

# Das Unerklärbare bei Verstärkern und Oszillatoren

Bei Angabe der Quelle ist das Material zum privaten Gebrauch voll nutzbar  
Bei kommerzieller Nutzung bzw. in Publikationen usw. ist eine Abstimmung mit mir notwendig  
Bilder sind in höherer Qualität ca. 2000×3000 Pixel oder \*.cdr Version 12 verfügbar

Dieses Material wurde heruntergeladen: [aes.cs.tu-berlin.de/voelz/PDF/Verstaerker.pdf](http://aes.cs.tu-berlin.de/voelz/PDF/Verstaerker.pdf)  
Email: [hvoelz\(at\)fpk.tu-berlin.de](mailto:hvoelz(at)fpk.tu-berlin.de) bzw. [h.voelz\(at\)online.de](mailto:h.voelz(at)online.de)  
Prof. Dr. Horst Völz, Koppenstr. 59, 10243 Berlin, Tel./Fax 030 288 617 08

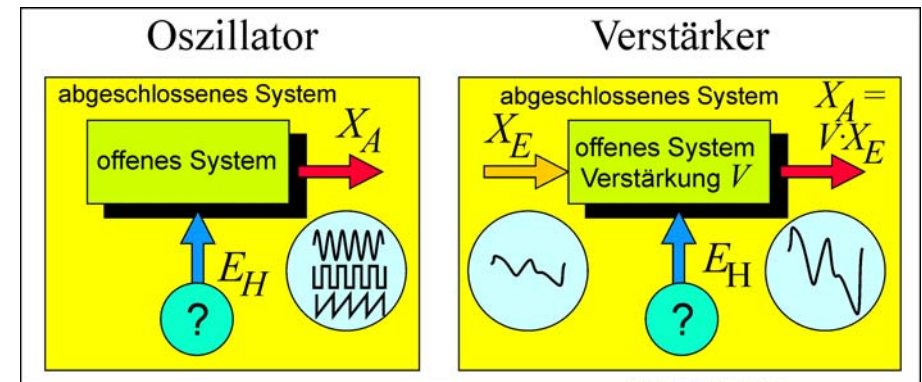
## Gliederung

Problemstellung ⇒ Begriffe und Inhalte  
Mechanische Verstärker = Umformer (Hebel, Schraube, Rollen, Hydraulik, Getriebe)  
Taster, Schalter, Relais usw. ⇒ Steuerung - Regelung  
Elektronische Verstärker: Steuerung frei beweglicher Elektronen ⇔ Leistungs-Verstärker  
Parametrische = Reaktanz-Verstärker  
Mikrowellen-, Laufzeit-Röhren (Klystron, Wanderwellenröhre, Magnetron, Scheiben-Triode, Gunn-Element usw.)  
Maser - Laser  
Einschub Natur-Erkenntnis  
Schwingungen - Oszillatoren  
Zusammenfassung und Schlussfolgerung  
Zu fundamentalen Gesetzen  
Abschließende Folgerungen

## Das Prinzip

Verstärker und Oszillatoren stellen an ihrem **Ausgang einen Output  $X_A$**  zur Verfügung  
Bei Verstärkern folgt er dem **Input  $X_E$** , und mit der **Verstärkung  $V$**  gilt  $X_A = V \cdot X_E$   
In beiden Fällen muss zusätzlich eine **Hilfs-Energie  $E_H$**  bereitgestellt werden  
Im kybernetischen Sinn sind daher Verstärker und Oszillatoren **offene Systeme**, die externe Energie benötigen  
Somit erfolgen Verstärkung und Schwingungserzeugung **auf Kosten der Energie  $E_H$**   
Es gibt recht unterschiedliche **Varianten** der Verstärkung bzgl. Nutzung, Steuerung der Hilfsenergie  
Verstärkung und Schwingungserzeugung sind meist auf **zeitliche (elektrische) Signale, Erscheinungen** bezogen  
**Verstärkung** gibt es aber auch **zeitunabhängig** und **geometrisch** (räumlich) bzgl. Konzentration  
Ähnlich treten den **Schwingungen** auch räumliche **Wellen** und **periodische Konzentrations**-Änderungen auf

**Polemik:** Betreffen die Kosten der Geschmacks-**Verstärker** unsere Gesundheit?



## Das Problem

Die **üblichen Darstellungen** von Oszillatoren und Verstärkern sind fast immer nur **Beschreibungen** der Art: jetzt und danach geschieht dieses und jenes

