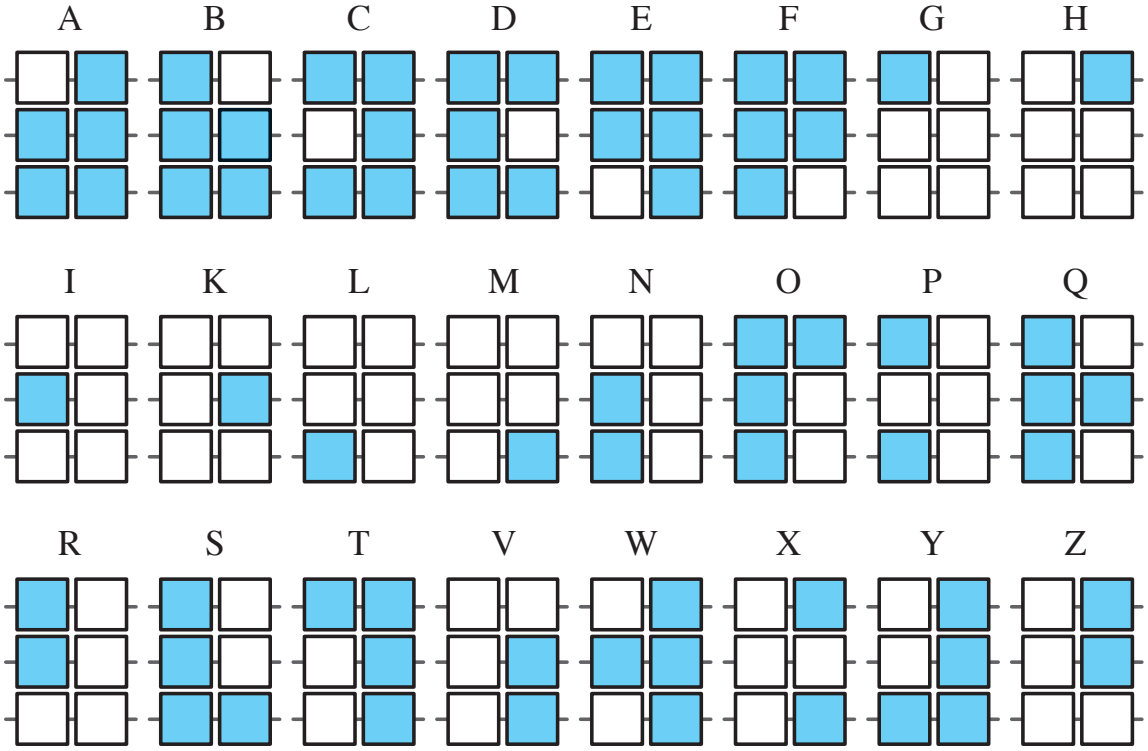
Telegrafennetz um 1805

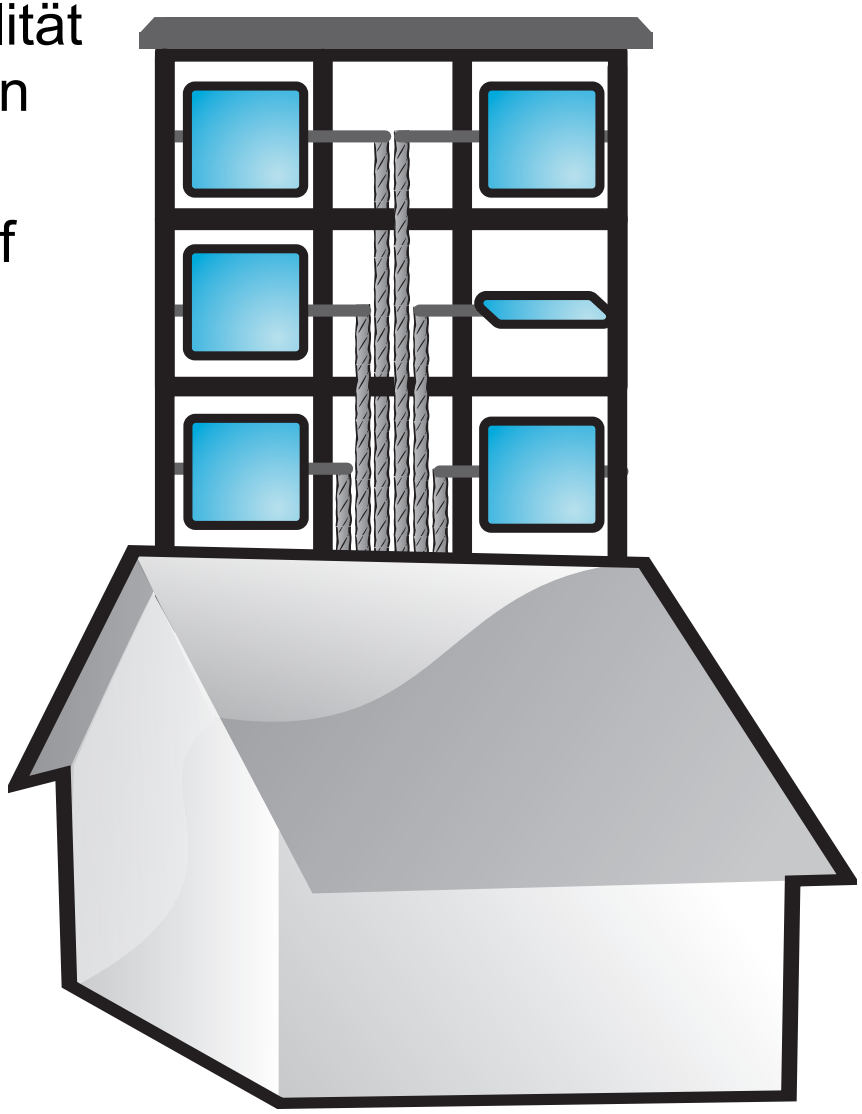


Telegrafennetz um 1845

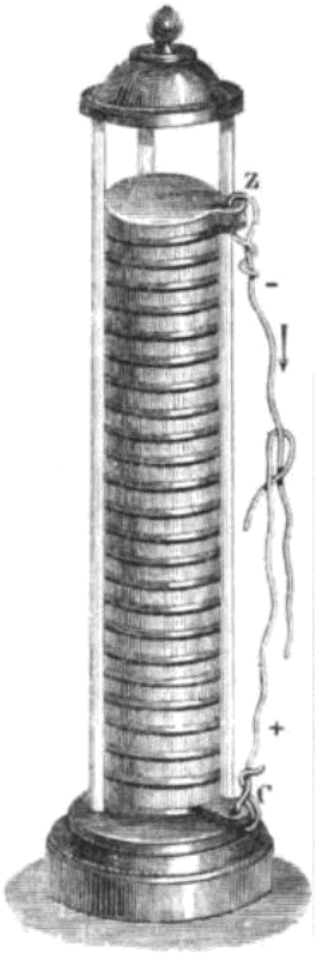
Das mechanische Internet (in Großbritannien)

- Optischer Telegraf von Lord Murray
  - 1795 beschließt die Englische Admiralität den Bau einer Telegrafenlinie zwischen London und der Hafenstadt Deal
  - Errichtet wurde ein 6-Klappen-Telegraf nach Murrays Plänen

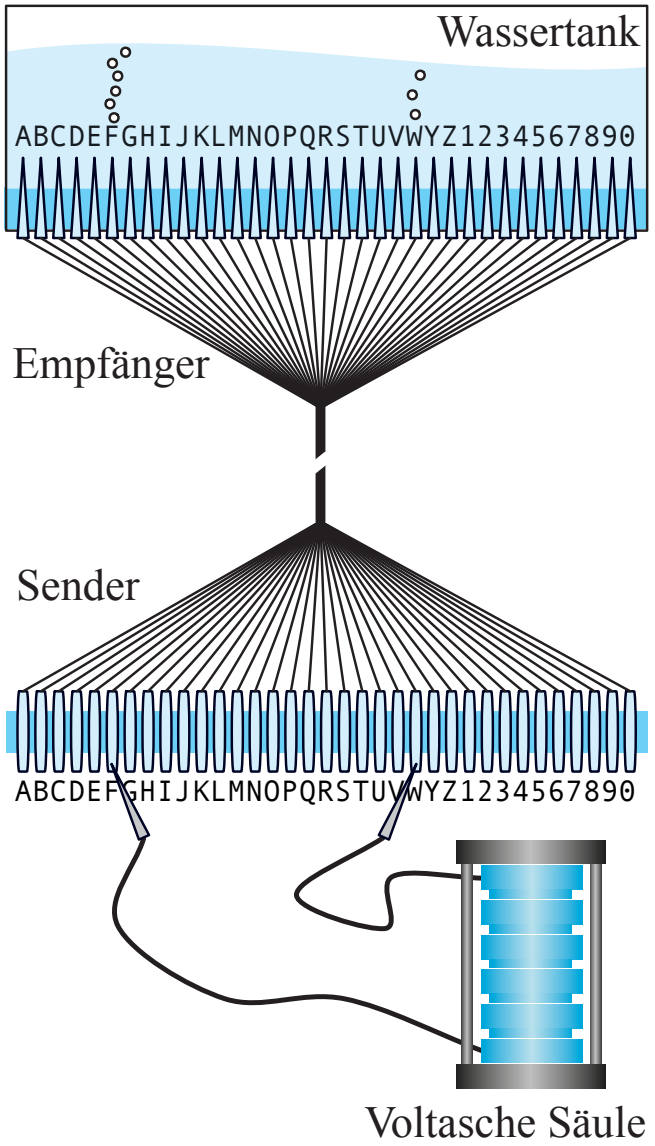




Die elektrische Revolution



- Allessandro Volta
  - 1745 - 1827
  - erfindet mit der Volta'schen Säule den Vorläufer der modernen Batterie

