

## Grundlagen der Elektronik für Medienwissenschaftler Teil 2

# Schwingungen, Zwei-, Vierpole, Wellen

Seminar HU; WS 2012/13

Prof. Dr. Horst Völz

Diese Einführung benutzt hauptsächlich:

Völz, H.: Elektronik - Grundlagen - Prinzipien - Zusammenhänge. 5. Aufl. Akademie Verlag, Berlin 1989.

Weitere Literatur und Prüfungshinweise sind am Ende vorhanden.

Dieses Material wurde heruntergeladen von [r-h-voelz.de](http://r-h-voelz.de)

Für privaten Gebrauch ist es frei nutzbar.

Bei Publikationen, Vorträgen usw. ist die Angabe der Quelle notwendig.

Bei kommerzieller Nutzung ist eine Abstimmung mit mir erforderlich.

Die Bilder sind in höherer Qualität ca. 2000×3000 Pixel oder \*.cdr Version 12 verfügbar.

Prof. Dr. Horst Völz, Koppenstr. 59, 10243 Berlin, Tel./Fax 030 288 617 08

Email: [horst.voelz\(at\)campus.tu-berlin.de](mailto:horst.voelz(at)campus.tu-berlin.de) bzw. [h.voelz\(at\)online.de](mailto:h.voelz(at)online.de)

# Zusammenfassung

Nach einer kurzen Einführung von Stoff, Energie und Information folgt die Grobeinteilung in Zweipole als Sender (Quelle) und Empfänger sowie Vierpole. Dabei werden nur passive Systeme behandelt (aktive in Teil 3).

Eine Unterscheidung von kontinuierlichen (analogen) und digitalen (diskreten) Signalen leitet zur Digitalisierung über. Mittels der (komplexen) Zeigerdarstellung werden harmonische und oberwellenhaltige Signale, einschließlich Drehstrom behandelt um dann zur SHANNON-Entropie und dem Goldenen Schnitt überzuleiten.

Der folgende Abschnitt betrifft Zweipole aus R, C und L sowie deren Knickkennlinien und Ortskurven einschließlich Resonanz und Schwingkreis.

Mit den Vierpolen wird dann Kanalanpassungen, resonanzartige RC-Schaltungen, Einschwingvorgänge, Modulationen, Pulstechniken, digitale Codierungen, Kanalkapazität, Energie je Bit und Speicherung behandelt.

Abschließend werden dann die Übertragungstechniken mit Leitungen und Lichtleiter sowie auf die verschiedenen Wellen und deren Anwendungen erfasst.

# Gliederung

## 1. Einführung

2. Signale

3. Zweipole

4. Vierpole

5. Wellen

# Voraussetzungen

Zu Beginn fünf Grundsätze, die Sie nicht teilen müssen, die aber dennoch vorausgesetzt werden.

1. Es gibt ein Etwas *außerhalb von mir*, das nenne ich **Welt**.  
Diese Welt ist für mich *erkennbar* und *beschreibbar* durch *Sprache*, *Bilder* und *Mathematik* (Gesetze, Algorithmen, Zahlen).
2. Die Welt entspricht einen sehr abstrakten, raumzeitlichen **Gefäß**  $(x, y, z, t)$ , dessen Grenzen (Wände) nicht unbedingt bekannt sein müssen.  
Daher sind ergänzende Begriffe und Inhalte wie *Meer*, *Äther* (vor EINSTEIN üblich) und *Raumzeit* nützlich.
3. In dem Gefäß befindet sich **Materie**, die veränderbar angeordnet und beweglich ist.  
Sie besteht insbesondere aus *Stoff*, *Energie* und *Information*.
4. Im Sinne der Allgemeinen Relativitätstheorie *bedingen sich* Gefäß und Materie *gegenseitig*.
5. Eine vorteilhafte **Beschreibung** der Welt erfolgt durch **Zahlen** (reell = kontinuierlich, ganzzahlig = diskret, digital)
  - a) Für das **Gefäß** mittels der *Koordinaten*  $x, y, z$  und der (linear fortschreitenden) *Zeit*  $t$ :  
Beide bedürfen nicht unbedingt einer weiteren Definition.  
Meist genügt es, gemäß IMMANUEL KANT (1724 - 1804) anzunehmen:  
dass sie dem Menschen angeborene Formen der sinnlichen Anschauung sind(s. Raum\_ZeitF.pdf).
  - b) Für die **Materie** mittels *Ausprägungen* von Eigenschaften, wie Spannung, Strom, Magnetfeld usw.  
Sie werden bevorzugt mittels *Messung* gewonnen.

**Kurzfassung:** Welt = Gefäß + Materie, beschrieben mittels Zahlen.

# Einschränkungen, Vereinfachungen

## Stoff

besteht *nur* aus elektrischen und magnetischen **Bauelemente** ( $R$ ,  $C$ ,  $L$ ) mit kontinuierlichen Ausprägungen.

Meist befinden sie sich an *fest gegebenen Koordinaten*  $x_i$ ,  $y_i$ ,  $z_i$  mit  $i$  für jedes einzelne.

Zeitlich sind ihre *Ausprägungen* (Widerstand, Kapazität, Induktivität) *oft unveränderlich*.

Untereinander können die Bauelemente *vernetzt*, verschaltet sein und ergeben dann ein (*elektromagnetisches*) *System*, das auch durch seine *Struktur* gekennzeichnet ist.

Zur Vereinfachung wird im Weiteren der Begriff **System** benutzt, der gegenüber dem üblichen Gebrauch eingengt ist.

## Energie

Hier wird der *elektromagnetische Anteil* betrachtet, nur selten ergänzt mit dem verkoppelten *mechanischen*.

Die Ausprägungen betreffen u. a. als Spannung  $U$ , Strom  $I$ , Magnetfeld  $H$  und magnetische Induktion  $B$ .

Die Energie kann *kontinuierlich* oder *diskret* existieren und in zwei Varianten bezüglich Raum und Zeit vorkommen:

1. *in den Bauelementen* und *Systemen* und ist oft durch deren *Zustand* gekennzeichnet.
2. als elektromagnetisches *Feld* (verallgemeinert) und dessen Ausbreitung außerhalb der Bauelemente und Systeme.

## Information

Sie beeinflusst u. a. das Verhalten der Systeme, hängt von der *Zeit*  $t$  ab, wird hier aber zunächst nicht genauer definiert.

Insbesondere kann sie *übertragen*, *gespeichert* und *verarbeitet* werden.

# Energetische Wechselwirkungen

Sie erfolgen

- zwischen *den Bauelementen* (Systemen) bedingt durch ihre *Verschaltung* (Struktur) sowie
- zwischen (dem *Feld*) der Welt und den *Bauelementen bzw. Systemen*.

Die *Ausbreitung* der Wechselwirkungen ist zumindest durch die Lichtgeschwindigkeit begrenzt.

Deshalb erfolgen alle durch sie hervorgerufenen Struktur- und Energie-Änderungen stets in der *Zeit t*.

Dabei können die Energie-Änderungen oft als *Signale*  $f(t)$  betrachtet werden, die dann auch *Information* vermitteln, s. u..

Durch die Wechselwirkungen *ändern* sich insbesondere die *Ausprägungen* der *Bauelemente, Systeme*.

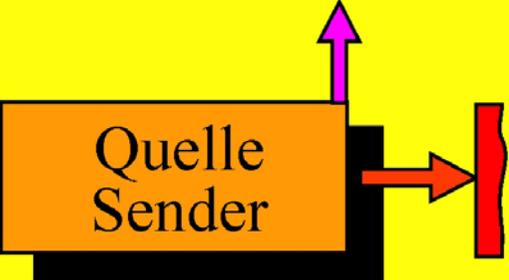
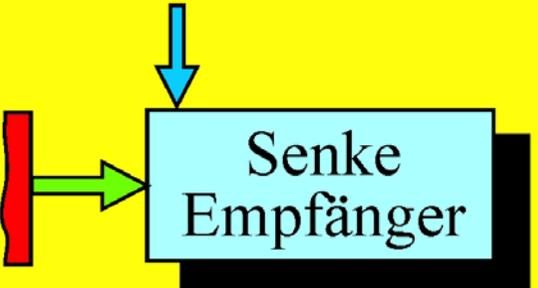
Dabei sind *drei Arten* zu unterscheiden:

1. *Quelle, Sender, Oszillator* usw. Sie geben Energie, Signale ab; *erzeugen* sie.
2. *Kanal, Vierpol, Übertrager* usw. Sie nehmen Energie, Signale auf, verändern und *übertragen* sie.
3. *Senke, Empfänger, Zweipol, Speicher* usw. Sie nehmen Energie, Signale entgegen; *reagieren* und *speichern*.

Zusätzlich können dabei unterschieden werden:

- *Aktive* Systeme gemäß 1. und gemäß 2. dann, wenn für die Energien  $E_{\text{Eingang}} \leq E_{\text{Ausgang}}$  gilt. Sie enthalten Verstärker.
- *Passive* Systeme gemäß 3. und gemäß 2. dann, wenn für die Energien  $E_{\text{Eingang}} \geq E_{\text{Ausgang}}$  gilt.

# Bauelemente und Systeme

Welt		
 <p>Quelle Sender</p>	 <p>Kanal Vierpol</p>	 <p>Senke Empfänger</p>
<b>aktiv</b>	<b>aktiv</b>	<b>passiv</b>
erzeugt Signale für andere Bauelemente, Systeme und die Welt	empfängt, verändert und sendet Signale bzgl. anderer Bauelemente, Systeme und der Welt	empfängt, interpretiert und speichert Signale von anderen Bauelementen, Systemen und der Welt
Durch sie lassen sich <b>Signalarten</b> einführen und ihre Eigenschaften u. a. die Informations- <b>Entropie</b> festlegen	Er ermöglicht u. a. Frequenzgänge, <b>Modulationen</b> , <b>Codierungen</b> usw. sowie die <b>Kanalkapazität</b> einzuführen.	Hiermit lassen sich u. a. Decodierung, <b>Interpretation</b> und <b>Wirkung</b> von Information erfassen

Bauelemente.cdr h. vözl 28.5.12

# Exkurs mathematische Zahlen-Bereiche

Die im Folgenden benötigten Zahlen betreffen *physikalische* Mess- und Kennwerte, die kurz *Werte* genannt werden: Hierzu müssen zunächst aus der *Mathematik* zwei *Zahlenklassen* eingeführt werden:

1. *abzählbar*  $\approx$  ganzzahlig und *rational*.

Es gibt endlich viele Zahlen, jedoch zu jeder Zahl existiert eine größere.

Eine entsprechende Zahlendarstellung benötigt nur *endlich viele Ziffern*

Ähnlich lässt sich *diskret* verwenden.

Hierzu gehören endlich viele, *genau definierte* (festgelegte) Werte.

2. *überabzählbar*  $\approx$  reell.

Hier existiert zwischen zwei beliebigen Zahlen immer eine weitere.

Es gibt mehr reelle als abzählbar viele Zahlen

Eine Zahlendarstellung benötigt hier allgemein *unendlich viele Ziffern*.

Ähnlich wie reell verhält sich auch *kontinuierlich*.

Prinzipiell kann hierbei ein Wert *jede* reelle Zahl annehmen.

## *Kommentar:*

In der Technik wird für kontinuierlich oft fälschlich *analog* verwendet.

Die *lateinische* Vorsilbe *ana* bedeutet auf, wieder, aufwärts, nach oben,

*Analogia* beinhaltet also mit der Vernunft übereinstimmend.

Daher ist analog, Analogie eigentlich nur bezüglich von *Abbildungen zwischen Bereichen* richtig angewendet (s. u.).

# Physikalische Größen

Zu jeder physikalischen Größe gehört *zweierlei*:

Eine *Maßzahl* = *Wert*  $X$  und eine *Maßeinheit*, wie Meter (m), Sekunde (s) oder Volt (V).

Außerdem entsprechen viele Größen einem *Tripel* gemäß:

1. *Koordinaten* des Ortes für das Feld, Bauelement oder System als  $x, y$  und  $z$  in m.
2. Aktuelle *Zeit*  $t$  der Messung in s vom linear gerichteten Zeitablauf.
3. *Messwert als Ausprägung von Eigenschaften* der Bauelemente, Systeme und des Feldes, z. B. bzgl.  $U, I, H$  und  $B$ .

Für jeweils zwei (*konjugierte*) Werte gilt die **HEISENBERG-Unschärfe**. WERNER KARL HEISENBERG (1901 - 1976).

Z. B. für Zeit  $t$  und Energie  $E$  bzw. Koordinate  $x$  (bzw.  $y, z$ ) und Impuls  $p = m \cdot v$  ( $m$  = Masse,  $v$  = Geschwindigkeit):

$$\Delta t \cdot \Delta E \geq h \quad \text{bzw.} \quad \Delta p \cdot \Delta x \geq h.$$

Dabei ist  $h \approx 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ W} \cdot \text{s}^2$  das PLANCK'sche Wirkungsquantum.

Bei einem Signal-Wert  $X = f(t)$  sind folglich die *Genauigkeiten* von  $X$  und dazugehörige Zeit  $t$  voneinander abhängig.

In der Praxis ist jede Messung jedoch mit *Messfehlern* behaftet.

Sie sind fast immer sehr groß gegenüber der Grenze der Unschärferelation (s. u.).

# Anwendung in der Physik

*Diskret* und *kontinuierlich* müssen in Physik und Technik *deutlich anders* als in der Mathematik erklärt werden.

Zunächst gibt es berechnete Annahmen dafür, dass die *Natur diskret* ist.

Als Grenzen werden meist die **PLANK-Länge**  $l_{pl} \approx 10^{-35}$  s und die **PLANK-Zeit**  $t_{pl} \approx 10^{-43}$  s herangezogen.

MAX KARL ERNST LUDWIG PLANCK (1858 - 1947).

Alle *real möglichen Messwerte* sind auch diesbezüglich um viele Zehnerpotenzen größer.

Daher können Messwerte prinzipiell als *kontinuierlich angenommen* werden – jedoch mit endlicher Ziffernzahl.

Außerdem gehört zu jedem *Messwert*  $X$  ein zunächst unbekannter *Messfehler*  $\Delta X$ , der aus zwei Anteilen besteht:

Der *systematische Fehler* stammt vom Messgerät und Messverfahren. Er ist schwierig abzuschätzen und entfällt hier.

Der *statistische Fehler* kann schrittweise über wiederholte Messungen für den gleichen Wert ermittelt werden.

Wegen vieler unabhängiger Einflüsse gehorchen die Ergebnisse meist der *Normal* bzw. **GAUß-Verteilung**.

Rechnerisch gemittelt ergeben sich dann ein Erwartungswert  $X_w$  als *Messwert* und eine *Streuung*  $\delta$  als *Messfehler*.

Ein mögliches Ergebnis lautet z. B.: Der Körper hat eine Masse von  $(34 \pm 1)$  g (Achtung! Rechner liefern oft zu viele Stellen!)

Prinzipiell können aber deutlich größere, theoretisch sogar unendlich große Abweichungen  $\Delta X \rightarrow \infty$  auftreten.

Jedoch, je weiter ein Messwert vom Erwartungswert abweicht, desto geringer ist seine Auftritts-Wahrscheinlichkeit.

Für viele Anwendungen genügt dennoch der Messwert.

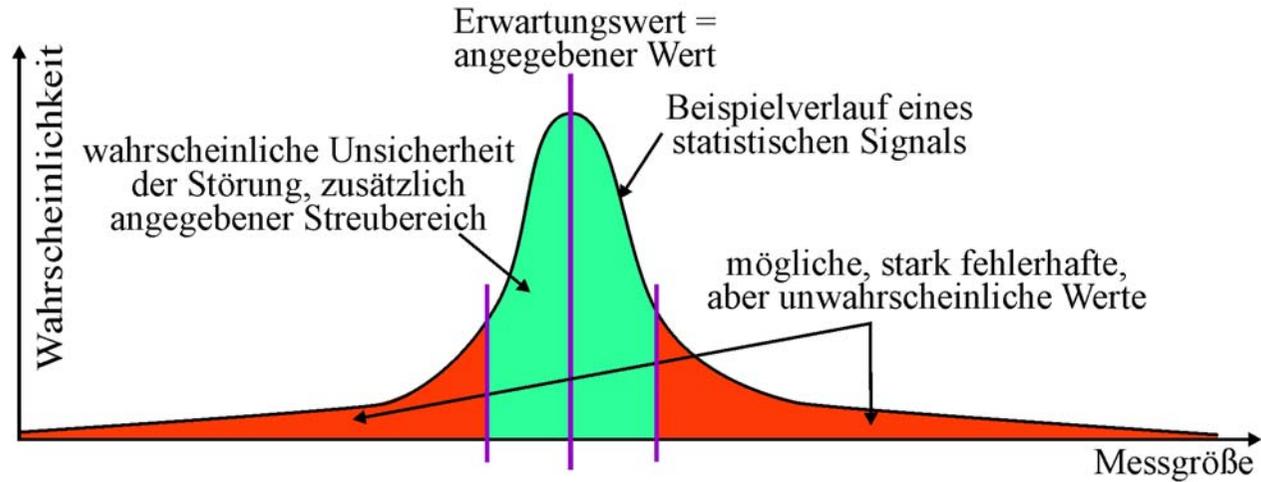
Soll mit *digitalen Werten* gearbeitet werden, so sind vergleichsweise nur sehr wenige Werte sinnvoll bzw. zulässig.

Die Streuung  $\delta$  führt nämlich zu einer beachtlichen großen Fehlerrate  $F_R$  des digitalen Wertes.

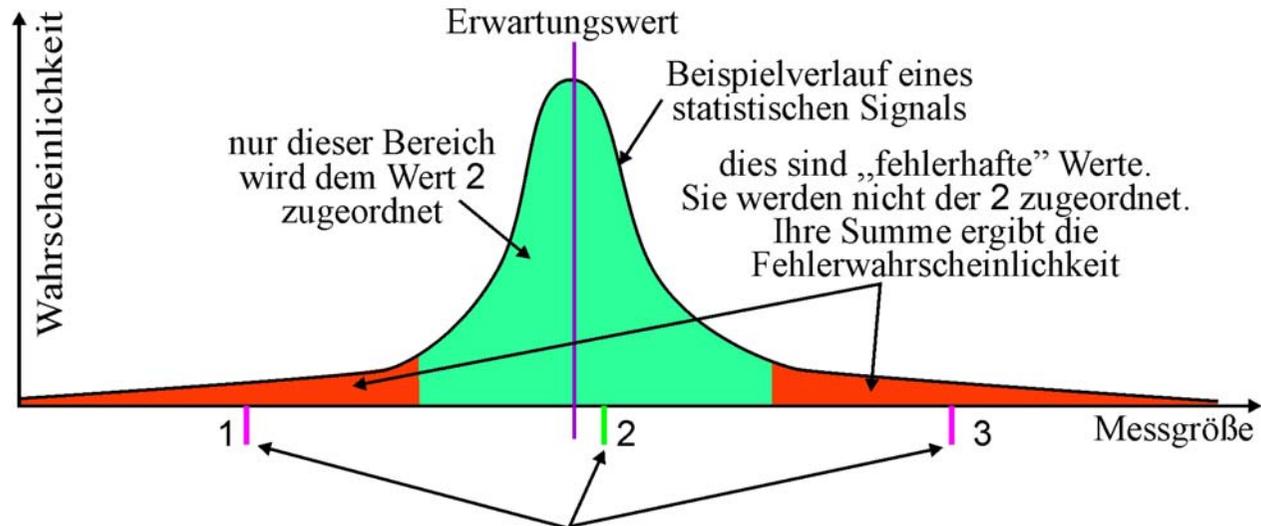
Für geeignete Fehlerkorrekturverfahren muss jedoch  $F_R < 10^{-4}$  geeigneter  $10^{-5} - 10^{-6}$  gelten.

Dazu müssen die diskreten (digitalen) Werte mindestens einen Abstand vom Zehnfachen der Streuung besitzen.

# kontinuierliche Messwerte



# diskretisierte, digitalisierte Messwerte



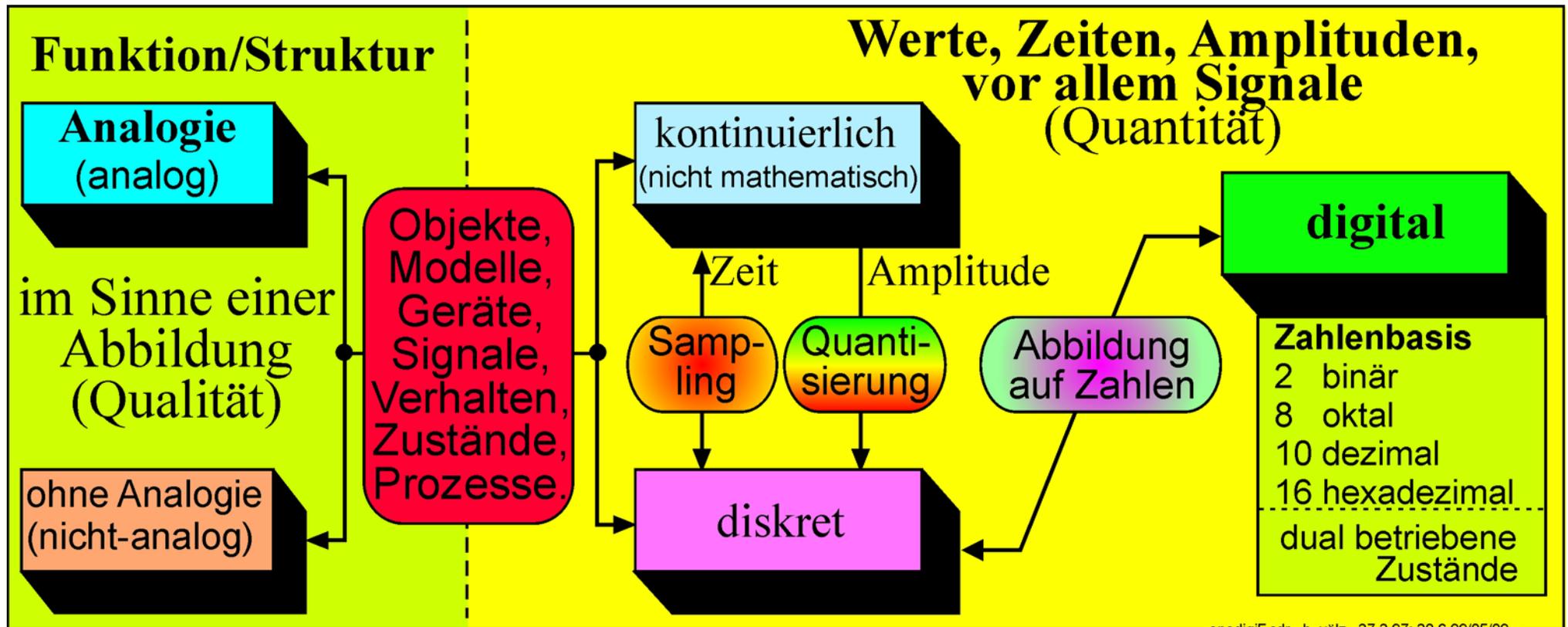
definierte = zugelassene diskrete, nummerierte und ausgegebene Werte

disKont.cdr h. vözl 23.3.99/2012

# Zusammenhang von analog, kontinuierlich, diskret und digital

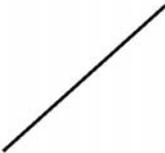
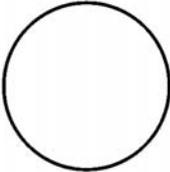
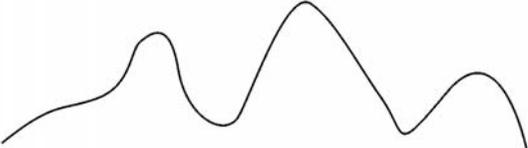
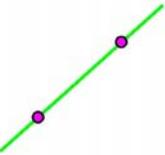
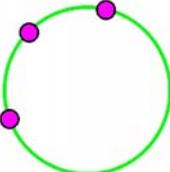
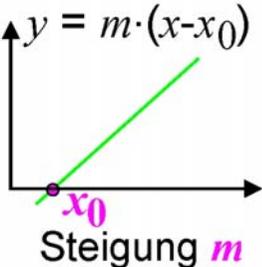
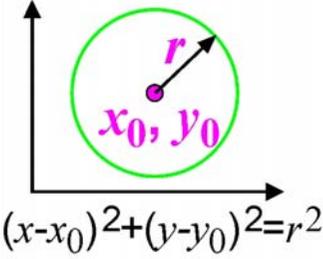
Das Bild gilt nahezu für alle physikalisch-technische Zusammenhänge und Eigenschaften:

*Links* (grün) für *Modell-Betrachtungen*, *rechts* (gelb) für *Zahlen*-Werte von Koordinaten, Zeiten und Ausprägungen.



Oft kann ein **kontinuierlicher Verlauf** aus **endlich vielen diskreten Werten** mittels einer **kontinuierlichen** mathematischen **Funktion** erzeugt werden.

Doch für nicht alle Anwendungen und Werte scheint es die „passende“ mathematische Funktion zu geben. Ob beim so erzeugten Kontinuum aber wieder die *ursprüngliche Präzision erreicht* wird, ist nicht gesichert.

<b>Zum Zusammenhang von kontinuierlich und diskret</b>			
	<b>Gerade</b>	<b>Kreis</b>	<b>Allgemeine Kurve</b>
<b>Unendlich viele (kontinuierliche) Werte werden angenommen</b>			 z. B. Zeitverlauf $y = f(t)$
<b>Es genügen aber wenige Werte, die jedoch nicht unmittelbar das Objekt bestimmen</b>	 zwei Punkte genügen	 drei Punkte genügen	Zur Berechnung sind meist endlich viele <b>Koeffizienten</b> ausreichend
<b>Zusätzlich sind kontinuierliche Funktionen erforderlich</b>	 $y = m \cdot (x - x_0)$ Steigung $m$	 $(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 = r^2$	Sie erfolgt mit einer <b>Funktionsreihe</b> , z. B. <b>Potenz-, Fourier-Reihe</b> oder <b>orthogonalen Funktionen</b>

Signalverarbeitung5a.cdr h. vözl 14.3.97/2012

# Gliederung

1. Einführung
- 2. Signale**
3. Zweipole
4. Vierpole
5. Wellen

# Anzahl notwendiger Werte

Die  $X$ -Werte betreffen drei Möglichkeiten (s. o.), nämlich das Tripel aus *Ort, Zeit und Messwert* (Ausprägung). Nicht immer sind jedoch alle drei zugleich notwendig. Es gibt mehrere *Vereinfachungen*, z. B.:

- *Ein Messwert  $X$*  genügt dann, wenn *Zeit* und *Ort unwesentlich* sind, z. B. für die Masse eines Körpers oder die Spannung einer Batterie.
- *Messwert und Ort  $X_O = f(x)$*  genügen vor allem bei *Speichermedien*. Bei ihnen befindet sich die Information langfristig stabil als *Speicherzustand* an einem festen Ort.
- *Messwert und Zeit  $X_S = f(t)$*  genügen bei einer *feststehenden Quelle*, z. B. Lautsprecher oder bei einem feststehenden *Empfänger* z. B. Mikrophon.  
Sie reichen aber auch für die menschliche *Wahrnehmung* sowie sein Sprechen und Handeln aus.  
Genau deshalb ist diese Einschränkung besonders *wichtig*.

**Erklärung:** Immer wenn  $X_S = f(t)$  gültig ist, wird im Folgenden der Begriff **Signal** gewählt.

Im obigen physikalischen Sinn sind sie *primär* immer *kontinuierlich*. Das betrifft vor allen Menschen und Wandler.

Für *verlustfreie* Übertragung und Speicherung sowie *rechentechnische* Behandlung

müssen sie jedoch zumindest zwischendurch *digital* sein.

Das erfordert Verfahren für *Wandlungen* (AD- und DA-Wandler): kontinuierlich  $\Leftrightarrow$  digital, s. u.

Eine ausführliche Behandlung der der Signale erfolgt noch bezüglich einer allgemeinen *Quelle*.

Mittels einer *Geschwindigkeit  $v$*  lassen sich *Signale* und *Speicherzustände* ineinander umwandeln.

Das ist Aufgabe der *Speichertechnik* und erfolgt mittels *Aufzeichnung* und *Wiedergabe*.

# Medien und Signale

**Kurzdefinition:** Medien besitzen und vermitteln Information für Menschen. Das erfolgt mittels Werte  $X$ .

Dabei sind die Medien und Quelle, Sender sowie der Mensch Senke und Empfänger.

In diesem Sinne gibt es immer Objekte (umfassender als Medien), von denen die Information zum Menschen gelangt.

Dabei sind zwei Varianten bezüglich des Signals  $X_S = f(t)$  zu unterscheiden:

- Das *Medium* ist als Quelle *aktiv* und sendet Information, die der Mensch wahrnehmen kann.
- Der *Mensch* ist *aktiv* und entnimmt dem Medium die Information, z. B. durch Betrachten oder Lesen.

Außerdem kann eine Information auf unterschiedlichen Wegen von der Quelle (Sender) zum Empfänger gelangen:

- *Ohne Medien:* Durch unmittelbare Wahrnehmung oder Beobachtung, z. B. Hören, Sehen, Fühlen, Riechen oder Schmecken. Das erfolgt unter anderem bei Beobachtungen in der Natur, im Theater und im Gespräch.
- *Übertragungs-Medien:* Hierzu werden verschiedene Techniken der Signalübertragung gezählt, z. B. Rundfunk, Fernsehen und Telefon.
- *Speicher-Medien:* Auf ihnen wird die Information (langfristig) gelagert und bei Bedarf als Signal abgerufen. Typisch sind Notizen, Bücher, Skizzen, Bilder, Schallplatten, CD, Filme, elektronische Speicher usw.

Signale sind auch *Schwingungen* oder *Wechselströme*. Hauptsächlich müssen unterschieden werden:

1. *Kontinuierliche* oder *diskrete* Signale.
2. *Zeitlicher Verlauf* und *Kurvenform*.
3. *Diskrete* und *digitale* Signale
4. *Statistische Messwerte*, SHANNON-Entropie.

Im Weiteren werden hier hauptsächlich Medien betrachtet, die mit *elektromagnetischen Signalen* arbeiten.

# 1. Kontinuierliche und diskrete Signale

**Signale**  $X = f(t)$  bestehen aus *zwei Teilen*: Zur jeder aktuellen **Zeit**  $t$  gehört eine **Amplitude**  $X$ .

Dabei werden Abweichungen und Messfehler meist als **Störungen** betrachtet.

Beide Werte können kontinuierlich oder diskret (digital) sein, das ergibt *vier Signal-Arten*:

**kk**: Zeit und Amplitude können im Rahmen ihrer Messfehler jeden zulässigen kontinuierlichen Wert annehmen.

Typische Beispiele primäre Signale und kontinuierliche Modulationen.

**kd**: Die **Zeit** verläuft hier *kontinuierlich*, die **Amplitude** kann jedoch nur vorgegebene *diskrete Werte* annehmen.

Sie springt immer dann zum nächstliegende diskreten Wert, wenn der Abstand ihres primär kontinuierlichen Wertes dorthin kleiner ist als zur aktuellen diskreten Amplitudenstufe.

Beispiele sind die seltenen *quantisiert-asynchronen Techniken*, z. B. Nachlauf-AD-Wandler.

**dk**: Die *kontinuierliche Amplitude* bleibt für die *diskret festgelegte Zeit* erhalten. Dazu wird das ursprüngliche Signal zu den diskret festgelegten Zeiten, z. B. mittels eines Taktes, abgetastet. Das ist bei vielen *Impulsmodulationen* der Fall.

**dd**: **Zeit und Amplitude** nehmen nur festgelegte *diskrete* Werte an.

Nur solche Signal-Werte sind vollständig diskret und können in getakteten digitalen *Rechnern* verarbeitet werden.

Erzwungene *zeitdiskreten Werte* können prinzipiell wieder *fehlerfrei kontinuierlich* zurück gewonnen werden.

Hierzu muss die *Taktfrequenz*  $f_T$  dem *Sampling-Theorem* von CLAUDE ELWOOD SHANNON (1916 - 2001) genügen.

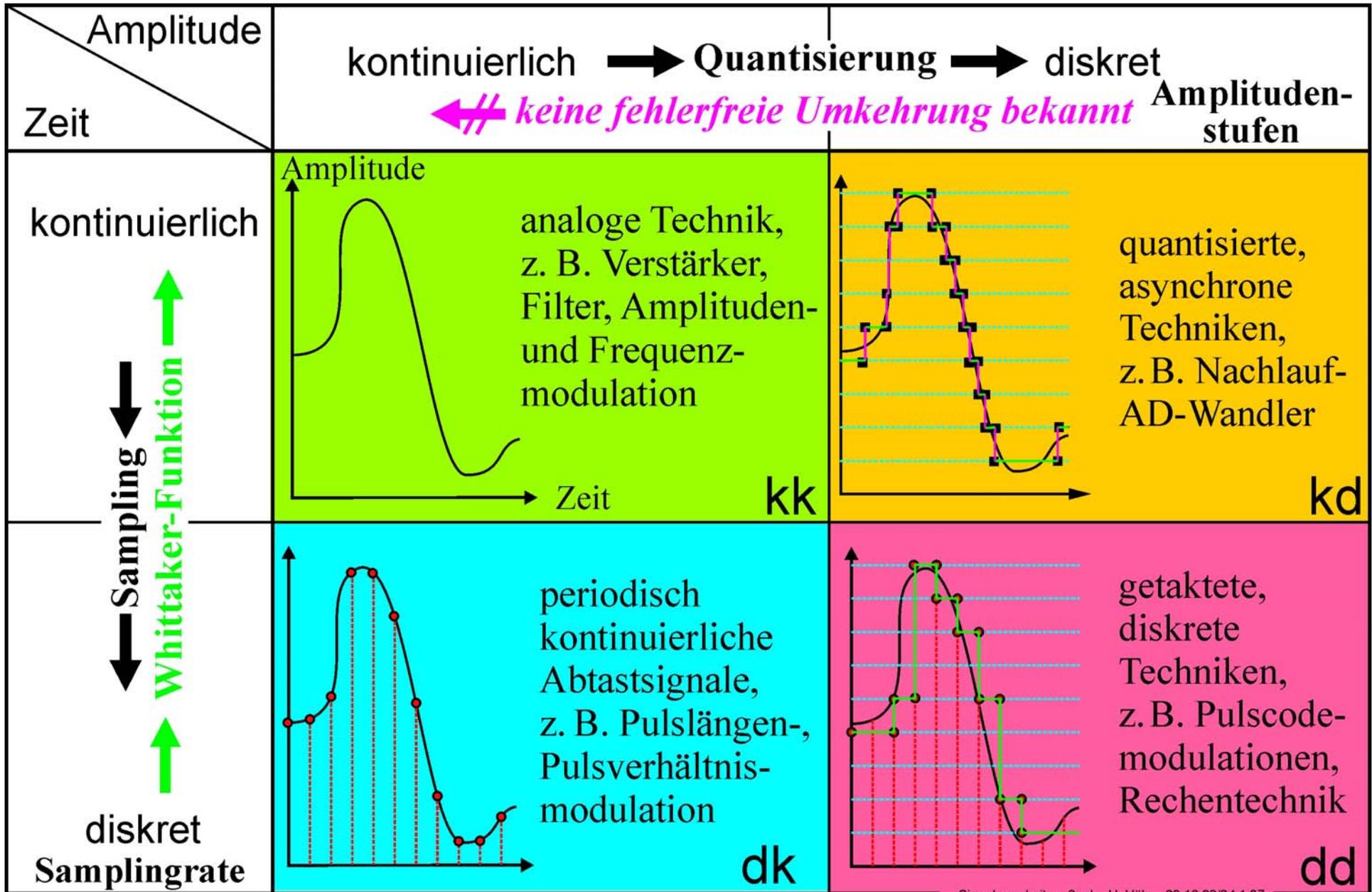
Für ein Signal mit der Bandbreite  $B$  muss gelten  $f_T \geq 2 \cdot B$ , für den Abstand der Abtastwerte  $\Delta T \leq 1/2 \cdot B$ .

Die zur Rückwandlung notwendige Formel ist die WHITTACKER-Funktion  $\sin(x)/x$ . (EDMUND WHITTACKER, 1873-1956).

Zu Grenzen und weiteren Detail siehe: Analogrechner.pdf und InftheorieHUF.pdf

Für die Rücknahme der *Amplituden-Quantisierung* ist (z. Z.) keine Formel oder allgemeine Lösung bekannt.

Ein Ausweg ist die *Kontinuierliche Digitaltechnik*, siehe: Analogrechner.pdf und [Völz 08].



Signalverarbeitung3.cdr H. Völz 29.12.93/24.1.07

## 2. Zeitlicher Verlauf oder Kurvenform

Signale als Schwingungen oder Wechselströme können unterschiedliche Kurvenformen (Zeit-Verläufe) besitzen. Dabei sind **vier Klassen** (durch Beispiele ergänzt) hervorzuheben:

- **periodisch**: Sinus, Rechteck und Dreieck (Sägezahn).
- **einmalig**: Sprung-, Rampen-, Exponential-Funktion, Rechteckimpuls, Einschwingvorgang und gedämpfte Schwingung.
- **nicht periodisch und nicht zufällig** (übertragen meist Information): Modulation, Codierung und Rechnersignale.
- **zufällig**, statistisch: Störungen und Rauschen.

