

# ***Infrastruktur der Kommunikation: Von der Theorie zur Praxis***

Johannes Huber  
Lehrstuhl für Informationsübertragung  
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg  
20. Juli 2012



FRIEDRICH-ALEXANDER  
UNIVERSITÄT  
ERLANGEN-NÜRNBERG  
TECHNISCHE FAKULTÄT



- Freileitungen entlang von Eisenbahntrassen: Telegraphie
- lokale Telefonnetze in Städten mittels symmetrischer Zweidrahtleitungen
  - Ortsanschlussleitungsnetze, Handvermittlung
    - Analoge Weitverkehrsnetze, automatische elektromechanische Vermittlung
    - Datenübertragung über das analoge Fernsprechnetzt mittels
  - Voiceband Modems (50 bit/s → 33000 bit/s) über Kanäle mit 3,1 kHz Bandbreite (Beispiel FAX)
    - Digitalisierung des Fernsprechnetzes (ISDN), elektronische Vermittlung
    - Optische Weitverkehrsnetze zur digitalen Hochgeschwindigkeitsübertragung
    - Nutzung des Ortsanschlussleitungsnetzes für die schnelle digitale Übertragung ⇒ Digital Subscriber Line DSL
    - Funknetze für die digitale Mobilkommunikation
    - Vereinigung von Daten- und Fernsprechnetzen (z. B. Voice over IP)

# Die Säulen des Informationszeitalters

- **Erfindung des Transistors**

Bardeen, Brattain, Shockley, AT & T Bell Labs, Murray Hill, New Jersey, 1947/48

⇒ Entwicklung der Mikroelektronik

Lösung des Problems: Wie können informationstechnische Systeme effizient implementiert werden?

- **Entwicklung der Informationstheorie** durch

*Claude E. Shannon (1916 – 2001)*

AT & T Bell Labs, Murray Hill, New Jersey, 1948 (publiziert)

Antwort auf die Frage: Was ist ein effizientes informationstechnisches System, aus welchen Komponenten soll es bestehen, welche Methoden sind anzuwenden?

⇒ Einleitung des Wandels von der analogen zur digitalen Informationstechnik durch eine

*Mathematische Theorie*



# Die Säulen des Informationszeitalters



Claude Elwood Shannon  
1916 – 2001

$$C = \frac{1}{2} \log_2(1 + S / N)$$

# Die Säulen des Informationszeitalters



The Father of  
Information Age

<http://www.eecs.umich.edu/shannonstatue/>



# Die Säulen des Informationszeitalters

Reprinted with corrections from *The Bell System Technical Journal*,  
Vol. 27, pp. 379–423, 623–656, July, October, 1948.

## A Mathematical Theory of Communication

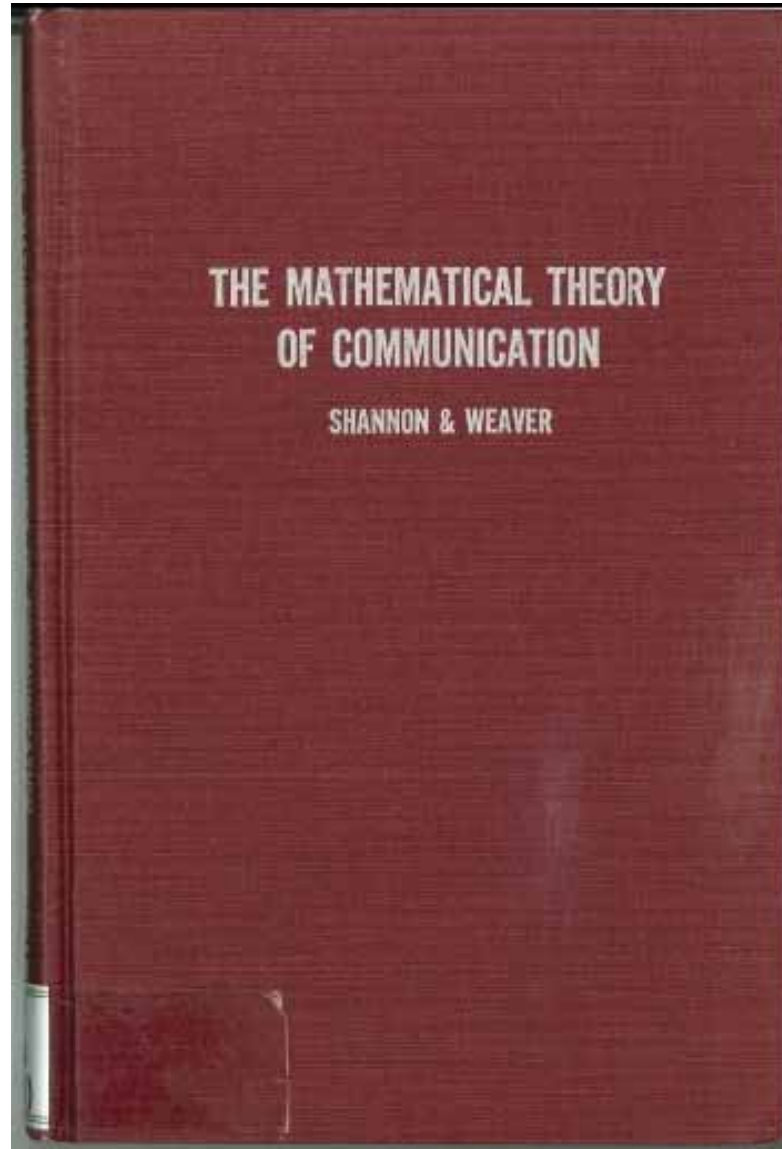
By C. E. SHANNON

### 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<sup>1</sup> and Hartley<sup>2</sup> 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.