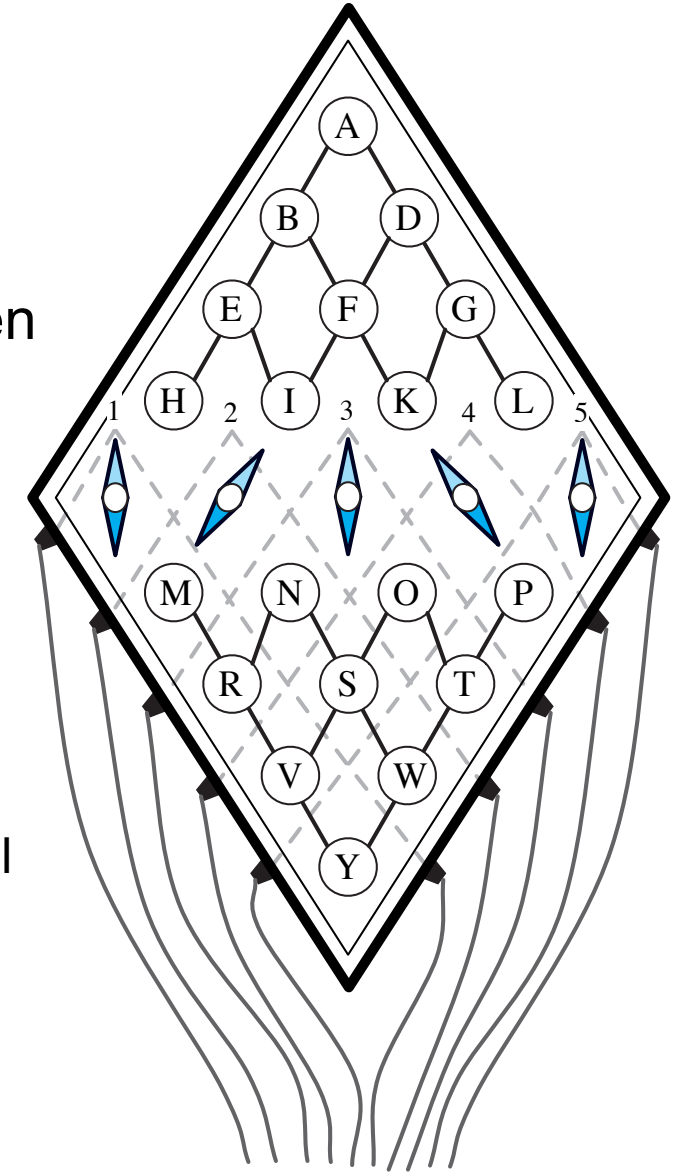


Voltasche Säule

- Samuel von Soemmerring
  - 1755 - 1830
  - nutzte die Volta'sche Säule zum Bau des elektrolytischen Telegrafen

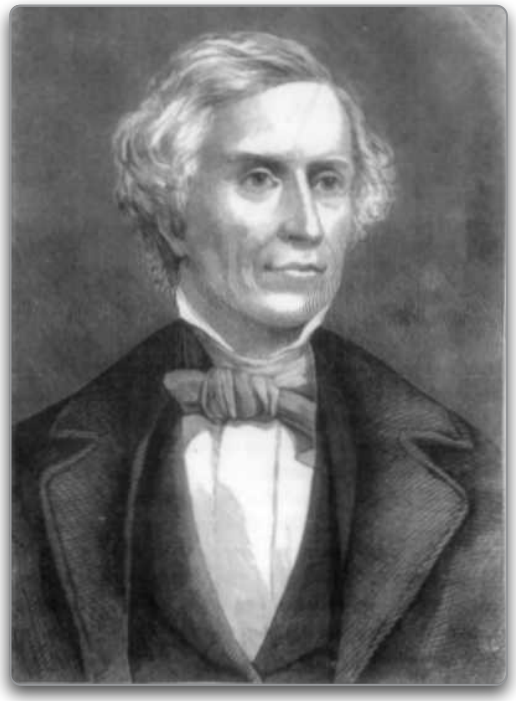
Die elektrische Revolution

- Nadeltelegraf von Cooke und Wheatstone
  - Der Däne Hans Christian Ørstead entdeckt, dass sich Magnetnadeln durch elektrischen Strom auslenken lassen
  - Cooke und Wheatstone nutzen das Phänomen zur Konstruktion eines elektrischen 5-Nadel-Telegrafen
  - Es folgen mehrere Weiterentwicklungen
    - 2-Nadel-Telegraf
    - 1-Nadel-Telegraf
  - Nadeltelegraf bewährt sich in der Praxis
    - Dennoch bleibt die Nutzung auf die britische Insel beschränkt
    - Außerhalb Großbritanniens wird schon bald ein anderer Telegraf seinen Siegeszug beginnen...



Morse-Telegraf

- Samuel Finley Breese Morse
  - Professor für Malerei
  - 1829 verlässt Morse die USA für eine dreijährige Arbeitsreise nach Europa
    - Längerer Aufenthalt im Louvre
  - 1832 erfolgt die Rückfahrt
    - Dampschiff Sully
    - von Le Havre nach New York
  - Charles T. Jackson
    - unterrichtet Morse über die neuesten Erkenntnisse auf dem Gebiet der Elektrizität

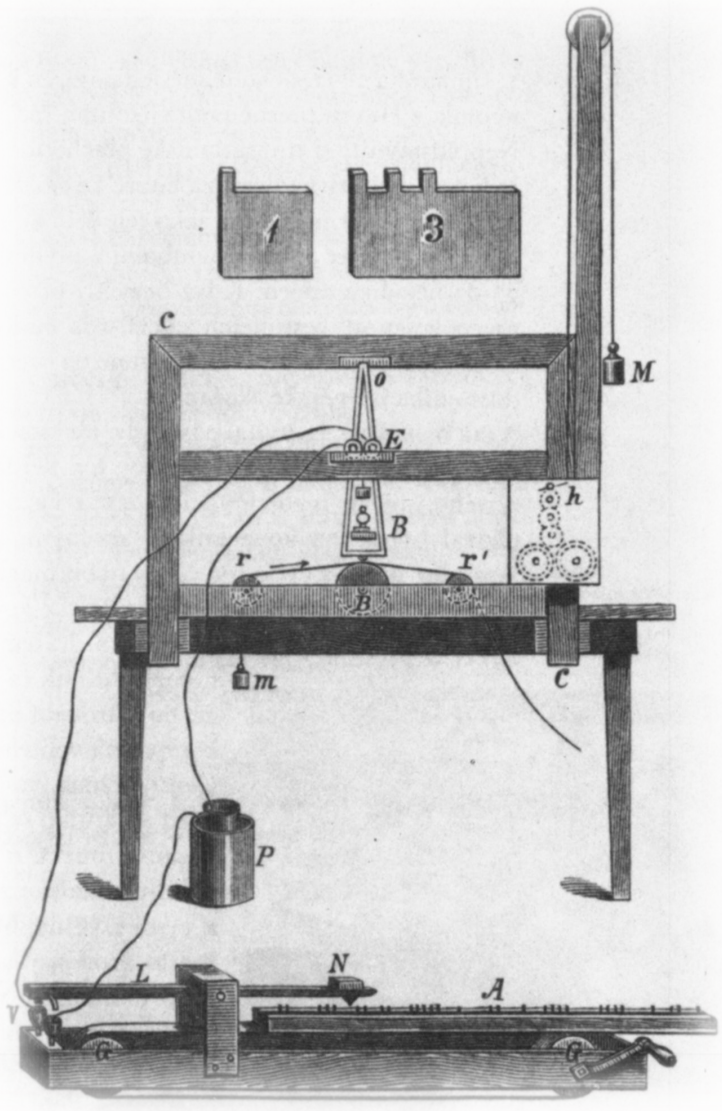


Samuel F. B. Morse
(1791 - 1872)

„If this be so, and the presence of electricity can be made visible in any desired part of the circuit, I see no reason why intelligence might not be instantaneously transmitted by electricity to any distance.“

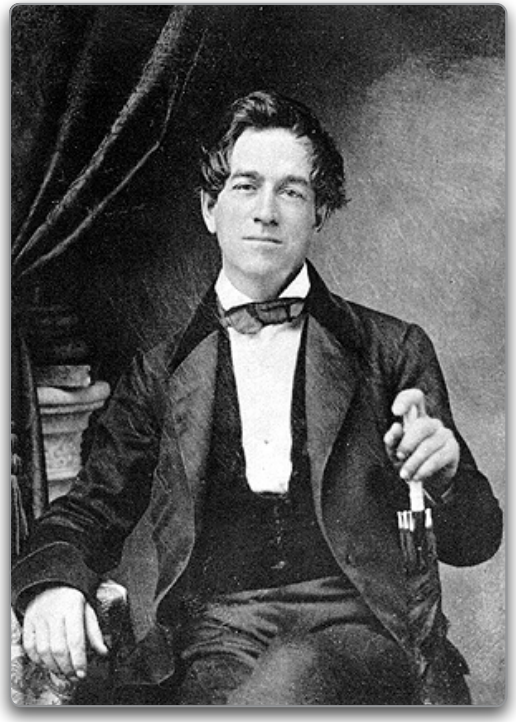
Morse-Telegraf

- Der elektrische Telegraf
  - Erster Prototyp im Jahr 1835
    - fragile Konstruktion
    - aus einer Staffelei gefertigt
  - Sender
    - Impulserzeugung durch Zackenbretter
    - noch kein Fingertaster („morse key“)
  - Empfänger
    - erzeugt Zickzack-Kurve
    - noch keine „dots“ und „dashes“
  - Probleme
    - Übertragung funktioniert nur auf kurzen Strecken
    - Morse stößt mit seinem Fachwissen an seine Grenzen