Besonders wichtig ist die **Sinus-Funktion**.

Sie ist durch folgende **Parameter** gekennzeichnet:

Zu ihrer **Frequenz  $f$**  gehört die **Periodendauer  $T = 1/f$** .

Weil sich Sinusschwingung auch von der Rotation ableitet (s. u.),

wird oft die **Kreisfrequenz  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$**  benutzt (=Weg auf dem Kreisumfang).

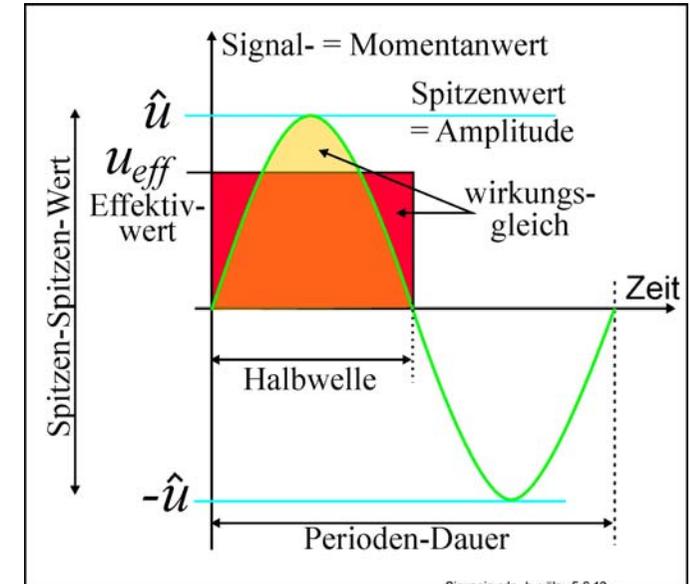
Das Maximum der Signalwerte (Momentanwerte) heißt **Amplitude** oder Spitzenwert  $\hat{u}$ .

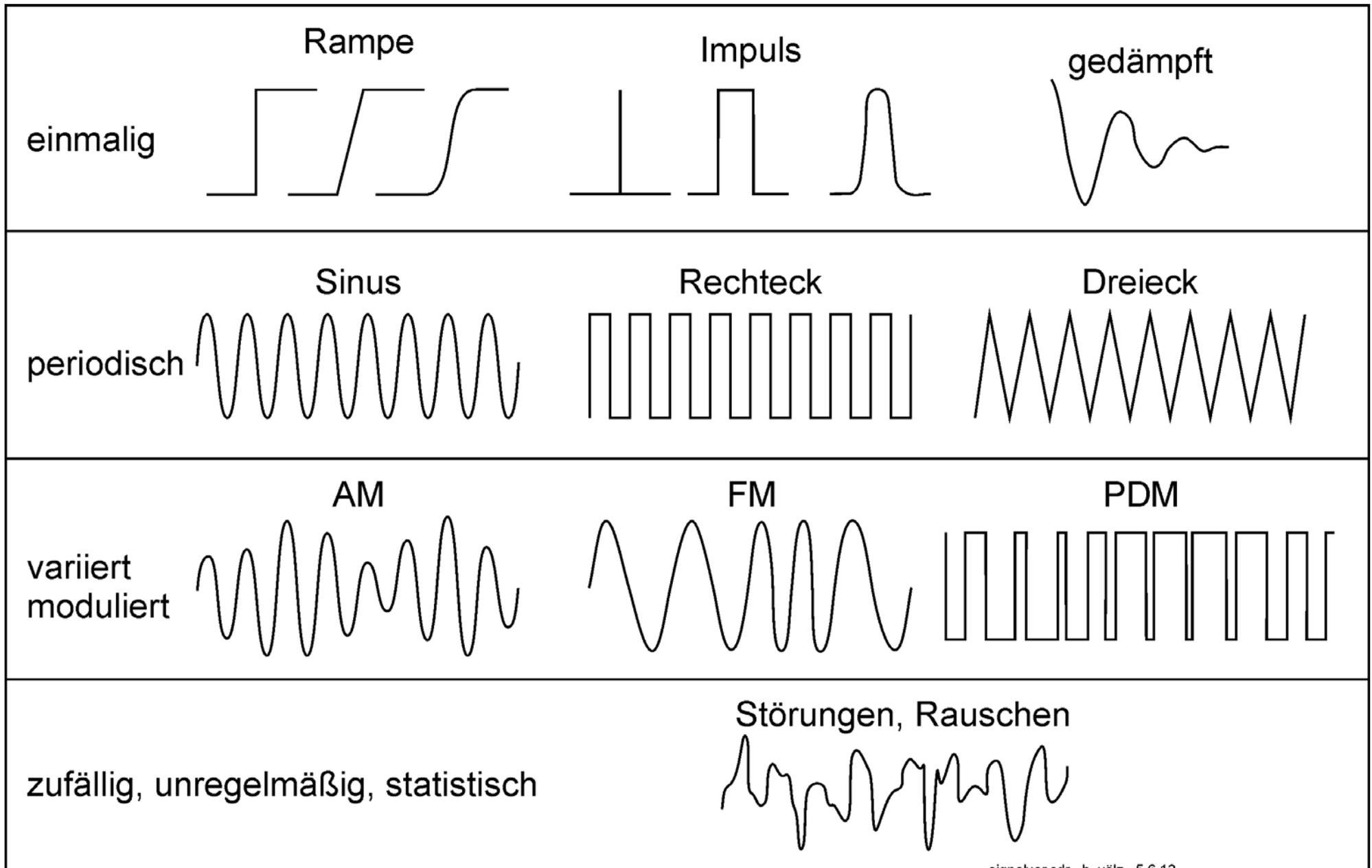
Die maximale Änderung  $-\hat{u}$  bis  $\hat{u}$  ist der **Spitzen-Spitzen-Wert**.

Wichtig ist auch die **Wärmewirkung** eines Wechselstromes. Hierfür gilt  $W = U \cdot I$ , bzw. auf die Spannung bezogen:

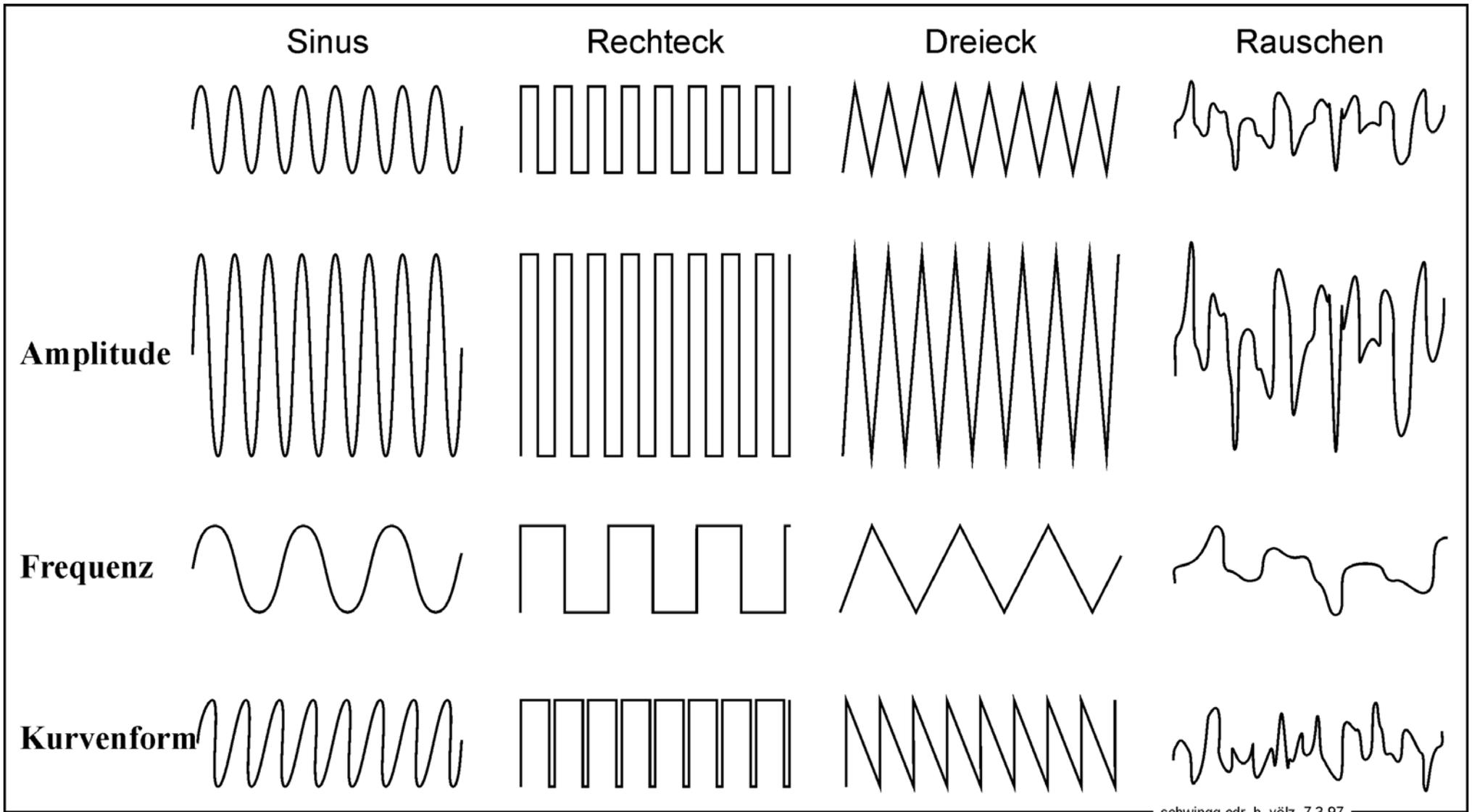
$$W = \frac{U^2}{R} = \frac{\hat{u}^2}{R} \int_0^T (\sin(t))^2 dt.$$

Hieraus folgt der **Effektivwert** für die Spannung (bzw. den Strom):  $u_{eff} = \hat{u} / \sqrt{2} \approx 0,707 \cdot \hat{u}$ .





signalvar.cdr h. vözl 5.6.12



schwiggg.cdr h. vözl 7.3.97

# Zeigerdarstellung und FOURIER-Analyse

JEAN BAPTISTE JOSEPH BARON DE FOURIER (1768 - 1830)

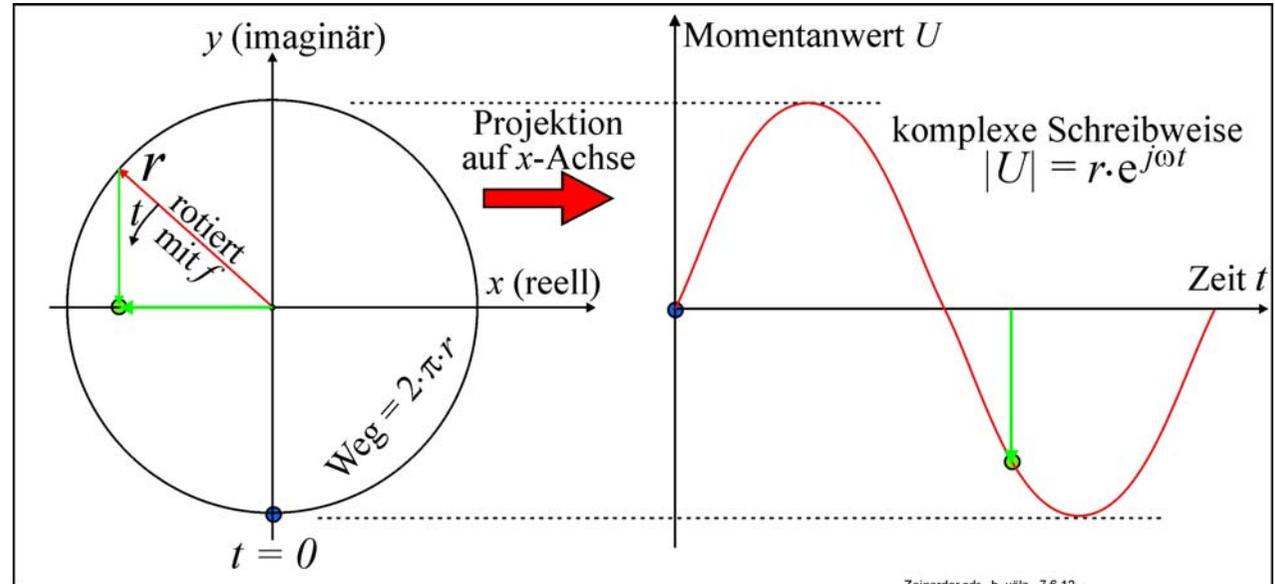
Die Sinus- und Cosinus-Schwingung sind wesentliche Grundlage der *Schwingungslehre*:

Hierfür ist die *Zeigerdarstellung* vorteilhaft.  
Sie erfolgt in der komplexen GAUß-Ebene.  
In komplexer Schreibweise gilt dann:

$$r_t = r \cdot e^{j \cdot \omega \cdot t}.$$

Die Projektion auf die  $x$ -Achse entspricht dann dem reellen Anteil

$$x(t) = |r_t| = \sin(\omega \cdot t).$$



Die *FOURIER-Analyse* ermöglicht jede periodische Kurve in ganzzahlige *Komponenten zu zerlegen*.

Dadurch entsteht das *Spektrum* der Schwingung.

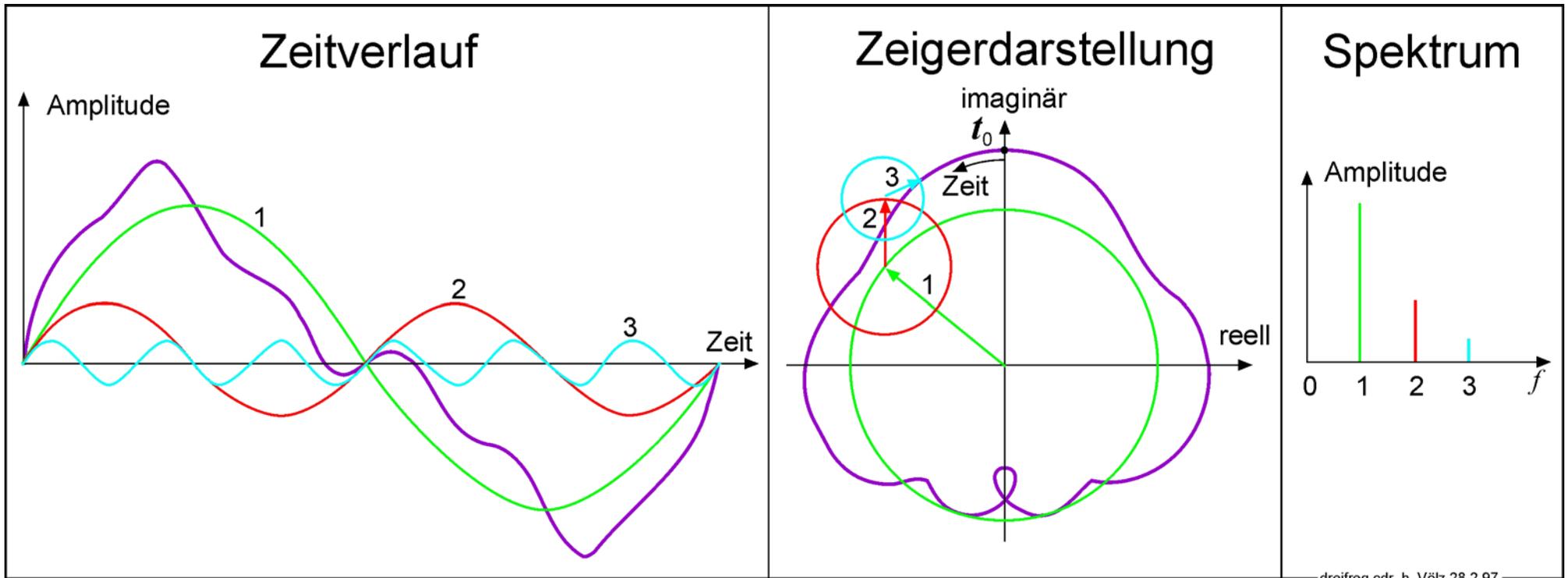
Die *tiefste Frequenz* wird dabei *Grund-Schwingung* (-welle)  $f_0$  genannt.

Die Vielfachen  $n \cdot f_0$  heißen  $(n-1)$ -te *Ober-Schwingung* (-welle).

So führte bereits PYTHAGORAS (570 - 500 v. Chr.) die die meisten *musikalischen Intervalle* ein, z. B: Oktave 1:2.

Für *nichtperiodische* Vorgänge gilt entsprechend das *FOURIER-Integral*.

Sinus-Schwingungen entstehen bei allen *Rotationen*, z. T. ebenfalls mit Oberwellen



# Vom Wechselstrom zum Drehstrom

Gleich- und Wechselströme überlagern sich *additiv*.

Bei *entgegengesetzten* Gleichströmen wird nur ihre *Differenz* wirksam.

Bei *Wechselströmen* ist zusätzlich immer die *Phasendifferenz*  $\alpha$  zu beachten.

Es sind dann die Vektoren mit ihrer Richtung zu addieren.

Vereinfacht ergibt sich für 2 gleichgroße Spannungen  $r$  mit einer Phasendifferenz  $\alpha$ :

$$x_1 = r \cdot \cos(\omega \cdot t) \text{ und } x_2 = r \cdot \cos(\omega \cdot t + \alpha) \Rightarrow x = 2 \cdot r \cdot \cos(\alpha/2) \cdot \cos(\omega \cdot t + \alpha/2).$$

Bei drei Spannungen mit jeweils  $\alpha = 120^\circ$  entsteht *Dreiphasen-* bzw. *Drehstrom*.

Entsprechend der *Stern-Dreieck-Umwandlung* (s.o.) sind auch Differenzen wichtig.

Für ihre Amplitude gilt  $U_d = \sqrt{3} \cdot r \approx 1,73 \cdot r$ , zu 220 V gehören dann **380 V**.

Drei so kombinierte Strom-Quellen besitzen mehrere *Vorteile*:

- Sie erzeugen direkt ein Drehfeld für Motoren, wobei mittels Stern-Dreieck-Umschaltung leicht Start und Betrieb erreicht werden.
- Sie ermöglichen u. a. Einsparungen bei der Energie-Übertragung und bei Transformatoren.

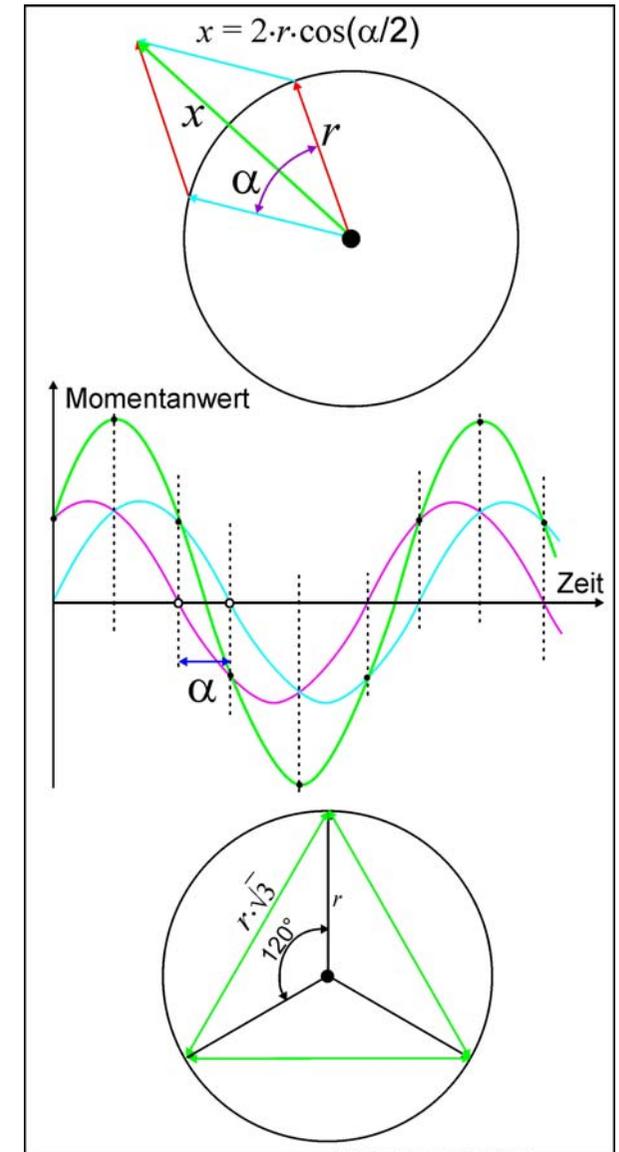
Jede der 3 Leitungen benötigt nur  $1/3$  des Querschnitts vom Ein-Phasenbetrieb.

Die sonst notwendige 4. Rückleitung kann entfallen, dort fließt kein Strom.

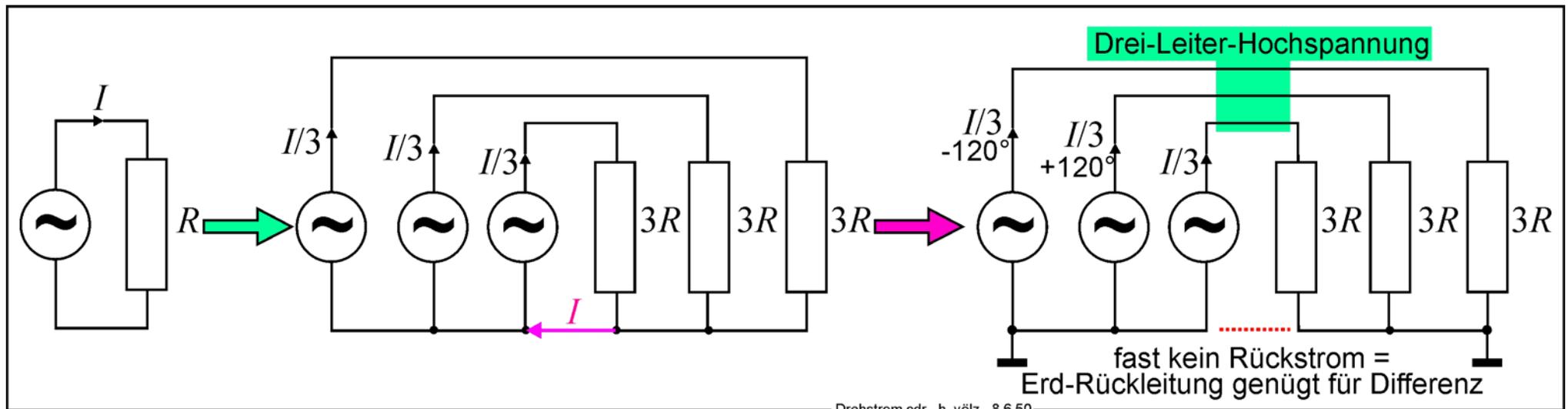
Von der **Einsparung auf  $3/4$**  wird jedoch etwas durch *höhere Isolation* verbraucht.

Bei unterschiedlicher Belastung der Phasen fließt über die *Erde als Null-Leiter* ein meist sehr *geringer Ausgleichstrom*.

Prinzipiell sind auch  $n$ -Phasen mit  $\Delta\alpha = 360/n$  möglich, Einsparung nur  $^{(n-1)}/_n$ .



- 1882 NIKOLA TESLA (1856 - 1943) entwickelt Zweiphasen-Wechselstrommotor  $\Rightarrow$  Netz in den USA
- 1989 Drei-Phasen-Motoren der AEG
- 1891 Dreiphasen-Hochspannungsleitung 15 kV über 175 km bei Frankfurt/M.



### 3. Diskrete und digitale Signale

Diskret und digital können gemäß Bild von S. 18 sowohl die *Zeit* als Taktung *und* die *Amplitude* betreffen.

Die *Zeit* verläuft dabei – wie üblich – fortschreitend in vielen diskreten Stufen  
Sie kann daher *gezählt* und dann digital, d. h. mit Zahlen beschrieben werden.  
Rein *binär* im Sinne von Zweistufig 0/1 existiert sie *nicht*.  
Vereinfacht kann sie daher also immer kontinuierlich behandelt werden.

Für die *Amplitude* bestehen deutlich mehr Varianten

Es können durchaus *2 binäre Stufen vorliegen*, das ist sogar häufig der Fall.

Bei mehreren Amplitudenstufen muss die *Abstufung nicht äquidistant* sein.

Zur Anpassung an unsere Sinnesorgane ist sogar logarithmisch gemäß ( $\log(|x|)$ ) nützlich.

Die Werte für Zeit und Amplitude können in verschiedenen *Zahlensystemen* angegeben werden

Typisch sind binär (2), oktal (8), dezimal (10) und hexadezimal (16), als jeweilige Zahlenbasis.

Die *Umrechnung* ist nicht ganz einfach und geschieht am besten mit einem Taschenrechner.

Das *Bit* steht für 2 (binär), das *Nibble* enthält 4 Bit, das *Byte* 8 Bit.

Da  $2^{10} = 1024$  werden hierfür die *dezimalen Vorsätze* k, M, G, T usw. oft fälschlich benutzt.

U. a. gilt  $2^{20} = 1\,048\,576$  (M);  $2^{30} = 1\,073\,741\,824$  (G);  $2^{40} = 1\,099\,511\,627\,776$  (T) usw.

Das führt zuweilen zu erheblichen Rechenfehlern.

Diskrete und binäre Signale müssen oft *gleichromfrei* sein, da dieser oft nicht übertragbar ist.

Bedeutung hat die *Rekonstruktion* diskreter und digitaler Signale nach *Störeinflüssen*.

Hierfür ist meist eine *Fehlerkorrektur* mit vorhergehender *Taktgewinnung* notwendig

# 4. Statistische Messwerte, SHANNON-Entropie

Signale können Information transportieren. Zunächst werden digitale Signale mit Bits aus 0/1 betrachtet. Mit  $n$  Bit sind dann  $m = 2^n$  unterschiedliche Zeichen, Signale darstellbar  $\Rightarrow n = \text{ld}(m)$ . Tabelle für  $n = 4$ .

Signallänge 4 = $\text{ld}(16)$	mögliche Zustände, konkrete Signale $16 = 2^4$
Bit 1	0 0 0 0   0 0 0 0   1 1 1 1   1 1 1 1
Bit 2	0 0 0 0   1 1 1 1   0 0 0 0   1 1 1 1
Bit 3	0 0 1 1   0 0 1 1   0 0 1 1   0 0 1 1
Bit 4	0 1 0 1   0 1 0 1   0 1 0 1   0 1 0 1

Diese Zusammenhänge waren HARTLEY bereits 1928 bekannt. Sie bedeuten: ↑ 15. Information

- Die **Informationsmenge** entspricht der Signallänge bzw. den Speicherplätzen  $n = \text{ld}(m)$ .
- Die konkret auftretenden (wahrgenommen) **Signale, Zustände** entsprechen einer der  $m$  verschiedenen Belegungen.

Bei den meisten Quellen treten die Signale jedoch mit unterschiedlichen **Wahrscheinlichkeiten**  $p_i$  auf.

Für die **Informationsmenge** kann das mittels **Gewicht**  $= p_i$  berücksichtigt werden.

Da für Gleichverteilung  $p = 1/m$  bzw.  $m = 1/p$  gilt, folgt dann als **Entropie-Term** des  $i$ -ten Zustands

$$h = p_i \cdot \text{ld}(1/p_i) = -p_i \cdot \text{ld}(p_i).$$

Um die gesamte Informationsmenge zu erhalten, müssen die  $m$  Terme zur **Shannon-Entropie**  $H$  addiert werden.

$$H = - \sum_{i=1}^m p_i \cdot \text{ld}(p_i) \quad \text{mit} \quad \sum_{i=1}^m p_i = 1.$$

Das Minuszeichen ist notwendig, damit die Informationsmenge positiv wird!

# Anwendung des Entropie-Terms

Dass der Entropie-Term  $h = -p \cdot \text{ld}(p)$  eine eigenständige Bedeutung, fand HELMAR FRANK (\*1931) heraus. [Frank 69]  
Er besitzt sein Maximum bei  $p = 1/e \approx 0,37$  (37 %), zusätzlich ist  $1 - 1/e \approx 0,63$  (63 %) wichtig.

EULERSche Zahl =  $e \approx 2,71 \Rightarrow$  Exponentialfunktion und natürlicher Logarithmus  $\ln$ , LEONHARD EULER (1707 - 1783)

Werden gleichzeitig mehrere Werte wahrgenommen, so ist jener auffällig, der in der Nähe von 37 % liegt.

Dies zeigte FRANK an vielen Beispielen:

Farbe weiß bei Iphigenie von AMSELM FEUERBACH (1829 - 1880), gelb bei den Pferden von Franz MARC (1880 - 1916)

3. Satz des 5. Brandenburgisches Konzert von JOHANN SEBASTIAN BACH (1685 - 1750) mit 124 *Synkopen* auf 310 Takte

Im Gedicht von EDGAR ELLEN POE (1809 - 1849) erscheint das *e* 8-mal bei 24 Vokalen.

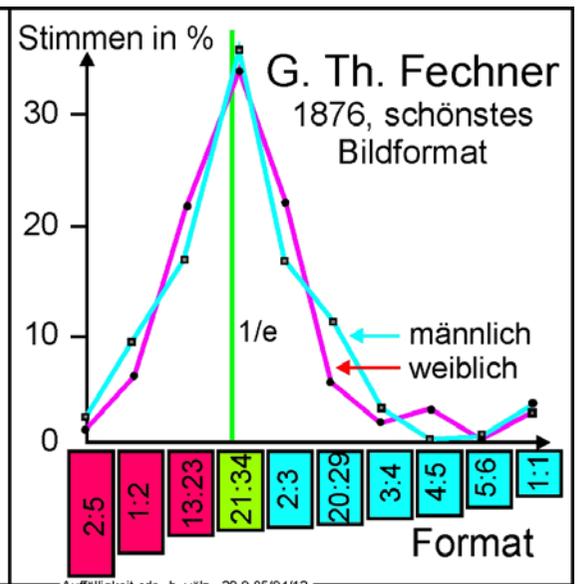
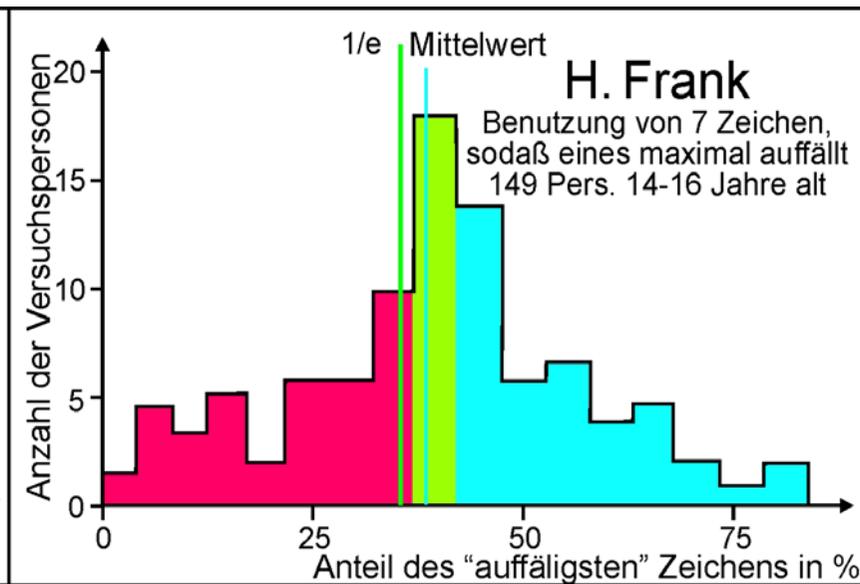
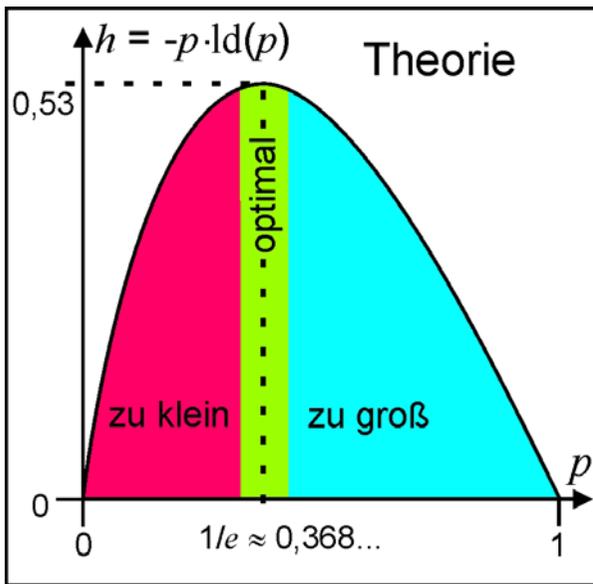
Hear the *sledges* with the *bells*, silver *bells*!  
What a world of *merriment* their *melody* foretells!

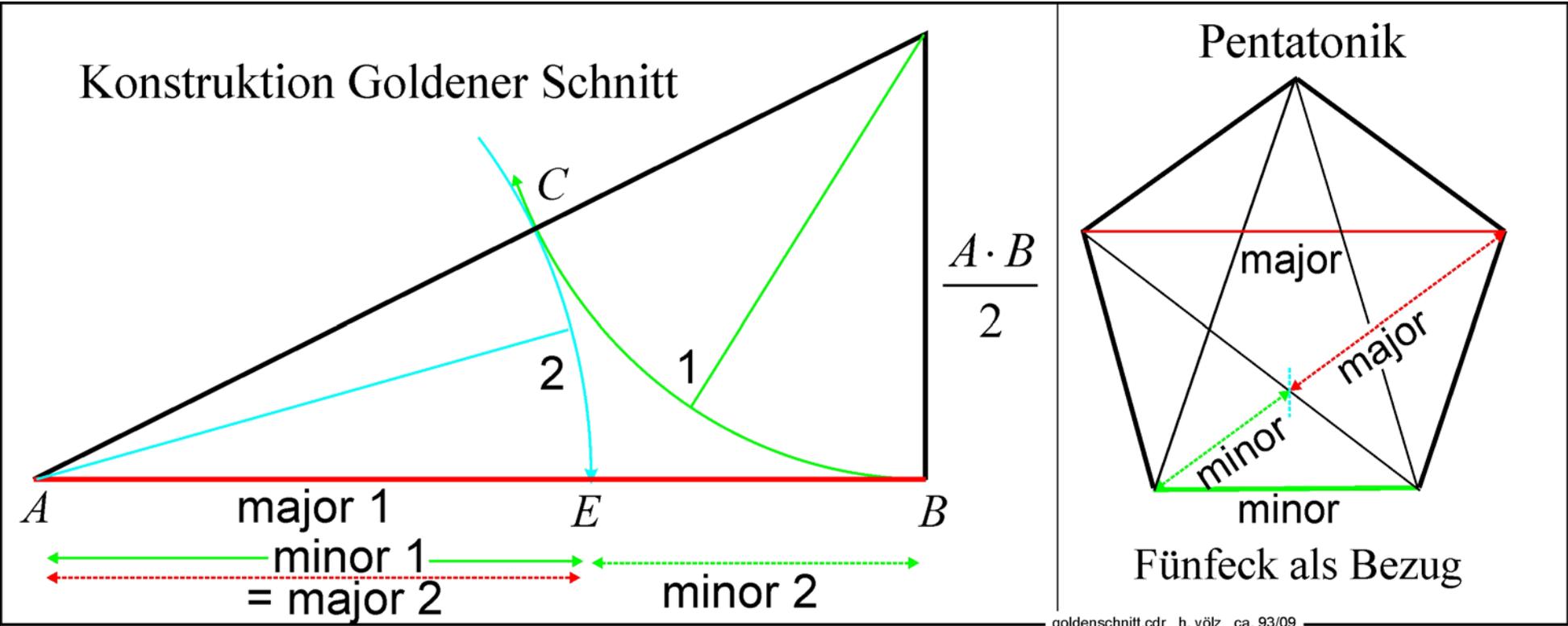
André Abraham MOLES (1920 - 1992) und FRANK erzielten Erfolge für die Preisbildung von Waren im Kaufhaus.  
Es konnte so sogar die „Schönheit“ von Häusern bestimmt werden [Völz 90].

Bald gab es Widerspruch. Denn der schon in der Antike war der *Goldene Schnitt* mit  $(\sqrt{5} - 1)/2 \approx 0,618$  bekannt.  
Doch in [Völz 88] zeigte ich, dass der Entropiewert infolge der *logarithmischen Wahrnehmung* ganz universell gilt.