# Die Säulen des Informationszeitalters



# Die Säulen des Informationszeitalters

Aus  
„Collected Papers“

304

C. E. Shannon

It is pointed out that the integrand here can be dominated by  $e^{-z^2/2}$ . This occurs in the paragraph in Ref. 6 containing Equation 2.6. Therefore, this integral can be dominated by  $\sqrt{2\pi}$ , and our integral in (34) involved in  $dQ/d\theta$  is dominated as follows:

$$\begin{aligned} \int_0^\infty \exp\left[-\frac{(r - A\sqrt{n}\cos\theta)^2}{2}\right] r^{n-1} dr \\ &= \left(\frac{\bar{z}}{e}\right)^{n-1} \exp\left(\frac{\bar{z}^2}{2}\right) \exp\left[-\frac{A^2 n}{2} \cos^2 \theta U\right] \\ &\leq \left(\frac{\bar{z}}{e}\right)^{n-1} \exp\left(\frac{\bar{z}^2}{2}\right) \exp\left[-\frac{A^2 n}{2} \cos^2 \theta \sqrt{2\pi}\right]. \end{aligned}$$

We have

$$\bar{z} = \frac{1}{2}\sqrt{n} (A \cos \theta + \sqrt{A^2 \cos^2 \theta + 4 - 4/n}) \leq \sqrt{n} G.$$

Replacing  $\bar{z}$  by this larger quantity gives

$$\left(\frac{\sqrt{n}G}{e}\right)^{n-1} \exp\left(\frac{nG^2}{2} - \frac{A^2 n}{2} \cos^2 \theta\right) \sqrt{2\pi}.$$

We have, then,

$$\begin{aligned} -\frac{dQ}{d\theta} &\leq \frac{(n-1) \exp\left(-\frac{A^2 n}{2} \sin^2 \theta\right) (\sin \theta)^{n-2} \left(\frac{\sqrt{n}G}{e}\right)^{n-1}}{2^{n/2} \sqrt{\pi} \Gamma\left(\frac{n+1}{2}\right)} \cdot \exp\left(\frac{nG^2}{2} - \frac{A^2 n}{2} \cos^2 \theta\right) \sqrt{2\pi}. \end{aligned} \quad (62)$$

Replacing the gamma function by its Stirling expression

$$\left(\frac{n+1}{2}\right)^{n/2} \exp\left(\frac{n+1}{2}\right) \sqrt{2\pi}$$

(which is always too small), and replacing  $[1 + (1/n)]^{n/2}$  by  $\sqrt{2}$  (which is also too small) again increases the right member. After simplification, we get

$$\begin{aligned} -\frac{dQ}{d\theta} &\leq \frac{(n-1)(G \sin \theta)^n \exp\left[\left(\frac{n}{2}\right)(-A^2 + 1 + AG \cos \theta)\right]}{\sqrt{n} G \sin^2 \theta \sqrt{2\pi} \exp\left(\frac{n-3}{2}\right)} \\ &\leq \frac{(n-1)e^{3/2} e^{-nL(\theta)n}}{\sqrt{2\pi n} G \sin^2 \theta}. \end{aligned} \quad (63)$$



# Säulen des Informationszeitalters

## Fundamentale Einsichten:

Beim Vorhandensein von Störungen kann auch durch *analoge, d.h. wertkontinuierliche Signalwerte* nur eine **begrenzte Anzahl** unterschiedlicher Informationen repräsentiert und übertragen werden:

⇒ Information ist in **digitaler Form** zu repräsentieren und zu übertragen

Trotz Störungen kann aber Information *zuverlässig, absolut fehlerfrei* übertragen werden:

⇒ eine effiziente Informationstechnik ist eine **digitale** Informationstechnik

# Kommunikationsinfrastruktur: Beispiel ACCESS-Network

Beispiel: Digital Subscriber Line DSL

Nutzung des historischen Ortsanschlussleitungsnetzes, entwickelt zur Übertragung eines einzelnen analogen Telefongesprächs mit einer Bandbreite von 3,1 kHz, für die schnelle digitale Übertragung

Bündelverseilung



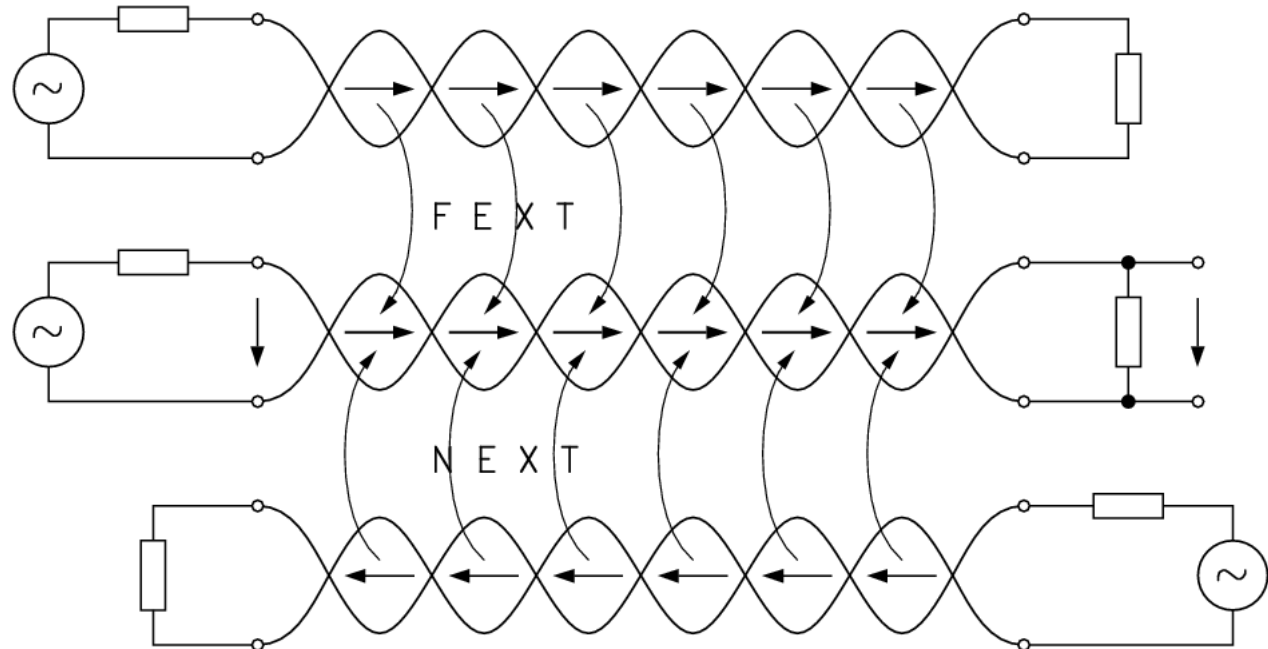
Lagenverseilung (historisch)