Morse-Telegraf

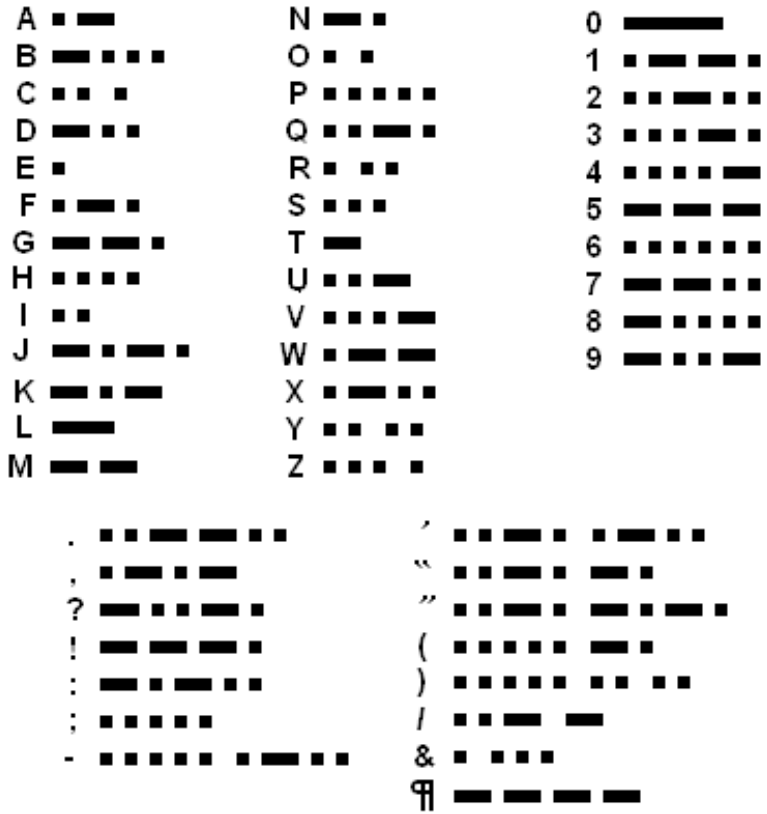
- Leonard Gale
  - New Yorker Chemieprofessor
  - enger Freund des Physikers Joseph Henry
  - identifizierte zwei maßgebliche Schwachstellen
    - Angelegte Spannung ist viel zu gering
    - Elektromagnet ist zu schwach
  - 1837 meldet Morse die Weiterentwicklung zum Patent an
- Alfred Vail
  - Sohn des Besitzers der Speedwell Ironworks Company, New Yersey
  - Weiterentwicklung zu einem kommerziellen Gerät
    - Einführung des „morse keys“
    - Ersann den ersten Morse-Code, der Nachrichten buchstabenweise codiert



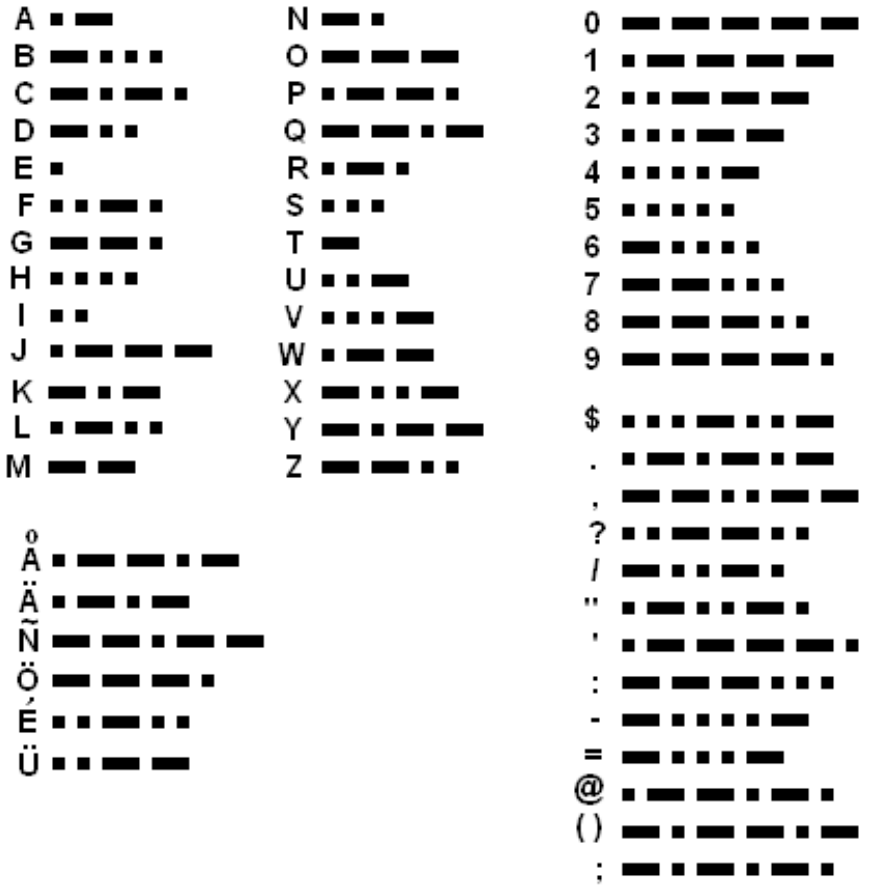
Alfred Vail
(1807 - 1859)

Morse-Telegraf

Amerikanischer Morse-Code

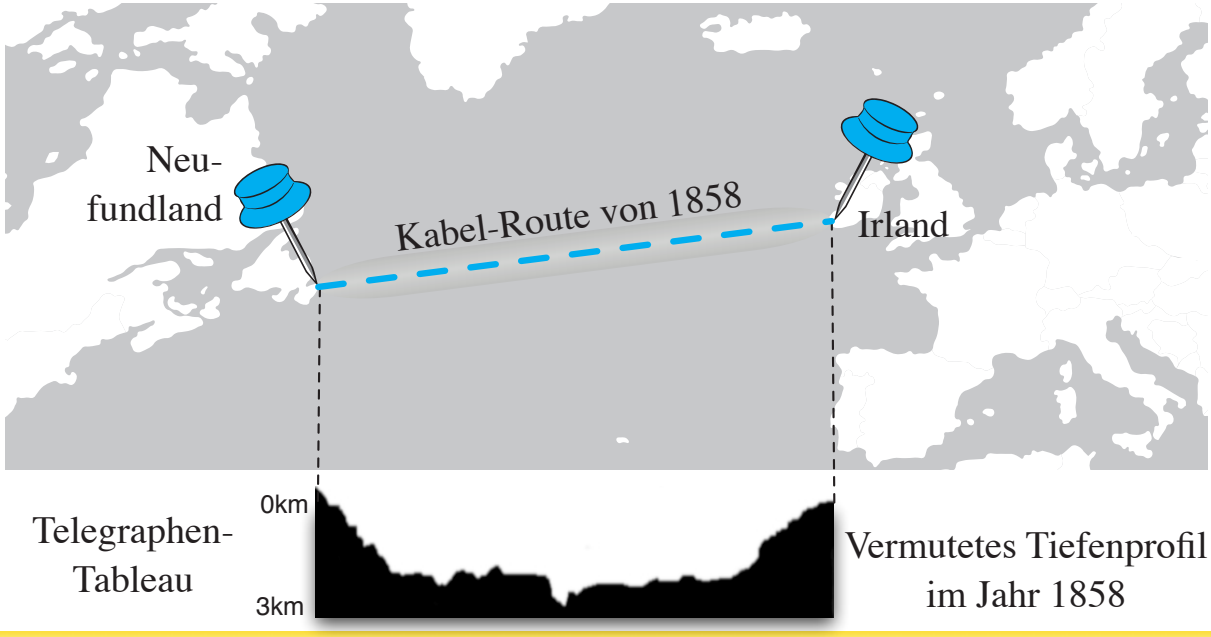


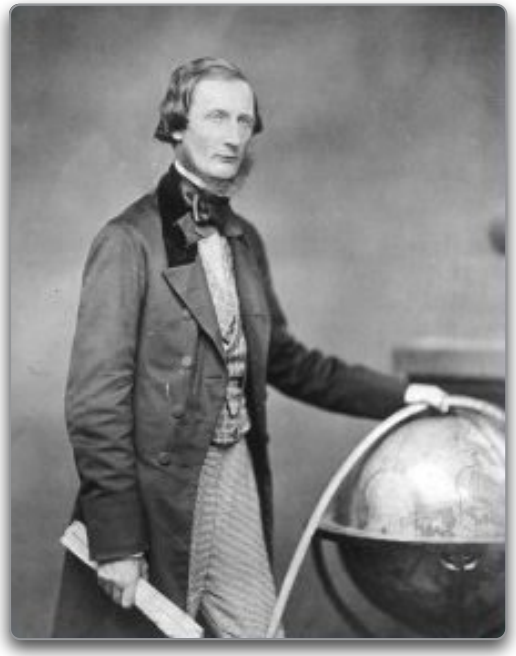
Internationaler Morse-Code



Mission Transatlantik

- Cyrus W. Field
  - mit 34 Jahren bereits ein reicher Unternehmer
  - trifft 1854 mit Frederic N. Gisborne zusammen
    - erste Erfolge im Verlegen von Unterwasserkabeln
  - Field plant den großen Wurf: Die Verlegung eines Kabels durch den Atlantik
    - konnte auf die Vermessungsarbeiten des Hydrografen Matthew Maury zurückgreifen