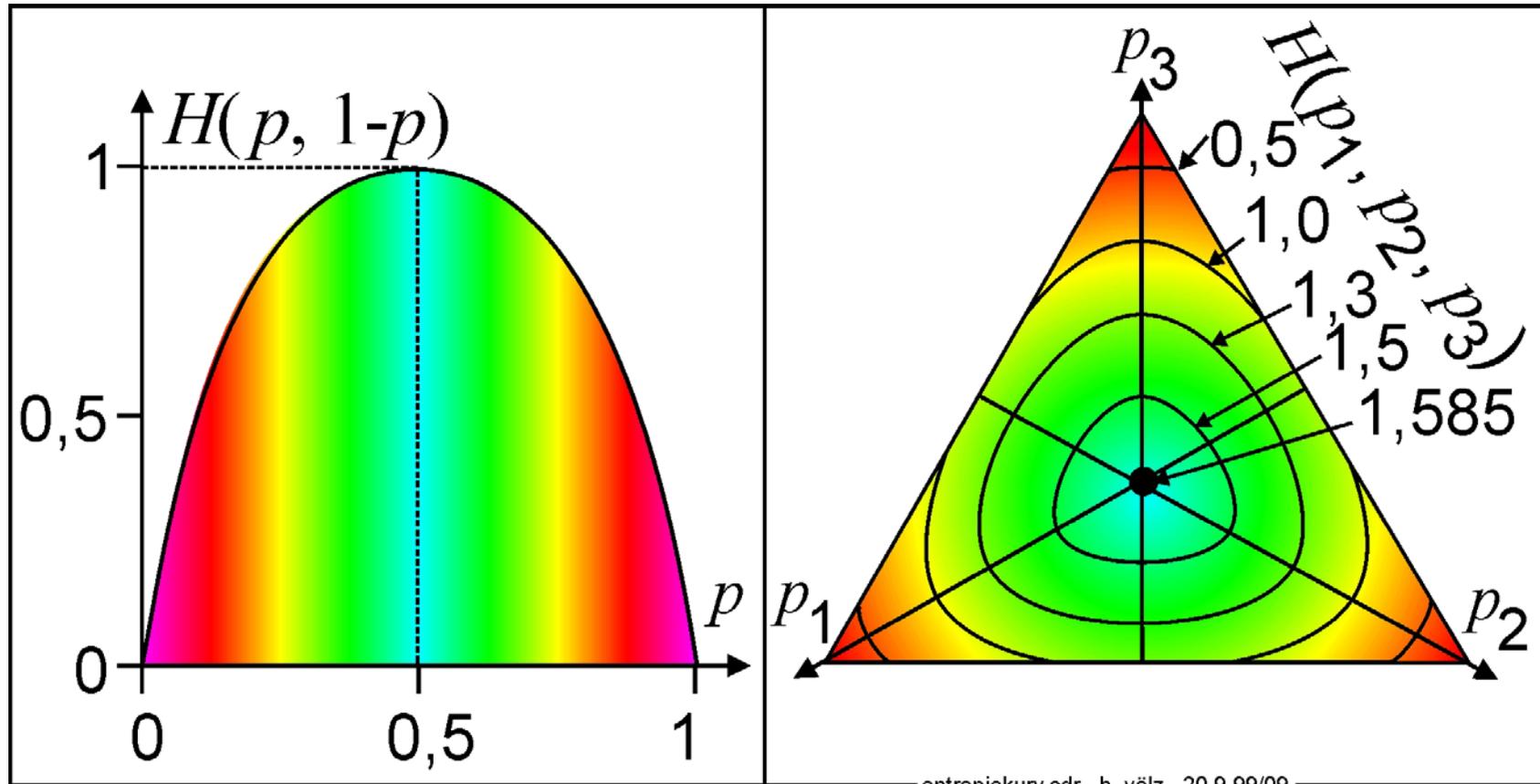
Dies folgt aus dem Weber-Fechner-Gesetz: Reize der Stärke  $R$  werden gemäß  $w = a + b \cdot \log(R)$  wahrgenommen.

Der Goldene Schnitt ist somit nur eine *Näherungs-Konstruktion* mit Zirkel und Lineal für flächige Gebilde.





Die SHANNON-Entropie gilt erst dann, wenn  $\sum p_i = 1$  erfüllt ist.  
 Hier sind die die Entropie-Funktionen für 2 und 3 Werte dargestellt.



entropiekurv.cdr h. vözl 20.9.99/09

# Entropie kontinuierlicher Signale

Für kontinuierliche Größen müssen die Wahrscheinlichkeiten  $p_i$  durch *Wahrscheinlichkeitsdichten*  $p(x)$  und die Summe  $\Sigma$  durch das *Integral*  $\int$  ersetzt werden. Die Integration hat dabei von  $-\infty$  bis  $+\infty$  zu erfolgen. Das Ergebnis nennt **HEINZ ZEMANEK** (\*1920) *relative Entropie*:

$$h_s(x) = - \int_{-\infty}^{+\infty} p_s(x) \cdot \text{ld}(p_s(x)) \cdot dx \quad \text{mit} \quad \int_{-\infty}^{+\infty} p_s(x) \cdot dx = 1.$$

Für diskrete, *digitale* Signale können die Werte  $x_i$  als *fehlerfrei* (reproduzierbar) angenommen werden. Bei *kontinuierlichen* Signalen treten dagegen stets *Störungen* (u. a. Rauschen) auf. Zu ihnen gehört eine Wahrscheinlichkeitsdichte  $p_n$  (noise) und damit die relative Entropie  $h_n(x)$ . Die Gesamt-Entropie ist folglich die Differenz beider relativen Entropien

$$H(x) = h_s - h_n.$$

Vielfach kann in guter Näherung für das Signal und die Störung eine GAUß-Verteilung angenommen werden. Unterschiede betreffen dann nur noch die Signal- = Nutzleistung  $P_s$  und die Störleistung  $P_n$ . Außerdem geht innerhalb des Logarithmus die Differenz in einen Quotienten über. Daher folgt

$$H = \text{ld} \left( \frac{P_s + P_n}{P_n} \right).$$

Ausführlicher ist diese Ableitung bei [Zemanek] und referiert bei [Völz 01] vorhanden. SHANNON hat das Ergebnis anders (exakter) und zwar indirekt über die Kanalkapazität abgeleitet (s u.)

# Gliederung

1. Einführung
2. Signale
3. Zweipole
4. Vierpole
5. Wellen

# Empfänger, Senke

nehmen **Signale** entgegen und **benutzen** sie. Dabei interessiert zunächst nicht ihre innere Struktur.

Im besonders einfachen Fall sind es **Zweipole**, die bei einer **Eingangsspannung** von einem **Strom** durchflossen werden.

Nur sie werden im Folgenden behandelt.

Allgemein sind es **komplexe Systeme** die das Eingangssignal in eine interne **Änderung umsetzen**.

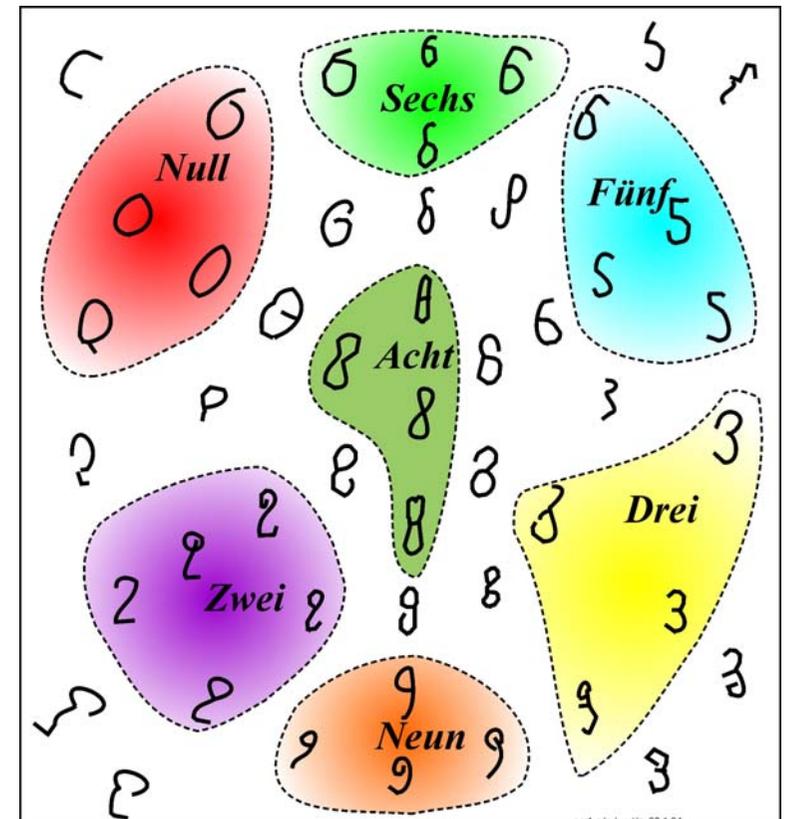
Das Spektrum reicht **von einfachen Geräten** über Rechner, Pflanzen, Tiere **bis zum Menschen**.

Die Signale sind u. a.: 0/1, ASCII, Text, Schall, Bilder usw.

Die Empfänger „ziehen“ (decodieren) aus den Eingangssignalen **Information**, die **Verhaltensänderungen** bewirkt.

Allgemein wird auf die **Information später** eingegangen.

Ein typisches Beispiel ist die **Zeichenerkennung**.



# Spannung und Strom in Bauelementen

Für die drei Bauelemente gelten folgende Gleichungen:

Widerstand	Induktivität	Kapazität
$U = I \cdot R$	bzw. $U = -L \cdot \frac{dI}{dt}$	bzw. $I = C \cdot \frac{dU}{dt}$ oder $U = \frac{1}{C} \cdot \int I \cdot dt.$

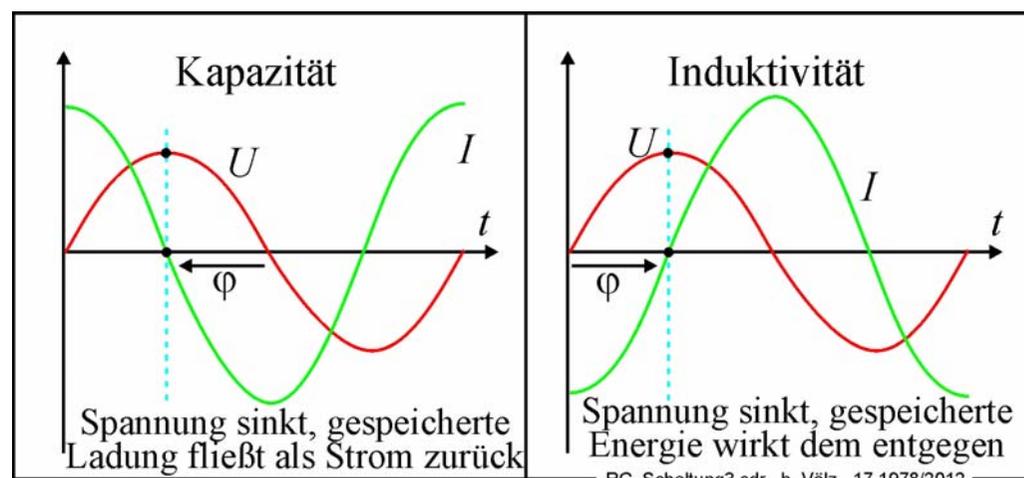
Für das Differenzieren von Sinus- bzw. Cosinus-Schwingungen gelten die Regeln

$$\frac{d \sin(t)}{dt} = \cos(t) \quad \text{und} \quad \frac{d \cos(t)}{dt} = -\sin(t).$$

So ergeben sich die Signalverläufe des Bildes.

Der Übergang ins Zeigerdiagramm erfolgt mit der Formel:

$$U = \hat{U}_0 \cdot e^{j \cdot \omega \cdot t}.$$



Mit der Phasenverschiebung  $\varphi = \pm 90^\circ$  gilt daher für die komplexen Widerstände von Kapazitäten und Induktivitäten

$$\mathfrak{R}_C = \frac{1}{j \cdot \omega \cdot C} \quad \text{und} \quad \mathfrak{R}_L = j \cdot \omega \cdot L.$$

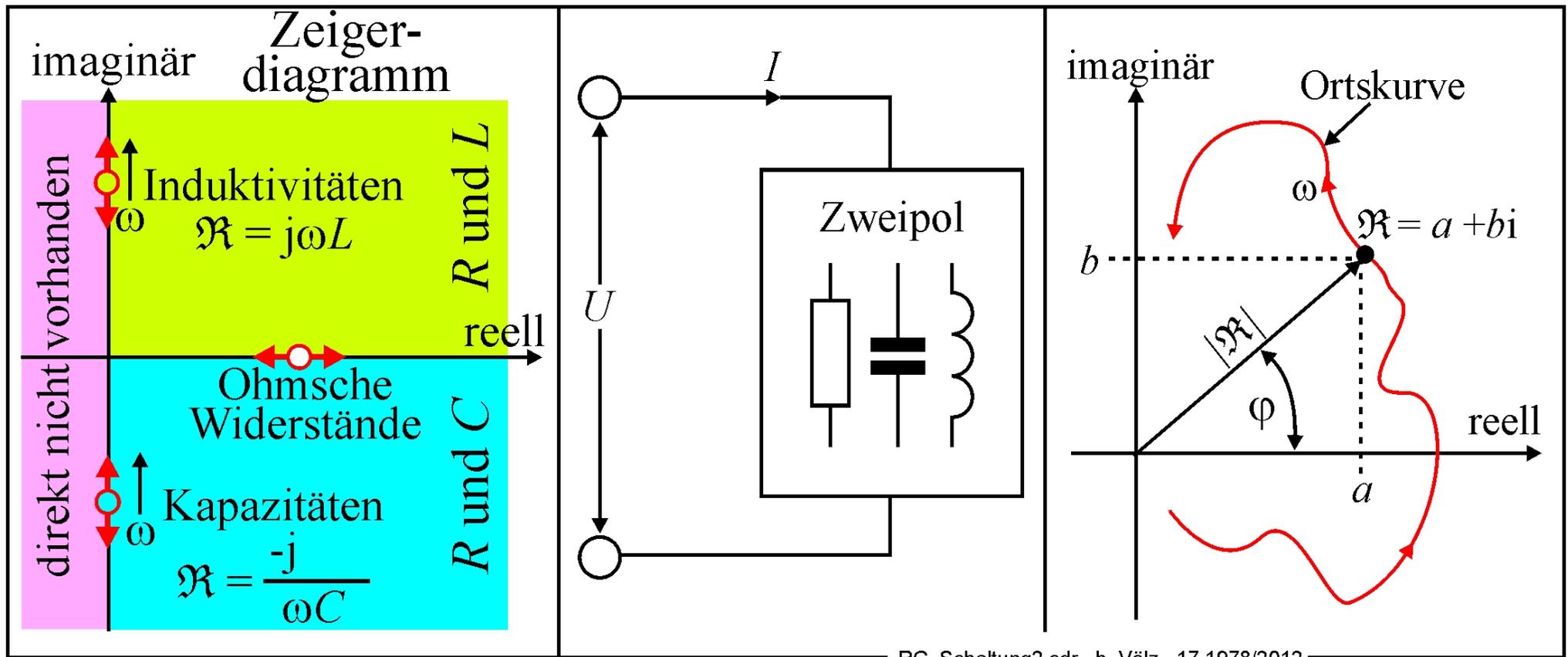
Werden die Ergebnisse ins **Zeigerdiagramm** übertragen, so entstehen die allgemeinen Zusammenhänge.

Nur auf den Achsen befinden sich jeweils  $R$ ,  $C$  oder  $L$ .

Im grünen Bereich „erscheinen“ nur  $R' + j \cdot \omega \cdot L'$ , im blauen  $R' + 1/(j \cdot \omega \cdot C')$

Für eine Umrechnung gilt:  $\mathcal{R} = |\mathcal{R}| \cdot e^{j \cdot \varphi} = a \cdot \cos(\varphi) + b \cdot j \cdot \sin(\varphi)$

Als Bauelemente gibt es **keine negativen Widerstände**. Sie lassen sich nur elektronisch erzeugen (s. u.)



# Knickkennlinien

sind eine Vereinfachung des Frequenzganges und ermöglichen schnelle Überblick.

Beim Serien-Schwingkreis ist zu beachten, dass für  $R \rightarrow 0$  der Strom  $\infty$  werden würde! Jedoch Induktivitäten haben immer Verluste.

$$\frac{\Re}{R} = 1 + G \left( \Omega - \frac{1}{\Omega} \right)$$

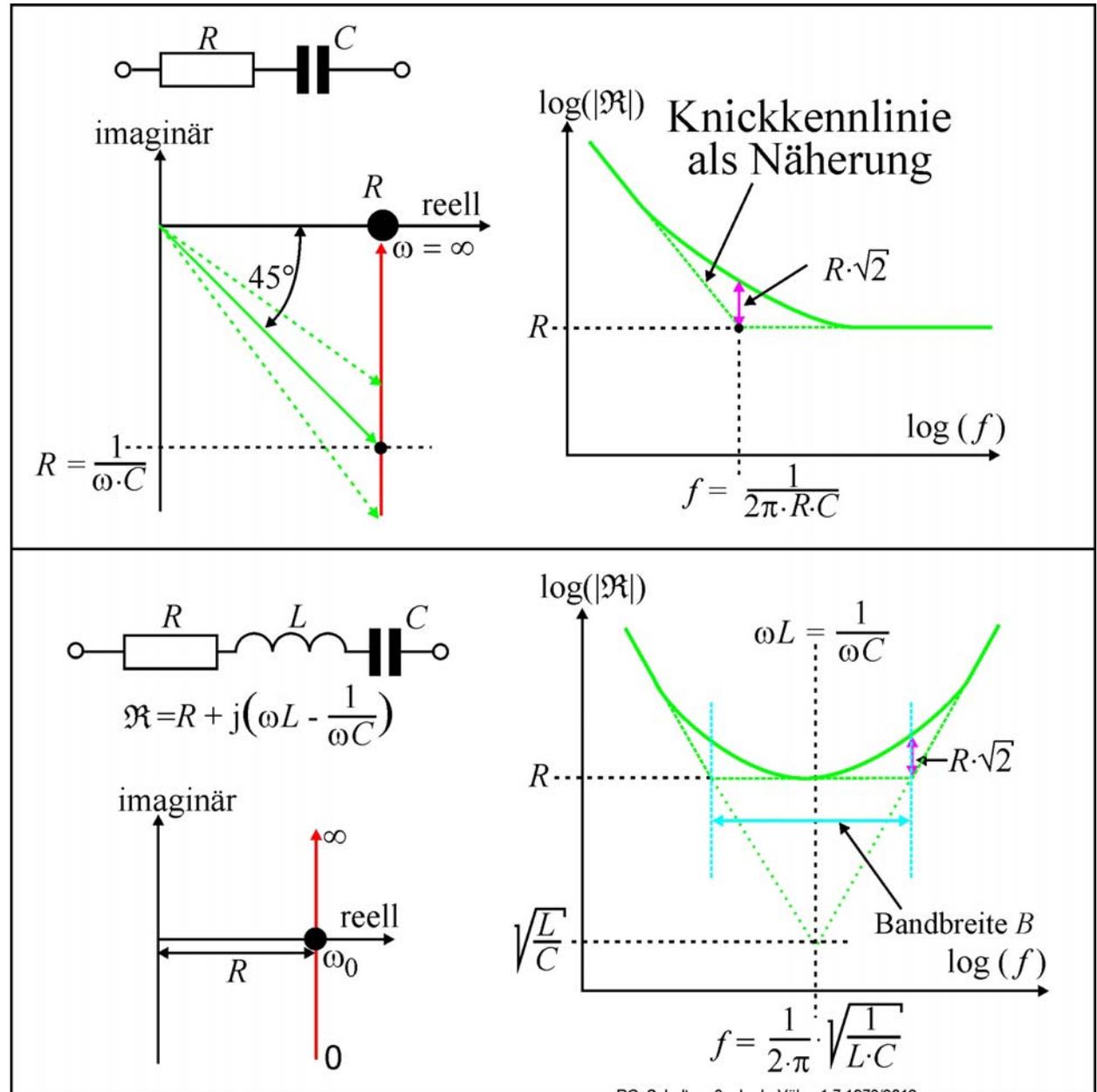
Mit

$$\Omega = \frac{f}{f_0} \quad \text{und} \quad G = \frac{1}{R} \cdot \sqrt{\frac{L}{C}}$$

folgt für die relative Bandbreite

$$b = \frac{B}{f_0} = \frac{1}{G} = R \cdot \sqrt{\frac{C}{L}}$$

Das folgende Bild vermittelt eine Zusammenstellung für die einfachen Zusammenschaltungen von Bauelementen.



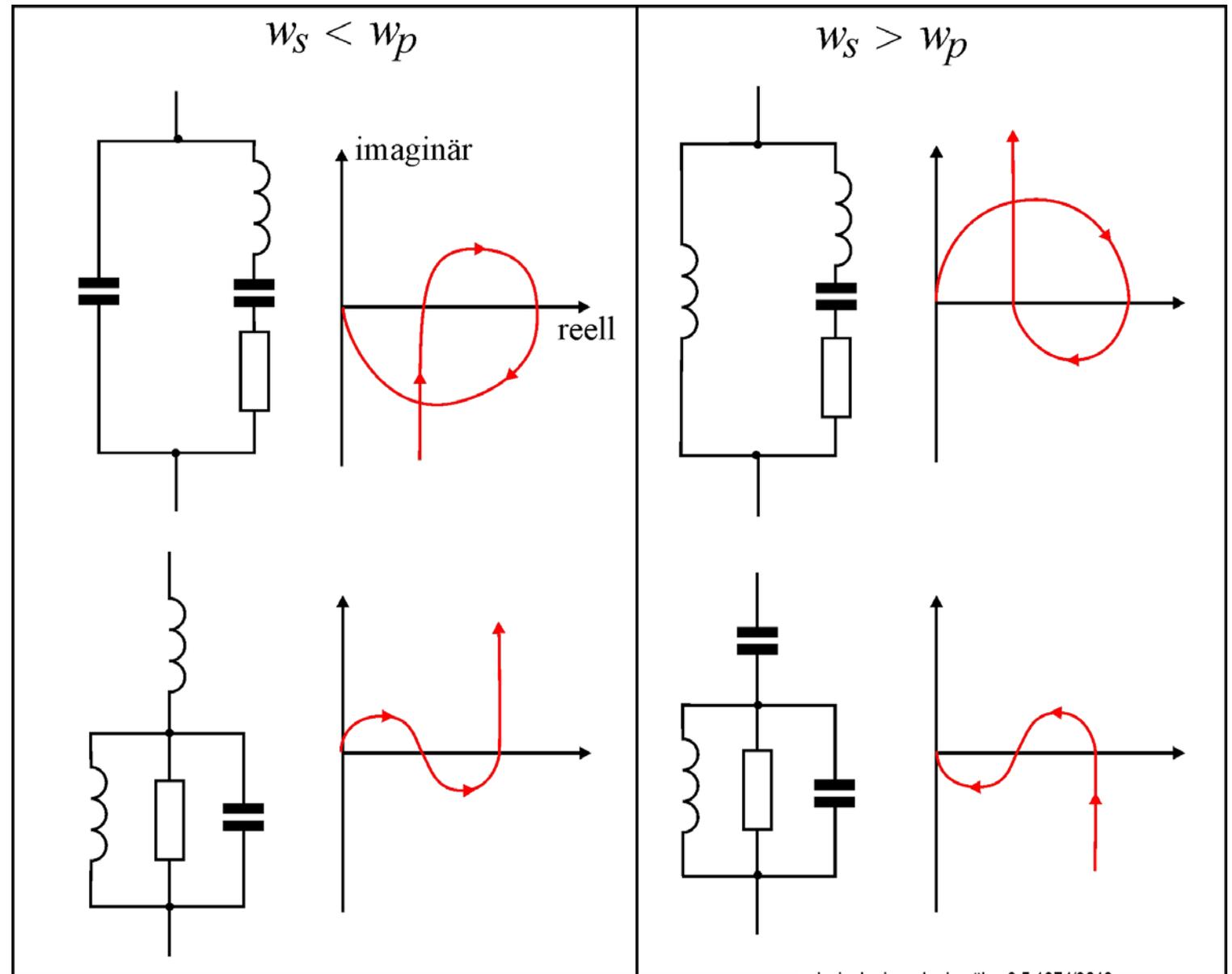
Schaltung						
Ortskurve						
Knick-Kennlinie						
Phasenwinkel						
$\mathfrak{R}$	$R + \frac{1}{1+j\omega C}$	$R + j\omega L$	$R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$	$\frac{R}{1+j\omega RC}$	$\frac{j\omega LR}{R+j\omega L}$	$\frac{1}{\frac{1}{R} + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}$
$ \mathfrak{R} $	$\sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}$	$\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}$	$\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$	$\frac{R}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}$	$\frac{\omega LR}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$	$\frac{1}{\frac{1}{R^2} + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}$
$\tan \varphi$	$\frac{1}{\omega RC}$	$\frac{\omega L}{R}$	$\frac{\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}{R}$	$-\omega RC$	$-\frac{R}{\omega L}$	$\frac{R}{\left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)}$

RC\_Schaltung5.cdr h. Völz 17.1978/2012

Dies sind Beispiele für komplizierte Ortskurven, die sich bereits bei vier Bauelementen ergeben.

Sie sind dadurch gekennzeichnet, dass sie eine Serien- und eine Parallel-Resonanz  $\omega_s$  bzw.  $\omega_p$  besitzen.

Ihre Beziehung bestimmt die Reihenfolge für das Passieren der reellen Achse.



schwingkreise.cdr h. vözl 3.5.1974/2012

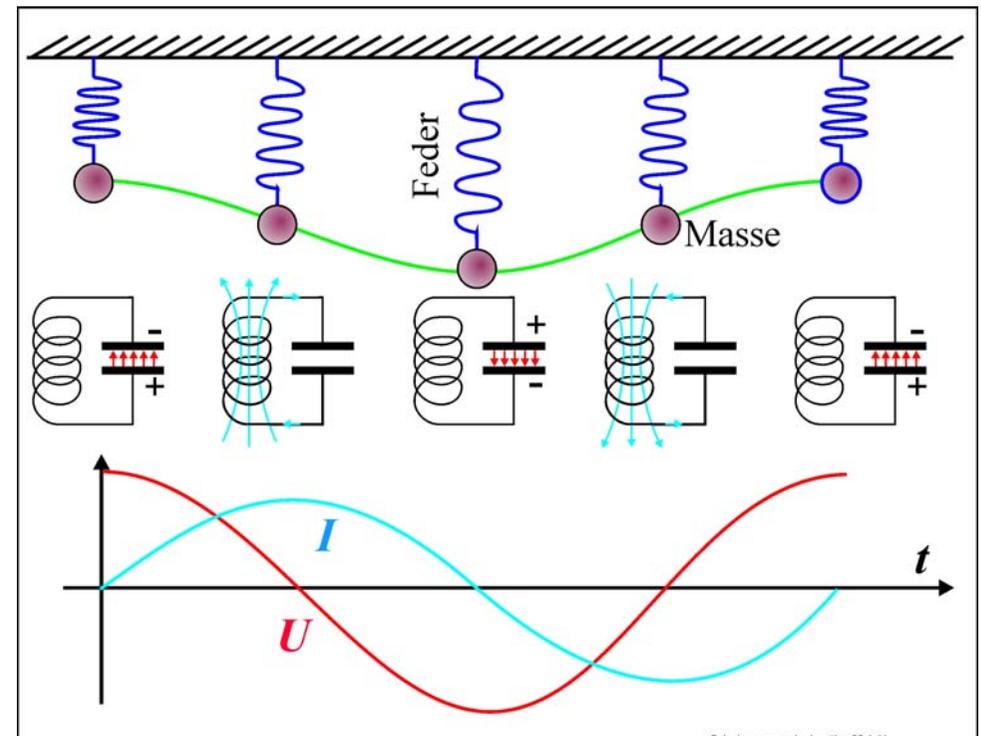
# Ergänzungen zur Resonanz

Ein *verlustfreier Schwingkreis* ist nur theoretisch möglich.  
Er besteht *nur* aus einer Induktivität und Kapazität.  
Wird bei ihm der Kondensator einmal aufgeladen, so pendelt  
die elektrische *Energie periodisch* zwischen L und C.  
Auch hierbei gibt es eine Phasenverschiebung  $U \Rightarrow I$  von  $90^\circ$ .

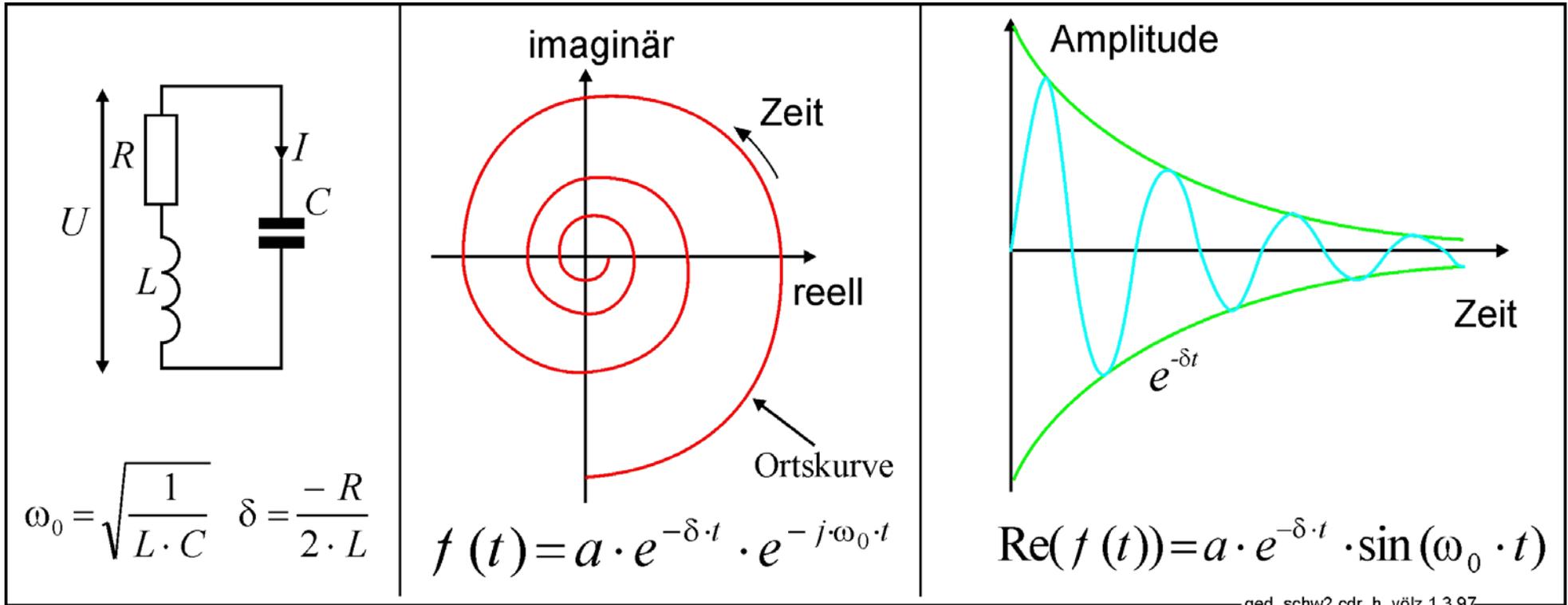
Es besteht Ähnlichkeit zu einem *Feder-Masse-System*.

Treten *Verluste* auf, z. B. infolge eines Widerstands, so klingt  
die *Schwingung gedämpft* ab.

Bereits hier sei erwähnt, dass zu Resonanz-Erscheinungen  
nicht unbedingt ein *Energie-Pendeln* erforderlich ist.  
Mittels Verstärker ist die Schwingungserzeugung auch anders,  
z. B. nur mittels RC-Glieder möglich.  
Beispiele sind der *Multivibrator* und *RC-Generator* (s. u.).



Beispiel für einen Schwingkreis mit gedämpfter Schwingung entsprechend  $e^{-\delta t}$



# Gliederung

1. Einführung
2. Signale
3. Zweipole
4. Vierpole
5. Wellen

# Vom Zwei- zum Vierpol

Zweipole sind meist komplexe Widerstände, deren Eingangswert eine *Spannung*  $U$  und „Ausgangs-“, Wert ein *Strom*  $I$  ist.

Viele Vierpole sind ihnen äquivalent, haben eine Ein- und Ausgang und betreffen meist Spannungen,  $U_E$  und  $U_A$ .

Das gilt insbesondere für Schaltungen die nur aus den Bauelementen  $R$ ,  $C$  und  $L$  bestehen.

Dabei gibt es häufig gilt einen Übergang vom komplexen Widerstand  $\mathfrak{R}$  zum Übertragungsmaß  $\mathfrak{K}$ :

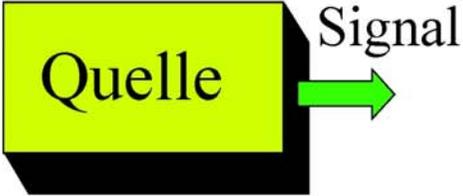
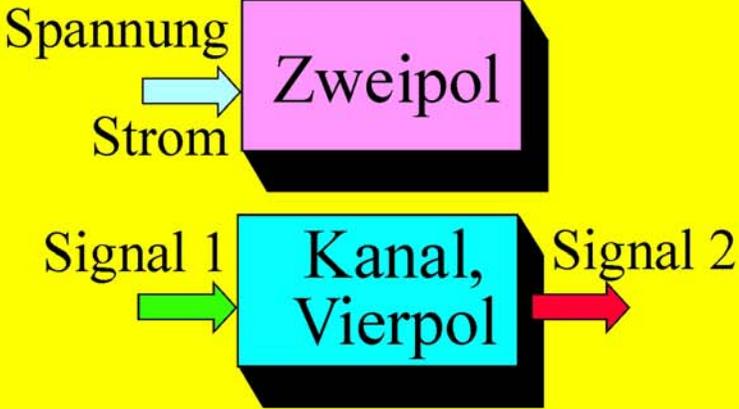
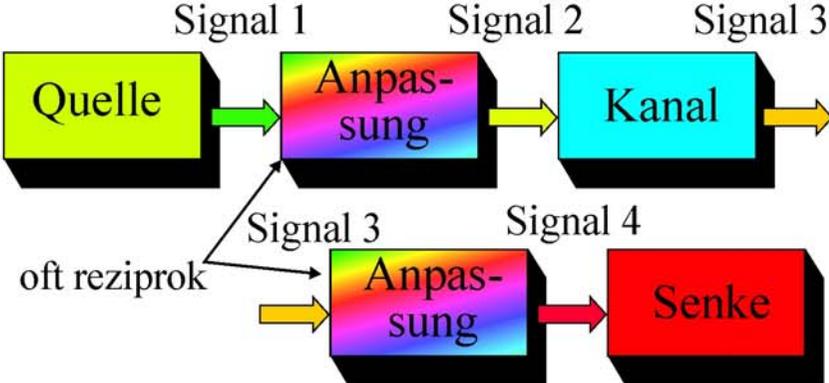
$$\mathfrak{R} = \frac{U}{I} \text{ geht über in } \frac{1}{\mathfrak{K}} = \frac{U_E}{U_A}.$$

Für  $\mathfrak{R}$  gibt es keine Bauelemente mit *negativem Widerstand*, sie können aber *elektronisch erzeugt* werden (s. u.).

Für  $\mathfrak{K}$  sind dagegen alle Werte möglich. Negative Werte treten u. a. bei Phasenverschiebungen von  $180^\circ < \varphi < 360^\circ$  auf.

Doch es gibt auch viele Vierpole die *völlig andere Eigenschaften* als bei  $\mathfrak{K}$  besitzen.