## Das Übertragungsmedium

### Störungen im vielpaarigen Kabel: *Nebensprechen*



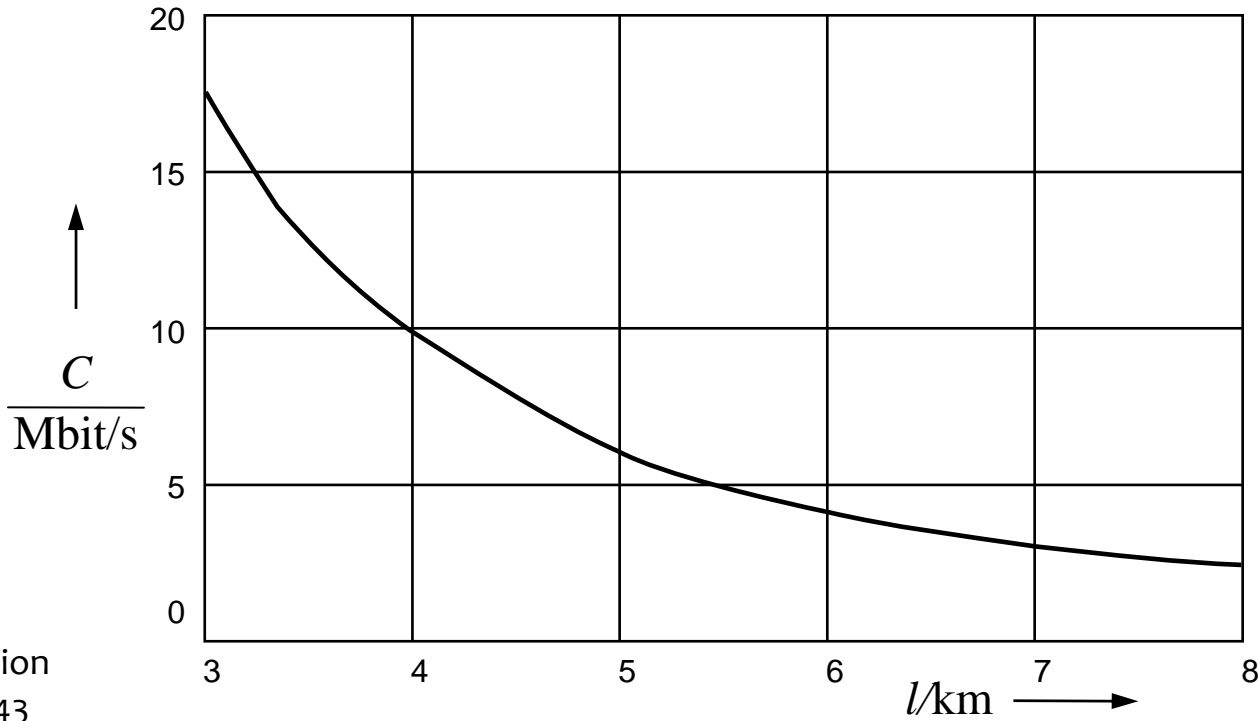
**Fernnebensprechen (Far-End Crosstalk): FEXT**  
**Nahnebensprechen (Near-End Crosstalk): NEXT**

# Übertragungsmedium symmetrisches Leiterpaar

## Informationstheoretische Übertragungskapazität

$$C = \int_0^{\infty} \log_2(1 + \text{SNR}(f)) df$$

Beispiel:  $\varnothing = 0,6 \text{ mm}$  (AWG22), 4 dominierende *Nahnebensprechstörer (NEXT)*