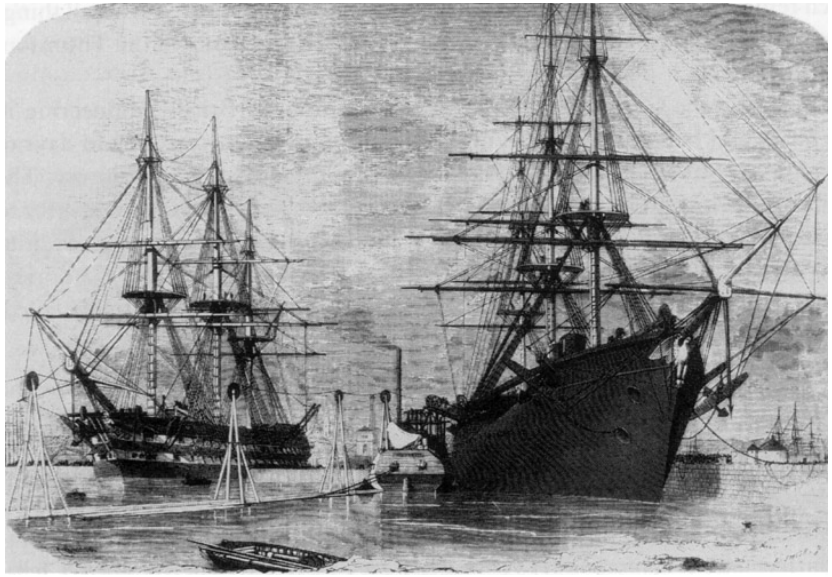




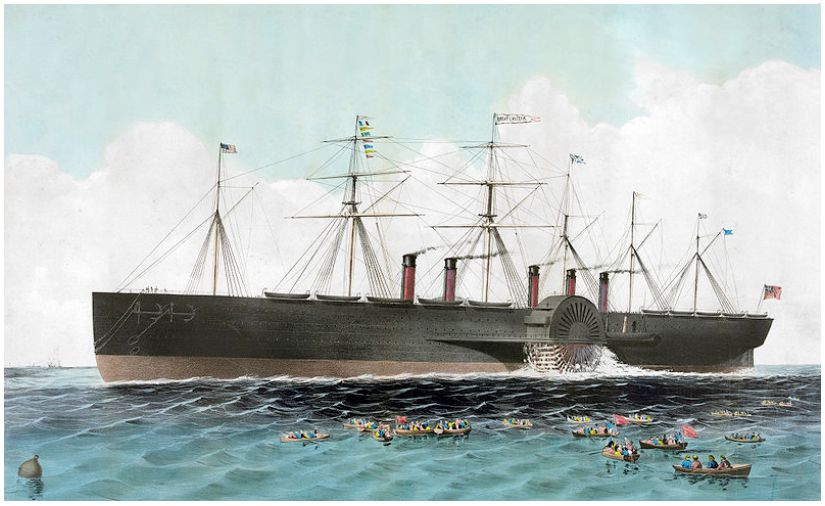
Cyrus W. Field
(1818 - 1892)

Mission Transatlantik

- Erste Mission 1857
  - H.M.S. Agamemnon, U.S.S. Niagara
  - nach 330 Seemeilen reist das Kabel
- Zweite Mission 1858
  - Verlegung des Kabels gelingt
  - Signalstärke sinkt kontinuierlich ab
    - Spannung wird sukzessive erhöht
    - Kabel verschmort und ist verloren
- Dritte Mission 1865
  - Great Eastern
  - 1000 km vor der Küste reist das Kabel
- Erfolge feiert Western Union
  - Plant sibirische Route nach Europa
  - 1865 ist der Bau voll im Gange



H.M.S. Agamemnon U.S.S. Niagara



Great Eastern

Mission Transatlantik

- Vierte Mission 1866
  - Field gelingt endlich die erfolgreiche Verlegung
  - Zudem kann das 1865er Kabel geborgen und zu Ende verlegt werden
  - Amerika und Europa sind ab jetzt durch 2 Telegrafenleitungen miteinander verbunden
  - Telegrafenlinien sind kommerzieller Erfolg
    - Fields kann seine Geldgeber schon bald auszahlen
    - Dennoch stirbt er als armer Mann

- Western Union Telegraph Company
  - Unerwartete Probleme beim Bau durch den sibirischen Permafrostboden
  - 1867 wird der Bau offiziell für beendet erklärt
  - Masten und Leitungen werden aufgegeben

Suche nach dem harmonischen Telegrafen

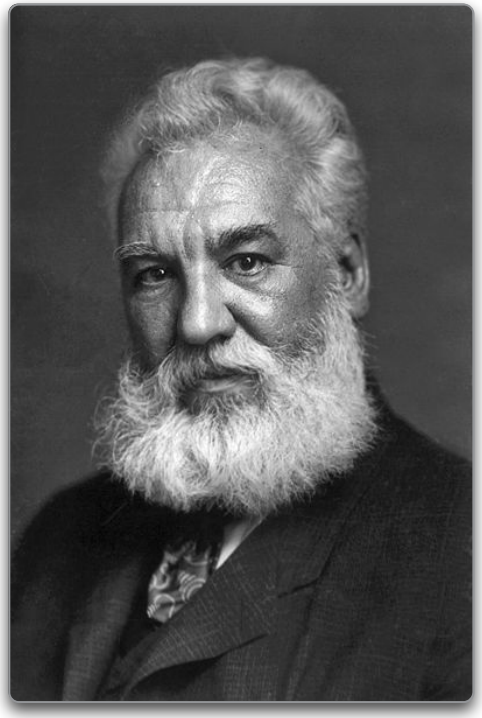
- Duplex-Telegraf
  - Gleichzeitige Benutzung der Leitung in beide Richtungen
  - 1872 von Joseph Stearns zum Patent angemeldet
- Quadruplex-Telegraf
  - Thomas Alva Edison
  - Zwei Morse-Datenströme pro Richtung
    - Amplitudenmodulation für den ersten Datenstrom
    - Phasenmodulation für den zweiten Datenstrom
- Suche nach dem heiligen Gral: dem harmonischen Telegrafen
  - Idee: Bringe Stimmgabeln auf Senderseite in unterschiedlichen Frequenzen zum Schwingen
    - Es entstehen Wechselstromquellen unterschiedlicher Frequenz
  - Morse-Datenströme werden mit den Wechselstromquellen überlagert und ohne gegenseitige Störung über die gleiche Leitung übertragen

Vom Telegraf zum Telefon

- Graham Bell
  - Forscht am Bau eines harmonischen Telegrafen
  - Dabei macht er eine faszinierende Entdeckung
    - Apparat war für die Übertragung primitiver Töne ausgelegt
    - Töne auf der Empfängerseite waren unerwartet komplex
  - Bell erkennt, dass der Apparat zu mehr im Stande ist

    „If I can get a mechanism which will make a current of electricity vary in its intensity as the air varies in density when a sound is passing through it, I can telegraph any sound, even the sound of speech.“
  - Im Juni 1865 scheint das Ziel nahe
    - Geräusche werden wiedererkennbar übertragen
    - Es entsteht das „gallows telephone“
    - Alle Verbesserungsversuche scheitern zunächst
  - Fortschritte machte derweil ein Anderer ...