U. a. dienen sie zur *Anpassung* zwischen Quelle, Sender und dem Übertragungskanal und erneut zum Empfänger.

 <p>A yellow 3D box labeled 'Quelle' has a green arrow pointing to the right labeled 'Signal'.</p>	<p><b>Signaleigenschaften u. a.:</b>  analog, diskret, digital  Signalverlauf <math>f(t)</math>  Delta- u. Rampenfunktion  Transformationen u. a.  Spektrum (Amplitude, Phase) <math>a(\omega)</math>, <math>j(\omega)</math>  Korrelation <math>x(t)</math>; Häufigkeiten <math>w(a, \omega)</math>  Entropie</p>
 <p>The top diagram shows a pink 3D box labeled 'Zweipol' with a light blue arrow labeled 'Spannung' and a light blue arrow labeled 'Strom' pointing into it from the left. The bottom diagram shows a cyan 3D box labeled 'Kanal, Vierpol' with a green arrow labeled 'Signal 1' pointing into it from the left and a red arrow labeled 'Signal 2' pointing out of it to the right.</p>	<p><b>Kanal-, Zwei-, Vierpoleigenschaften u. a.:</b>  Übertragungsmaß bzw. Impedanz <math>k(\omega)</math> bzw. <math>R(\omega)</math>  Ortskurve, Pol-Nullstellen- bzw. Smith-Diagramm  Einschwingverhalten, Impulsantwort  Nichtlinearitäten, Zeitabhängigkeit  Stabilität, Kausalität, Determiniertheit  Kanalkapazität  <b>typisch</b> sind Minimalphase, Allpaß, Aperturfunktion  realisiert <b>als:</b> Kanal, Filter, Bauelemente, Speicher</p>
 <p>The diagram shows a signal path. It starts with a yellow 'Quelle' box emitting 'Signal 1' (green arrow) into a rainbow-colored 'Anpassung' box. From there, 'Signal 2' (yellow arrow) goes to a cyan 'Kanal' box. From the 'Kanal', 'Signal 3' (yellow arrow) goes to another rainbow-colored 'Anpassung' box. From this second 'Anpassung' box, 'Signal 4' (red arrow) goes to a red 'Senke' box. A note 'oft reziprok' with arrows points to both 'Anpassung' boxes.</p>	<p><b>erfolgt u. a. durch:</b>  Modulationen, Codierungen, Komprimierungen  Quantisierung, Digitalisierung  Signaltransformation, -adaption, -erkennung  <b>typisch</b> sind z. B.:  Wirkungsgrad  Störabstand, Bandbreite, Übertragungszeit  Information, Redundanz, Relevanz</p>

# Vierpol-Varianten

Ein Vierpol hat **Eingangsgrößen**  $x(t)$ , die er verändert und danach als **Ausgangsgrößen**  $y(t)$  weitergibt.  $x$ ,  $y$  und  $t$  können dabei sowohl **kontinuierlich** als auch **diskret** bzw. **digital** sein.

Bezüglich der Veränderung gibt es sehr viele **Möglichkeiten** und **Anwendungen**:

1. **Frequenzgang** und **Einschwingvorgänge** bei RCL-Gliedern.
2. **Modulationen** von Trägern zur Übertragung oder Speicherung von Signalen.
3. **Codierungen**.
4. **Kanalkapazität**.
5. **Demodulation** und **Decodierung**.
6. **Speicherung**.

Auch die folgenden Gebiete sind wichtig. Aber wegen notwendiger Voraussetzungen werden sie erst später behandelt.

7. **Verstärkerschaltungen**, einschließlich Oszillatoren und Generatoren, u. a. Multivibratoren.
8. **AD-** und **DA-Umsetzer** (analog  $\Rightarrow$  digital bzw. digital  $\Rightarrow$  analog).
9. **Fehlerkorrektur**, **Komprimierung** und **Datenschutz** (Kryptografie).
10. **Dynamikregler** und **Verzerrer**.
11. **Signalwandler**, wie Sensoren (u. a. Mikrofone und Kameras), Aktoren (u. a. Lautsprecher, Bildschirme und Motoren), Antennen usw.

# 1. Frequenzgänge von RCL-Schaltungen

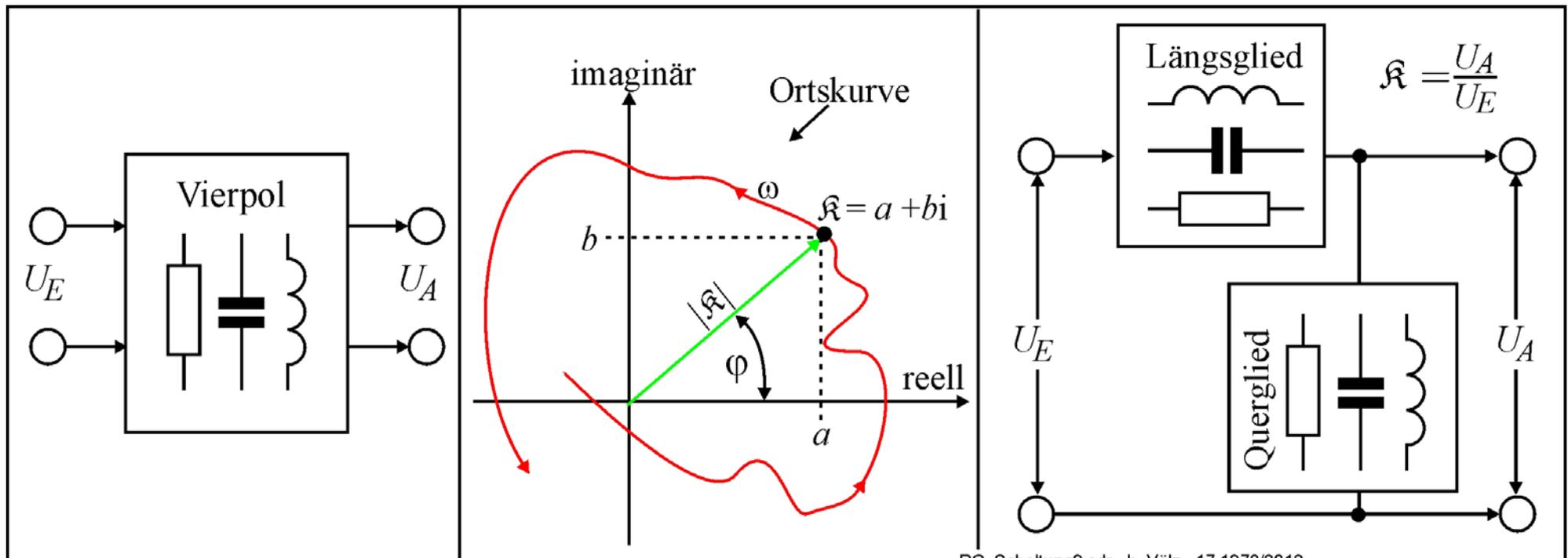
Ein **RCL-Zweipol** ist ein **komplexer Widerstand**  $\mathfrak{K}$ , der aus mehreren  $R$ ,  $C$  und  $L$  zusammenschaltet ist.

Ein **RCL-Vierpol** ist dagegen im einfachsten Fall ein komplexer **Spannungsteiler** mit dem **Übertragungsmaß**  $\mathfrak{K}$ .

Seine Ortskurve kann alle **vier Quadranten der Gauß-Ebene** erreichen.

Besonders einfach und dennoch wichtig sind die aus nur **zwei Bauelementen** bestehenden **Tief- und Hochpässe**.

Ihre Ortskurven und Knickkennlinien entsprechen ähnlich aufgebauten komplexen Widerständen.



RC\_Schaltung9.cdr h. Völz 17.1978/2012

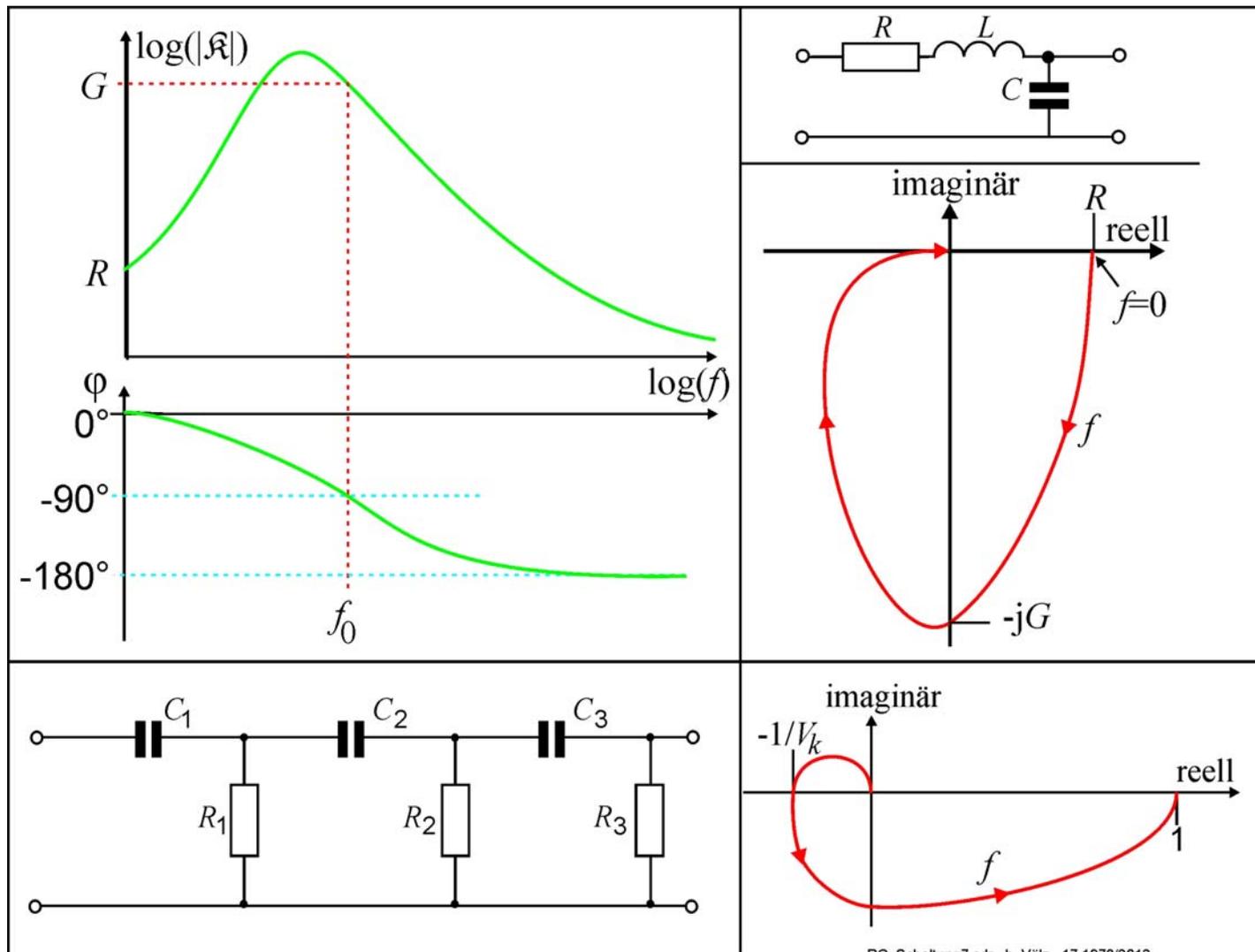
	Tiefpass		Hochpass	
Schaltung				
$\mathcal{K}$	$\frac{1}{1+j\omega RC}$	$\frac{1}{1+j\omega L/R}$	$\frac{1}{1+\frac{1}{j\omega RC}}$	$\frac{1}{1+\frac{R}{j\omega L}}$
Sperrbereich	$f > \frac{1}{2\pi RC}$	$f > \frac{R}{2\pi L}$	$f < \frac{1}{2\pi RC}$	$f < \frac{R}{2\pi L}$
Knick-Kennlinie				
entspricht Zweipol Ortskurve				

RC\_Schaltung5.cdr h. Völz 17.1978/2012

# Zwei Beispiele für komplizierte Ortskurven

Bei der „*Schwingkreisschaltung*“ ist die erhebliche Resonanz-Überhöhung mit einer Phasenverschiebung von ca.  $-90^\circ$  zu beachten.

Die *dreifache RC-Hochpass-Kette* erreicht sogar eine maximale Phasenverschiebung von  $-270^\circ$  ( $+90^\circ$ ). Zum negativ reellen Wert gehört eine Phasenverschiebung von  $\pm 180^\circ$ . Sie wird bei *Phasen-Schieber-Generatoren* zur Erzeugung dieser Frequenz benutzt. Die dabei notwendige kritische Verstärkung beträgt  $V_k$ .

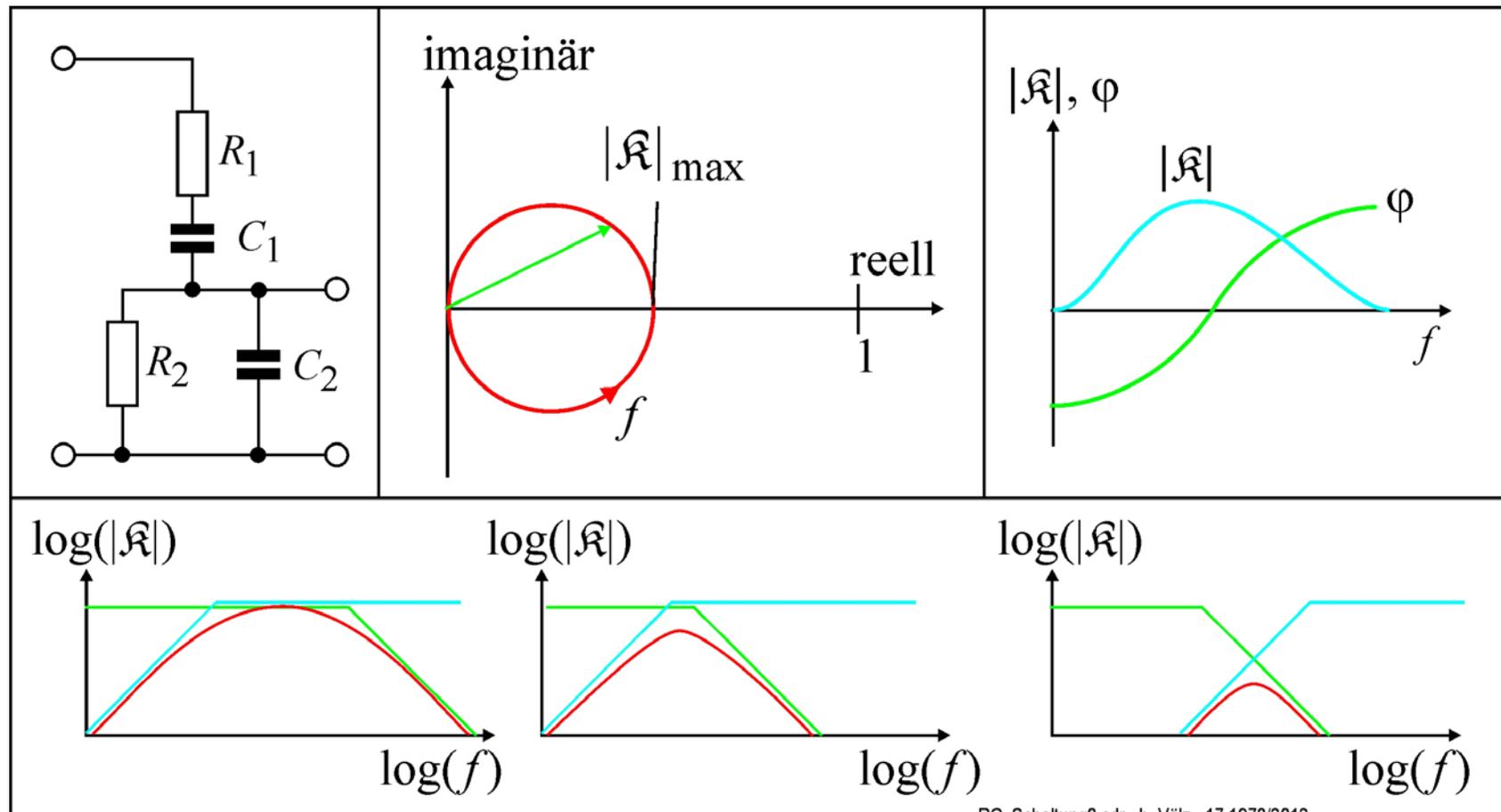


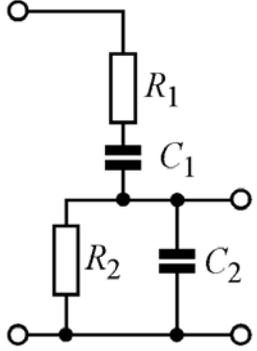
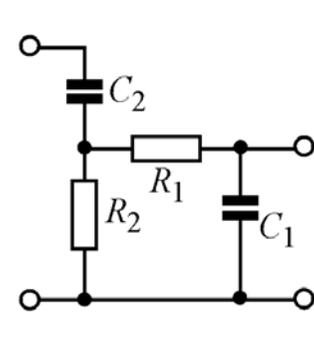
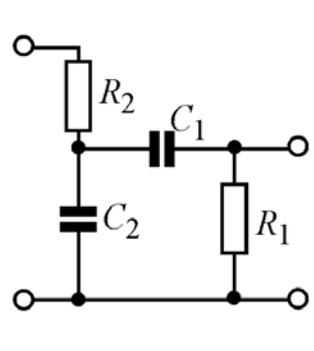
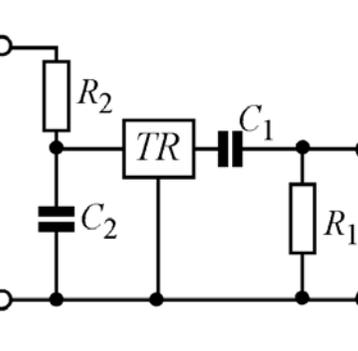
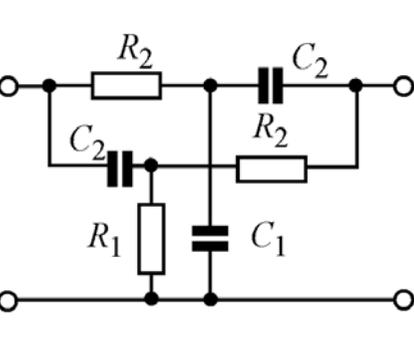
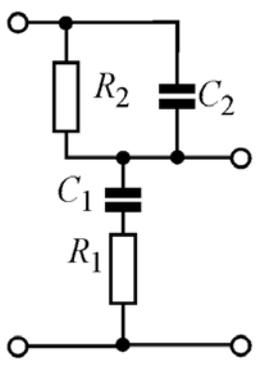
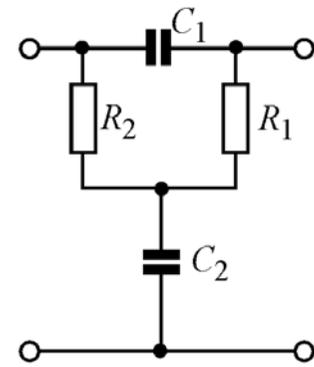
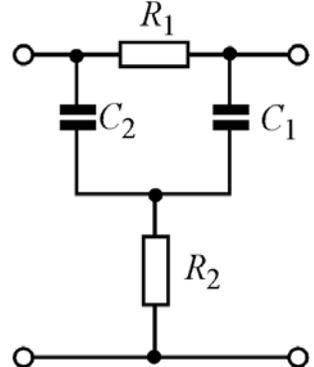
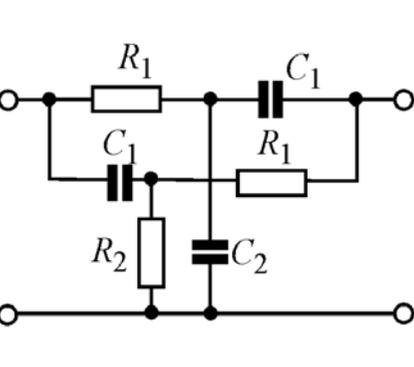
RC\_Schaltung7.cdr h. Völz 17.1978/2012

# Bandfilter mit RC-Schaltungen

Für sie existieren mehrere Schaltungen (s. u.), die meist aus einem *RC-Hoch-* und *-Tiefpass* bestehen. Ihre Wirkung ist mittels *kombinierter Knickkennlinien* darstellbar.

Mit ihnen arbeiten die die RC-Generatoren bei der *Phasenverschiebung*  $0^\circ$ . Es muss dabei gelten:  $V_k = 1/|\mathcal{K}|_{\max}$



Schaltung					
$V_k$	$1+r+c$	$1 + \frac{1+r}{c}$	$1 + \frac{1+c}{r}$	$1 + \frac{r}{c}$	$1 + \frac{1}{1+r+c}$
$S$	$\frac{\sqrt{r \cdot c}}{1+r+c}$			$\frac{\sqrt{r \cdot c}}{r+c}$	$\frac{\sqrt{r \cdot c}}{2+r+c}$
Umkehrung				<p style="text-align: center;">nicht vorhanden</p> <p style="text-align: center;"><b>Definitionen</b>  <math>r = R1/R2</math>  <math>c = C2/C1</math>  TR = Trennstufe</p>	
					

RC\_Schaltung10.cdr h. Völz 17.1978/2012

$S$  ist die Steilheit des Null-Durchganges.

# Impulse und Einschwingen

Ein Impuls besteht aus einer *Vielzahl harmonischer Schwingungen*

Sie gelangen gemäß dem Frequenzgang mit anderer Amplitude und Phase zum Ausgang.

Das wird bei einem Impuls besonders deutlich sichtbar.

Für einen **RC-Tiefpass** gilt:  $U_C = U_0 - U_R$  und  $U_R = I \cdot R$ .

Wegen

$$I = C \cdot \frac{dU_C}{dt}$$

folgt dann die Differentialgleichung

$$U_C = U_0 - R \cdot C \cdot \frac{dU_C}{dt}.$$

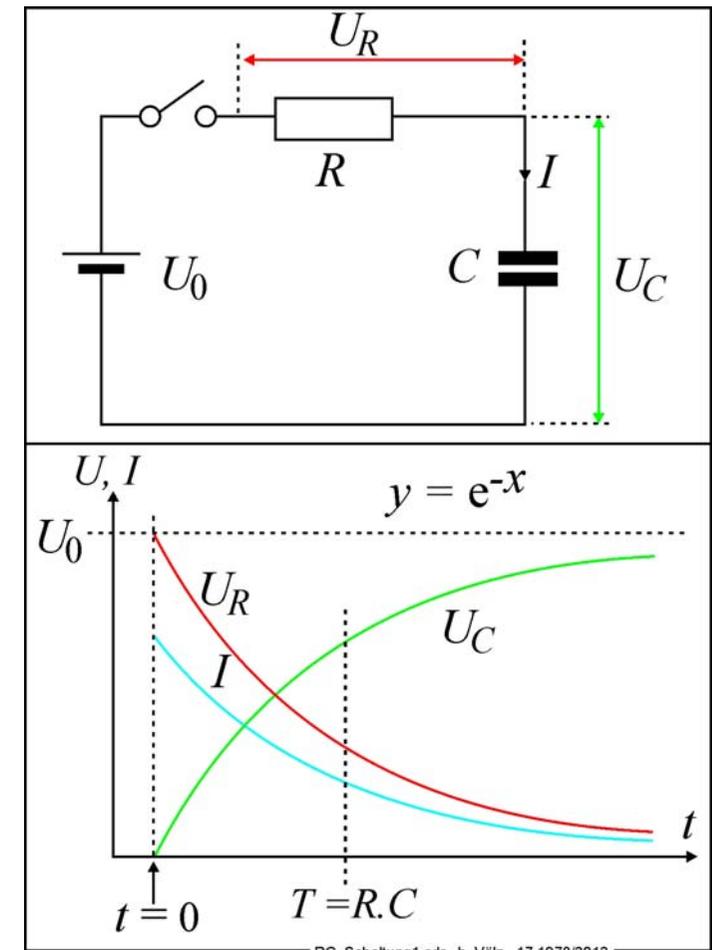
mit der Lösung

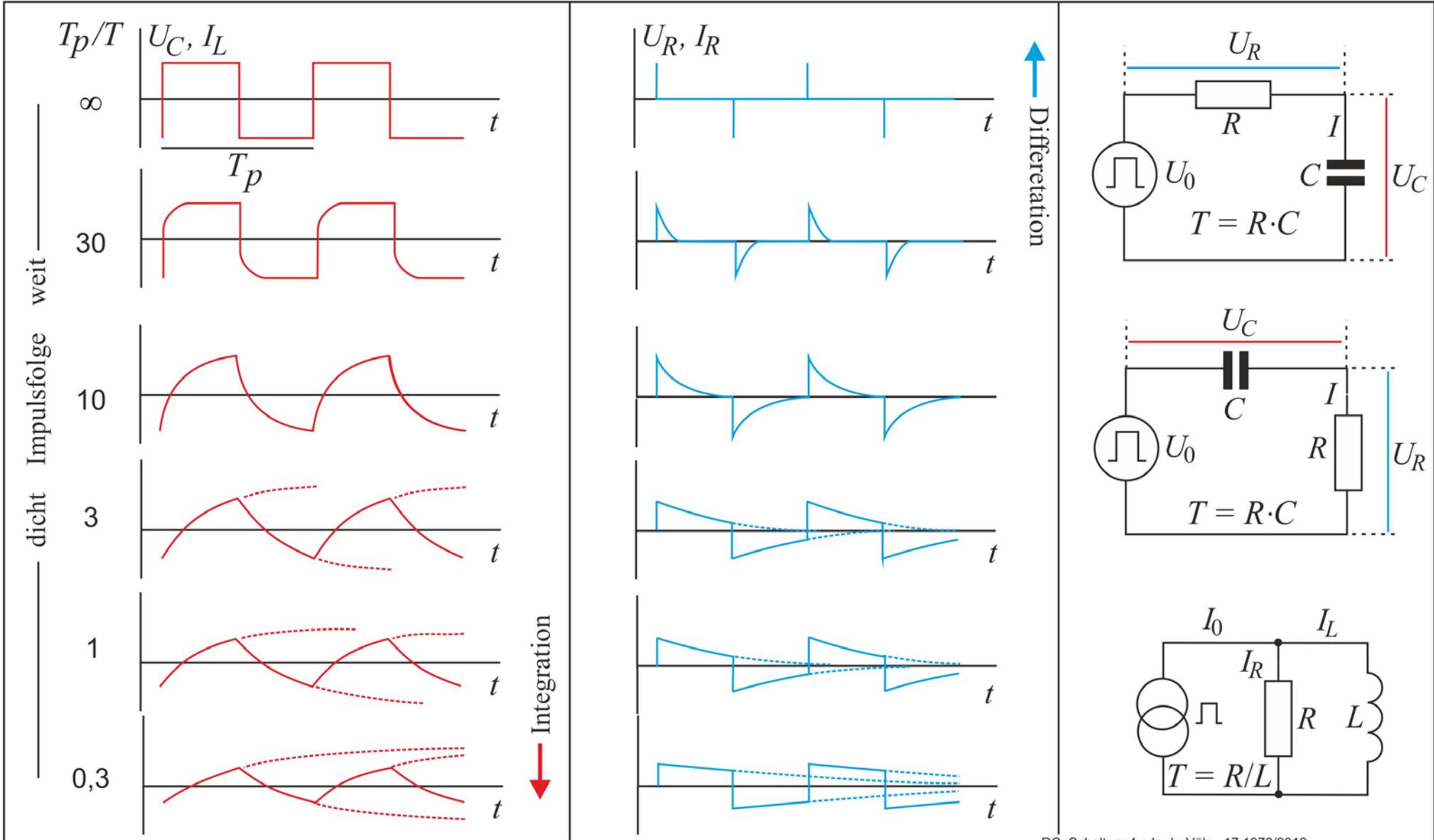
$$U_C = U_0 \left( 1 - e^{-\frac{t}{R \cdot C}} \right).$$

Darin  $T = R \cdot C$  die *Zeitkonstante* der Tiefpass-Schaltung.

Bei einer Induktivität ergibt sich analog  $T = L/R$

Das nächste Bild zeigt, wie sich dies bei Rechteckschwingungen auswirkt.





RC\_Schaltung4.cdr h. Völz 17.1978/2012

# Einschwingen bei einem Schwingkreis

Die Differentialgleichung wird am besten bzgl. der Ladung  $Q$  aufgestellt ( $I = dQ/dt$ )

$$L \frac{d^2 Q}{dt^2} + R \frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{C} = U(t)$$

Der übliche *Lösung-Ansatz*  $Q = A \cdot e^{pt}$  führt zur *quadratische Gleichung* mit den Lösungen

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}$$

Die  $p_i$  sind *komplexe Frequenzen* gemäß  $p_i = \delta \pm j\omega_0$  mit

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}} \text{ und } \delta = -\frac{R}{2L}$$

**Zum** Zeitpunkt  $t = 0$  wird die Spannung von Null auf  $U$  umgeschaltet (Stoßanregung, Rampenfunktion).

Dann ergeben sich dann drei Fälle:

$$\frac{R^2}{4L^2} \left\{ \begin{array}{l} < \\ = \\ > \end{array} \right\} \frac{1}{LC} \text{ bzw. } R\sqrt{\frac{C}{L}} \left\{ \begin{array}{l} < \\ = \\ > \end{array} \right\} 2 \cdot \left\{ \begin{array}{l} \text{gedämpfte Schwingung} \\ \text{aperiodischer Grenzfall} \\ \text{aperiodische Schwingung} \end{array} \right\}.$$

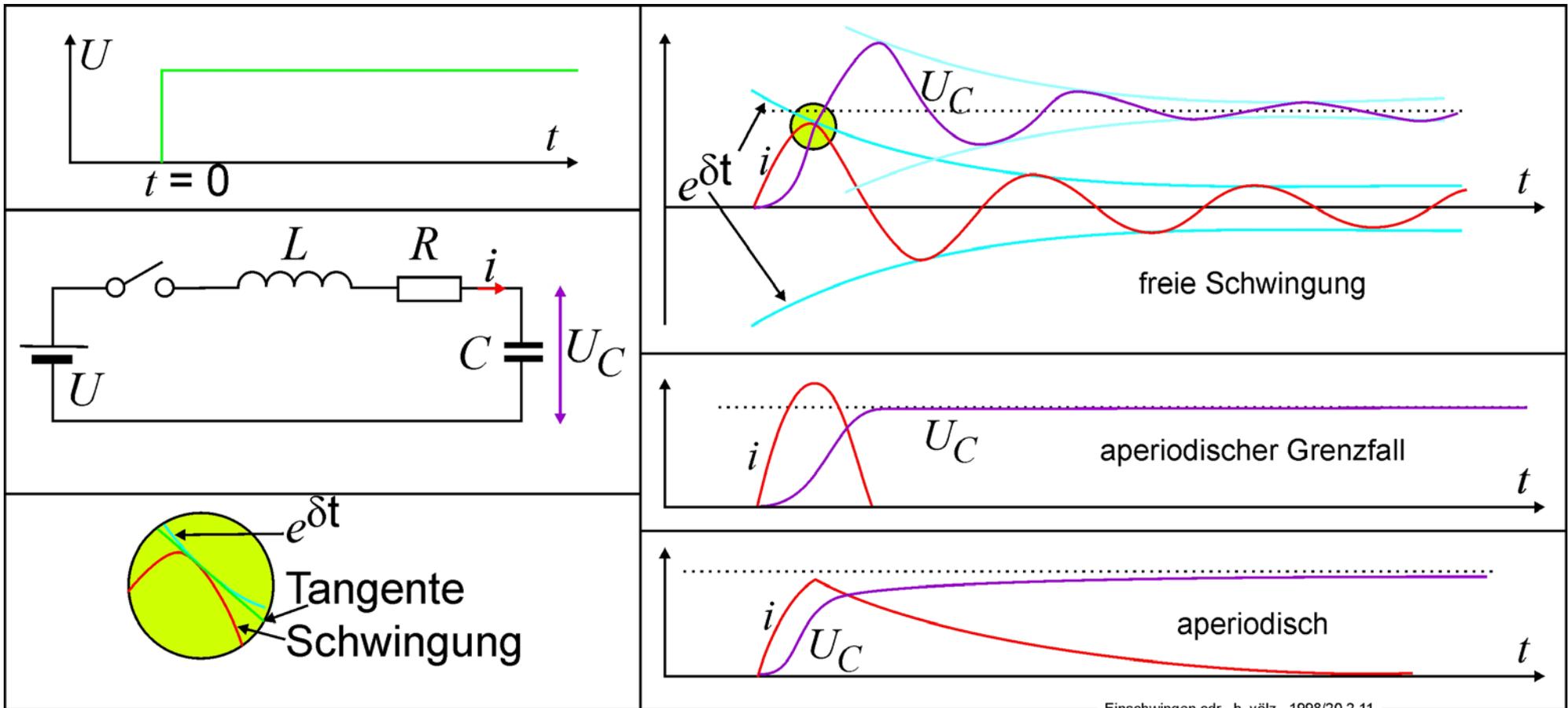
Beim aperiodischen Grenzfall kommt das System *in der kürzestmöglichen Zeit zur Ruhe*.

Dies ist z. B. für *Messinstrumente* usw. wichtig, für den *Menschen* ist er weniger vorteilhaft.

Eine *Bahn bremst*, der Mensch wird nach vorn bewegt: Die Bahn kommt zur Ruhe, der Mensch fällt zurück.

Hier ist *aperiodisch* günstiger: Bis zur Ruhe dauert es zwar *länger*, es treten aber geringere *Beschleunigungen* auf

So sind vorwiegend *Stoßdämpfer* konstruiert.



Achtung! Erster Spannungs-Sprung bei der freien Schwingung beträgt  $\pm U = 2U$  (vgl. S. 41).  
 Im aperiodischen Fall wird nur  $U$  erreicht.

# Einschwingen bei Systemen

Die Betrachtungen zum Einschwingen führen auch mittelbar zum Sampling-Theorem.

Die ersten Untersuchungen hierzu erfolgten experimentell 1924 von KARL KÜPFMÜLLER (1897- 1977).

Er zeigte, dass zwischen der Bandbreite  $B$  eines Kanals der mindestens notwendigen Einschwinddauer  $\tau$  gilt:

$$2 \cdot \tau = 1/B.$$

1930 folgerte HARRY NYQUIST (1889 - 1976) Ähnliches bei seinen Versuchen zur Pulsmodulation.

Erste theoretische Arbeiten führte 1933 VLADIMIR ALEXANDROWITSCH KOTELNIKOW (1908 - 2005) durch.

Bei der höchsten Signalfrequenz  $f_S$  muss für den digitalen Probenabstand  $\Delta T = 1/f_S$  gelten.

Diese Ergebnisse blieben bis in die 70er Jahre außerhalb von Russland unbekannt.

So schuf 1940 (1948?) unabhängig davon CLAUDE SHANNON (1916 - 2001) seine Theorie.

Für eine fehlerfreie Rekonstruktion kontinuierlicher Signale mit Bandbreite  $B$  muss für den Probenabstand gelten

$$\Delta T \leq \frac{1}{2 \cdot B}.$$

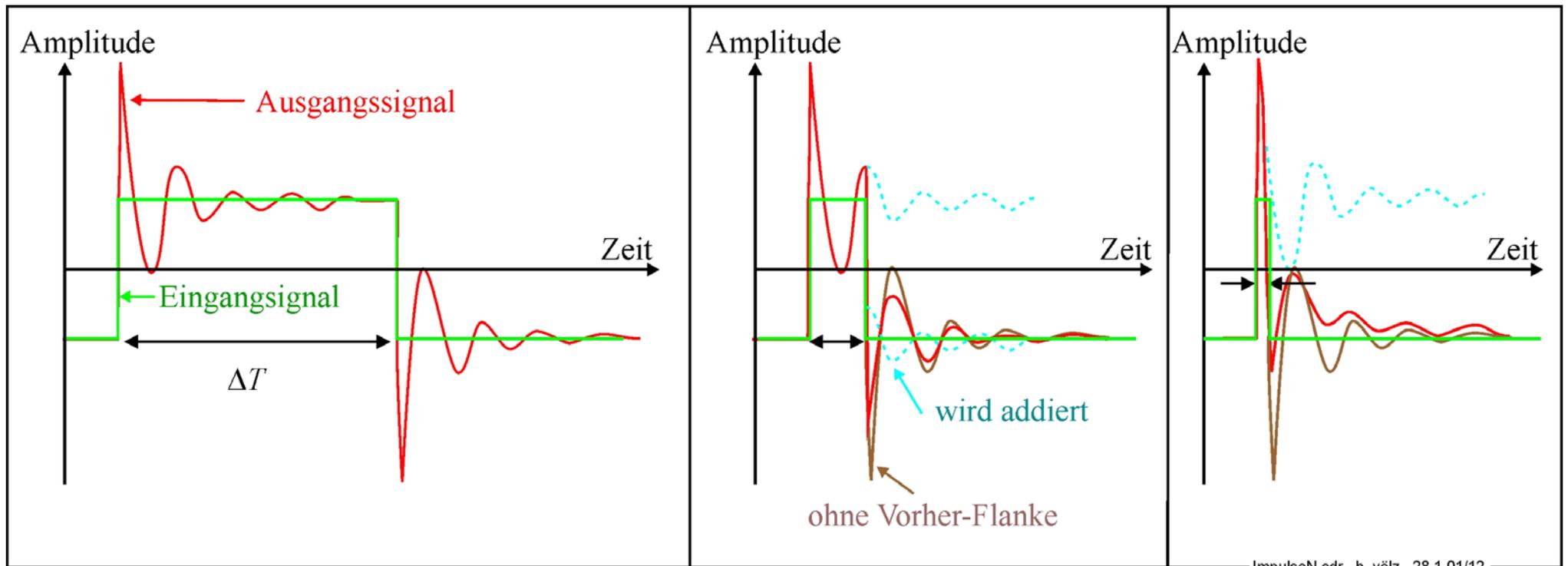
Erst sehr spät wurde die Analogie HEISENBERG-Unschärfe erkannt (WERNER KARL HEISENBERG; 1901 - 1976).

Für zwei konjugierten Größen, z. B. Zeit  $\Delta t$  und Energie  $\Delta E$  gilt mit der PLANCK-Konstante  $h$ :  $\Delta t \cdot \Delta E \geq h/2$ .