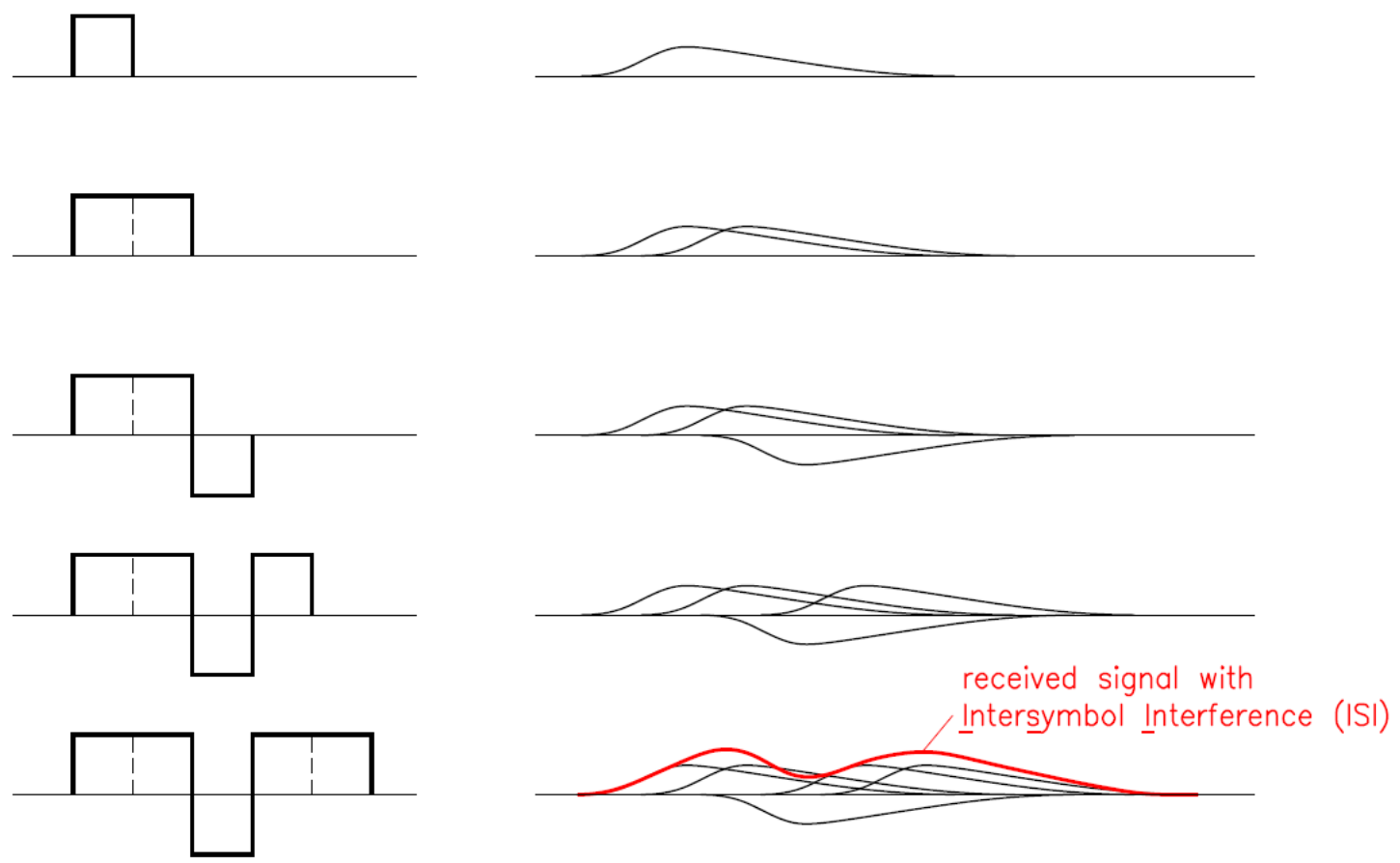


Quelle: Dissertation  
K.-P. Graf, Seite 43



# Digitale Basisbandübertragung (HDSL, SDSL)

*Intersymbol Interferenz infolge zeitlicher Dispersion*

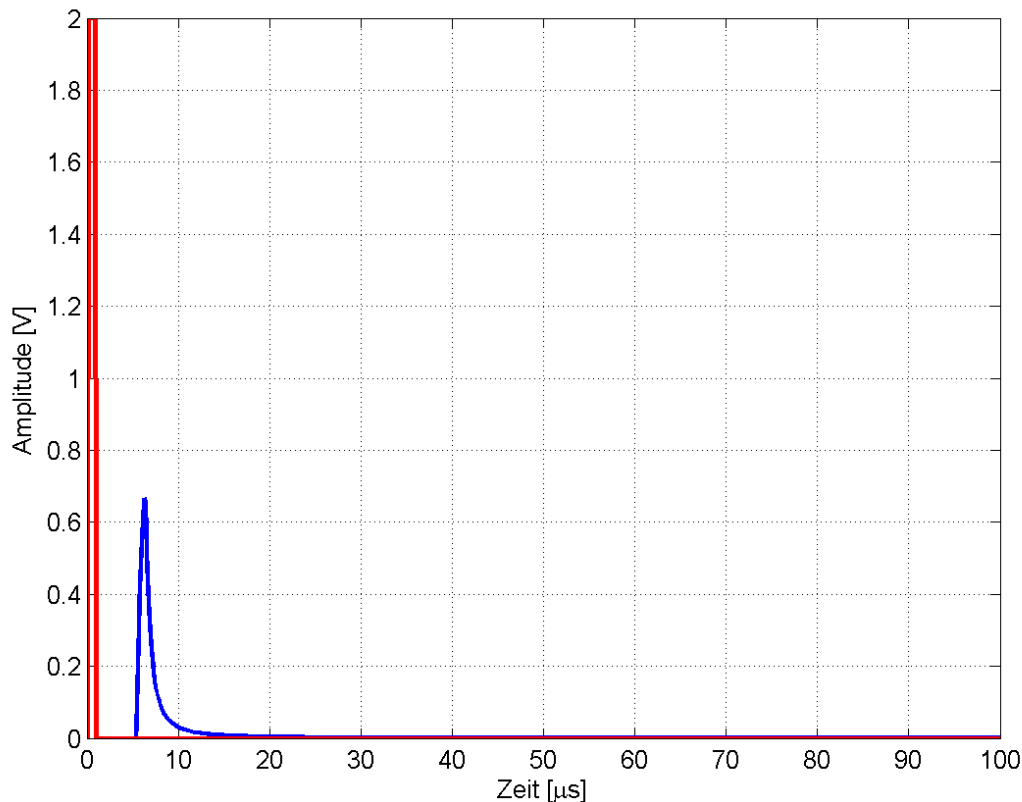


## Digitale Basisbandübertragung (HDSL, SDSL)

*Symmetrisches Leiterpaar  $\varnothing = 0,4 \text{ mm}$*

*Antworten auf einen Rechteckimpuls der Dauer  $1 \mu\text{s}$   
(entspricht einer quaternären Basisbandübertragung von  $2 \text{ Mbit/s}$ )*

*Leitungslänge  $1 \text{ km}$*



*starke Überlagerung der empfangsseitigen Impulse (Intersymbol Interference ISI)*

## Maximum-Likelihood Sequence Estimation of Digital Sequences in the Presence of Intersymbol Interference

G. DAVID FORNEY, JR., MEMBER, IEEE

Quelle: IEEE  
Transactions on  
Information Theory,  
Vol. IT-18, No. 3,  
May 1972, S. 363-  
378

*Abstract*—A maximum-likelihood sequence estimator for a digital pulse-amplitude-modulated sequence in the presence of finite intersymbol interference and white Gaussian noise is developed. The structure comprises a sampled linear filter, called a whitened matched filter, and a recursive nonlinear processor, called the Viterbi algorithm. The outputs of the whitened matched filter, sampled once for each input symbol, are shown to form a set of sufficient statistics for estimation of the input sequence, a fact that makes obvious some earlier results on optimum linear processors. The Viterbi algorithm is easier to implement than earlier optimum nonlinear processors and its performance can be straightforwardly and accurately estimated. It is shown that performance (by whatever criterion) is effectively as good as could be attained by any receiver structure and in many cases is as good as if intersymbol interference were absent. Finally, a simplified but effectively optimum algorithm suitable for the most popular partial-response schemes is described.

### INTRODUCTION

**I**NTERSYMBOL interference arises in pulse-modulation systems whenever the effects of one transmitted pulse are not allowed to die away completely before the transmission of the next. It is the primary impediment to reliable high-rate digital transmission over high signal-to-noise

is corrupted by white Gaussian noise  $n(t)$  to give a received signal

$$r(t) = s(t) + n(t). \quad (2)$$

In this paper we shall restrict ourselves to finite impulse responses  $h(t)$ .

This model dates back to Nyquist and is so simple that it would seem unlikely that at this late date anything new could be said about it. However, no serious attention seems to have been given to this problem until the last decade, when practical requirements for high-speed digital transmission over telephone circuits have begun to become important.