Graham Bell
(1847 - 1922)



Vom Telegraf zum Telefon

- Elisha Gray
  - forscht ebenfalls am harmonischen Telegrafen
  - ähnliche Entdeckung wie Bell
- Zwei Patentanträge
  - „Electric Telegraph for Transmitting Musical Tones
    - Beschreibung eines harmonischen Telegrafen
  - „Transmitting Vocal Sounds Telegraphically“

„To all whom it may concern: Be it known that I, Elisha Gray, of Chicago, in the County of Cook, and State of Illinois, have invented a new art of transmitting vocal sounds telegraphically, of which the following is a specification:
It is the object of my invention to transmit the tones of the human voice through a telegraphic circuit, and reproduce them at the receiving end of the line, so that actual conversations can be carried on by persons at long distances apart.“

Elisha Gray
(1835 - 1901)

- Gray und Bell reichen Ihre Patente am gleichen Tag ein
  - Graham Bell: „Improvement in Telegraphy“, zwei Stunden vor Gray

Vom Telegraf zum Telefon

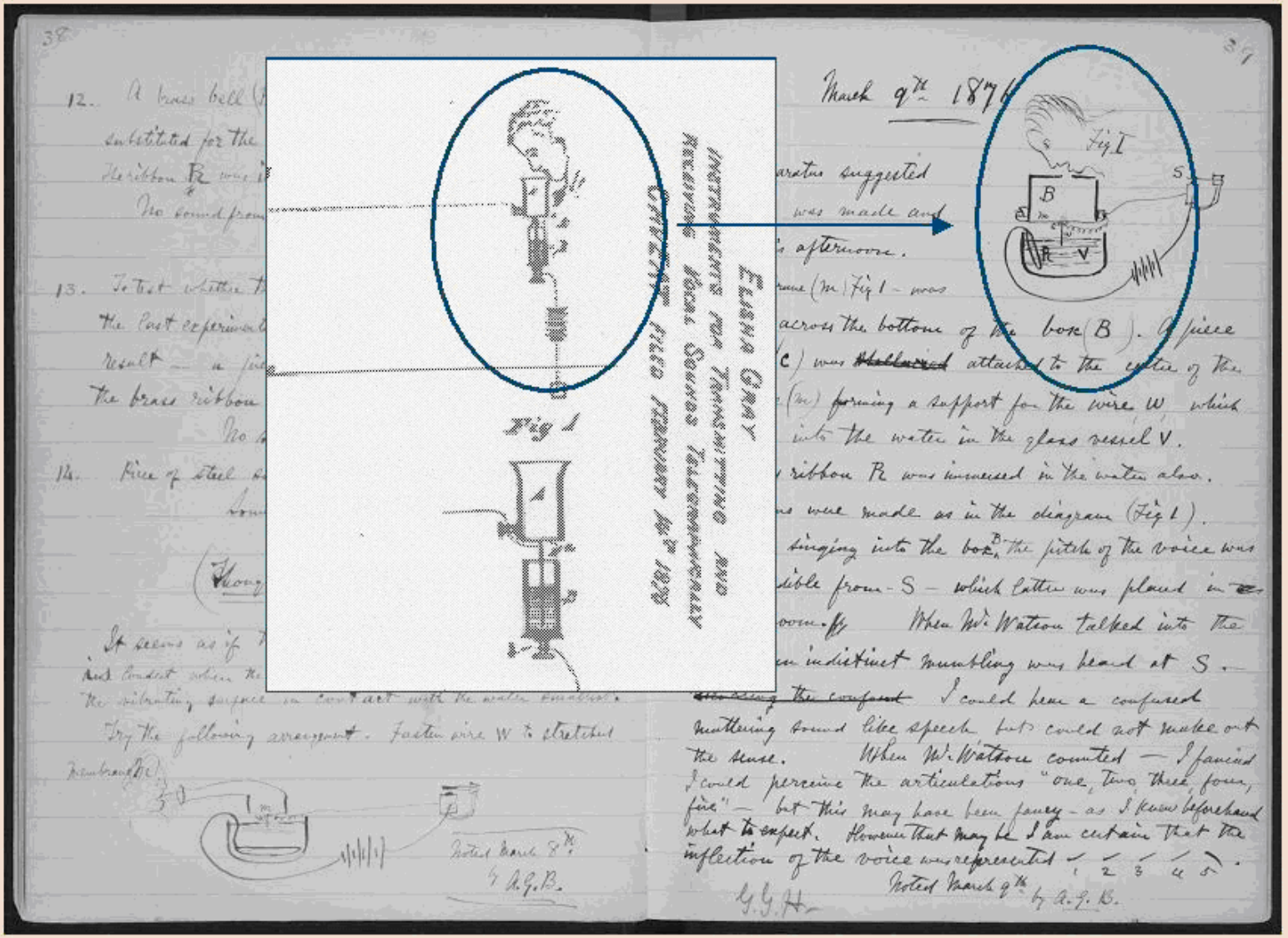
- Die große Patenschlacht
  - Beginn ca. 17 Monate nach Erteilung des Bell‘schen Patents
  - Insgesamt über 600 Prozesse
  - Etliche Widersacher, u.a.
    - Western Union Telegraph Company (Elisha Gray)
    - Antonio Meucci
      - meldet das Teletrofono 1871 zum Patent an
      - Patent ist zeitlich begrenzt

„Whereas if Meucci had been able to pay the $10 fee to maintain the caveat after 1874, no patent could have been issued to Bell: Now, therefore, be it resolved, that it is the sense of the House of Representatives that the life and achievements of Antonio Meucci should be recognized, and his work in the invention of the telephone should be acknowledged.“

[U.S. House of Representatives, 2002]

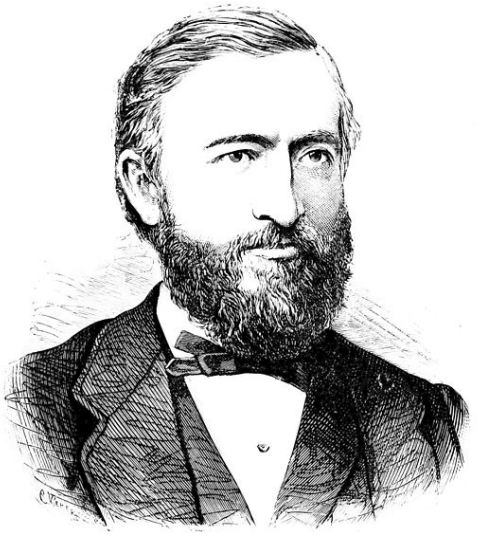
Antonio Meucci
(1808 - 1889)

A smoking gun?



Vom Telegraf zum Telefon

- Philipp Reis
  - Erfindung des ersten Geräts zur Übertragung von Tönen über elektrische Leitungen
  - Reis verfolgt akademisches Interesse
    - Herstellung von Demonstratoren zu Lehrzwecken
  - Limitierungen des Reis-Telefons
    - Akustische Signale werden nicht in kontinuierlich verändernde Spannungspegel übersetzt
    - ein elektrisches Signal wird an- und ausgeschaltet



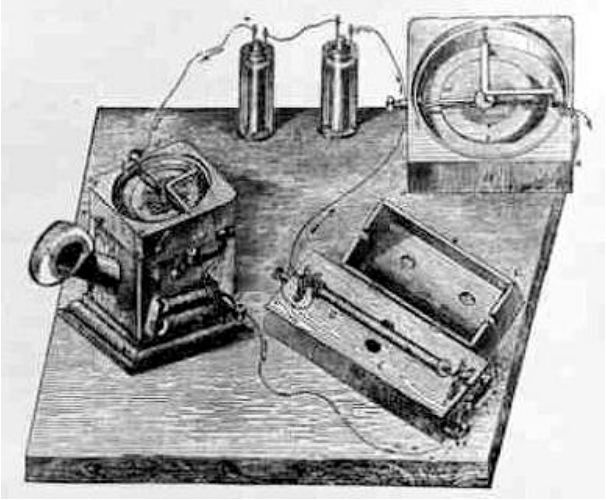
Philipp Reis
(1834 - 1874)

„A century of Reis would never have produced a speaking telephone by mere improvement in construction.“

[Judge Lowell]

„The honor, to have transmitted the human voice by means of electricity first, owes to rice.“

[Silvanus Thompson]



Vom Telefon zum Radio

- James Clerk Maxwell
  - formuliert 1865 die Maxwell‘schen Gleichungen
  - postuliert die Existenz elektromagnetischer Wellen

(1831 - 1879)

(1857 - 1894)

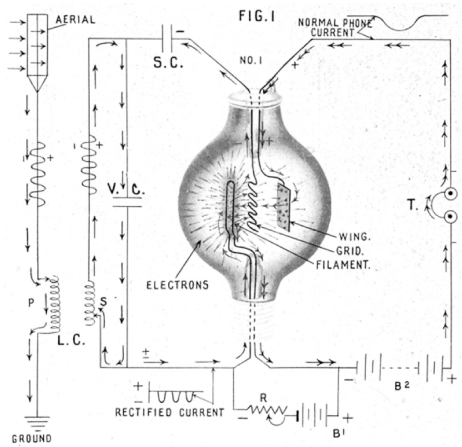
- Heinrich Hertz
  - gelingt 1886 der experimentelle Nachweis
  - an die Idee eines drahtlosen Telegrafen denkt zunächst niemand

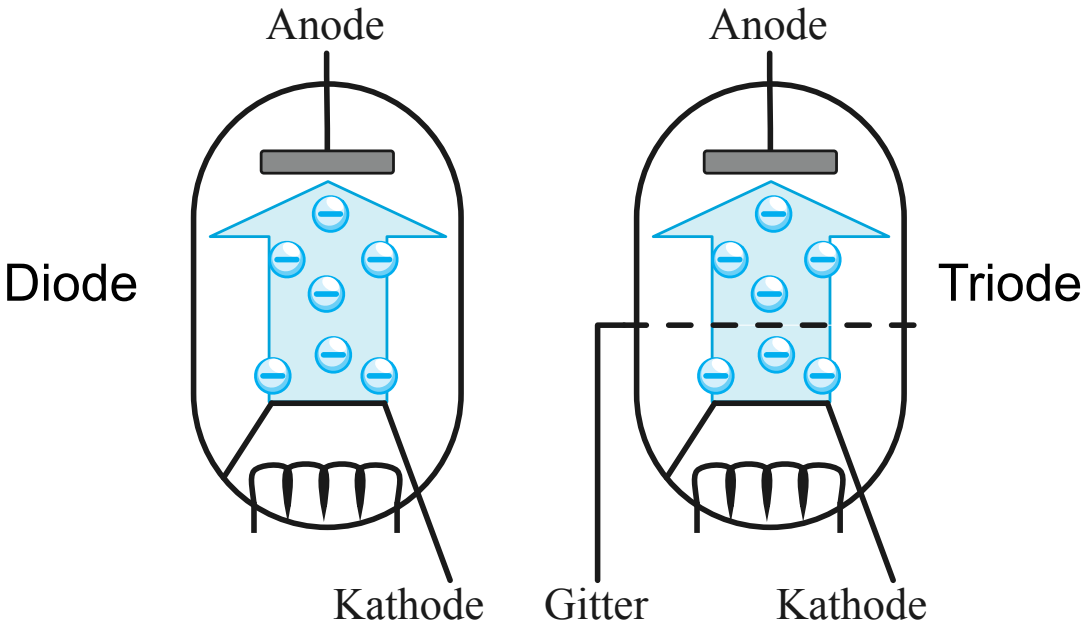
- Guglielmo Marconi
  - liest 1894 eine Biographie von Hertz
  - erkennt das Potenzial seiner Erfindung für die Nachrichtentechnik
  - meldet seine Erfindung 1896 zum Patent an