Ein Photon der Frequenz  $\nu$  besitzt die Energie  $\Delta E = h \cdot \nu$ .

Aus beiden Gleichungen folgt unmittelbar das Sampling-Theorem.

Je kürzer der Impulsabstand ist, desto mehr beeinflussen sich die beiden Einschwingvorgänge. Schließlich sind die beiden Impulsflanken nicht mehr detektierbar.



## 2. Modulationen

Bisher sind nur einfache Schwingungen, wie Sinus- oder Rechteck-Signale behandelt.

Damit sind aber nur *eine* Amplitude und Frequenz zu übertragen.

Um mehr Information zu übermitteln sind u.a. Modulationen oder Codierungen erforderlich.

Dazu müssen unterschieden werden:

- Ein **Träger**: Bei *kontinuierlichen* Verfahren die **Trägerfrequenz**  $f_T$  bzw.  $\omega_T$ , bei *digitalen* Verfahren die **Taktfrequenz**  $f_T$  bzw. die Taktzeit  $t_T$ .
- Das die **Information** enthaltende **Signal**  $X_m$ : *kontinuierlich* aus  $n$  Signalfrequenzen  $f_{mi}$  bzw.  $\omega_{mi}$  oder *digital* aus verschiedenen Impulsen und Folgen.

Für die möglichen Kombinationen gilt:

		Information Signal $X_m$	
		<i>kontinuierlich</i>	<i>diskret - digital</i>
Träger	<i>kontinuierlich</i>	AM, FM (S.60ff.), PM (Phasen).	Frequenz- Amplitudenumtastung, ASK, PSK, u. a, Quadratur-, Trellis-Modulationen. DAB
	<i>diskret - digital</i>	Grenze gemäß Sampling-Theorem. s. S. 18/72, Pulsmodulationen S. 66	<b>Codierungen</b> , Rechnersignale (s. S. 67ff. ), teilweise auch Pulsmodulationen.

Im Folgenden werden die beiden *grün* unterlegten Varianten behandelt.

Die *orange* unterlegten Techniken sind recht kompliziert, daher wird hier auf sie verzichtet, s. u. a. [Friedrichs].

Es bedeuten: ASK = amplitude shift keying, PSK = phase SK, englisch Trellis = Gitter

# Signal und Träger sind kontinuierlich

Der *Träger* besitze die Kreisfrequenz sei  $\omega_T$ , den Anfangswinkel  $\varphi_T$  und die Amplitude  $u_T$ :

**Fehler! Es ist nicht möglich, durch die Bearbeitung von Feldfunktionen Objekte zu erstellen.**

Besonders einfach und übersichtlich ist es, nur *eine modulierende Signalfrequenz*  $\omega_m$  anzunehmen.

Sie besitze die Amplitude  $u_0$  und den Anfangsphasenwinkel  $\varphi_m$ . Dann gilt:

**Fehler! Es ist nicht möglich, durch die Bearbeitung von Feldfunktionen Objekte zu erstellen.**

Mit ihr sind *drei Modulationen* möglich:

- *Amplituden-Modulation AM*:  $u_T = m \cdot u_m$ . Dabei ist  $m \leq 1$  der *Modulationsgrad*.
- *Frequenz-Modulation FM*:  $\omega_T = \omega_0 + \Delta\omega$  mit  $\Delta\omega = k \cdot u_m$ .  $\Delta\omega$  ist der *Frequenzhub* und  $k$  ein Modulationsfaktor.
- *Phasen-Modulation PM*: entspricht der Frequenzmodulation, bei *Differenzierung des Signals* ( $d\varphi/dt = \omega$ ). Auf sie kann daher im Weiteren verzichtet werden. Sie wird u. a. bei den PSK (pulse shift keying) angewendet.

# Amplituden-Modulation AM

Hier wird der Amplituden-Faktor  $u_T$  gemäß dem Signal  $u_m(t)$  geändert und es gilt:

$$u(t) = u_T \left( 1 + m \cdot \cos(\omega_m t + \varphi_m) \right) \cdot \cos(\omega_T t + \varphi_T).$$

Mittels des Additionstheorems

$$2 \cdot \cos(\alpha) \cdot \cos(\beta) = \cos(\alpha + \beta) + \cos(\alpha - \beta)$$

folgt das Spektrum aus drei Frequenzen, nämlich dem Träger und den zwei Seitenbändern (-frequenzen):

$$\frac{u(t)}{u_T} = \cos(\omega_0 t + \varphi_T) + \frac{m}{2} \left( \cos(\omega_0 + \omega_m) + \varphi_m \right) t + \frac{m}{2} \left( \cos(\omega_0 - \omega_m) - \varphi_m \right) t.$$

Dieses Ergebnis kann mit dem **Zeigerdiagramm** anschaulich gemacht werden.

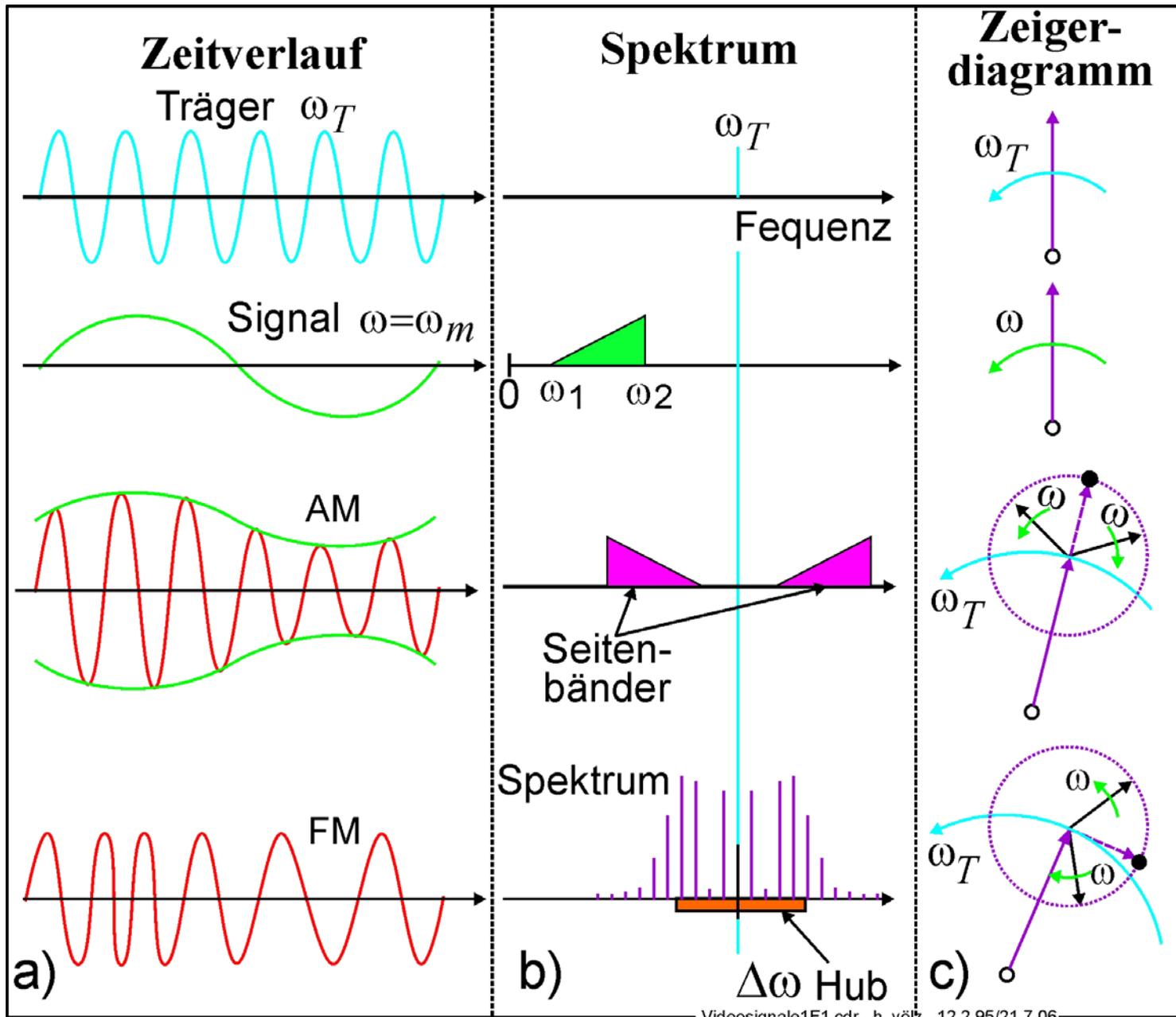
Die Amplitudenmodulation verändert die Länge des mit  $\omega_T$  rotierenden Zeigers mit der Frequenz  $\omega_m$ .

Dazu müssen an das Ende zwei mit  $\omega_m$  entgegengesetzt rotierende Vektoren (als Seitenbänder) angefügt werden.

Im folgenden Bild ist beim Spektrum ein Signalfeld von  $\omega_1$  bis  $\omega_2$  eingezeichnet.

Die AM wird u. a. bei der Lang-, der Mittel- und teilweise der Kurzwelle angewendet.

Die Frequenzmodulation wird anschließend behandelt.



Videosignale1F1.cdr h. vözl 12.2.95/21.7.06

# Frequenz-Modulation FM

Auch hier kann die Zeigedarstellung benutzt werden.

Jedoch jetzt müssen zwei mit  $\omega_m$  rotierende Vektoren in Richtung der Tangente zum Kreis zeigen.

Das für aber nur näherungsweise zu richtigen Ergebnis, denn es darf ja nicht die Länge von  $\omega_T$  verändert werden.

Das verlangt zusätzlich rotierende Vektoren und führt zu einem Spektrum aus vielen Frequenzen.

Deshalb wird auch die Berechnung schwieriger. Zunächst folgt durch Einsetzen

$$u(t) = u_T \cdot \cos\left(\left(\omega_T + \Delta\omega \cdot \cos(\omega_m t + \varphi_m)\right)t + \varphi_T\right).$$

Für  $\cos(\cos(\alpha))$  existiert jedoch keine einfache Umrechnungsformel.

Für die weitere Rechnung müssen der *Modulationsindex*

$$x = \frac{\Delta\omega}{\omega_m}$$

und die **BESSEL-Funktionen**  $n$ -ter Ordnung  $J_n(x)$  eingeführt werden. Für  $x < 1$  gilt die Reihe

$$J_n(x) \approx \left(\frac{x}{2}\right)^n \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k!(n+k)!} \left(\frac{x}{2}\right)^{2k} \quad \text{mit} \quad \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n^2(x) = 1.$$

Eine oft brauchbare und einfache Näherung lautet

$$J_n(x) \cong \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot n}} \cdot \left(\frac{e \cdot x}{2 \cdot n}\right)^n \cdot$$

# Fortsetzung FM

Nach einigen Zwischenrechnungen folgt schließlich (s. [Völz07] S. 80 ff.):

$$u(t) = u_T \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(x) \cdot \cos(\omega_T t + n \cdot (\omega_m t + \varphi_m) + \varphi_T).$$

Das Spektrum reicht mit  $\pm n \cdot \omega_m$  weit über den Frequenzhub hinaus, theoretisch sogar bis ins Unendliche. Für den Träger sowie das linke und rechte Seitenband gilt:

$$J_0(x) \approx 1 - \frac{x^2}{2} \quad \text{und} \quad J_1(x) \approx \frac{x}{2} \cdot \left(1 - \frac{x^2}{8}\right).$$

Für die (realen) **Grenzen des Spektrums** gilt die grobe Abschätzung der maximal notwendigen Ordnung  $n$

$$|J_n(n-1)| \leq 0,14.$$

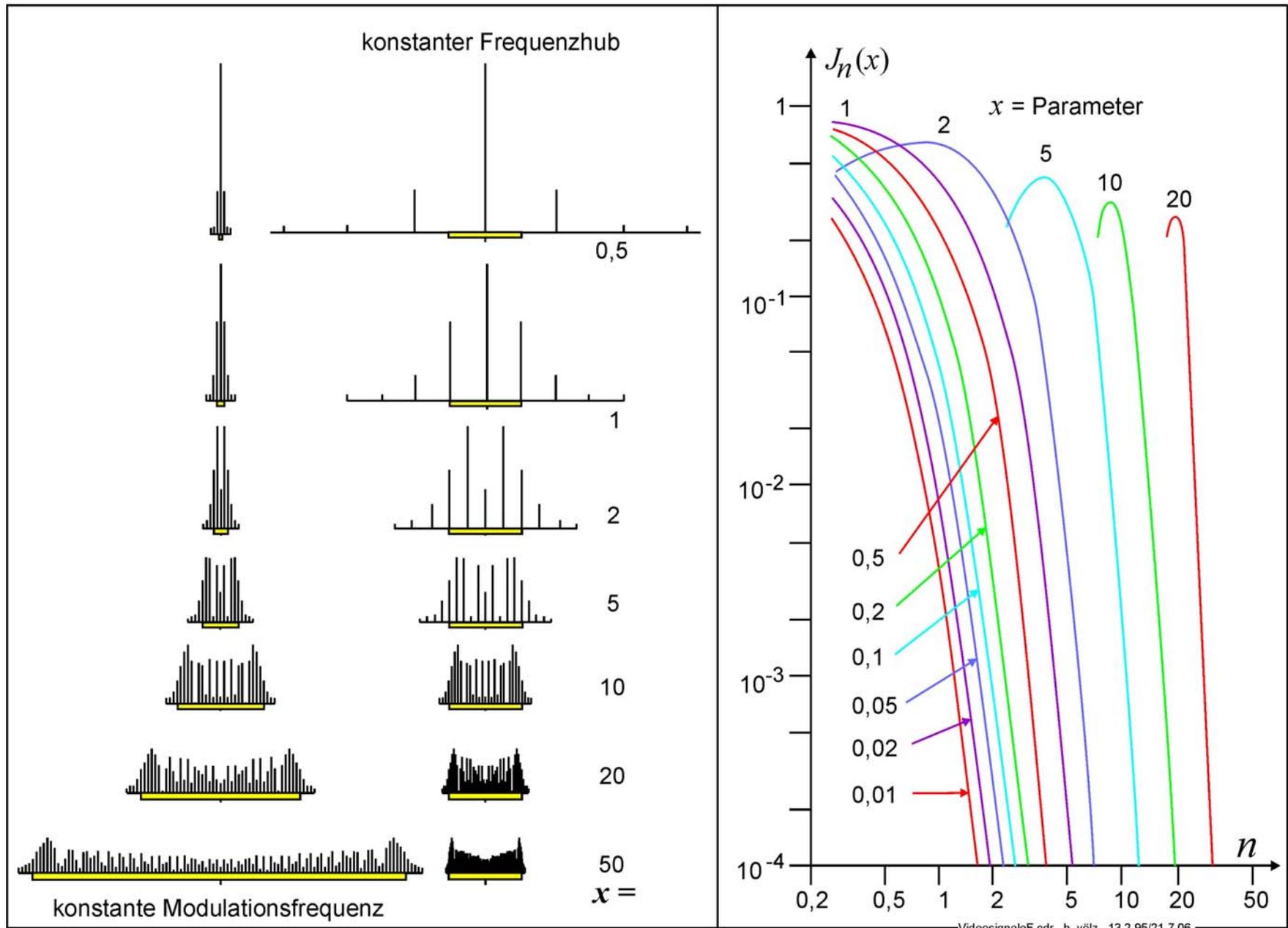
Als meist brauchbare Näherung für **Bandbreite** des Spektrums folgt so

$$B \approx 2 \cdot (f_m + \Delta f).$$

Nur für sehr **niedrige Modulationsfrequenzen**  $f_m \rightarrow 0$ , also **quasistatischen Betrieb** gilt  $B \approx \Delta\omega$ .

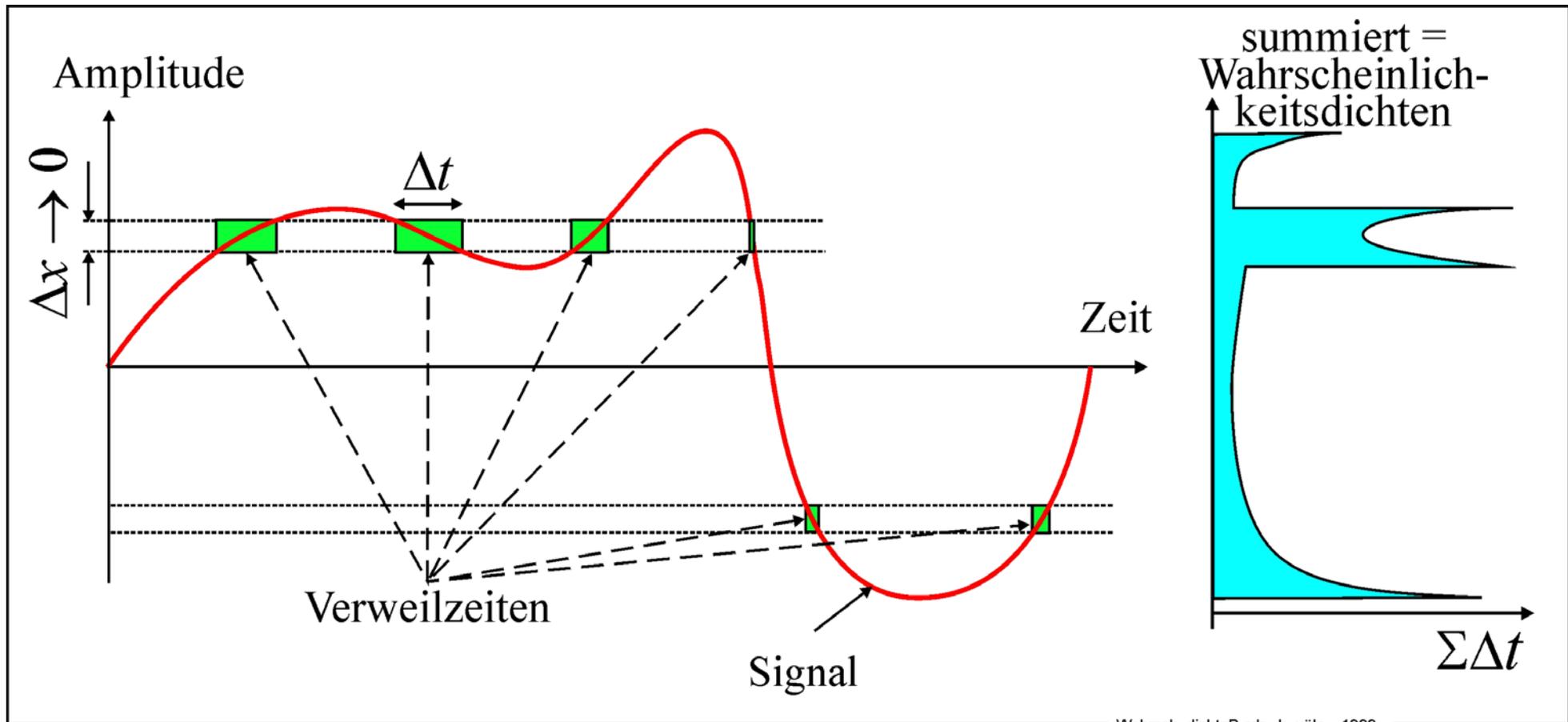
Die **folgenden Bilder** vertiefen diese Zusammenhänge

Die Frequenzmodulation wird u. a. bei UKW und der Videoaufzeichnung auf Magnetband angewendet.

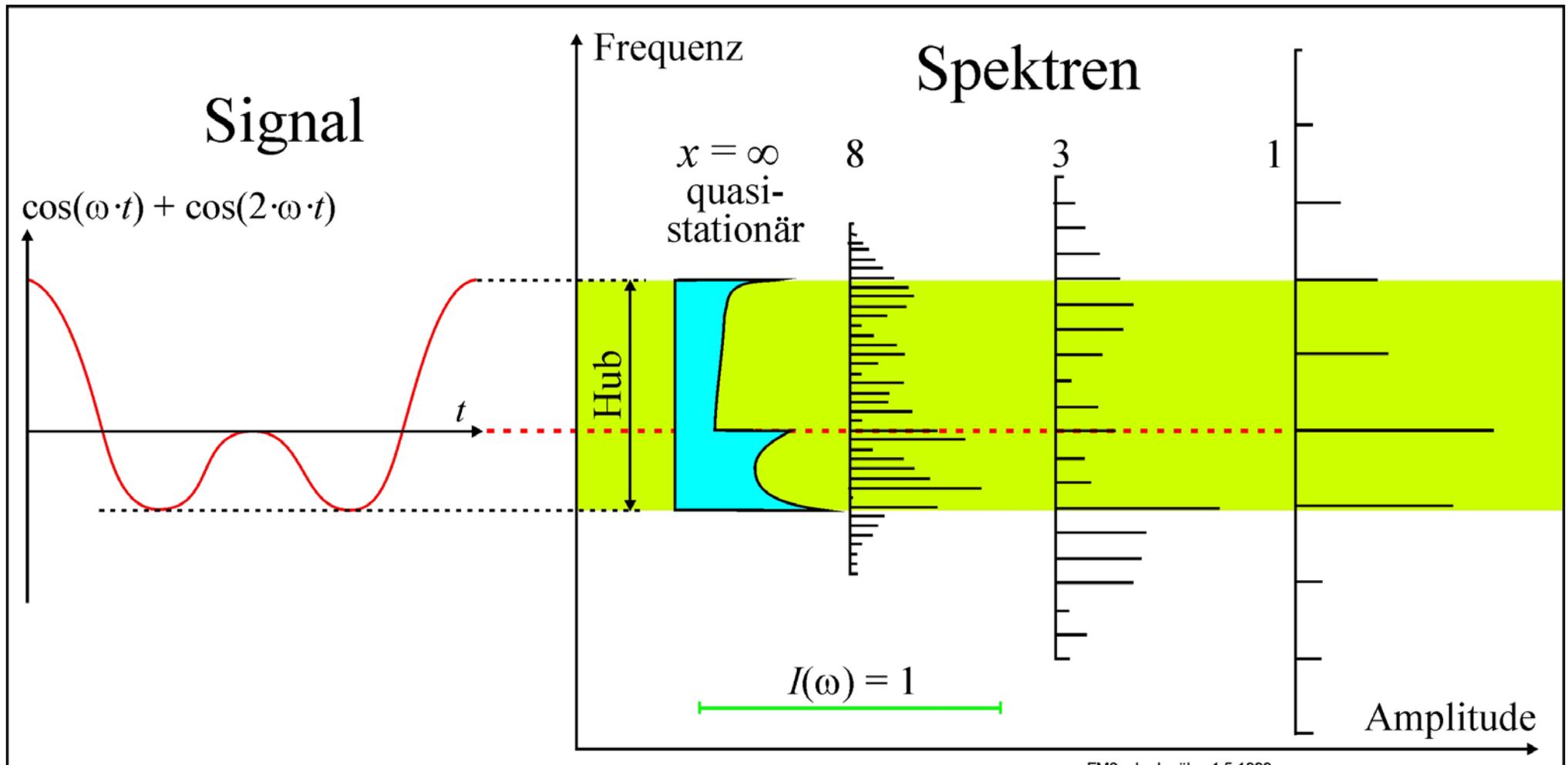


VideosignaleF.cdr h. vözl 13.2.95/21.7.06

Für das *quasistationäre Spektrum* muss die *Wahrscheinlichkeitsdichte* des Signals bestimmt werden



Für zwei *Signalfrequenzen* ergibt sich dann das folgende Bild.



# Pulsmodulation

Hierbei sind der Träger diskret bzw. digital und das Signal kontinuierlich

Hierunter fallen hauptsächlich verschiedenen *Puls-Modulationen* gemäß dem Bild. Der Träger ist ein getaktetes Rechtecksignal.

Die Taktfrequenz muss für das Signal dem Sampling-Theorem genügen.

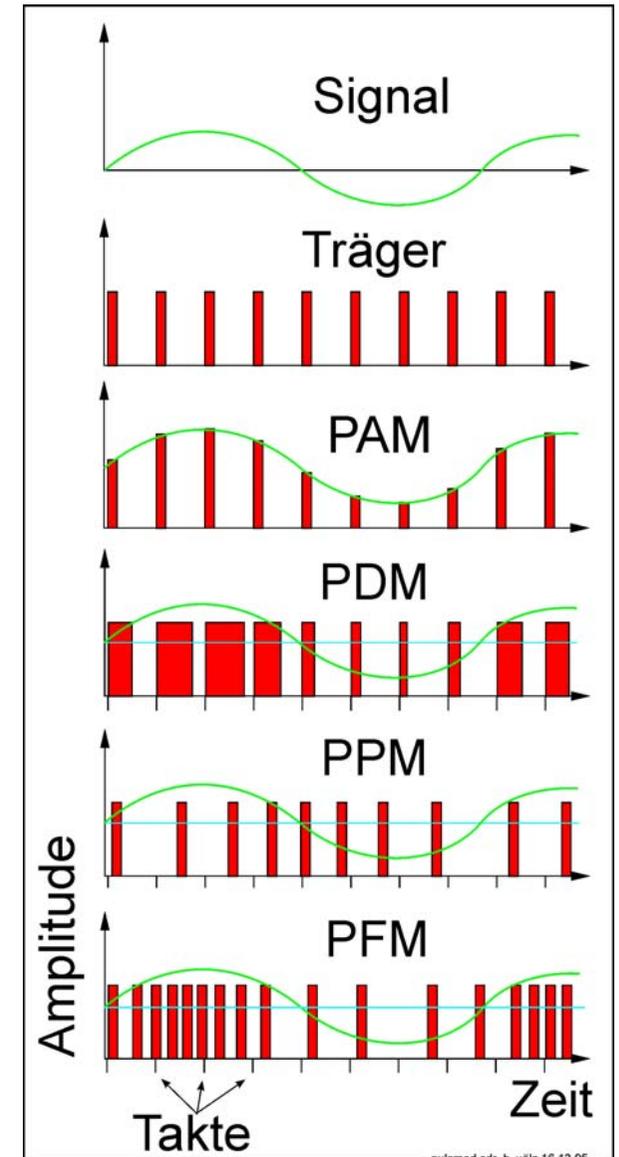
*Verändert werden* (PXM = pulse x modulation):

- PAM die Amplitude.
- PDM die Länge = Dauer des Impulses.
- PPM die aktuelle Phasenverschiebung des Taktes
- PFM die aktuelle Frequenz des Taktes.

Bei den beiden letzten Verfahren bleibt aber die gemittelte Taktfrequenz erhalten.

Zusätzlich gibt es noch mehrere Verfahren.

Sie stellen Abwandlungen oder Kombinationen der vier Verfahren dar.



# 3. Codierungen

Hierbei sind Signal und Träger diskret bzw. digital.

Ein digitaler **Träger**  $X_T$  ist ein Takt-Signal mit konstanter Frequenz  $f_T$  bzw. konstantem Taktabstand  $\Delta T$ . Durch ihn werden **Taktfenster = Bit-Zellen** für Änderungen des informationstragenden **Signals**  $X_S$  festgelegt. Die **diskreten Amplituden-Werte** von  $X_S$  können sich nur zwischen den Taktfenstern ändern.

Die oft **komplizierte Zusammenfassung** von  $X_T$  und  $X_S$  ist das **codierte Signal**  $X_C$ .

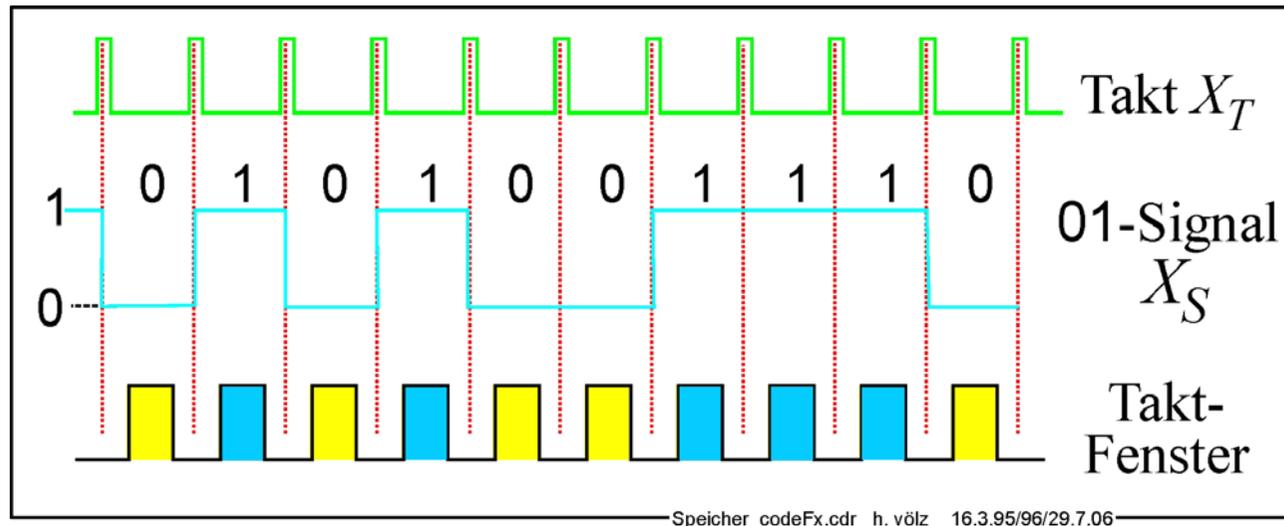
In ihm sind meist sowohl der Takt  $X_T$  als auch das Signal  $X_S$  **nur mittelbar vorhanden**.

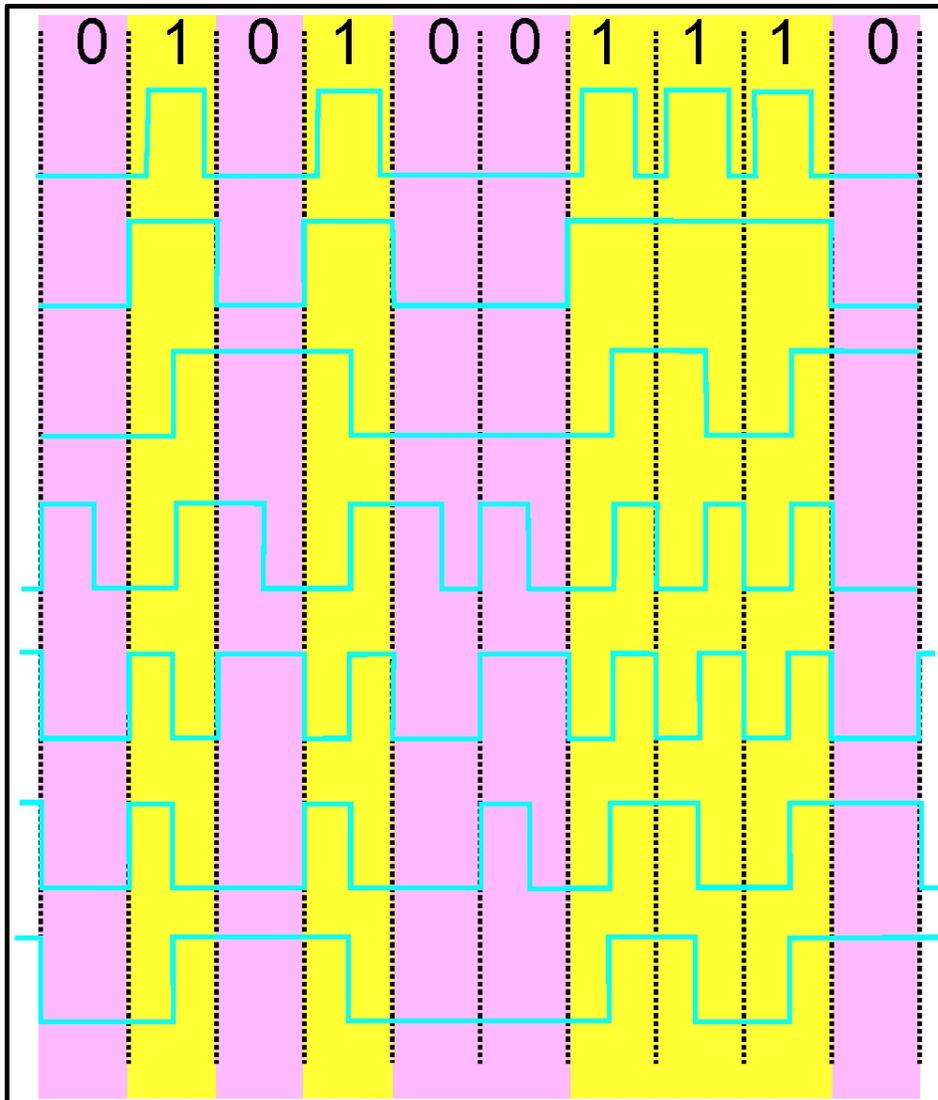
Beispiele für die einige (historisch verwendeten) Codierung zeigen das folgende Bild und die Tabelle.

Inzwischen sind **weitaus leistungsfähigere Codierungen üblich** (s. u.).

Im Folgenden sind vereinfacht nur digitale (zweistufige) Werte für  $X_S$  angenommen.

Vorwiegend treten in den **gelben** und **blauen** Fenstern (Bit-Zellen) unterschiedliche Größen auftreten.





RB = return to bias

NRZ(C) = non return to zero change

NRZ(1) = non return to zero one

PE = phase encoding

FM = frequency modulation

MFM = modified FM

M<sup>2</sup>FM = modified MFM

Speicher\_codeFb.cdr h. vözl 16.3.95/96/29.7.06

Name	Ausführliche Namen	Beschreibung, Algorithmus	FW
RB	Return to bias	Bei 1 setze einen Rechteckimpuls in die Bit-Zelle.	10
NRZ-C	Non return to zero; change	Bei 0 → 1 setze 1 zu Beginn der Bit-Zelle. Bei 1 → 0 setze 0 zu Beginn der Bit-Zelle.	6
NRZ-1	Non return to zero; one.	Bei 1 schreibe Flusswechsel mitten in die Bit-Zelle.	5
PE	Phase encoding = Richtungstaktschrift	Schreibe in die Mitte jeder Bitzelle einen Flusswechsel. Füge bei einem 01- oder 10-Wechsel je einen Flusswechsel zu Beginn der Bit-Zelle hinzu.	14
FM	Frequency modulation = Manchester-Code = Frequency doubling = Bi-Phase = two frequency recording = Wechseltaktschrift	Schreibe <b>Takt-Bit</b> an den Anfang der Bit-Zelle.  Schreibe <b>Daten-Bit</b> in die Mitte der Bit-Zelle.	15
MFM	Modified frequency modulation = Miller Code (ARVIN MILLER)	Schreibe <b>Takt-Bit</b> dann, wenn a) kein Daten-Bit in der vorigen Bit-Zelle war <b>und</b> b) kein Daten-Bit in der aktuellen Bit-Zelle vorliegt. Schreibe <b>Daten-Bit</b> in die Mitte der Bit-Zelle.	9
MMFM =M <sup>2</sup> FM	modified MFM = Miller squared (JERRY MILLER)	Schreibe dann <b>Takt-Bit</b> , wenn a) kein Daten-Bit vorher <b>und</b> b) kein Takt-Bit vorher war <b>und</b> c) kein Daten-Bit in die aktuelle Bit-Zelle kommt. Bei 1 schreibe <b>Daten-Bit</b> .	5

FW ist die notwendige Anzahl von Flusswechseln gemäß dem 10-Bit-Signal 0101001110, s. Bild

# Folgerungen

Gemäß den Beispiel-Codierungen sind zu unterscheiden:

die  $n$  **Bit** des 01-Signals und die benötigten  $m$  **Flusswechsel** (FW).

Es ist daher nach einer „**optimalen**“ **Codierung** mit minimaler Anzahl von FW zu suchen.

Dafür sind jedoch **zusätzliche Bedingungen** zu beachten.

- Der Übertragungskanal bzw. die Speicherung bedingen einen **kleinstmögliche FW-Abstand**  $\Delta T_{FW}$ . Er wird auch oft als **minimale Lauflänge**  $L$  angegeben.
- Die Flusswechsel-Folge muss **gleichstromfrei** sein (Gleichstrom ist meist nicht übertragbar).
- Der **Takt muss regenerierbar** sein, das bedeutet **Lauflängen-Begrenzung** RLL  $a, b$ , (run length limit) sie bestimmt die minimale ( $a$ ) und maximale ( $b$ ) aufeinander folgender 0 bzw. 1.

Insgesamt existiert z. Z. **keine umfassende Theorie**.