Wissenschaftlich wären jedoch **Erklärungen**, abgeleitet im Sinne von *Ursache*  $\Rightarrow$  *Wirkung*: es geschieht weil Dazu müssen Eigenschaften und Verhalten beider aus **Gesetzen, Theorien oder Hypothesen** der Wissenschaft (Physik, Chemie usw.) abgeleitet werden

U. a. ist dabei der **Energieerhaltungssatz** wichtig, durch ihn muss u. a.  $E(X_A) \leq E_H$  gelten

Im Folgenden werden Erklärungen auf dieser etwas verallgemeinerter Basis versucht

Beschreibung	Erklärung
<i>erfolgt</i> sprachlich, schriftlich. bildlich. mimisch, gestisch <i>dient</i> der Informationsweitergabe	<b>Ableitung</b> aus Gesetzen, Theorien, Hypothesen, Zusammenhängen
<i>betrifft</i> Erlebnisse, Tatbestände, Personen, Sachen, Ideen <i>erfolgt</i> phänomenologisch, deskriptiv Schilderung. Erzählung, Mitteilung	<b>Abbildung</b> eines Sachverhaltes in einer Theorie <b>Deutung und Begründung</b> der Zusammenhänge Logisches Denken, Verstehen, Lehren
Beschreibungs-Sprachen der Rechentechnik für Programme und Geräte <b>Achtung:</b> spottet jeder Beschreibung	Mitteilung = (offizielle) Äußerung: z. B. Kriegs-, Liebes-, Willens-, eidesstattliche, bindende, feierliche Erklärung
Ziel einer <b>Erklärung</b> ist es, im <b>Gegensatz zur Beschreibung</b> , zum <b>Wesen</b> der untersuchten Sachverhalte beziehungsweise Zusammenhänge vorzudringen und damit <b>wissenschaftliche Voraussagen</b> zu ermöglichen.	

Erklärung bei:

IMMANUEL KANT (1724 - 1804): „Ableitung aus einem deutlich angebbaren Prinzip“

GEORG WILHELM FRIEDRICH HEGEL (1770 - 1831): „Rückführung von Erscheinungen auf vertraute Verstandesbestimmungen“

## Begriffe und Inhalte

### Verstärker $\Leftrightarrow$ Oszillator

Verstärker und Schwingungen hängen recht eng zusammen

**Verstärker** sollen ein Geschehen, eine Wirkung vergrößern, stärken, erhöhen

**Oszillatoren** erzeugen periodische **Schwingungen**, heißen daher auch Generatoren oder Schwingungserzeuger

Eine Verstärkung kann auch **Schwingungen betreffen**, z. B. bei Schall und elektromagnetischen Wellen

Schwingungen treten außerdem oft infolge von **Rückkopplung bei Verstärkern** auf

**Periodisches** Geschehen hängt oft **Resonanz-Erscheinungen** zusammen, die dann **verstärkend** wirken

## Verstärker und Verstärkung

Es gibt sie in großer Vielfalt und auf vielen Gebieten, u. a.:

**Elektrotechnik:** Gerät zur Verstärkung elektrischer Signale, u.a. mittels *Relais, Röhren, Transistoren*, in vielen Varianten mit sehr *unterschiedlichen Funktionsweisen* s. u.

**Kraft-, Druck-V.**, z. B. Hebel, Flaschenzug, Getriebe

**Optischer V.:** Gerät zur Verstärkung von optischen Signalen, u.a. auch *Laser* und Maser

**Bild-V.:** System mit Bilder besser sichtbar gemacht werden, z.B. *Elektronen-Vervielfacher* oder bzgl. Infrarot

**Fotografie:** *chemische Lösung* zum Verstärken von Negativen

**Röntgenbilder:** *Folie oder Zusatzstoff* zur Erhöhung der Wirkung von Röntgenstrahlen bei Bildern

**Hydraulischer V.:** Gerät zur Verstärkung hydraulischer Größen

**Verkehr:** Fahrplanleistung (Fahrzeuge) zur zeitweiligen Verdichtung eines Taktverkehrs

### Nicht technisch

**Psychologie:** ein Reiz, der als Konsequenz eines bestimmten Verhaltens auftritt

**Konditionierung:** Belohnung, Motivierung (positiv, z. B. Geld, Lob) bzw. unangenehmer Reize (negativ, z. B. Schmerz, Hunger) für wirksames *Lernen, Lerntheorien*