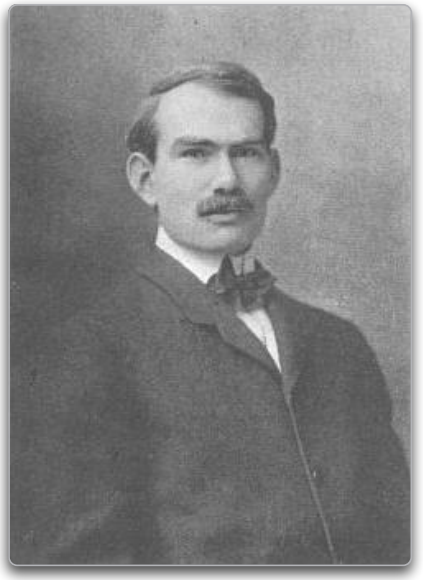
(1874 - 1937)

Vom Telefon zum Radio

- Lee De Forest
  - meldet 1906 das Audion zum Patent an
    - Vorläufer der Triodenröhre





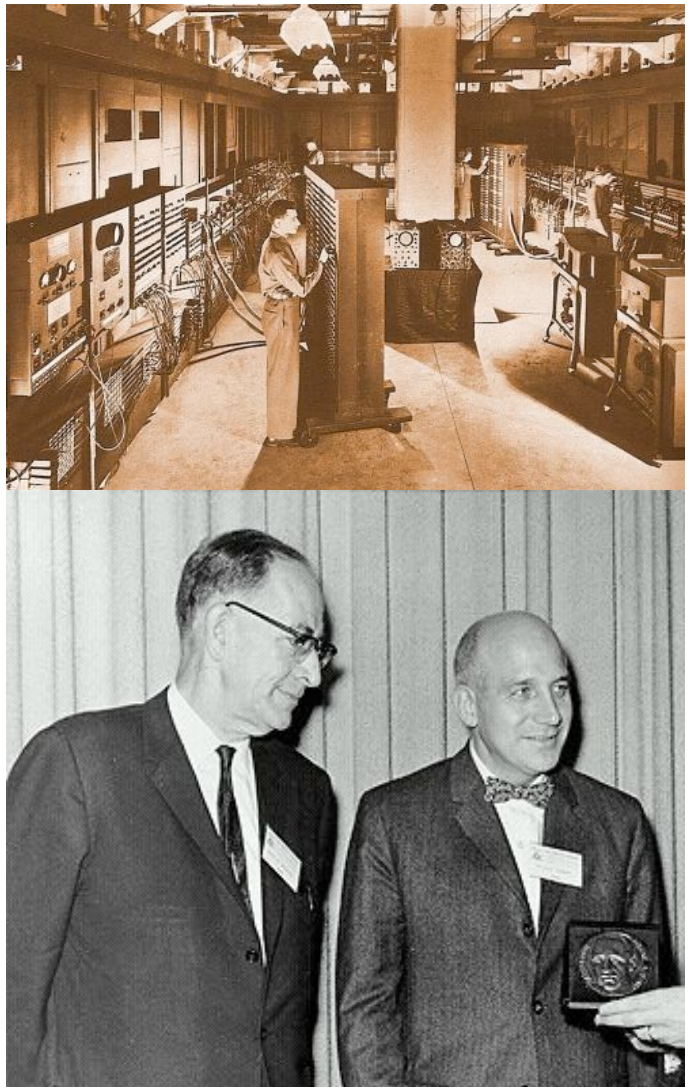


Lee De Forest
(1873 - 1961)

- Revolutioniert den Bau von Signalverstärkern
- Doch nicht nur das:
  Röhren lassen sich auch als Schaltelement nutzen...

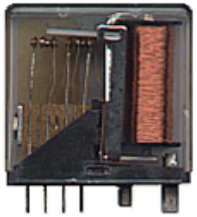
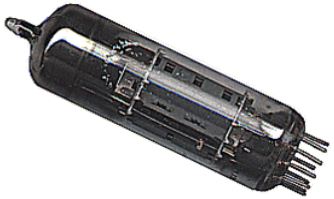
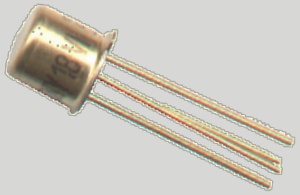
Ursprünge der Computertechnik

- ENIAC (1946)
  - John Mauchly und John Presper Eckert
  - University of Pennsilvania
  - Vorläufer der „Ersten Generation“
  - Start einer neuen Ära der Computertechnik
- Daten und Fakten
  - 35 Tonnen, 10 Meter Länge
  - 500.000 Einzelteile
    - 18.000 Röhren (50 defekte Röhren/Tag)
    - 10.000 Kondensatoren, 70.000 Widerstände
  - 100 kHz Taktfrequenz
  - 175 kW Stromverbrauch
  - Integer-Arithmetik, keine Gleitkommazahlen
  - Programmierung durch „Kabelstecken“

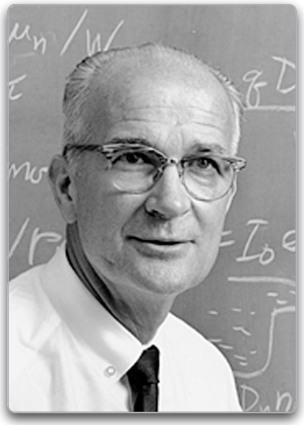


John Mauchly und
John Presper Eckert (1966)

Entwicklung der Schaltelemente

Relais	Röhre	Transistor	Hochintegration
			

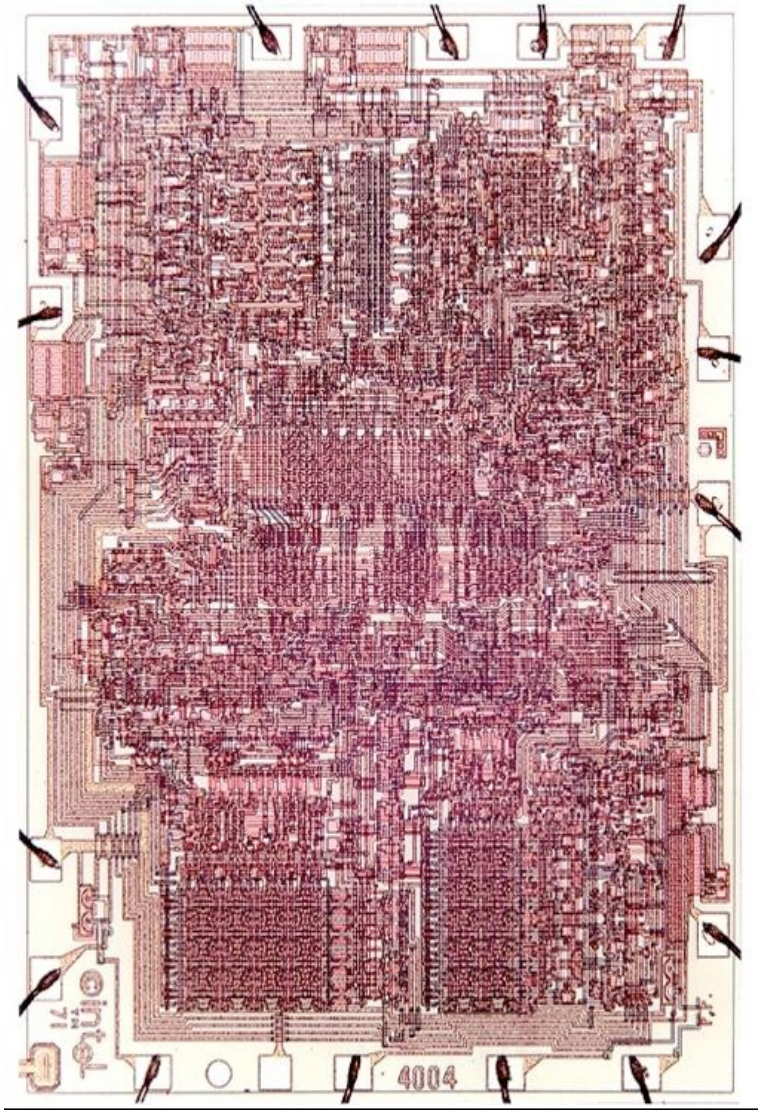
- Der Transistor
  - Julius Edgar Lilienfeld patentiert das Funktionsprinzip im Jahr 1928
  - Der erste technisch verwertbare Transistor wird erst 1947 gebaut
    - Bell Laboratories in New York