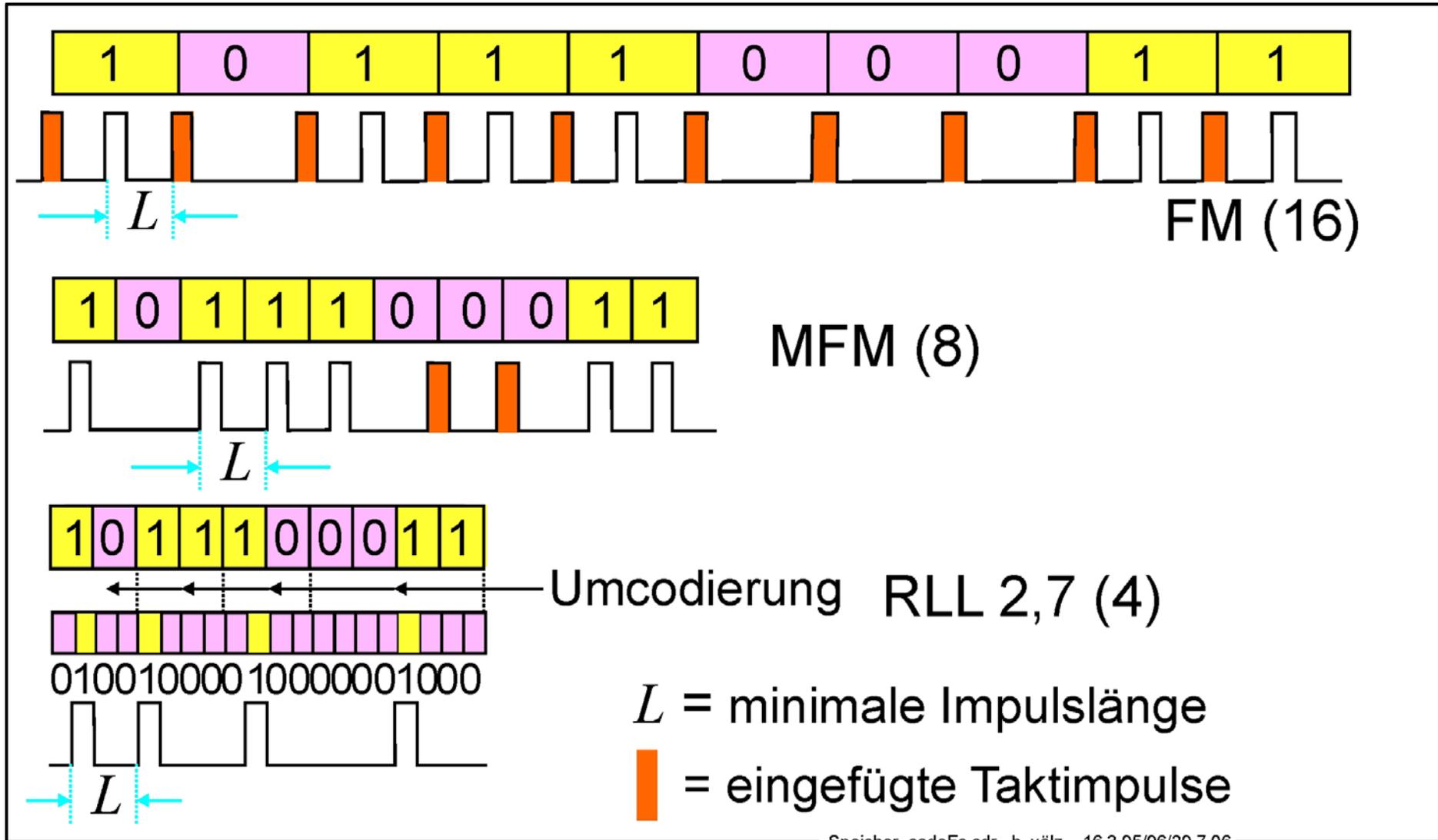
Die meisten Codierungen sind intuitiv bzw. experimentell entstanden und benutzen **Tabellen**.

Dabei werden immer **mehrere Bit** zu einem **Code-Wort** zusammengefasst.

Die dazu notwendige **zusätzliche Speicherung** und **Verzögerung** bei der Wiedergabe ist unwesentlich.

Einige Beispiele für Disketten, Magnetbänder und Festplatten zeigen die folgenden Seiten

Dieses Bild zeigt Beispiele der Entwicklung. Im codierten Signal ist die *Lauflänge*  $L$  (FW) konstant dargestellt. Von FM über MFM nach RLL 2,7 besteht 2- bzw. 4-facher Gewinn.



Speicher\_codeFc.cdr h. vözl 16.3.95/96/29.7.06

# Einige Tabellen-Codierungen

RLL 1, 7 und RLL 2,7 wurden für Festplatten benutzt.

RLL 2,7 ist zusätzlich ein effektiver Präfix-Code

Der Gruppen-Code GCR 4/5 entstand 1973 für Datenbänder

Die EFM (eight to fourteen modulation) wurde 1982 für die CD entwickelt.

Für die DVD existiert sogar ein doppelter Tabellen-Code.

RLL 1, 7		RLL 2, 7	
Daten	Code	Daten	Code
00	101	10	0100
01	100	11	1000
10	001	000	000100
11	010	010	100100
0000	101000	011	001000
0001	100000	0010	00100100
1000	001000	0011	00001000
1001	010000		

GCR 4/5		EFM 8/14 (Auszug)	
Daten	Code	Daten	Code
0000	11001	00000000	01001000100000
0001	11011	00000001	10000100000000
0010	10010	00000010	10010000100000
0011	10011	00000011	10001000100000
0100	11101	00000100	01000100000000
0101	10101		
0110	10110		
0111	10111	...	...
1000	11010		
1001	01001		
1010	01010		
1011	01011	11111011	01001000010010
1100	11110	11111100	01000000010010
1101	01101	11111101	00001000010010
1110	01110	11111110	00010000010010
1111	01111	11111111	00100000010010



# Energie je Bit

Aus der Kanalkapazität lässt sich auch die notwendige Energie zur Übertragung oder Speicherung von 1 Bit ableiten.

Bei rein thermischen Rauschen gilt für die Störungen  $P_n = k \cdot B \cdot T$

$k = 1,381 \cdot 10^{-23}$  J/K = BOLTZMANN-Konstante;  $T$  = absolute Temperatur

Die Nutzleistung sei das  $z$ -fache der Störleistung:  $P_s = z \cdot P_n$ , dann folgt  $C = B \cdot \lg(1+z)$

Für Verhältnis von Nutzleistung zur Kanalkapazität gilt deshalb

$$\frac{P_s}{C} = k \cdot T \cdot \frac{z}{\lg(1+z)} \text{ in } \frac{\text{J}}{\text{Bit}} \text{ bzw. } \frac{\text{W}}{\text{Bit/s}}$$

Der Ausdruck mit  $z$  kann in eine Reihe entwickelt werden:

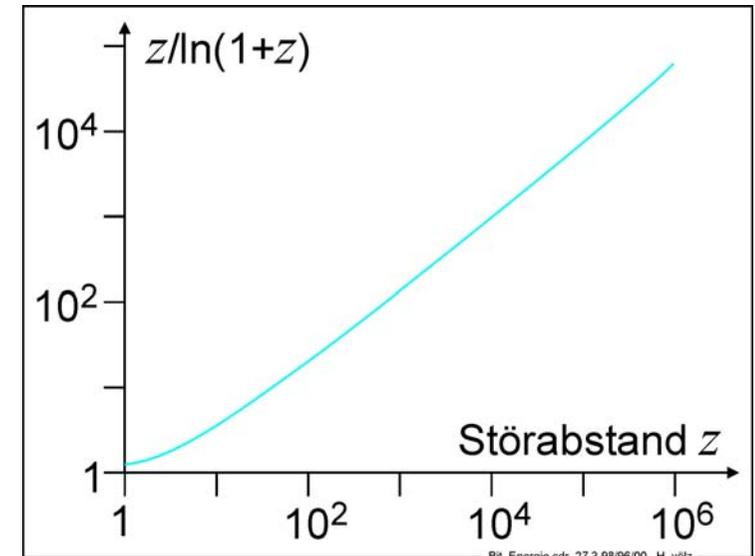
$$\frac{z}{\ln(1+z)} = \frac{1}{1 - \frac{z}{2} + \frac{z^2}{3} - \frac{z^3}{4} \pm \dots} \text{ mit } 1 < \frac{z}{\ln(1+z)} \rightarrow 1 \text{ für } z \rightarrow 0$$

Also gilt

$$\frac{E}{\text{Bit}} \geq k \cdot T \cdot \ln(2).$$

Bei 300 K ( $\approx$  Zimmertemperatur) folgt  $E/\text{Bit} = 3 \cdot 10^{-21}$  J  $\cong$  26 meV  $\cong$  Photon von  $5 \cdot 10^{11}$  Hz

Da meist ein **Störabstand**  $\geq 40$  dB bzw.  $z \geq 100$  benötigt wird, muss dann auch die Minimal-Energie soviel größer sein.



# Energie/Bit aus der thermodynamischen Entropie

Mit Wahrscheinlichkeit  $W$  für die Zustände und  $k =$  Boltzmann-Konstante gilt (s. o.)

$$S = k \cdot \ln(W)$$

Angenommen wird ein **2-fach entartetes System** = 2 Energiemulden in denen **eine Kugel** liegen kann

**Vor einer Messung** unbekannt, in welcher Mulde die Kugel liegt

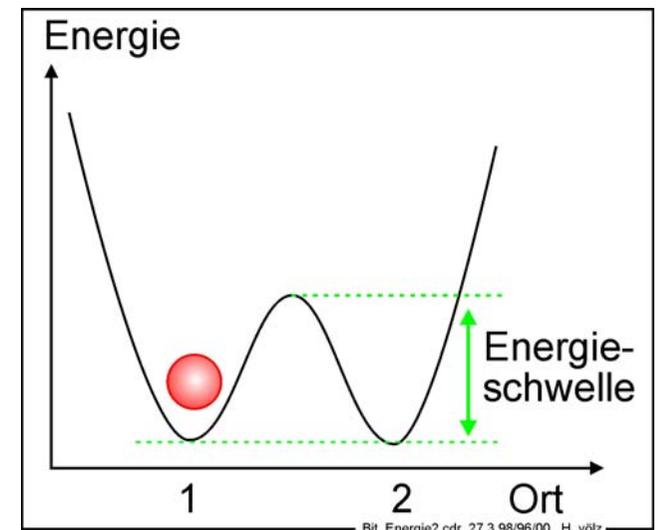
Für beide beträgt die Wahrscheinlich je  $W = 1/2$ .

**Nach Messung** ist die Mulde der Kugel bekannt  $\Rightarrow W = 1$ .

Die Messung erfordert ein Äquivalent  $\Rightarrow$  Differenz beider Entropien  $S = k \cdot \ln(W)$ .

Mittels Multiplikation mit der absoluten Temperatur  $T$  folgt dann für die Energie

$$\Delta E / \text{Entscheidung} = \Delta S \cdot T = k \cdot T \cdot [\ln(1) - \ln(1/2)] = k \cdot T \cdot \ln(2).$$



**Achtung! Thermodynamik** (Quantentheorie) und **SHANNON-Theorie** liefern zwar das gleiche Ergebnis. Es betrifft aber **nicht die beiden Entropien**, sondern nur die notwendige Energie je binärer Entscheidung

# Informations-Menge

Die Menge gespeicherter bzw. übertragener Information beträgt  $I = H \cdot T$  (Entropie · Zeitdauer).

Bei kontinuierlichen Signalen kann Sie als *Quader* mit drei den Kantenlängen betrachtet werden:

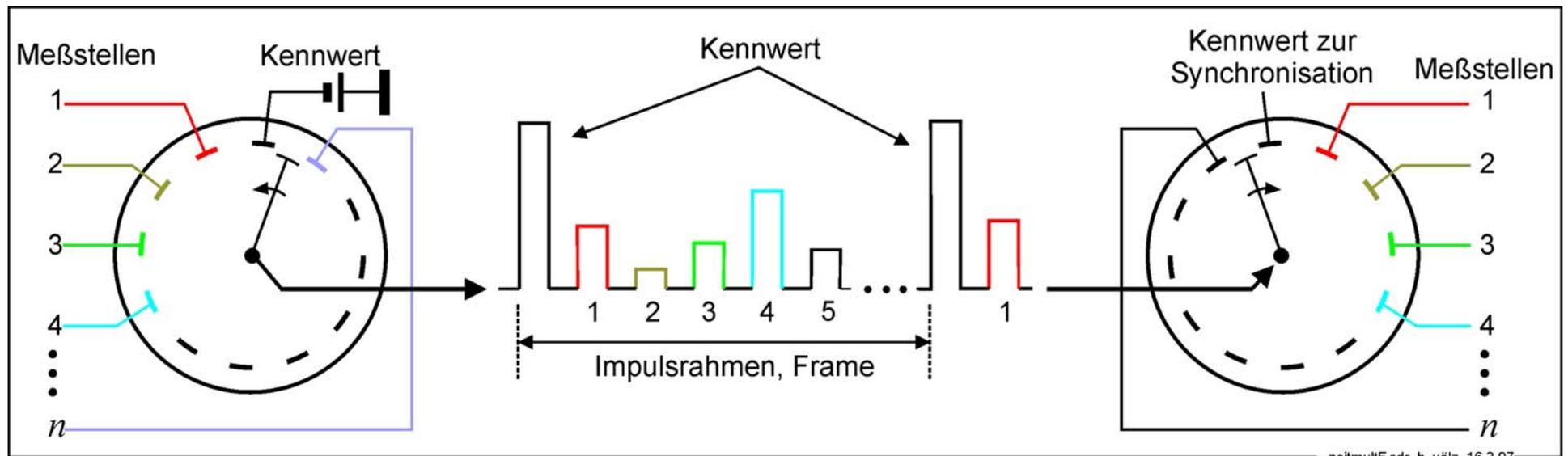
$$\text{Zeitdauer } T, \text{ Bandbreite } B \text{ und Störabstand } A \Rightarrow I = T \cdot B \cdot A.$$

Bei diskreten, *digitalen* Signalen ergibt sich  $A = \log_2(n)$  aus den vorhandenen Amplitudenstufen.

Die Informationstheorie ermöglicht auszurechnen, wie die 3 Parameter *gegeneinander austauschbar* sind.

Hierzu dienen u.a. die *Modulationen* und *Codierungen*.

Bei diskreten, digitalen Signalen ist es zusätzlich möglich, Signale mehrerer *Quellen zu vermischen*:

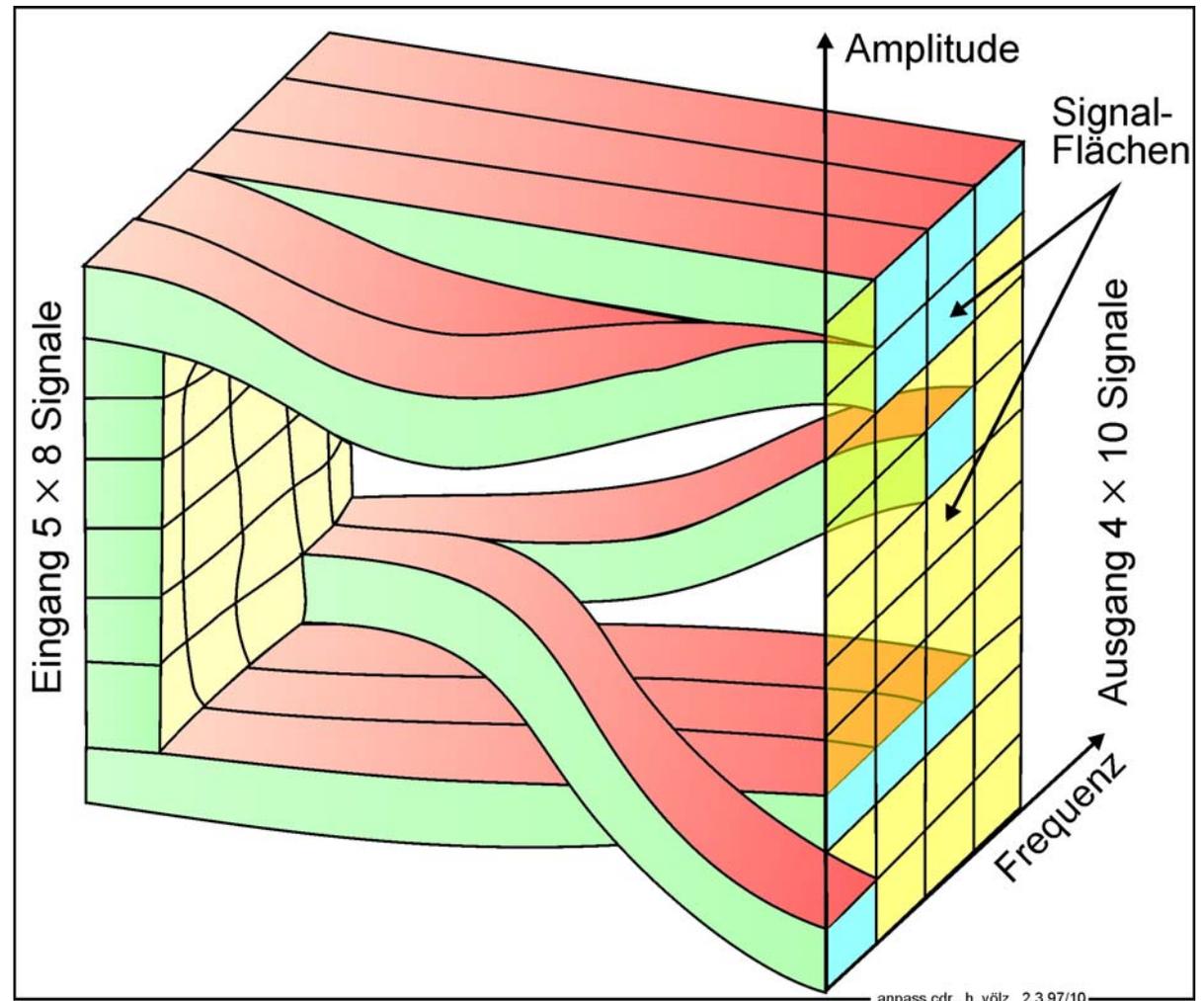


# Zum Signalaustausch

Diskrete Signale können u. a. durch Frequenz- und Amplitudenstufen dargestellt werden.

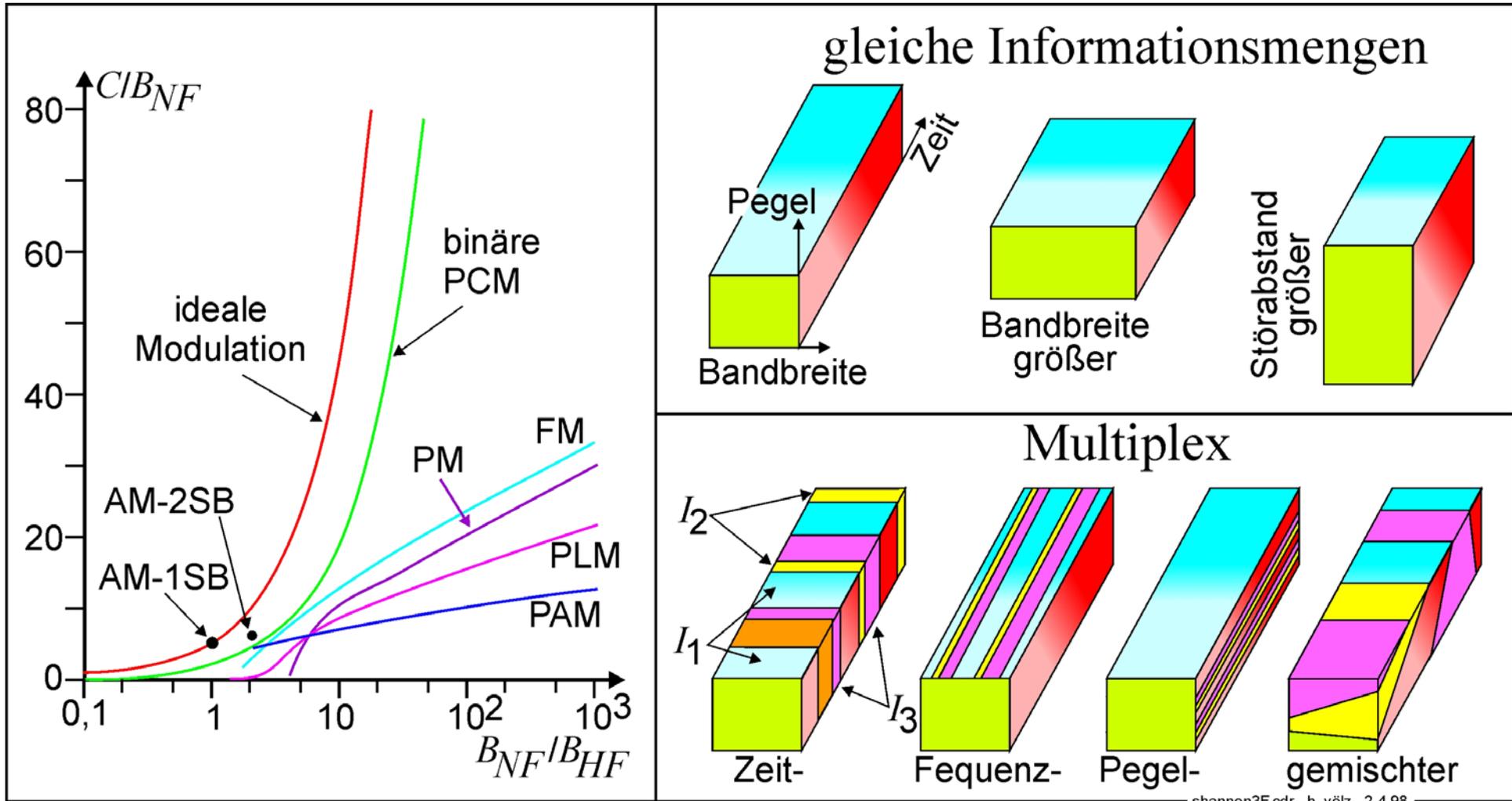
Diese „Elementarsignale“ können dann durch eine Codierung nahezu beliebig umgeordnet werden.

Das zeigt schematisch das nebenstehende Bild.



Links: **Wirkungsgrad** von Modulationen und Codierungen.

Rechts: Möglichkeiten für **Veränderungen der 3 Parameter** (oben) und **Mischung** verschiedener **digitaler Signale** (unten).



# 5. Demodulation und Decodierung

Modulationen und Kodierungen sind zur Kanalanpassung notwendig.

Zum Erhalt der Original-Signale müssen sie mittels Demodulation und Decodierung rückgängig gemacht werden. Hierfür gibt es mehrere Verfahren und Schaltungen.

Sehr einfach ist es bei den meisten *Pulsmodulationen*: Es ist nur die Pulsfrequenz durch einen Tiefpass abzutrennen. Lediglich die *Puls-Phasen-Modulation* verlangt komplexere Schaltungen (sind hier nicht aufgeführt).

Einfach ist auch die Demodulation der **AM**. Es genügen eine Gleichrichtung und Abtrennung des Gleichanteils.

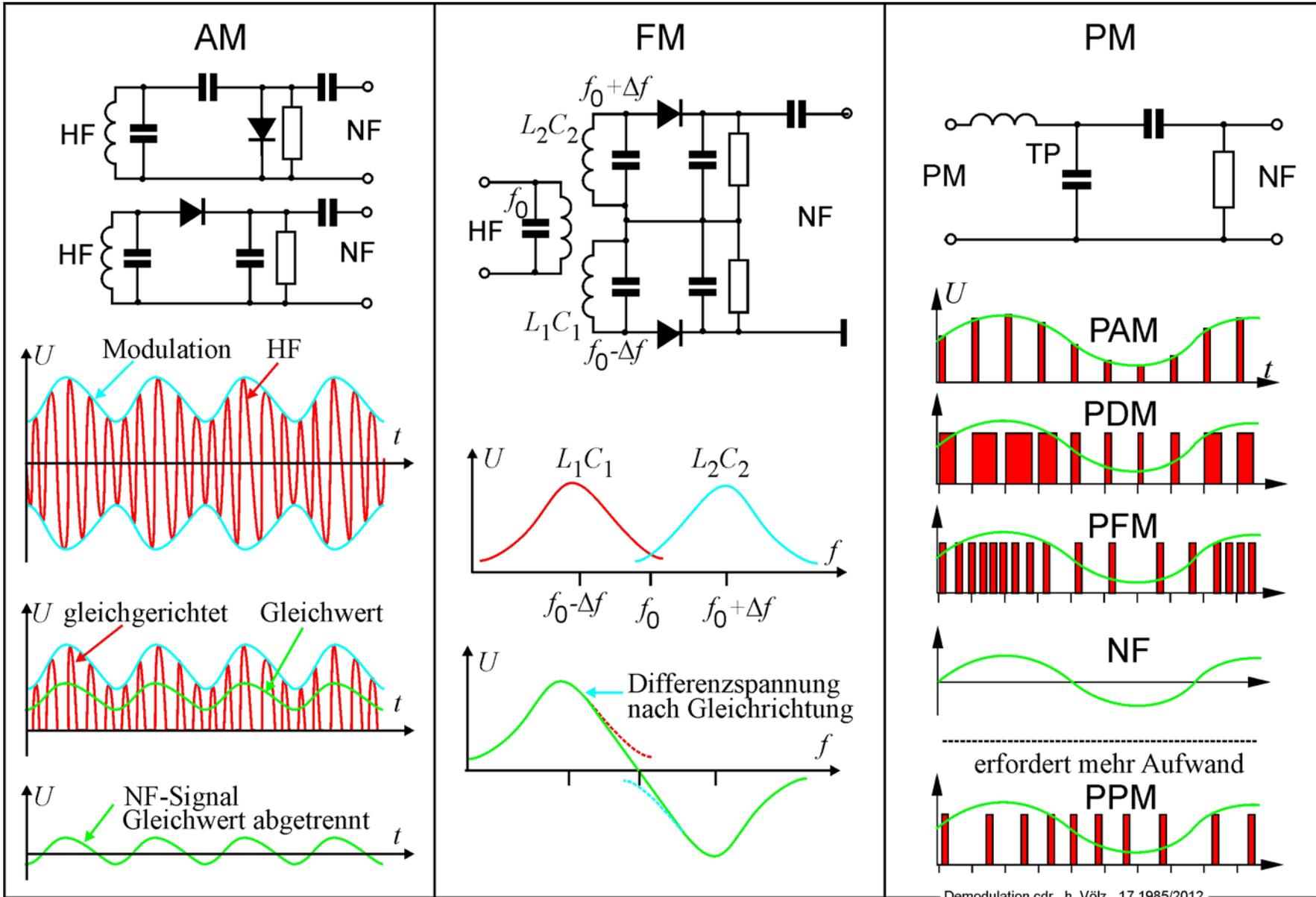
Deutlich schwieriger ist die Demodulation der **FM**.

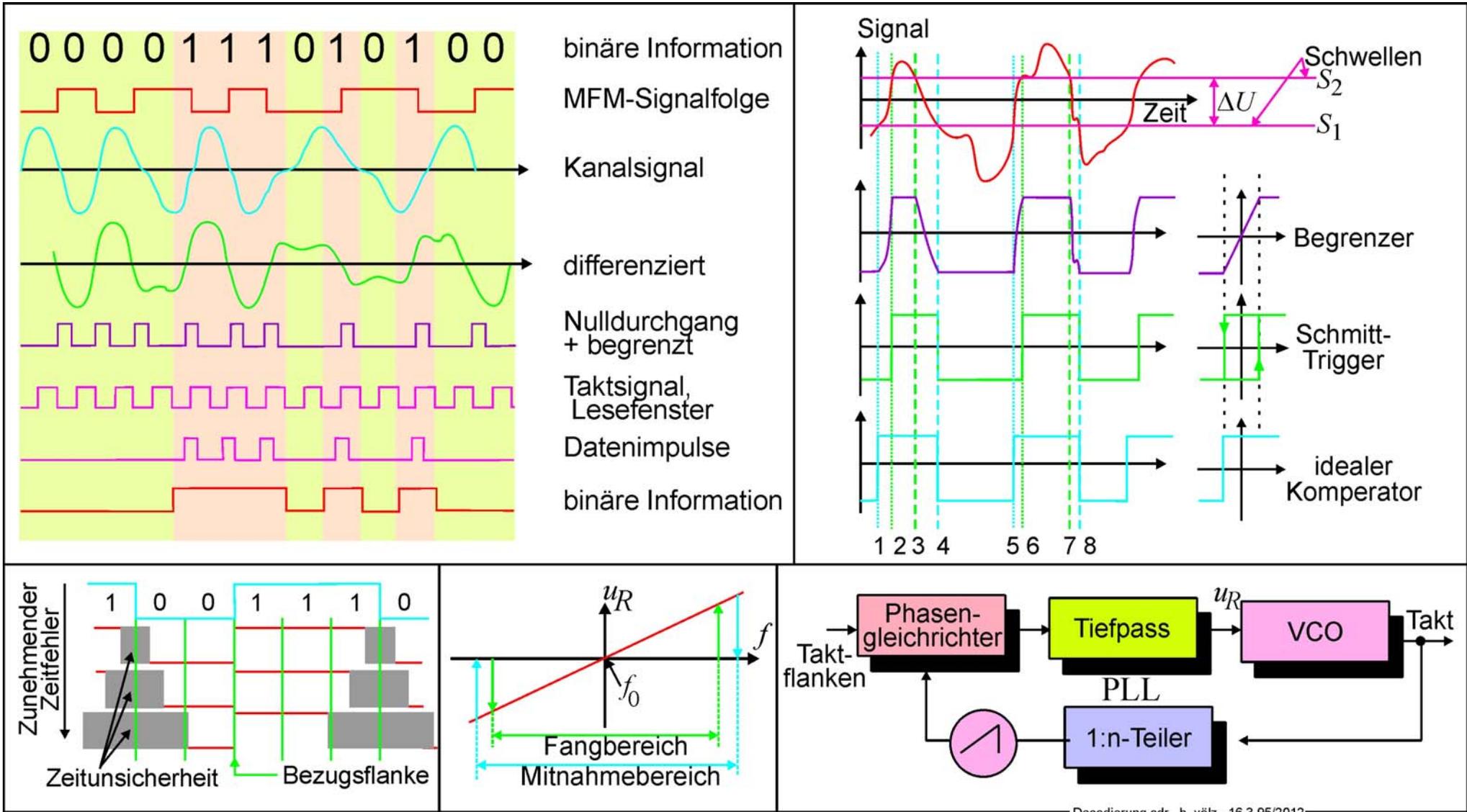
Eine klassische Schaltung benutzt zwei auf  $f_0 \pm \Delta f$  abgestimmte Schwingkreise mit folgender Gleichrichtung wie bei AM. Durch Differenzbildung entsteht dann das Original-Signal.

Bei *digitalen Signalen* ist erheblich mehr Aufwand erforderlich. Dabei ist zweierlei zu beachten:

1. Vom Kanal kommen immer *kontinuierliche Signale mit Störungen*, sie sind in diskrete Signale umzuwandeln. Das erfolgt u.a. durch Begrenzerschaltungen, Schmitt-Triger oder adaptive Signalerkennung.
2. Meist ist in den diskreten Signalen der *Takt nur indirekt vorhanden*, er muss erst fehlerfrei erzeugt werden. Dabei stören häufig, insbesondere bei bewegten Speichermedien auch Zeit-, Gleichlauf-Fehler. Sie werden durch Schwungrad-Schaltungen minimiert.

Erst nachdem beides fehlerfrei gelungen ist kann die *eigentliche Decodierung* erfolgen.





## 6. Speicherung

Bei allen bisher behandelten Vierpolen treten die Eingangs- und Ausgangs-Signale praktisch gleichzeitig auf.

Bei der Speicherung gelangen die Eingangs-Signale ins System und werden mittels **Irreversibilität** dort „aufgezeichnet“.

Am Ausgang treten die Signale erst dann wieder auf, wenn eine Wiedergabe erfolgt.

Speichern **hebt also die aktuelle Zeit auf**.

Es gibt je eine Auslösungs-Zeit für den **Aufzeichnungs-Vorgang** und für den **Wiedergabe-Vorgang**

Außerdem sind durch Transport des Speichers die Informationen (ohne Übertragung) **an beliebige Orte** zu bringen.

Besonders **anschaulich** ist die Speicherung bei der Lagerung von Lebensmitteln, z. B. Äpfeln.

Für „gutes“ Speichern sind in einigen Fällen auch einige **Sonderbedingungen** erforderlich.

So gibt es Maßnahmen zur **Stabilisierung des Speicherzustandes**.

Bei der klassischen Fotografie war z. B. ein Entwickeln notwendig.

Die Besonderheit vieler Speicher ist die Möglichkeit den **Speicher-Inhalt zu löschen**.

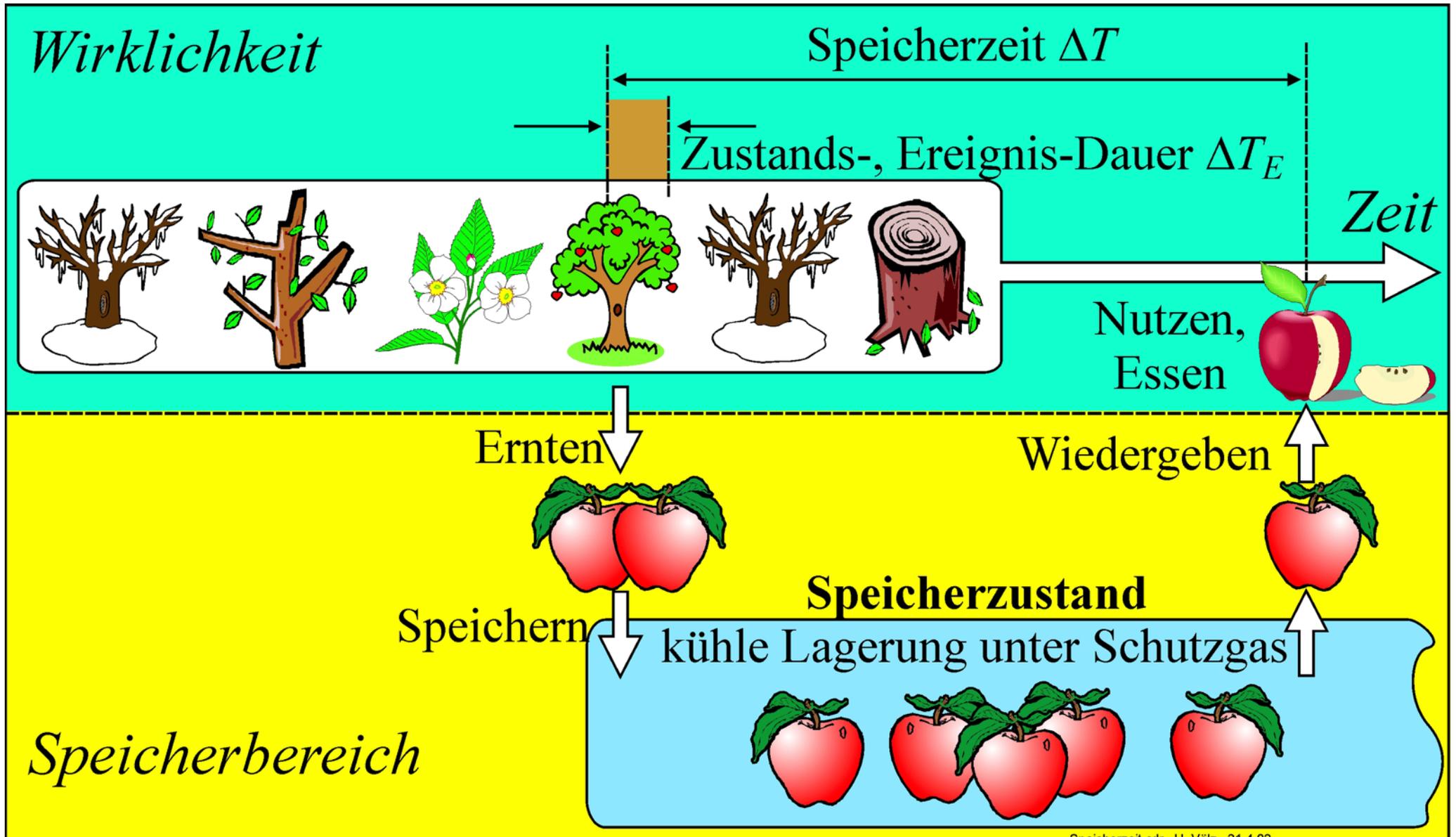
Bei einigen Speichern ist der Aufzeichnungsvorgang nicht eindeutig definiert. Er erfolgt bei einer **Produktion**.