While lip service has long been paid to the idea that symbol decisions ought to be based on the entire received sequence, the fact that straightforward likelihood calculations grow exponentially with message length [4] has justified a retreat to simple symbol-by-symbol decisions in most theoretical and practical work. Early work analyzed and optimized linear transmitter and receiver filters subject



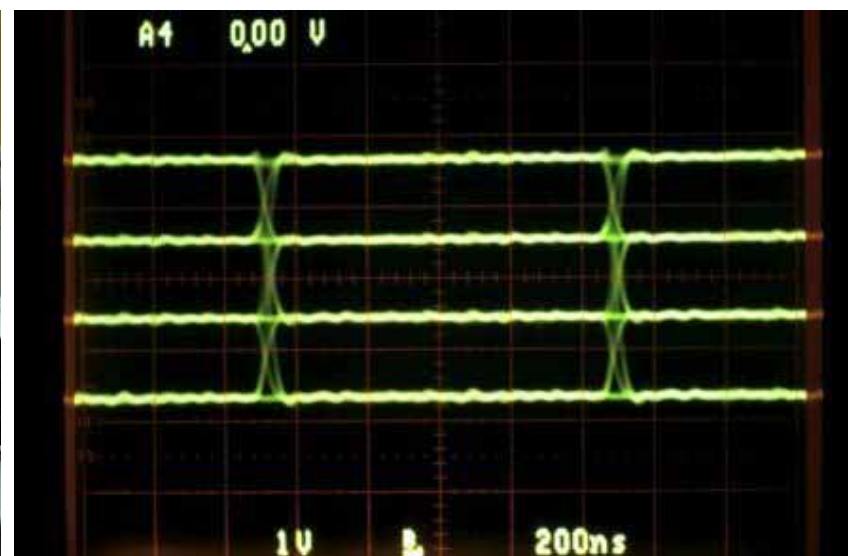
# Die praktische Lösung durch Umsetzung der Theorie

## *Geburt von DSL: Juni 1986*

Versuchsaufbau



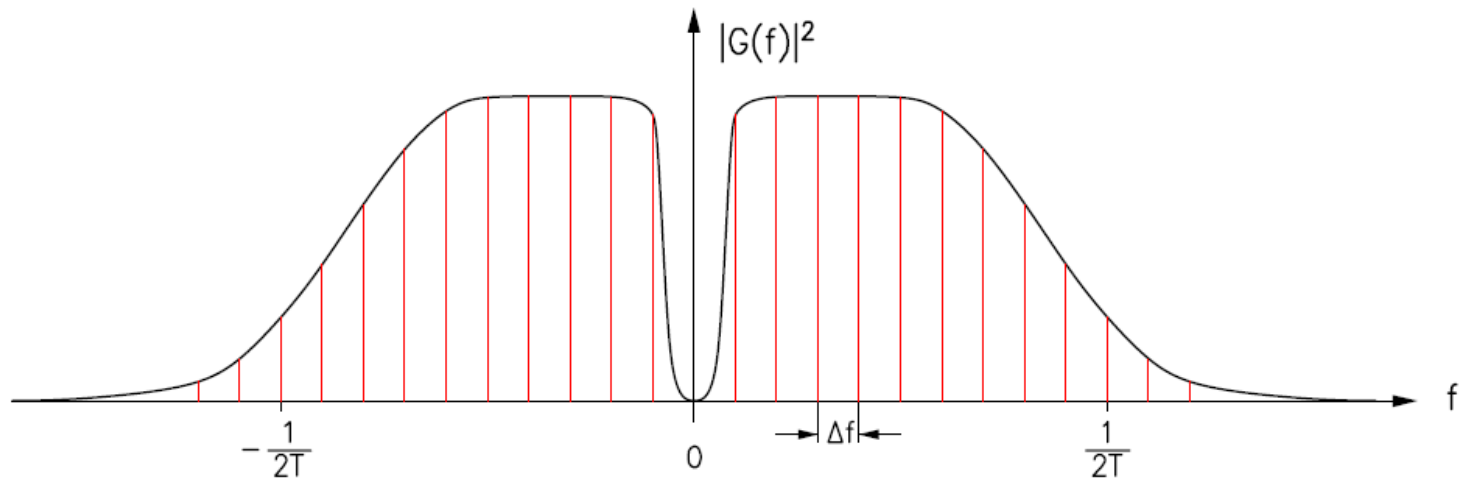
Augendiagramm



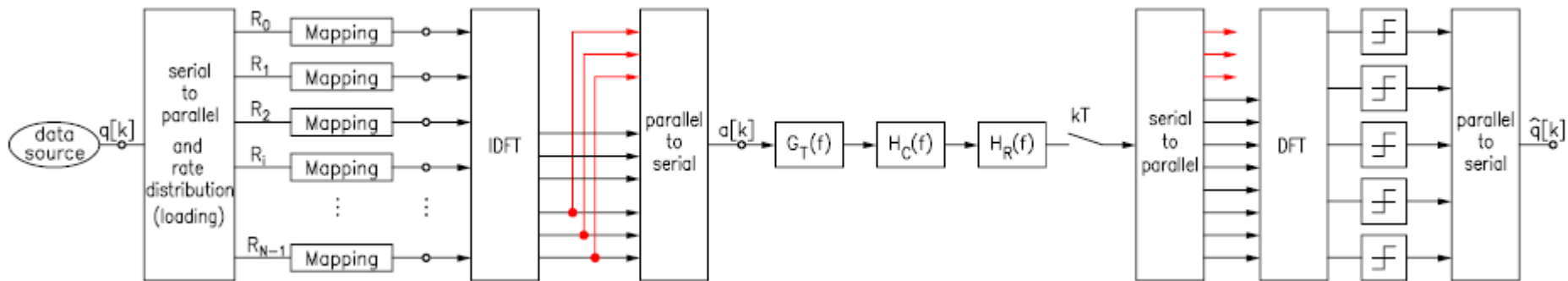
## Mehrträger-Übertragungsverfahren (Discrete Multitone: DMT) (OFDM 1965/1971/1980)

Zerlegung des benutzten Frequenzbereichs in sehr schmale Teilbänder, innerhalb derer das spektrale Signal-Störleistungsverhältnis  $\text{SNR}(f)$  als nahezu konstant betrachtet werden kann

⇒ **Dispersionsfreie Übertragung im einzelnen Teilband**



## Mehrträger-Übertragungsverfahren (Discrete Multitone: DMT)

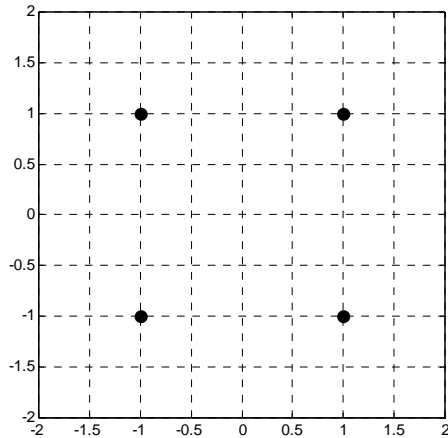


Cyclic prefix: Transformation der **linearen** Faltung des Sendesignals mit der Kanalimpulsantwort in eine **zyklische** Faltung. (Jede zirkulante Matrix wird durch die Fouriermatrix diagonalisiert!)