William Shockley

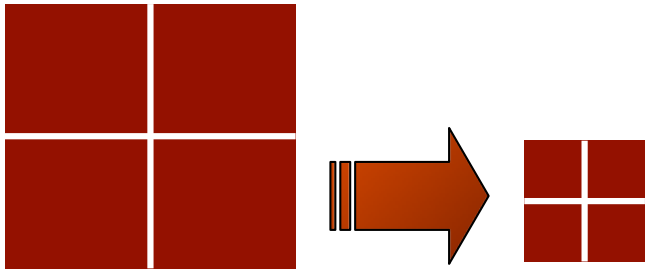
John Bardeen

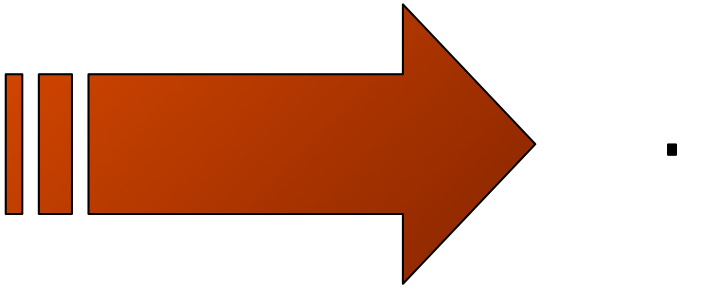
Walter Brattain

Entwicklung der Strukturbreiten



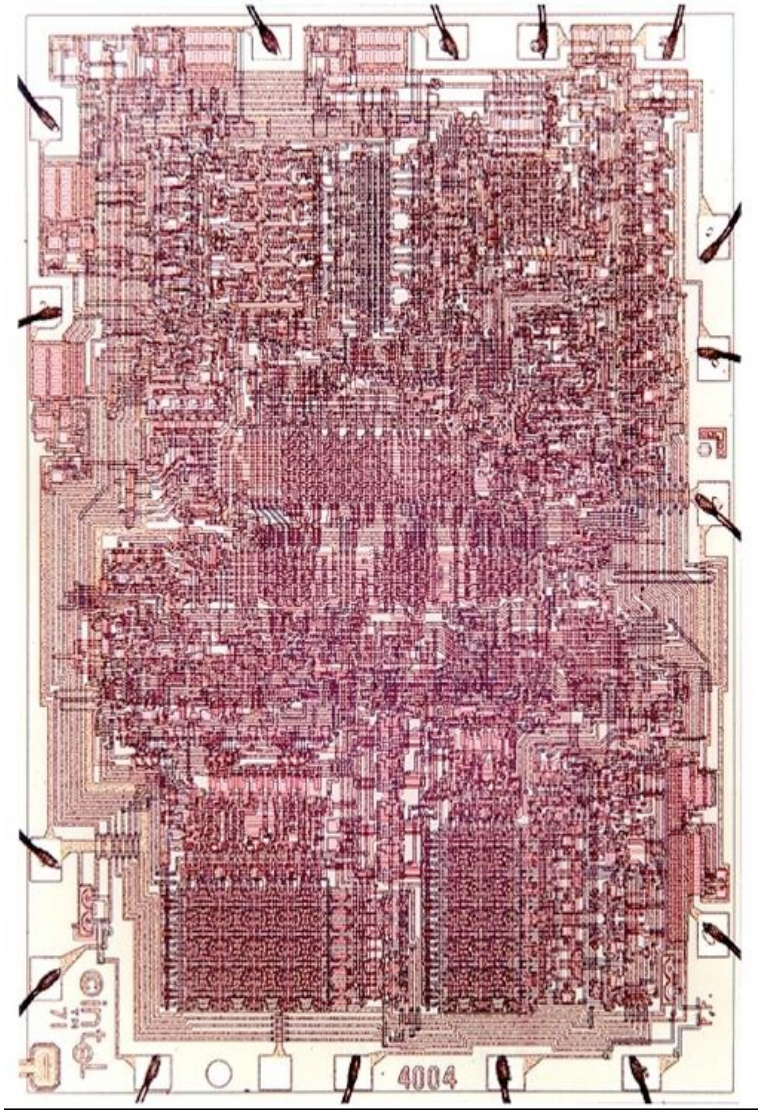
Eine Halbierung der Strukturbreite
bedeutet die Viertelung
der benötigten Chipfläche



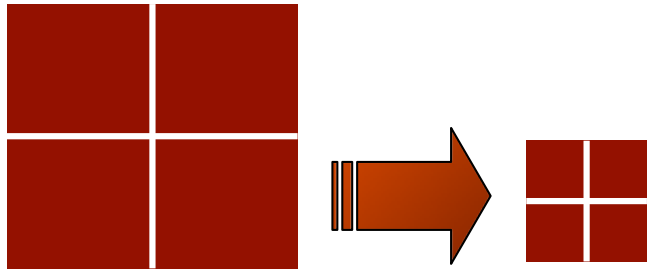


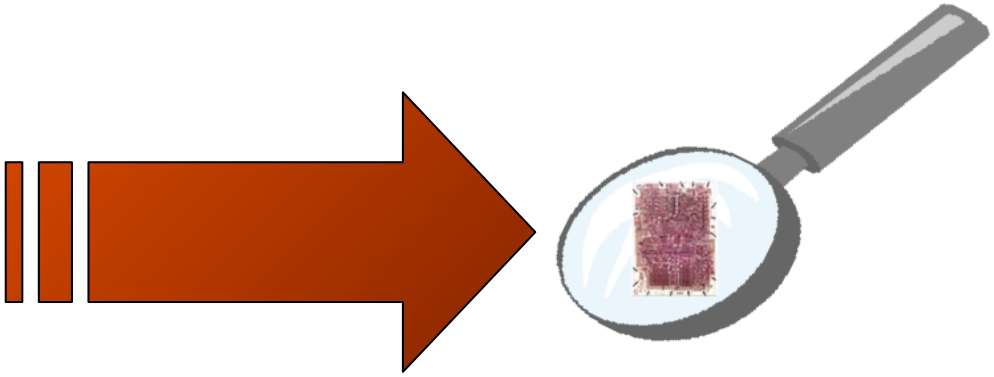
10 µm (1971) — 14 nm (0.014 µm) (2015)

Entwicklung der Strukturbreiten



Eine Halbierung der Strukturbreite
bedeutet die Viertelung
der benötigten Chipfläche

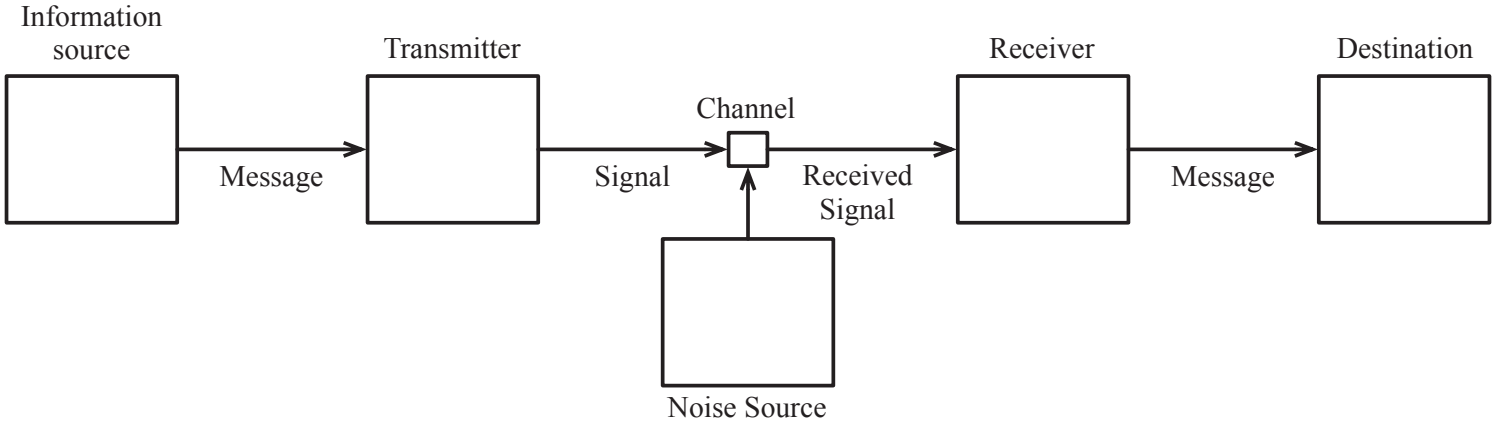




10 µm (1971) — 14 nm (0.014 µm) (2015)

Geburtsstunde der Informationstheorie

- Claude Shannon
  - publiziert 1948 eine wegweisende Arbeit
    - *A Mathematical Theory of Computation*
  - Allgemeines Kommunikationsmodell



Claude Shannon
(1916 - 2001)

  - Das Bit wird zur Einheit der Information
    - Informationsbegriff wird mathematisch greifbar
      - nicht mehr an ein bestimmtes Übertragungsmedium gebunden
      - Erkenntnisse sind von universeller Natur