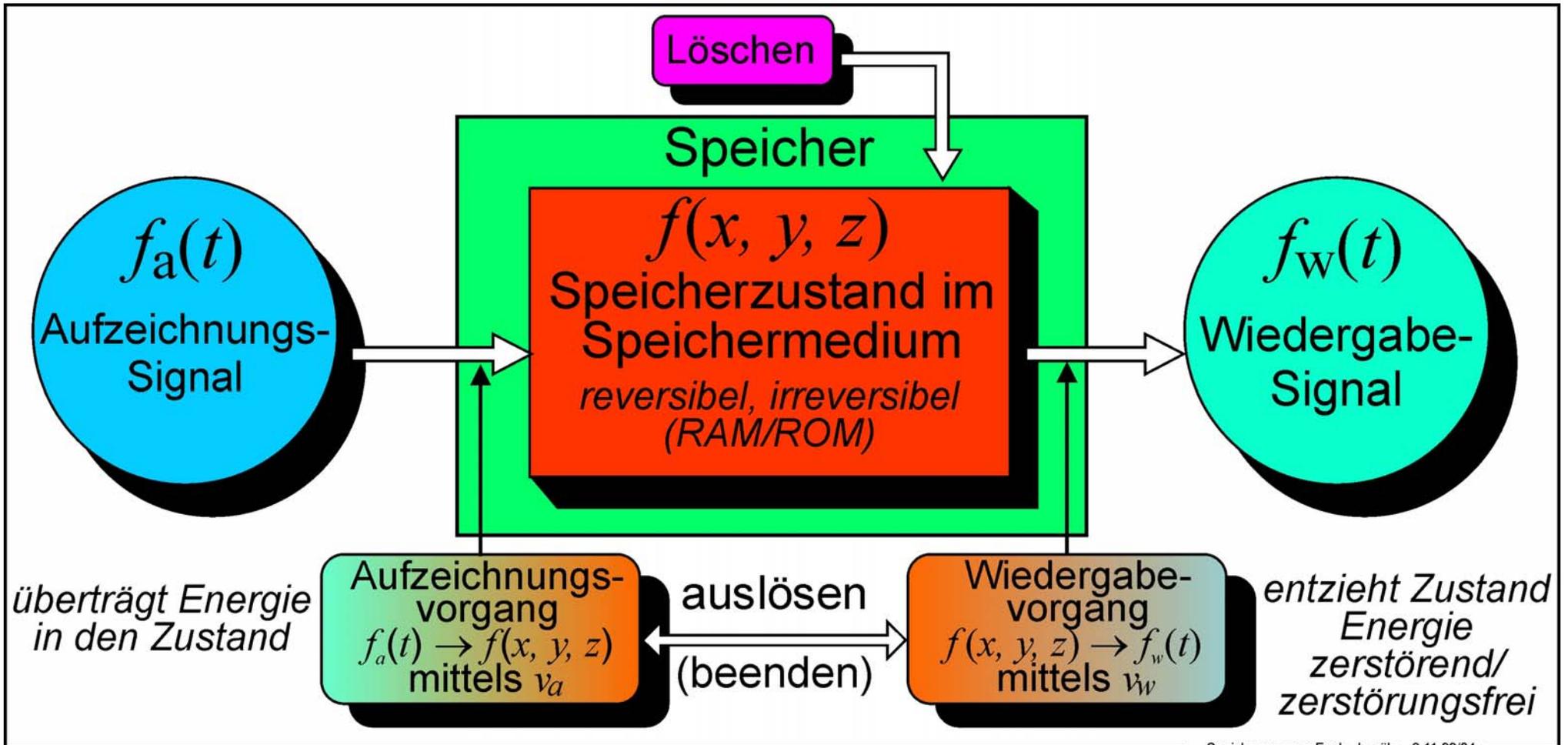
Dann ist für den Anwender nur der Wiedergabe-Vorgang möglich.

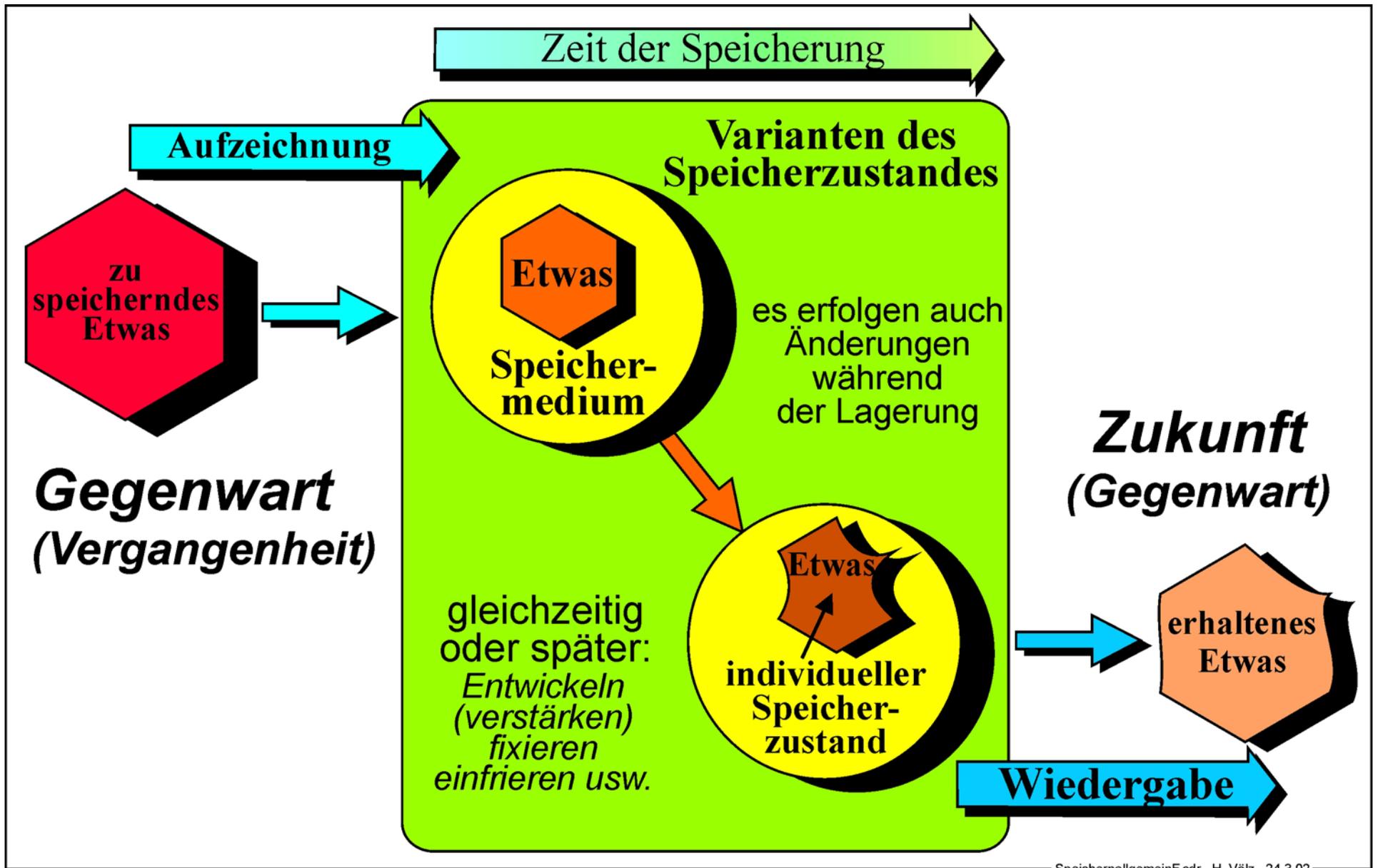
Solche Speicher heißen **Nur-Wiedergabe-Medien**, Minimal-Speicher oder spezieller ROM (read-only-memory).

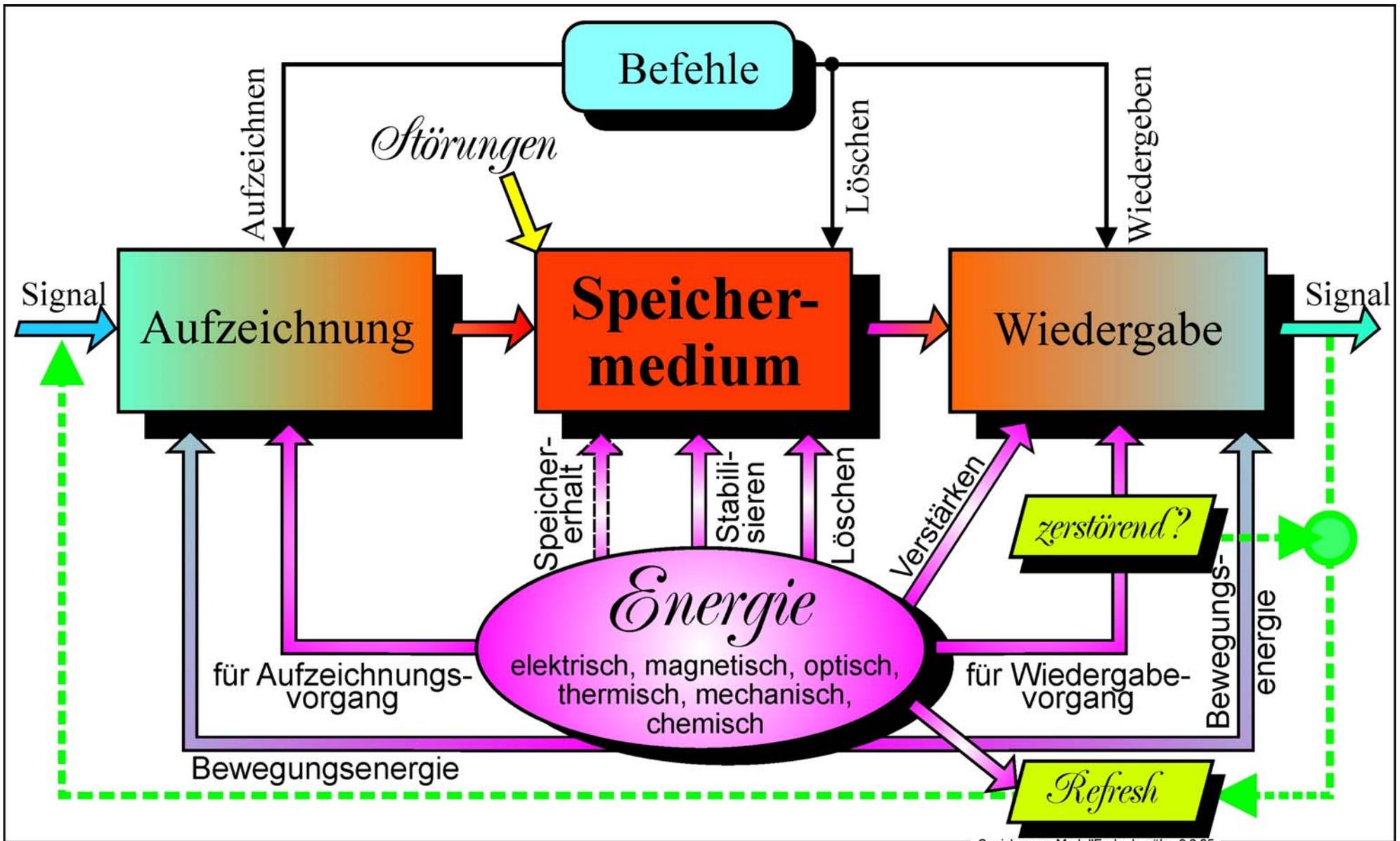
Bei allen Prozessen der Speicherung sind **vielfältige Energie-Bedingungen** zu erfüllen.

Weitere Details s.: [r-h-voelz.de/pdf/HU/SpeichernFundament.pdf](http://r-h-voelz.de/pdf/HU/SpeichernFundament.pdf).

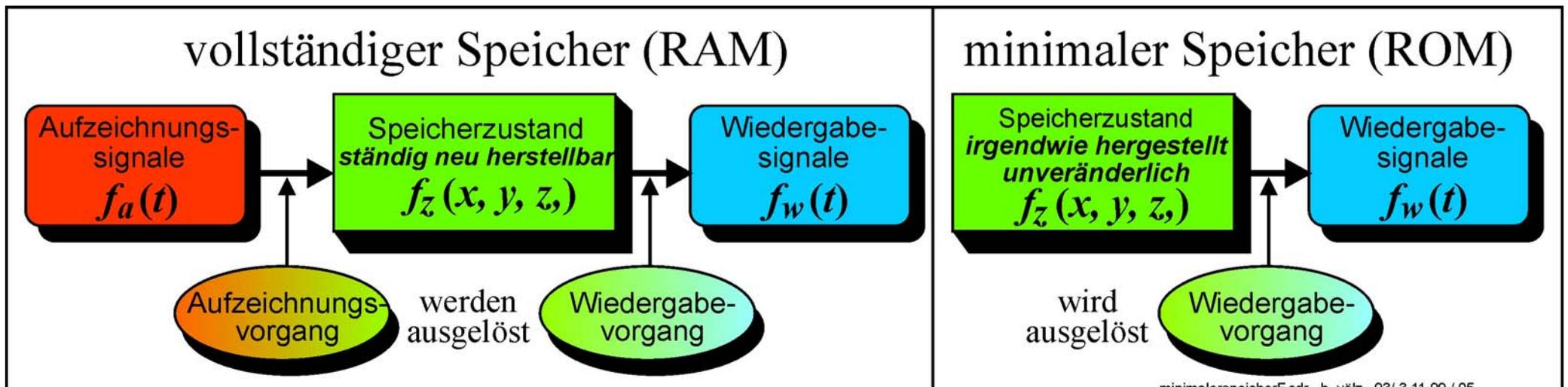








Speicherung\_ModellF.cdr h. vözl 9.2.05



minimalspeicherF.cdr h. vözl 93/ 3.11.99 / 05

# Gliederung

1. Einführung
2. Signale
3. Zweipole
4. Vierpole
- 5. Wellen**

# Übertragungstechniken

Signale müssen von einem Ausgang (Kanal, Quelle oder Speicher) zu einem Empfänger gelangen.

Hierfür existieren zwei deutlich verschiedene *Verfahren*:

1. gezielt auf einzelne *Empfänger gerichtet* (Analogie: Gehirn - Nerv - Muskel)
  - a) per Leitung, Koaxial-Kabel, Hohl- und Lichtleiter bzw. Abnahme  $\sim 1/r$
  - b) mittels *stark* gebündelter Wellen (Strahlung). Abnahme  $\sim 1/r$ .
2. *allgemein zugänglich durch* raumerfüllende oder gebündelte Wellenausbreitung (Strahlung)  
Analogie: Immunsystem und Medikamente, Abnahme  $\sim 1/r^2$

Eine andere Einteilung berücksichtigt die *Anzahl der Dimensionen*:

1. *Längs* verschiedener Leiter oder Kabel.
2. Auf der *Oberfläche* einer Grenzfläche, z. B: Wasserwellen.
3. In den *Raum*, z. B. mit einer Kugelwelle.

Bei 2. und 3. kann durch *Bündelung* (Richtstrahlung) eine mehr oder weniger gerichtete Ausbreitung erreicht werden.

# Direkte Übertragung

betrifft den direkten Weg von einem Sender zu einem Empfänger.

Im Folgenden werden zunächst die Fälle per *elektrischen Leitern* behandelt.

Auf die Streifen-Leitung bei *gedruckten Schaltungen* wird hier nicht weitere eingegangen.

Die runden und rechteckigen *Hohlleiter* entsprechen im Wesentlichen der Ausbreitung von Wellen (s. u.).

Den *Lichtleitern* ist ein besonderer Abschnitt gewidmet.

	Seiten-	Ansicht Front-
einfacher Draht mit Erdrückleitung		
Zweidraht-, Lecher-, Doppeldrahtleitng, (verdrillt)		
Koaxialleitung		
gedruckte Schaltung Streifenleitung		
Hohlleiter (rechteckig)		
Lichtleiter		

Leitungen.cdr h. vözl 25.6.12

# Leitungen

Am übersichtlichsten ist die Doppelleitung auch Zweidraht- oder Lecherleitung genannt. ERNST LECHER (1856 - 1926) Sie lässt sich über *differentielle*, auf die Längeneinheit bezogene *Größen* behandeln.

Es existieren  $dL$  (H/m),  $dC$  (F/m),  $dR$  und  $dG$  ( $\Omega/m$ ). Für viele Koaxial-Kabel gilt  $dC = 150$  pF/m und  $dL = 250$  nH/m. Wie gut das Signal die Leitung passiert, beschreibt der stark frequenzabhängige *Ausbreitungskoeffizient*  $\gamma = \alpha + j\cdot\beta$  Bei Telefonleitungen können 10 km, bei Höchsthfrequenzen dagegen nur 10 cm erreicht werden.

Deshalb werden die Frequenzgänge auf die Wellenlänge  $\lambda$  im Vergleich zu den Abmessungen bezogen Das Verhalten und die Dämpfung einer Leitung sind bei tiefen Frequenzen durch  $dG/\omega dC$  bestimmt.

Von stärkerem Einfluss ist  $dR/\omega dL$ . Für  $dR/\omega dL \gg 1$  liegt eine *starke* Dämpfung vor, für  $dR/\omega dL < 1$  *schwache Dämpfung*.

Bei sehr hohen Frequenzen sind die Verluste vernachlässigbar.

Wichtig ist der **Wellenwiderstand**  $Z_w$ , eine brauchbare Näherung ist

$$Z_w = \sqrt{\frac{dL}{dC}}$$

Am Leitungs-Ende kann das Signal reflektiert werden und sich dann mit dem ankommenden Signal überlagern.

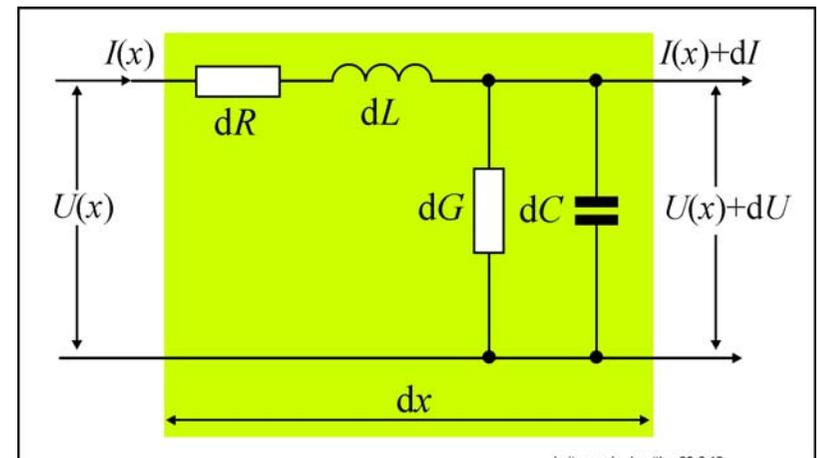
Deshalb sollten Leitungen mit  $Z_w$  *abgeschlossen werden*.

Bei höchsten Frequenzen tritt der *Skinneffekt auf*.

Zu seiner Minderung werden die Oberfläche des Leiters versilbert oder Litzen benutzt.

Übliche Koaxialkabel haben einen Außendurchmesser von 2 bis 15 mm, Sonderformen von 1 bis 100 mm.

Es gibt auch eine koaxiale Bauform von Freileitungen, die *Reusenleitung*.



# Lichtleiter 1

Die obere *Grenzfrequenz* aller Leiter-Anordnungen kann durch Lichtleiter *erheblich überboten* werden. Ihr Grundprinzip nutzt den optischen *Grenzwinkel*  $\Theta$ , ab dem eine *verlustfreie Totalreflexion* erfolgt. Die Faser besteht dazu aus einem *Kern* mit dem Brechungsindex  $n_2$ , der von einem *Mantel* mit  $n_1 < n_2$  umgeben ist. Hierfür werden *verschiedene Glassorten* benutzt.

Lichtwellen, die unter  $\Theta$  auf die Wände des Kerns treffen, werden dann total reflektiert und im Kern fortgeleitet.

Der typische *Dämpfungsverlauf* ist durch UV- und IR-Absorption begrenzt.

Das Glas muss außerdem sehr *OH-arm* sein. Dessen Absorption-Banden bringen nämlich zusätzliche Verluste. Es existieren *drei günstige Fenster*, die auch noch durch preiswerte Laser und Empfangsdioden unterstützt sind. Das Fenster um  $1,55 \mu\text{m}$  besitzt zusätzlich noch eine *geringe Dispersion*. So sind Frequenzen bis *10 GBit/s* möglich. Mit Entwicklung spezielle Gläser sind heute Dämpfungen unter etwa **2 dB/km** durchaus üblich.

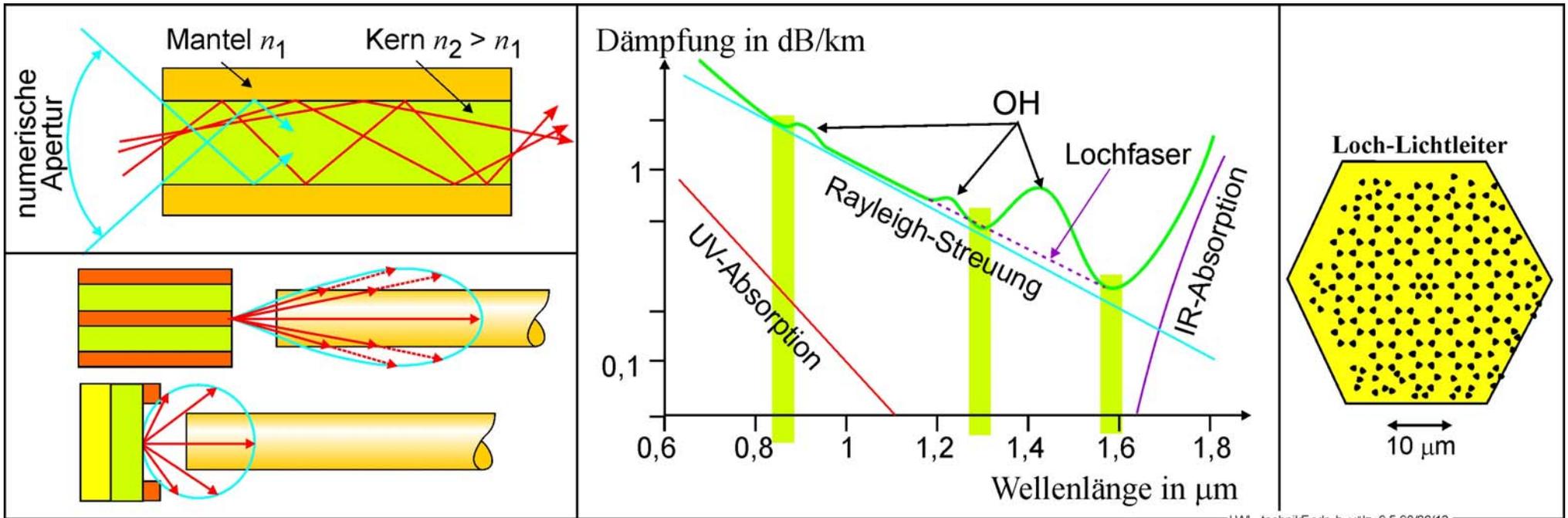
Eine etwa 100-fach bessere Lichtleitung ist mit *photonischen Fasern* möglich.

Sie wurden erstmalig 1999 PHILIP ST. J. RUSSEL hergestellt. Die Lichtleitung erfolgt bei ihnen in Luft.

Doch es gibt kein Mantel-Material mit  $n_1 < 1$ . So wurde die neu entwickelte photonische Technik verwendet.

Dabei gibt es eine Vielzahl, sechseckig verteilter Luftkanäle symmetrisch um den mittleren, etwas größeren Kanal.

Großtechnologisch wird dazu ein Bündel dickerer Glasröhren wird bei erhöhter Temperatur durch Zug gestreckt.



LWL\_technikF.cdr h. vözl 9.5.98/06/12

# Lichtleiter 2

Für die **Einkopplung** von Licht in die Faser ist die **numerische Apertur**  $N_a$  wichtig:

$$N_a = \sqrt{n_2^2 - n_1^2} = \sin\left(\frac{\Theta}{2}\right).$$

Je größer sie ist, desto **leichter ist Licht einzukoppeln**.

Dann durchlaufen aber einzelnen Lichtstrahlen **unterschiedlich lange Wege**  $\Rightarrow$  **Moden-Dispersion**.

Dadurch werden kurze Lichtimpuls um die Zeit der Wegdifferenz verlängert  $\Rightarrow$  reduziert Übertragungsbandbreite

Neben Lichtleiternetzen werden die **Fasern auch eingesetzt**:

- **Lichttransport** an unzugänglichen Stellen.
- **Abbildung von Objekten** mittels eines Faserbündels, z. B. in der Medizin (Magenspiegelung).
- **Leistungsübertragung**, z. B. in der Chirurgie oder zur Materialbearbeitung.
- Einfache Signal-Übertragungen mit Kunststofffasern, z. B. für störfreie akustische Signale, Unterdrückung von Masseverkopplungen..

# Wellen

**Ursprung:** 11. Jh., mittelhochdeutsch für Reisigbündel, zylindrischer Körper und Wasserwoge.  
Zusammenhang mit dem Althochdeutschen *wallen* etwa wandern, reisen, umherschweifen. (Wallfahrtsort!)

**Heute** betrifft Welle folgende **Inhalte:**

1. Sich *fortpflanzende* elektromagnetische, akustische usw. **Schwingung**.
2. Sich zeitweilig aus der Wasser-**Oberfläche** hervorwölbendes Wasser.
3. Sich auf einen **Seil, Draht usw.** ausbreitende Bewegung; Biege-, Torsion- usw. Welle.
4. **Geschehen**, das in großem Ausmaß oder relativ dichter Folge auftritt, z. B **Protestwelle**.
5. Fläche, stellenweise vorhandene **Erhebung**, z. B. im Gelände (**Bodenwelle**) oder beim Teppich.
6. Entsprechend geformtes **Kopfhaar**.
7. Stabförmiges **Maschinenteil** mit oder für Drehbewegung.
8. Umschwung beim **Turnen**.

Im Weiteren interessieren nur **physikalische Wellen**, gemäß der folgenden Beschreibung:

Sich im Raum ausbreitender, weitgehend periodischer, gerichteter Energie- oder Stofffluss.

Neben 1. sind gehören hierzu auch die meisten **Oberflächen-, Biegewellen** usw. gemäß 2. und 3.

Formal können auch **Informations-Wellen** gemäß 4. so angesehen werden.

Da bei ihnen jedoch der Stoff- oder Energietransport unwesentlich ist, werden sie hier nicht weiter berücksichtigt.

# Physikalische Wellen

Ihr *Stoff-, Energie-Fluss* besitzt eine Ausbreitungsrichtung, in die der **POYNTING-Vektor**  $S$  weist (nicht von *to point!*). Ihn führte 1884 JOHN HENRY POYNTING (1852 - 1914) für den Energiestrom der *Elektrodynamik* ein. Dort ist er das *Vektorprodukt* aus elektrischer und magnetischer Feldstärke  $E, H$  gemäß  $S = E \times H$ , z. B. in  $W/m^2$ . Allgemein ist er eine *Leistungs- oder Energiestromdichte*, die eine Flächeeinheit in der Zeiteinheit senkrecht durchdringt. Sie kann für die *Übertragung von Information* benutzt werden und ersetzt dann die Punkt-zu-Punkt-Leitungen (s. o.).

Bezüglich des Energie- oder Stoff-Transports gibt es *zwei Arten von Wellen*:

1. Es wird ein *Transport-Medium benötigt*, z. B. bei Schall-, Wasser-, Biege- und Materie-Wellen.
2. Es ist *kein Transport-Medium* erforderlich, u. a. bei elektromagnetischen und Gravitations-Wellen.

Der zweite Fall ist schwer vorstellbar, wurde jedoch durch den **MICHELSON-MORLEY-Versuch** von 1887 erzwungen. Es gibt *keinen „Äther“!* Das führte zu den beiden *Relativitätstheorien* von 1905 und 1913.

Alle Wellen sind durch eine *Eigenschaft* gekennzeichnet, deren *Ausprägung* sich in Raum und Zeit ändert. Dabei sind dabei zwei Fälle in Bezug auf die Richtung  $S_{\Rightarrow}$  des POYNTING-Vektors zu unterscheiden:

1. Bei **Transversal**-Wellen erfolgt die Änderung *senkrecht* zur  $S_{\Rightarrow}$ .  
Das trifft auf die elektromagnetischen Wellen = **TEM** (transversal elektromagnetisch) zu (ausführlich später).  
Es trifft aber auch weitgehend auf Biegewellen und z. T. auf Oberflächenwellen zu.
2. Bei **Longitudinal**-Wellen ( $\approx$ Längswellen) erfolgt die Änderung *in Richtung* von  $S_{\Rightarrow}$ .  
Typisch hierfür sind u. a. Schall- und Kompressionswellen, die immer ein Medium benötigen.  
Im erweiterten Sinn gehören hierzu auch die Gravitations- und Materiewellen.

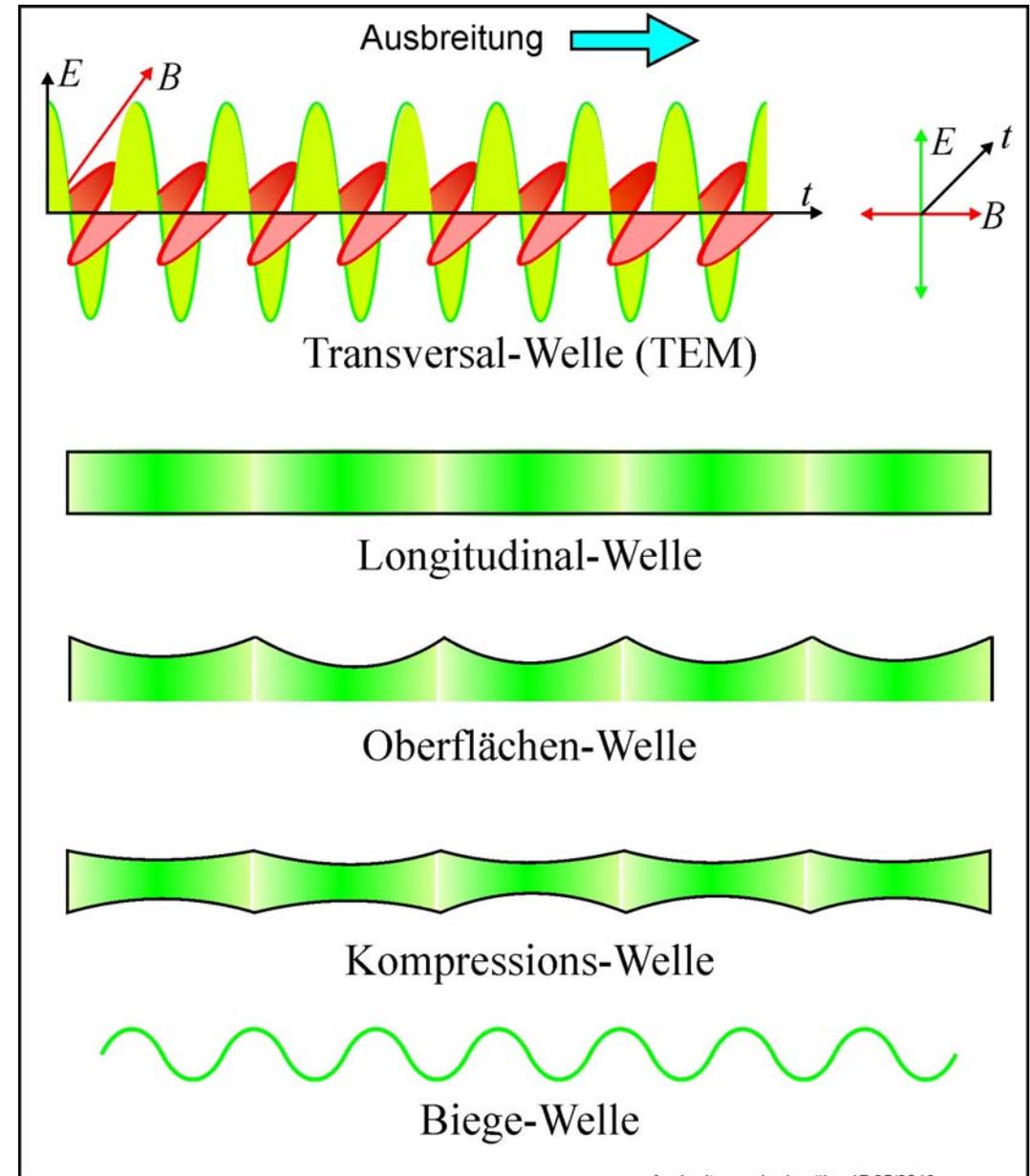
# Nicht-elektromagnetische Wellen

Bei den longitudinalen *Schall*wellen liegt eine Dichtemodulation, z. B. der Luftmoleküle vor. Auch seismische und Erdbebenwellen gehören hierzu.

*Oberflächen*wellen treten an der freien Oberfläche eines Körpers, z. B. bei Wasser auf. Sie sind *vorwiegend transversal* besitzen aber auch longitudinale Anteile. Ihre Dispersion führt zu dem „Überschlagen“ von Wellenbergen. Beachte Tsunami und Gezeiten. Technisch werden sie u. a. für *Filter* und in Reflexion zur *Lichtablenkung* benutzt.

*Kompressions-* und *Scher*wellen in Stäben usw. enthalten transversale und longitudinale Anteile.

*Biegewellen* treten u. a. bei Seilen und Drähten auf. Sie sind überwiegend transversal und können ähnlich dem Licht „polarisiert“ sein.



Ausbreitung.cdr h. vözl 17.95/2012

# Exkurs Materiewellen

Sie wurden 1929 von LOUIS VICTOR DE BROGLIE (1892 - 1987) mit seiner Dissertation eingeführt. Seitdem besteht der *Welle-Teilchen -Dualismus*:

Jedes bewegte Teilchen (und Objekt) kann auch *als Welle interpretiert* werden und umgekehrt. Licht besteht sowohl aus Photonen als auch aus Wellen

Mit dem PLANCKSchen Wirkungsquantum  $h$ , der Lichtgeschwindigkeit  $c$ , der Masse  $m$  und Geschwindigkeit  $v$  gilt

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}.$$

Die allgemeine mathematische Grundlage gehört zur *Quantenphysik*.

Sie geht heute vorwiegend von der SCHRÖDINGER-Gleichung und den dazugehörigen Wellenfunktionen  $\Psi$  oder  $\psi$  aus. Ursprünglich entstand die äquivalente Matrizenmechanik durch HEISENBERG.

**Hinweis:** Physikalische Wellen setze immer ein Feld voraus, das nur über seine Wirkung bestimmt werden kann. Wenn sich diese Wirkung periodisch in Raum und/oder Zeit ändert liegen Wellen vor. Dies gilt u. a. für elektromagnetische, Gravitations- und Schallwellen. *Materiewellen* sind dagegen hauptsächlich durch Interferenz gekennzeichnet.

# Eigenschaften elektromagnetischer Wellen

Sie lassen sich recht universell bezüglich *Photonen im Wellenmodell* beschreiben.

Jedes Photon entspricht dann einer kurzen *an- und abschwellenden Welle*.

Bei „üblichem“ Tageslicht liegt ihre Länge im *mm-Bereich*.

Der POYNTING-Vektor, das elektrische und das magnetische Feld bilden ein *rechtwinkliges Dreiein*.

Für die weiteren Betrachtungen wird auf die *Richtung des elektrischen Feldes* Bezug genommen.

Bei *unpolarisiertem* (üblichem) Licht zeigen die elektrischen Felder der einzelnen Wellen in beliebige Richtungen.

Bei *linear polarisiertem* Licht weisen alle elektrischen Felder in eine Richtung.

Es gibt auch *zirkular polarisiertes Licht*, dann rotieren die elektrischen Felder der einzelnen Wellen gleichförmig.

*Weißes Licht* besteht aus einer Vielzahl von Wellen unterschiedlicher Frequenz und ist meist unpolarisiert.

*Monochromatisches Licht* liegt dann vor, wenn alle Wellen die gleiche Frequenz aufweisen.