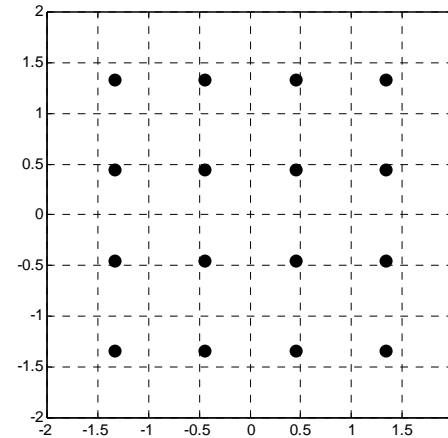
# Die praktische Umsetzung der theoretischen Lösung

## Signalkonstellationen für die Subträger

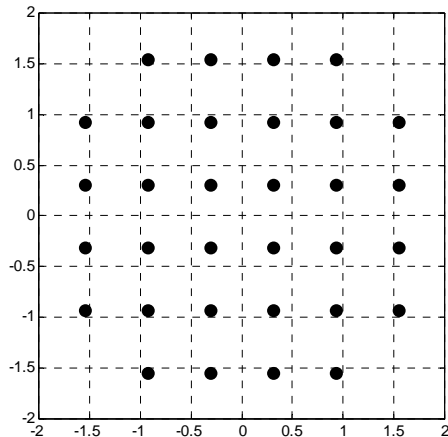
QAM  $M = 4$