**Medienwirkung:** Hypothese: Massenkommunikation kann Verstärkung bestehender Einstellungen bewirken

## Mittelbare Verstärker, z. B. Chemie, Genetik

Ein *Katalysator* erhöht die *Reaktionsgeschwindigkeit* bei chemischen Prozessen

Er senkt dazu die zu überwindenden *Energieschwellen*

In der *Genetik* gilt u.a. für Enzyme das *Schlüssel-Schloß-Prinzip*

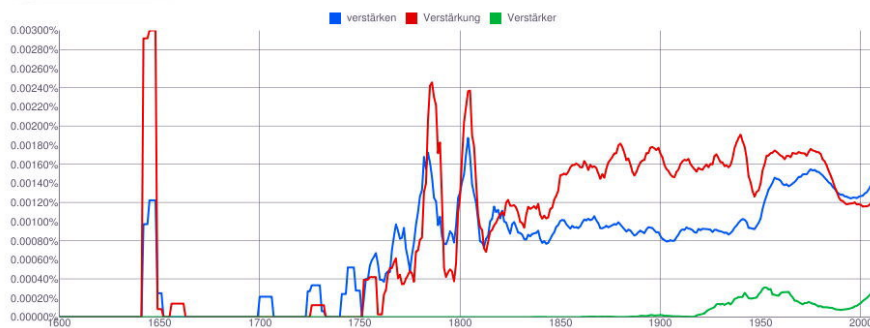
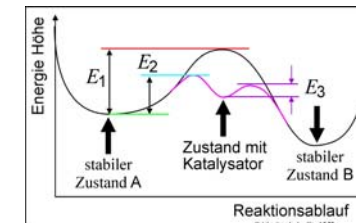
Ein Prozess läuft nur dann ab, wenn das entsprechende *Enzym* vorliegt

*Transkriptions-V.* = Enhancer der Genetik bzgl. der DNA mit regulierender Funktion

Beim *Immunsystem* müssen erst die passenden *Antikörper* gebildet werden

*Geschmacks-V.* Glutaminsäure, dessen Verbindungen (E 620 bis E 625) kann bei empfindlichen Menschen Taubheitsgefühl in Nacken, Rücken und Armen, Kopfschmerzen, Herzklopfen, Schwächegefühl auszulösen

*Intelligenz-V.:* Computer  $\leftrightarrow$  Drogen

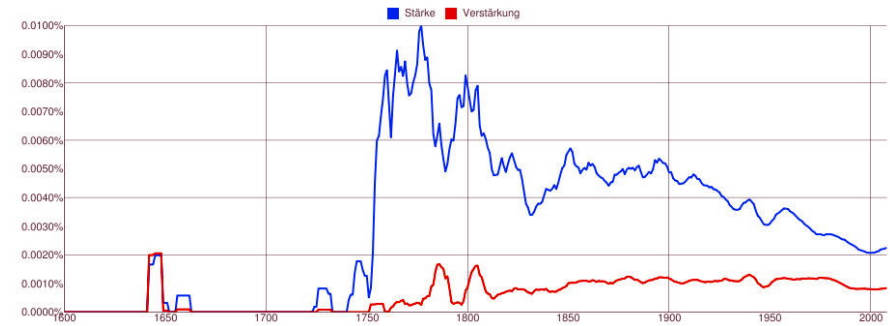


*Verstärker* im elektrisch-elektronischen Sinn beginnen erst nach 1900  
Selbst das Maximum um 1800 liegt zeitlich auch vor dem elektromagnetischen Relais



## Stärke ≠ Verstärkung

- **körperliche Kraft**
- **Macht**
- **Funktions-, Leistungsfähigkeit**
- Besondere **Fähigkeiten, Begabungen**, seine Stärke ist Mathematik
- **Vorteilhaftes einer Sache** = wertvolle Eigenschaft, Vorzug
- **Gehalt; Konzentration** von etwas, z. B. die Stärke des Kaffees, eines Medikaments
- **Ausmaß, Größe, Grad der Intensität**: die Stärke des Verkehrs, der Schmerzen
- **Leistung, Wirksamkeit**, z. B. Stärke eines Motors
- **Anzahl** = zahlenmäßige Größe: die Stärke einer Armee
- **Dicke, Festigkeit** um Stabilität zu bewirken, z. B. bei Blechen, Papier
- **weiße, pulverige Substanz** aus verschiedenen Pflanzen (z. B. Kartoffel), u.a. zum **Stärken von Wäsche**