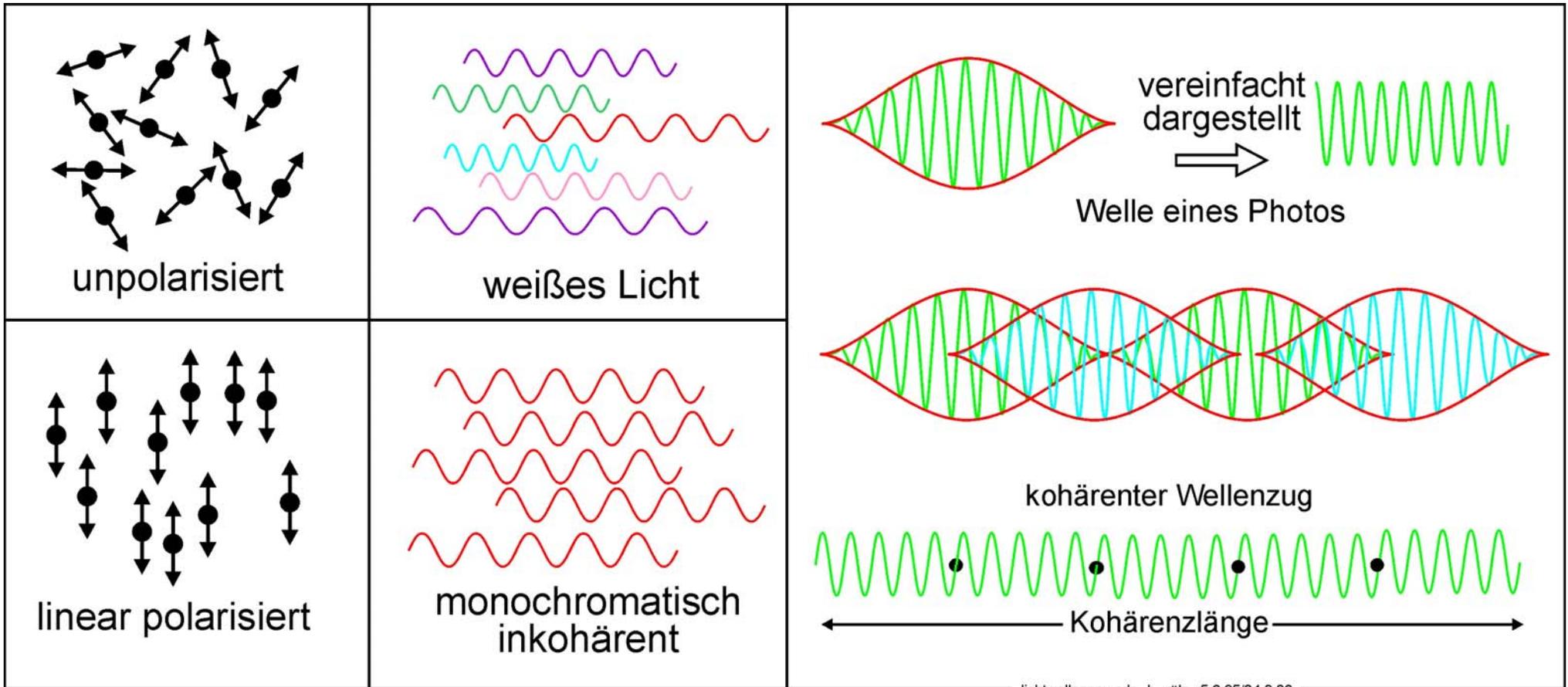
Ein festes phasenstarres Aneinanderkoppeln mehrerer Photonen gleicher Frequenz *verlängert den Wellenzug*.

Technisch leistet dies der *Laser* und führt dann je nach der Anzahl der Photonen zu einer *Kohärenzlänge*.

Nur innerhalb dieser Länge können Interferenzen von Licht erfolgen, z. B. beim *Doppeltspalt* oder *Holografie*.

Auf die *Erzeugung langwelliger Frequenzen* wird im *Teil 3* bei den Verstärkern eingegangen.

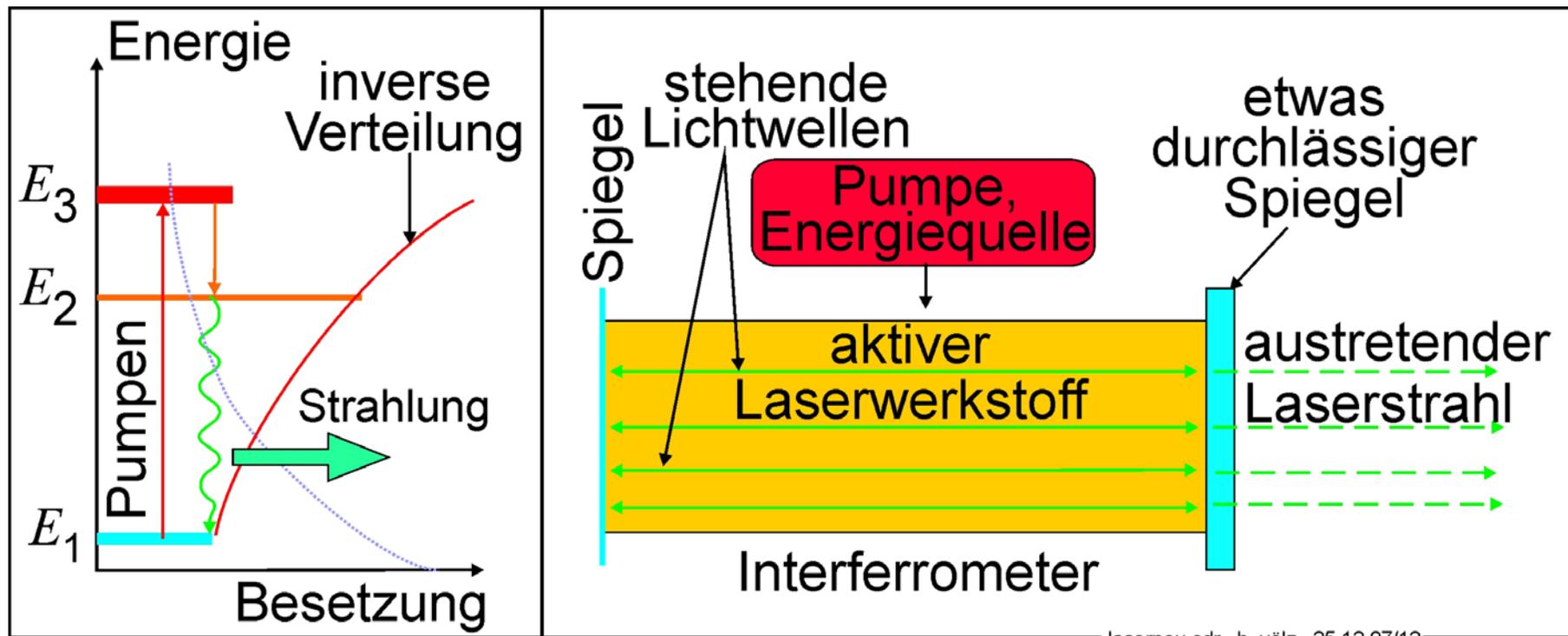
# Photonen im Wellenmodell



lichtwellenneu.cdr h. vözl 5.6.95/24.3.06

# Der Laser

Er beruht auf einem Drei-Term-Schema. Dabei ist der metastabile Zustand  $E_2$  wichtig. Mittels Energiezufuhr werden Elektronen  $E_3$ , gepumpt, um dann auf  $E_2$  zu fallen und dort gespeichert zu werden. Ein entsprechender Laserwerkstoff ist beidseitig mit Spiegeln wie ein Interferrometer abgeschlossen. Fällt ein Elektron von  $E_2$  nach  $E_1$ , so erzeugt es in ihm eine stehende Welle. Durch Resonanz fallen alle Elektronen von  $E_2$  nach  $E_1$  und werden phasenstarr verkoppelt. Der teildurchlässige Spiegel lässt einige davon als Laserstrahl austreten.



# Die Wellengleichung

Eine elektromagnetische Welle wird durch ihre Schwingungs-Amplitude  $u$  und Kreisfrequenz  $\omega$  charakterisiert. Mit der Zeit  $t$  und der Lichtgeschwindigkeit  $c$  gilt im  $xyz$ -Raum eine partielle Differentialgleichung 2. Ordnung. Das ist die Wellengleichung, die in vielen Schreibweisen existiert.

$$\frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \sum_{i=1}^3 \frac{\partial^2 u}{\partial x_i^2}$$

Ihre Lösung sei hier nur für den Fall der Ausbreitung in  $x$ -Richtung angegeben.

Dazu werden die Funktionen  $f_w$  und  $g_w$  als Linearkombinationen von  $\cos(k \cdot x - \omega \cdot t + \varphi)$  eingeführt, dann gilt:

$$u(t, x) = f_w(x + c \cdot t) - g_w(x - c \cdot t).$$

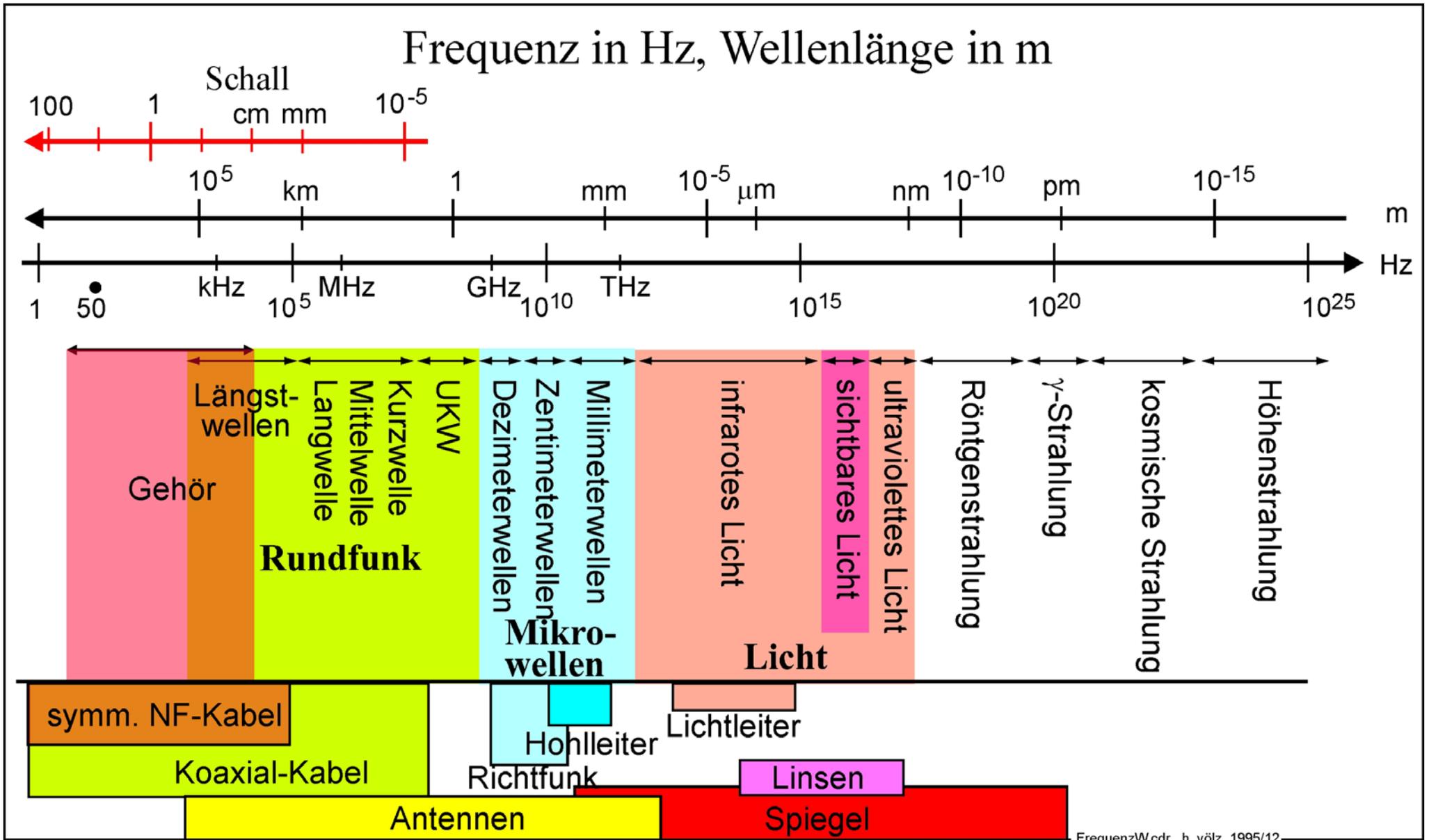
Darin bedeuten  $k$  die **Wellenzahl** als Anzahl der Schwingungen in der Längeneinheit gemäß  $k = \omega / c$ .  $\varphi$  ist ein Phasenwinkel.

Neben der Kreisfrequenz  $\omega$  werden meist die **Frequenz**  $f = \omega / 2\pi$  und die **Wellenlänge**  $\lambda = c / f$  benutzt.

Das riesige Spektrum der möglichen elektromagnetischen Wellen zeigt das folgende Bild.

Es zeigt auch die für die wichtigsten Übertragungsgeräte möglichen Wellenbereiche.

Ferner sind zum Vergleich auch die Schallwellen und der Bereich unseres Gehörs eingetragen.



# Wellenabstrahlung eines Dipols

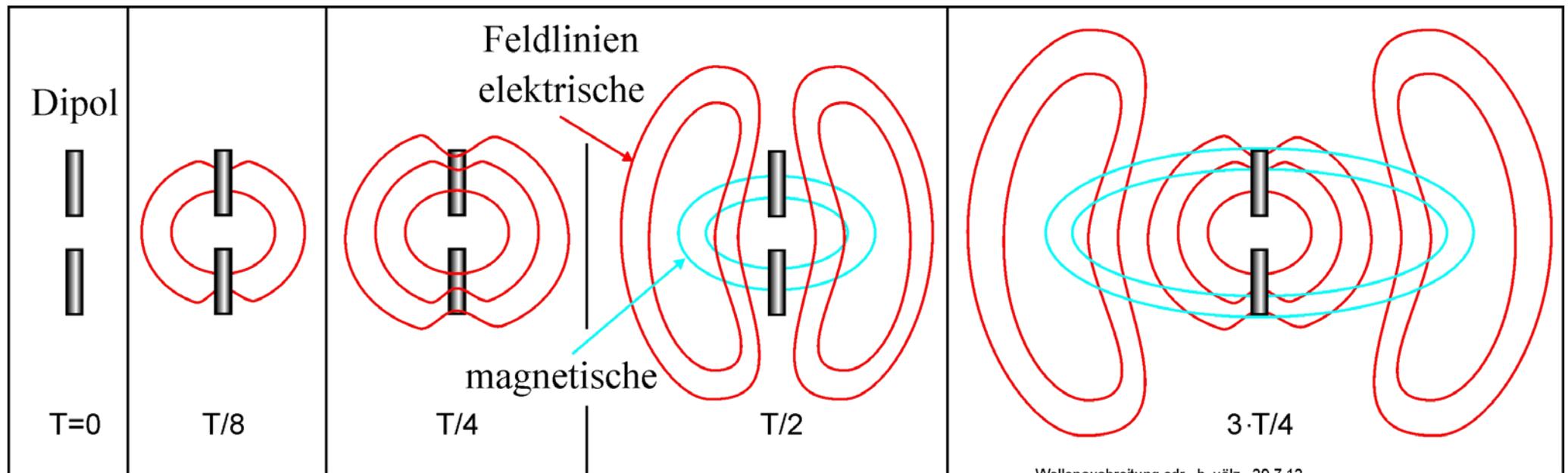
Der Strom im Dipol verursacht ein magnetisches Feld, die Spannung am Dipol ein elektrisches Feld.

Die *Ausbreitungsgeschwindigkeit* der Felder ist die Ursache dafür, dass *Strahlung* eintritt.

Beim Umpolen können die Felder *nicht schnell genug zurückkehren*, um wieder vom Leiter aufgenommen zu werden. Denn dann hat dort schon die Polung gewechselt ( $T/8$  mit  $T=1/f$ ).

Erst im *Fernfeld* bei einer Entfernung  $x > \lambda/4$  besteht kein Phasenunterschied zwischen beiden Feldern.

Im meist unbedeutendes *Nahfeld*, sind die Zusammenhänge kompliziert. Dort nimmt die Antenne auch Energie zurück.



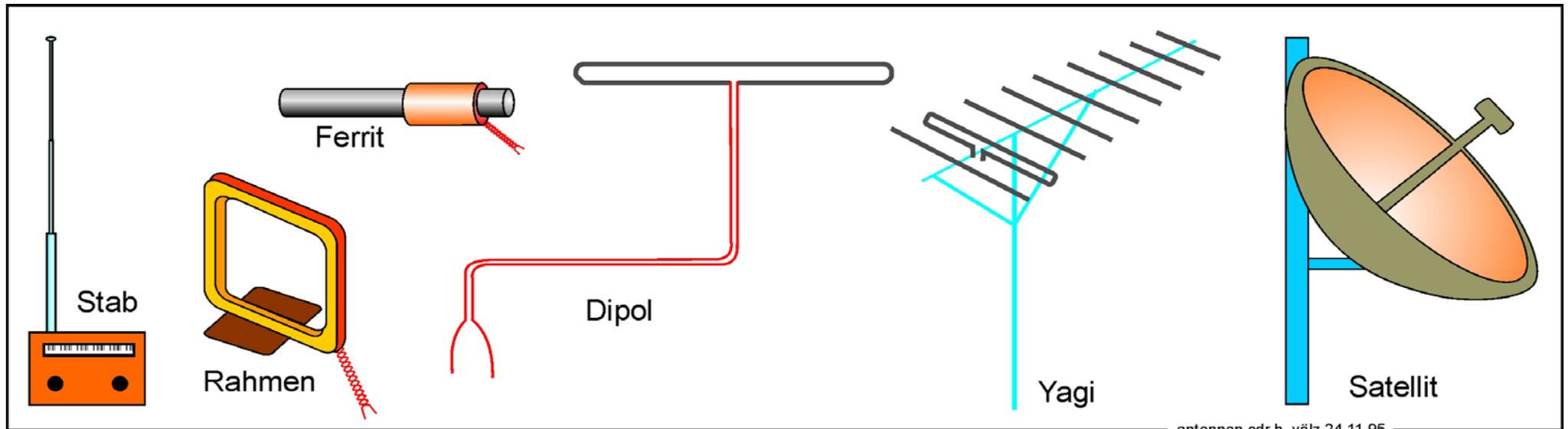
# Antennen

Je nach Wellenlänge und Anwendung existieren unterschiedliche Antennen.

Die Stab-Antenne besitzt keine Richtwirkung.

Die Richt-Charakteristik von Dipol, Rahmen und Ferrit-Antenne ist eine flach liegende Acht.

Die Yagi- und noch mehr die Satelliten-Antenne (auch Schüssel genannt) besitzen eine beachtliche Richtwirkung.



Achtung! Eine *Stabantenne* ist immer nur die (sichtbare) Hälfte. Damit sie wirksam werden kann, benötigt sie die Erde als zweiten Pol (Vergessen Sie nicht Ihre Antenne zu erden). Beim Kofferempfänger wird sie durch das Volumen des Gerätes „ersetzt“.

# Wellenausbreitung um die Erde

Von einer hohen Antenne breiten sich Wellen als Boden- und Raumwelle aus.  
Ihr Verhältnis hängt überwiegend von der Antennenhöhe und Wellenlänge ab.  
Die **Bodenwelle** trifft geradlinig auf die Erdoberfläche.  
Sie reicht umso weiter, je größer die Höhe der Antenne und die Wellenlänge sind.  
Die **Raumwelle** breitet sich nach allen Richtungen aus.  
Sie kann die Erdoberfläche nur dann erreichen, wenn sie *zur Erde reflektiert* wird.

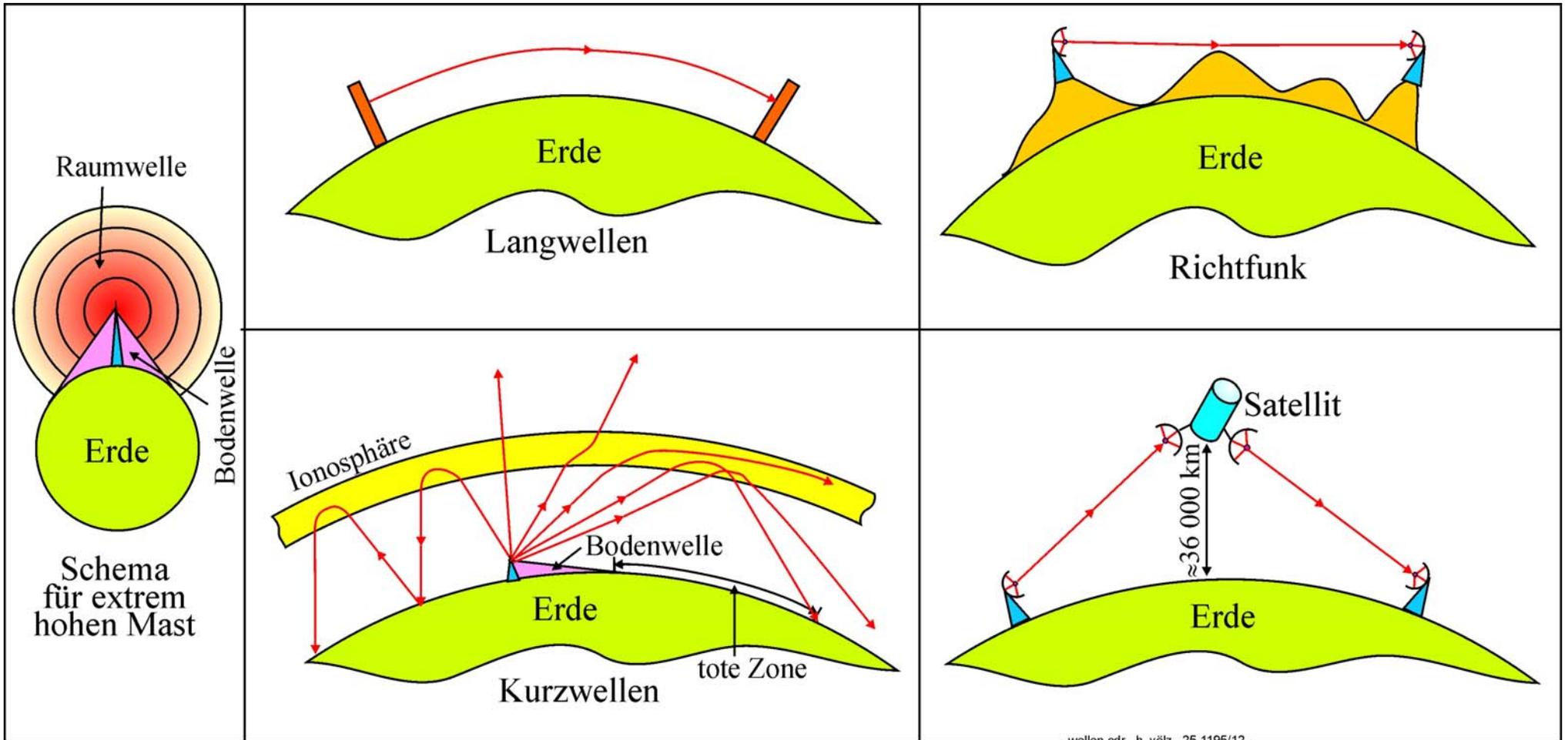
Die (geringe) Leitfähigkeit der Erde führt **Langwellen** (<300 kHz) um die Erde herum.  
Sie reichen daher sehr weit und die Raumwelle hat auf der Erde keine Bedeutung.

**Kurzwellen** (3 - 30 MHz) werden an sonnenbedingten **Ionisations**schichten der hohen Atmosphäre *reflektiert*.  
So werden Reichweiten bis zu 8 000 km mit Dämpfungen um 70 dB (1:7000) erreicht.  
Zwischen der Bodenwelle und den reflektierten Wellen entsteht oft eine tote Zone.  
Z. T. können Raum- und Bodenwelle auch *interferieren* und sich dabei teilweise oder ganz auslöschen.  
Mit Änderung der Sonneneinstrahlung verschieben sich die Empfangszonen und es tritt wechselnder Schwund auf.

Bei **Mittelwellen** gibt es Übergangsverhalten.

Bis zu 50 km können oberhalb von 1 GHz mit Spiegeln auf höheren Masten **Richtfunkverbindungen** genutzt werden.

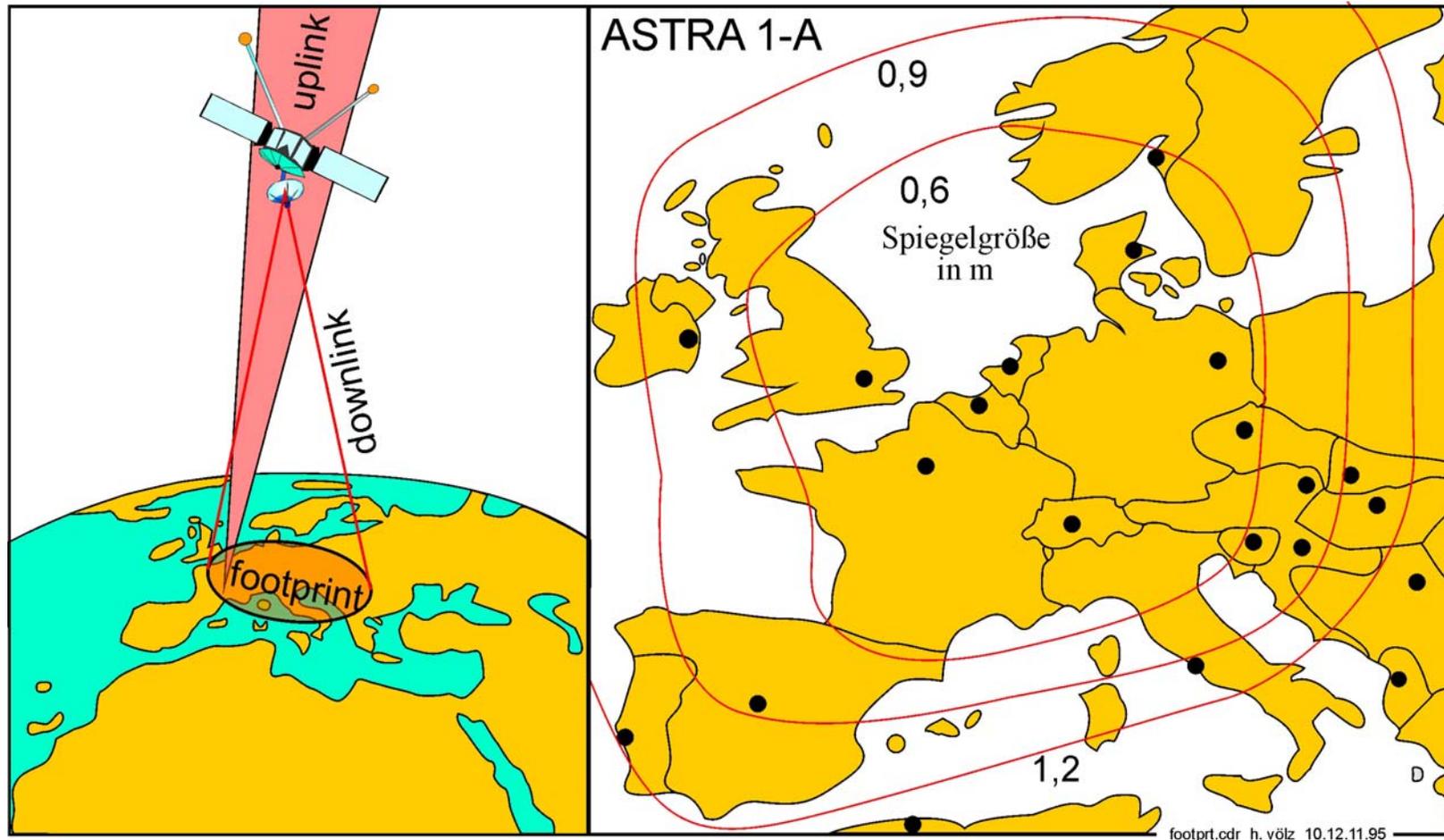
Weltweite Übertragungen sind mit **stationären Satelliten** in etwa 36 000 km Höhe üblich.



wellen.cdr h. völz 25.1195/12

# Satelliten-Technik

Hier gibt es einen *uplink* der Signale zum Satelliten sendet und einen *downlink* für terrestrische Empfänger. Für sie wird dabei der so genannte *Footprint* ausgeleuchtet.



# Optischer Richtfunk

= optische Freiraumkommunikation, Laserlink, englisch Free-Space Optics (FSO)

Ein Laserstrahl wird moduliert und per Linsenbündelung gerichtet in den Raum abgestrahlt (nicht per Lichtleiter).

Eine relativ große Linse sammelt das Empfangslicht und leitet es zur Empfangsdiode.

Es entstehen richtfunkähnliche Punkt-zu-Punkt-Verbindungen über einige Kilometer mit mehreren GBit/s.

Sende-Energie muss so gering bleiben, dass keine Gefahr für Mensch, Tier, Luftfahrt usw. eintreten kann.

Oft ist Infrarot besser als grünes Licht.

**Vorteile:** lizenzfreier Betrieb, hohe Datensicherheit (Bündelung), hohe Bitraten, keine Interferenz, schneller Aufbau  
Anlagen müssen nicht „vergraben“ werden.

**Nachteile:** Störungen in der Atmosphäre durch Luftflimmern, Umgebungslicht, Abschattung, Witterungseinflüsse (Nebel, Regen) und Umweltverschmutzung z. B. Rauch.

# Typische Frequenzbereiche

<b>Längstwellen</b> (100 km)	Bodenwelle ist über größte Entfernungen stärker als Raumwelle; auch unter Wasser möglich
<b>Langwelle</b> (1-10 km)	Bodenwelle > 1000 km, Raumwelle nur nachts bei größeren Entfernungen stärker.
<b>Mittelwelle</b> (0,1- 1 km)	Bodenwelle > 100 km, Raumwelle nachts durch Reflexion an Ionosphäre größere Reichweite. Überlappung bewirkt Schwund
<b>Kurzwelle</b> (10 - 100m)	Bodenwelle unbedeutend, Raumwelle erlangt durch Reflexion an Ionosphäre sehr große Reichweiten, hängt stark von Tageszeit ab.
<b>UKW, FS</b> (0,1 - 10 m)	Nur Sichtreichweite, selten witterungsbedingte Überreichweiten. Mehrfachnutzung von Frequenzen
<b>Richtfunk</b> (1 cm - 1m)	Nur optische Sicht, Molekülresonanzen bewirken Verluste. Gute Bündelung möglich
<b>Licht:</b> mm-Wellen	Dämpfung durch Regen und Nebel (s. u.)

# Weitere Anwendungen

Neben den behandelten Techniken existieren noch viele andere Funkdienste. Hier seien nur einige kurz erwähnt.

**Rundfunk. FS:** Digital Audio Broadcasting (DAB), Digital Video Broadcasting-Terrestrial (DVB-T), Funkfernschreiben (RTTY = Radio Teletypewriter).

**Amateurfunk,** General Packet Radio Service (GPRS).

**Betriebsfunk.**

**Mobiltelefon** usw.: A-, B-, C-, D- und E-Netz, UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) DECT (Digital Enhanced Cordless Telecommunications), GSM (Global System for Mobile Communications), Jedermannfunk (u. a. CB-Funk).

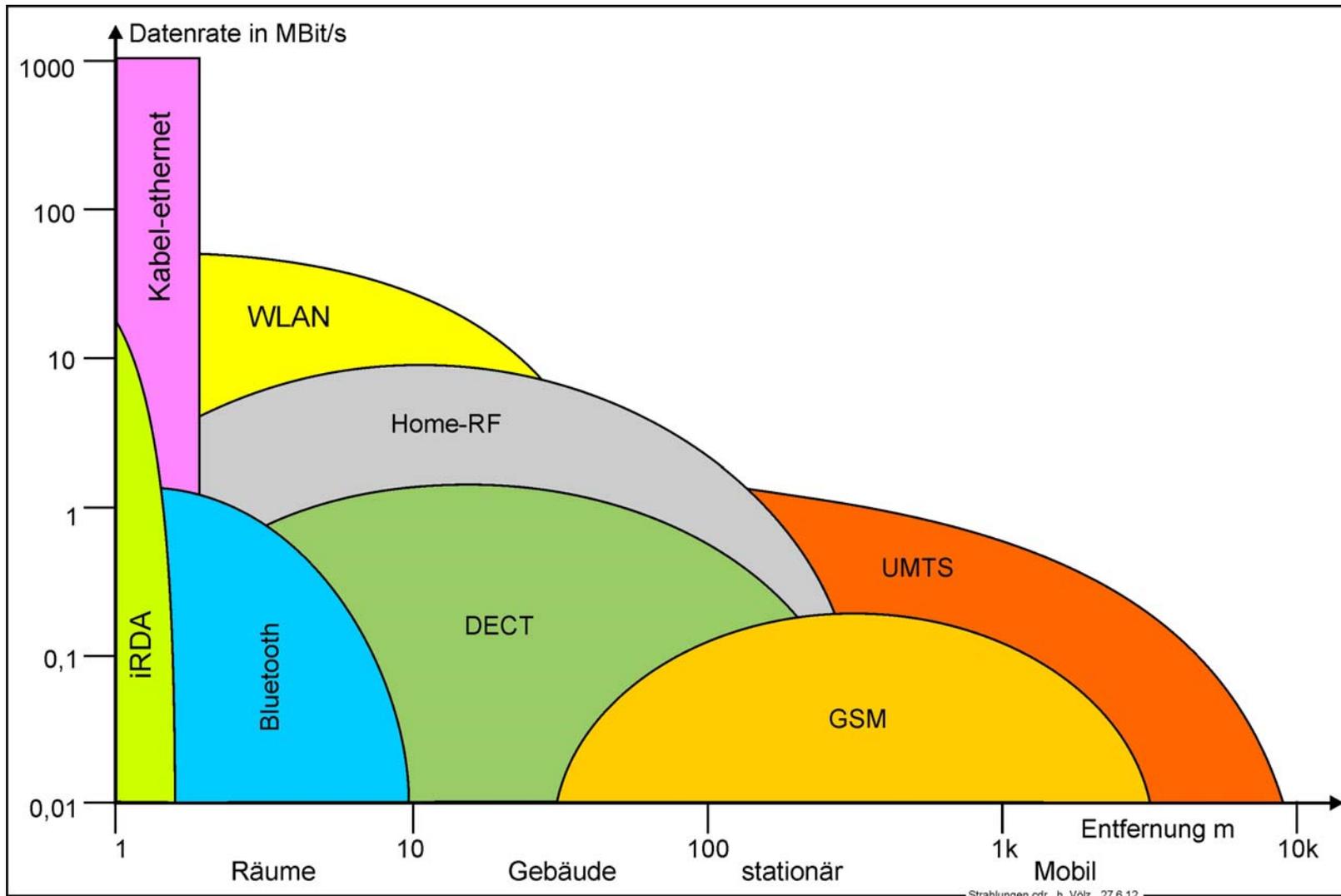
**Nahbereich von Geräten:** Bluetooth, IR (Infrarot-Verbindung), WLAN (Wireless Local Area Network), RFID (Radio Frequency Identification).

**Funkfernsteuerung:** Fernbedienungen, Haustechnik, Forschung, Industrie und Modellbau (auch mit Ultraschall).

**GPS** (Global Positioning System).

**Telemetrie.**

**Radar** (Radio Detection And Ranging).



# Exkurs Phasen-, Gruppengeschwindigkeit, Doppler-Effekt

Oft werden mehrere Frequenzen gleichzeitig übertragen.

Sie überlagern sich dann u. a. **Wellenpaketen, -gruppen** mit Maxima und Minima.

Insbesondere auf Leitungen kann die Fortleitungs-Geschwindigkeit frequenzabhängig sein (Dispersion).

Dabei entstehen zwei typischen Geschwindigkeiten.

- **Phasengeschwindigkeit** betrifft die Bewegung der Phase, z. B. Maximum, Minimum oder Nulldurchgang einer monochromatischen Welle.
- **Gruppengeschwindigkeit**: betrifft das Wellenpaket und entspricht der Fortpflanzung der Hüllkurve, die sich aus mehreren Frequenzen zusammensetzt.

## Doppler-Effekt

Er tritt dann auf, wenn der **Sender oder Empfänger sich bewegt**.

Für Wellen mit **Träger, z. B. Schall** verändert sich dabei die Wellenlänge und wegen feststehender Ausbreitungsgeschwindigkeit die empfangene Frequenz.

Bei den trägerfreien **elektromagnetischen Wellen** wird dagegen entsprechend der Relativitätstheorie unabhängig von der Bewegung stets die Lichtgeschwindigkeit eingehalten.

# Literatur

- [Frank 69] Frank, H.: Kybernetische Grundlagen der Pädagogik. 2. Aufl. Bd. 1 + 2. Agis-Verlag, Baden-Baden 1969
- [Friedrichs] Friedrichs, B.: Kanalcodierung - Grundlagen und Anwendungen in modernen Kommunikationssystemen. Springer, Berlin - Heidelberg - New York, 1996.
- [Völz 01] Völz, H.: Wissen - Erkennen - Information. Shaker Verlag, Aachen 2001
- [Völz 07] Völz, H.: Handbuch der Speicherung von Information Bd. 3 Shaker Verlag, Aachen 2007
- [Völz 08] Völz, H.: Kontinuierliche Digitaltechnik. Shaker-Verlag. Aachen 2008
- [Völz 88] Völz, H.: Entropie und Auffälligkeit. Wissenschaft und Fortschritt 38 (1988) 10, 272 - 275
- [Völz 90] Völz, H.: Computer und Kunst. Urania-Verlag, Leipzig - Jena - Berlin 1990
- [Zemanek] Zemanek, H.: Elementare Informationstheorie. R. Oldenbourg Verlag, München - Wien 1975

## **Download 27.5.12.**

Amateurband - Wikipedia.mht

Eight-to-Fourteen-Modulation - Wikipedia.mht + *Tabelle: SCEN103 -- 12-10 Class.mht*

Filter (Elektrotechnik) - Wikipedia.mht

Frequenzband - Wikipedia.mht

Komplexe Wechselstromrechnung - Wikipedia.mht

Nahfeld und Fernfeld (elektromagnetische Wellen) - Wikipedia.mht

Resonanz (Physik) - Wikipedia.mht

Schwingkreis - Wikipedia.mht

Wechselstrom - Wikipedia.mht

Wellengleichung - Wikipedia.mht

Wellenlänge - Wikipedia.mht