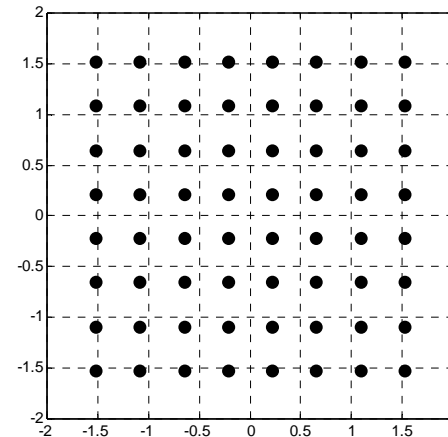
QAM  $M = 16$



QAM  $M = 32$

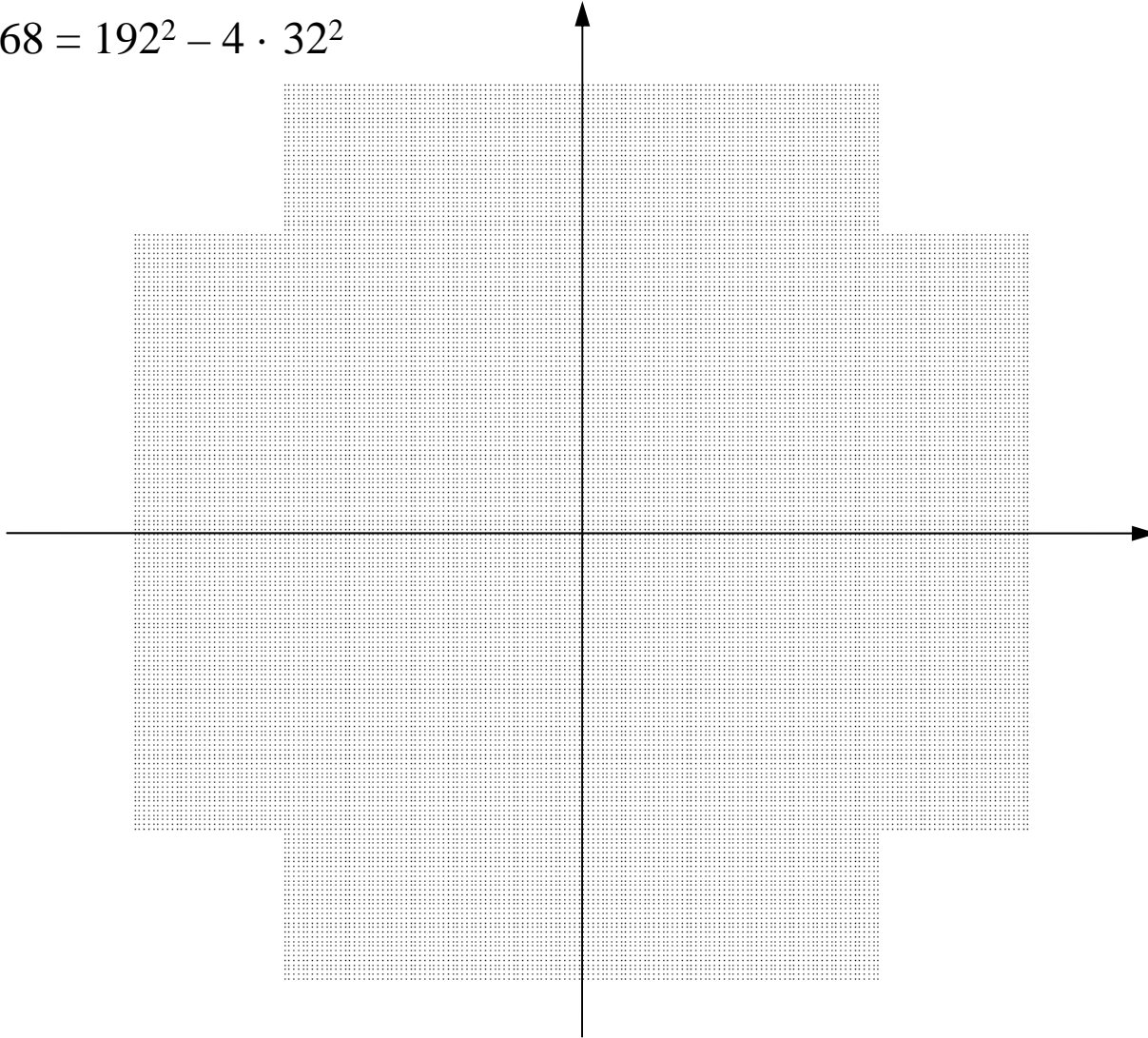


QAM  $M = 64$



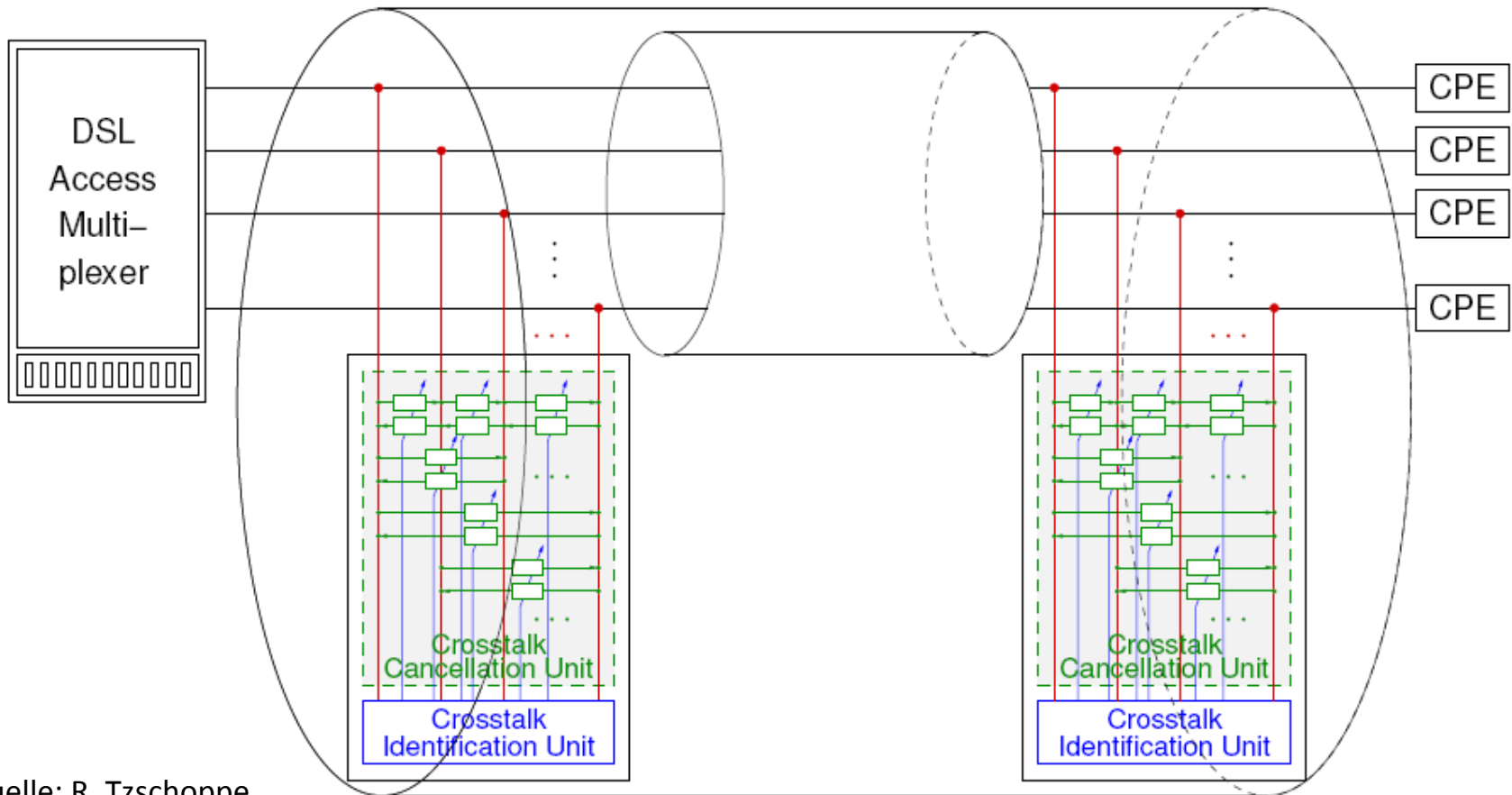
# Die praktische Umsetzung der theoretischen Lösung