Das Shannon‘sche Kommunikationsmodell

A Mathematical Theory of Communication

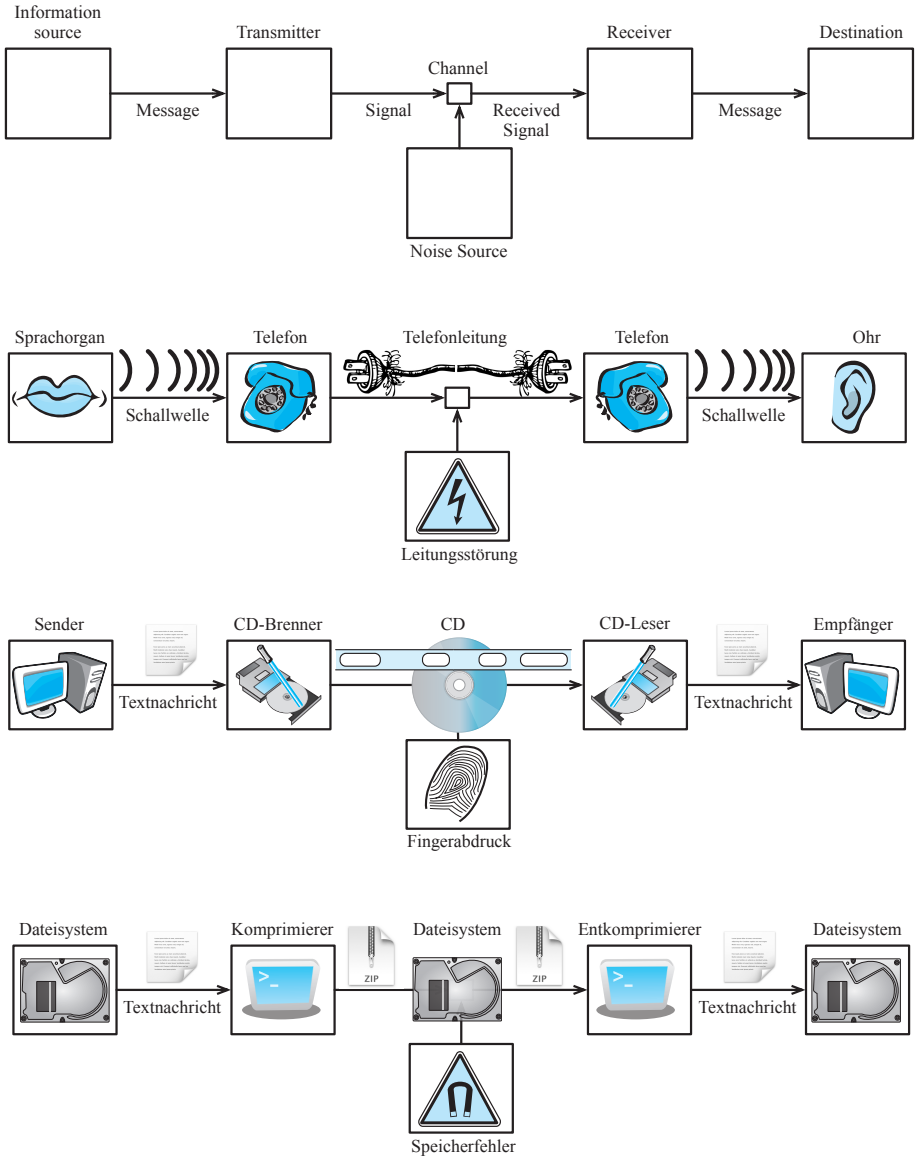
By C. E. SHANNON

INTRODUCTION

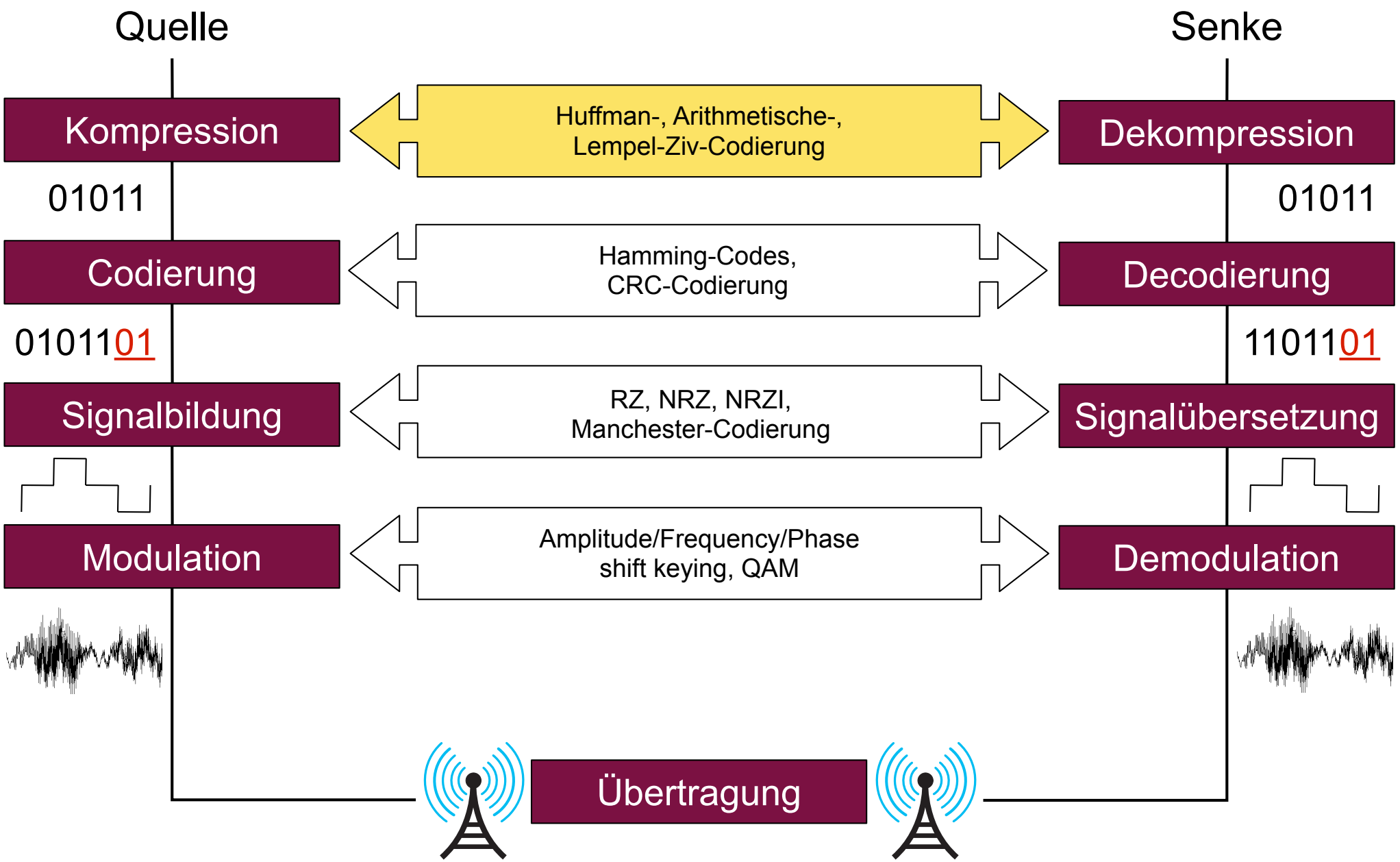
THE recent development of various methods of modulation such as PCM and PPM which exchange bandwidth for signal-to-noise ratio has intensified the interest in a general theory of communication. A basis for such a theory is contained in the important papers of Nyquist[1] and Hartley[2] on this subject. In the present paper we will extend the theory to include a number of new factors, in particular the effect of noise in the channel, and the savings possible due to the statistical structure of the original message and due to the nature of the final destination of the information.

The fundamental problem of communication is that of reproducing at one point either exactly or approximately a message selected at another point. Frequently the messages have *meaning*; that is they refer to or are correlated according to some system with certain physical or conceptual entities. These semantic aspects of communication are irrelevant to the engineering problem. The significant aspect is that the actual message is one *selected from a set* of possible messages. The system must be designed to operate for each possible selection, not just the one which will actually be chosen since this is unknown at the time of design.

Published in THE BELL SYSTEM TECHNICAL JOURNAL
Vol. 27, pp. 379-423, 623-656, July, October, 1948
Copyright 1948 by AMERICAN TELEPHONE AND TELEGRAPH CO.
Printed in U. S. A.



Was ist Informationstheorie?

- Fragestellungen
  - Wie lässt sich die Information einer Nachricht messen?
    - Lassen sich Nachrichten beliebig verdichten?
    - Falls nein, wo befindet sich das theoretische Minimum?
  - Wie lassen sich Nachrichten über rauschbehaftete Kanäle senden?
    - Lassen sich Nachrichten stets fehlerfrei übertragen?
    - Falls nein, wie weit lässt sich die Fehlerwahrscheinlichkeit senken?
- Shannon löste gleich beide Fragestellungen
  - Quellencodierungstheorem (source coding theorem)
    - Informationsgehalt, Entropie
    - Erlaubt Rückschlüsse auf die Grenzen der Datenkompression
  - Kanalcodierungstheorem (noisy channel theorem)
    - Kanalkapazität
    - Soviel vorweg: Shannon erzielte ein faszinierendes Ergebnis
      - mehr hierzu in den folgenden Unterrichtseinheiten...

Wie geht es weiter?