# Mechanische Verstärker = Umformer auf Kosten anderer Eigenschaften

## Vierpol als eine Verallgemeinerung

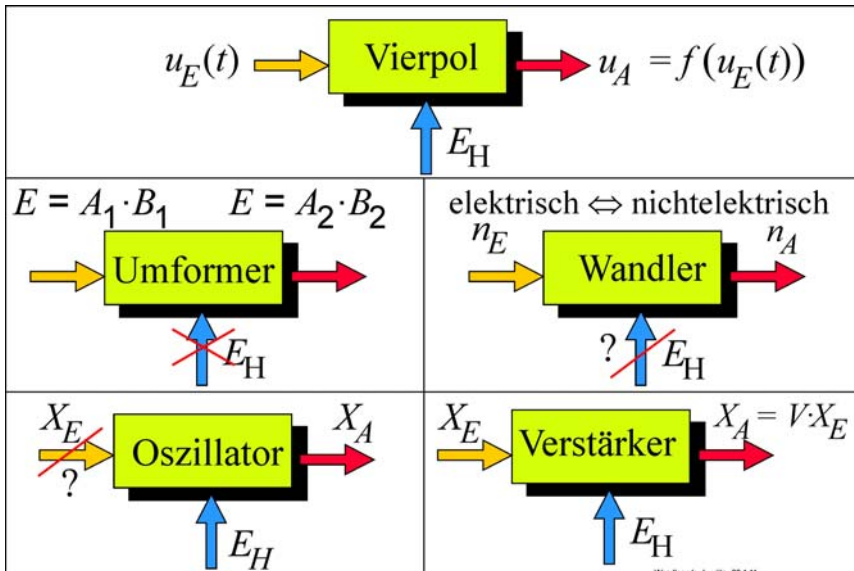
Der typische Vierpol tritt in der Nachrichtentechnik auf, sofern keine Hysterese oder Ähnliches auftritt, gilt zwischen den **Eingang- und Ausgangssignalen**  $u_A(t) = f(u_E(t))$

**Passive Vierpole** kommen ohne Zusatz-Energie  $E_H$  aus, **aktive** verlangen sie

Zu den Vierpolen gehören u. a. die folgenden **vier Varianten**

Sie sind dadurch gekennzeichnet, dass einige Größen nicht vorkommen

- **Umformer** wandeln eine **Energieart** in eine andere. Sie benötigen meist **keine Hilfsenergie**  $E_H$ . Typisch sind Wechselrichter, Transformatoren, Spannungswandler, aber auch mechanische Hebel und Getriebe
- **Wandler** bewirken Umsetzungen: **nichtelektrische Größen**  $n_E \leftrightarrow$  **elektrische Signale**  $u_A$ . Beispiele sind für Schall Mikrofone und Lautsprecher, für Bilder Fotoapparate und Monitore. Sie benötigen oft  $E_H$ . Sie werden hier nicht weiter behandelt, da kein direkter Bezug zum Thema besteht [Völz 1999]
- **Verstärker** vervielfachen den **Input**  $X_E$  mittels zugeführter **Energie**  $E_H$  zum größeren **Output**  $X_A$ ,
- **Oszillatoren** erzeugen aus zugeführter Energie  $E_H$  einen **periodischen Output**  $X_A$  nur in Sonderfällen besitzen einer Input  $X_E$ , der dann aber nur Parameter der Schwingung steuert



## ARCHIMEDES (284 - 212 v.Chr.)

Er **berechnete** Kreisumfang, Kegel- und Zylinderinhalt, Quadratur von Ellipse und Parabel, Quadratwurzel und löste Gleichungen dritten Grades

Ferner fand er **physikalische Grundgesetze**: Schwerpunkt, Hebel, spezifisches Gewicht, Statik und Auftrieb, Gesetze der Optik)

Er befasste sich mit **Sternmessungen**, wies die **Kugelwölbung der Weltmeere** nach und baute ein **Planetarium**

215 v.Chr. bestimmt er die Sandzahl zu  $10^{63}$  Sandkörnern, aus denen die Welt bestehen soll

212 v.Chr. setzte er angeblich mit einem riesigen Spiegel die römische Flotte bei Syrakus in Brand

Im Zusammenhang der hier durchgeführten Betrachtungen sind **zwei ältere Daten** wichtig

250 v.Chr. findet er die **Gesetze des Hebels** und der **schiefen Ebene**

239 v.Chr. erfindet den **Flaschenzug** und wendet ihn in der Hafenstadt Syrakus (Sizilien) an

Mit ihm konnte König HIERON ein großes Schiff allein ins Wasser gleiten lassen, so überzeugte er ihn von der Bedeutung technischer Wissenschaft

Weiter sind **zwei Anekdoten** über ihn bedeutsam: „Heureka“ und sein Tod

## Heureka

Der Legende nach besaß König HIERON II von Syrakus einen goldenen Kranz (**Krone**)

Er hatte den Verdacht, dass er evtl. mit Silber **gefälscht** sei

Die für damalige Zeiten sehr schwierige Aufgabe übertrug er ARCHIMEDES

Dieser fand die Problemlösung, als er **zum Bade in die Wanne stieg** und dabei das Wasser **überlief**

So waren das Volumen und mit dem Gewicht das spezifische Gewicht und damit der Silberanteil zu bestimmen

Mit dem Ruf „**Heureka**“ (Ich hab 's!) soll er nackt nach Hause gelaufen sein,

um sofort den entsprechenden Versuch mit der Krone sofort durchzuführen

Sie war gefälscht!