QAM:  $M = 32768 = 192^2 - 4 \cdot 32^2$



# Beispiel zu aktuellen Entwicklungen: Multiple Input /Multiple Output

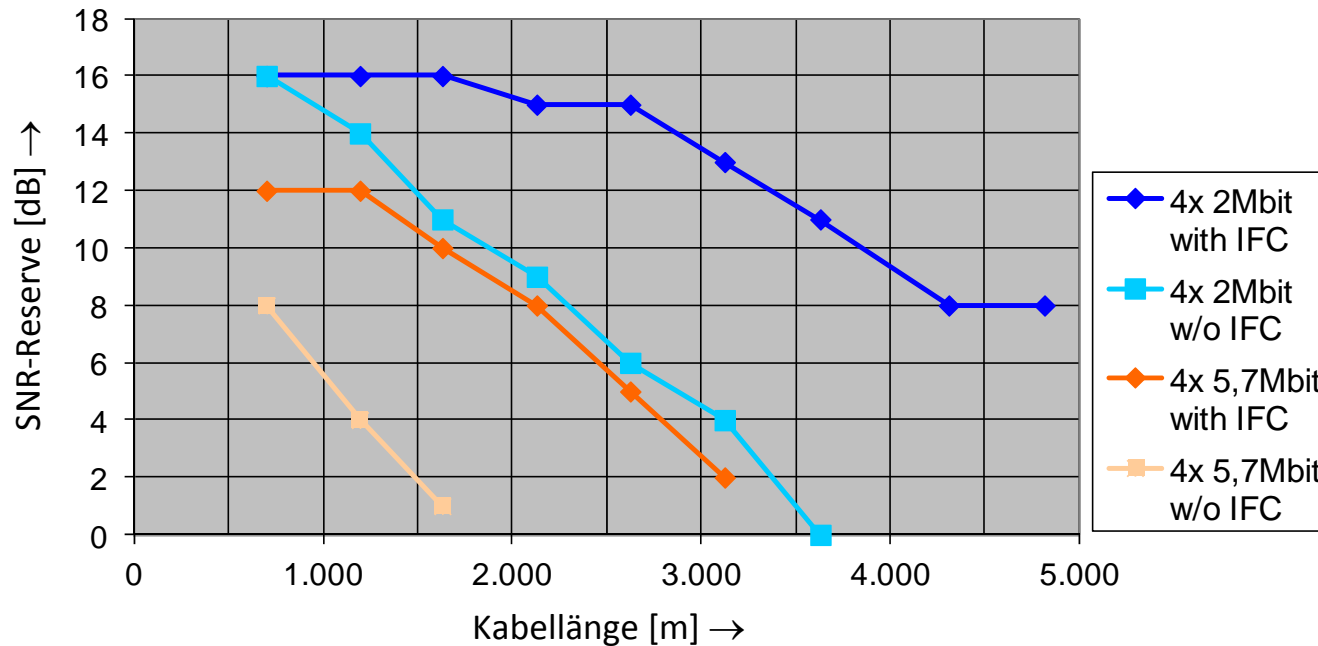
## Prinzip der Nebensprech-Kompensation



Quelle: R. Tzschoppe,  
Diss. Seite 5

# Beispiel zu aktuellen Entwicklungen: Multiple Input /Multiple Output

SNR-margin/reach with fixed bit rate  
(0,5 mm cable without external interferer)



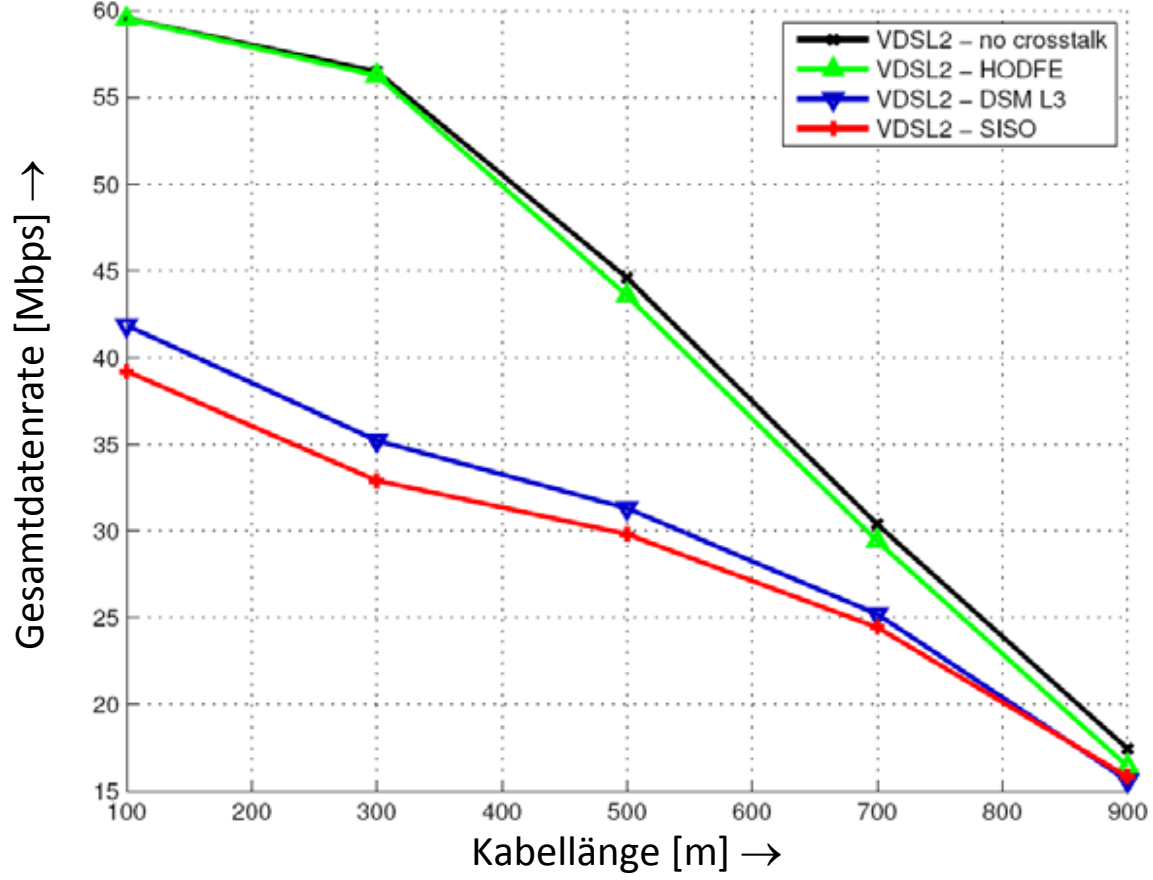
Quelle: R. Tzschope, Vortrag zu IFC-DSL *Broadband United*, Seite 23

# Beispiel zu aktuellen Entwicklungen: Multiple Input /Multiple Output

## Verallgemeinerte MIMO-Verfahren

### Multidimensionale entscheidungsrückgekoppelte Entzerrung mittels Tensor-Algebra

Beispiel: 8 VDSL2 Signale asynchron wechselseitig FEXT



Quelle: R. Bianchi,  
Diss-Vortrag, Seite 86





# von Theorie und Praxis

Technische Revolutionen wurden und werden immer mehr durch  
**fundamentale theoretische Leistung**  
erreicht:

Thermodynamik (Carnotscher Kreisprozess): effiziente Wärmekraftmaschinen  
Elektrodynamik (Maxwellsche Gleichungen): Elektrotechnik  
Quantenmechanik (Festkörperphysik): Mikro-/Nano-Elektronik  
Informationstheorie: Digitale Informationstechnik

***„Eine gute Theorie ist das praktischste, was es gibt“***  
(G. R. Kirchhoff, 1824 – 1887)

Vgl. aktuelle Diskussion um das bayerische Gymnasium G8: „Ausräumen von Inhalten“?

*Werden unsere Abiturienten noch für naturwissenschaftlich/technische Fächer  
studierfähig sein??*

*Wer wird dann in der Lage sein, hierzulande konkurrenzfähige Produkte zu entwickeln??*

***Herzlichen Dank!***