Ob die Stange bricht?

## Tod des ARCHIMEDES

Im 2. Punischen Krieges belagerten die Römer von 214 bis 212 v.Chr. Syrakus

212 rückten sie endlich unter Leitung des Konsuls CLAUDIUS MARCELLUS als Sieger in Syrakus ein

ARCHIMEDES soll gerade geometrische Figuren zu einer Berechnung in den Sand gezeichnet haben

Er war so tief in sein Problem versunken, dass er einen sich nähernden römischen Soldaten aufforderte:

„Störe mir meine Kreise nicht!“

Daraufhin habe der ihn erschlagen und das sogar, obwohl die Soldaten den ausdrücklichen Befehl hatten, ARCHIMEDES auf alle Fälle zu verschonen

Deutlich anderer Meinung ist der Tschechische Schriftsteller *Karel Čapek* (1890 - 1938)

**Kurz-Erzählung** „Archimedes' Tod“ 1938. („Wie in alten Zeiten“. Aufbau-Verlag, Berlin 1977, S. 40)

Es war bekannt, dass ARCHIMEDES viele wirksame Kriegsmaschinen erfand, um den Feind abzuwehren,

u. a. Steinschleudern, Flaschenzüge und Haken, mit denen römische Schiffe hochgezogen werden konnten, um sie dann zerbersten zu lassen, sowie optische Vorrichtungen, um sie in Flammen zu setzen

In diesem Sinne wollte ihn nun der Konsul für Rom gewinnen, um dessen Weltmacht weiter zu stärken

Doch hierzu war ARCHIMEDES nicht zu überzeugen und daher musste er sterben

Diese Variante hat ČAPEK 1938 mit hoher Aktualität – auch für heute – literarisch aufbereitet (s. Ende)

## Hebel und Transformator

Beide arbeiten *ohne Hilfs-Energie*  $E_H$

Da sie *verlustfrei* angenommen werden, liegt am *In- und Output* liegt die *gleiche Energie*  $E(X_E) = E(X_A)$  vor

Sie ist aber als *Produkt zweier Größen* bestimmt

Beim *Hebel* die *Längen*  $l_1$  und  $l_2$  sowie die *Kräfte*  $F_1$  und  $F_2$ , gemäß  $E = l \cdot F$

Beim *Transformator* die *Spannungen*  $U_1$  und  $U_2$  sowie die *Ströme*  $I_1$  und  $I_2$  gemäß  $E = U \cdot I$

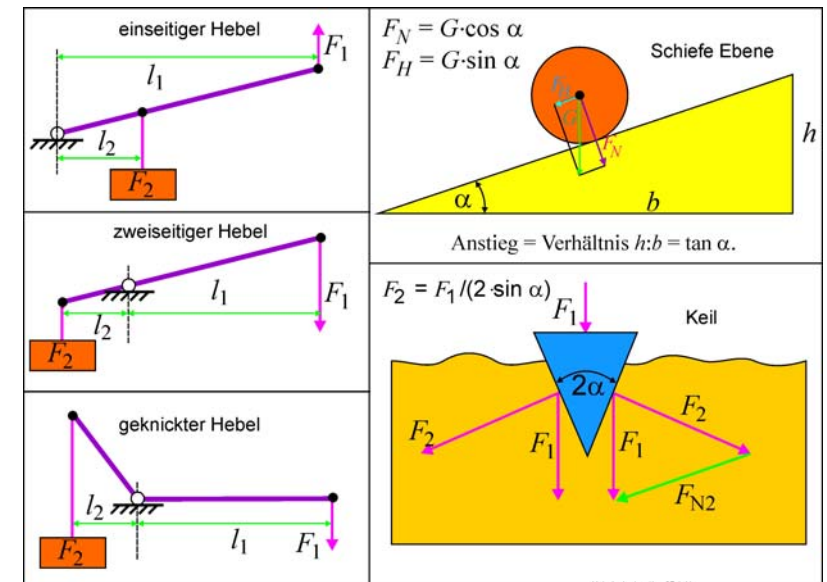
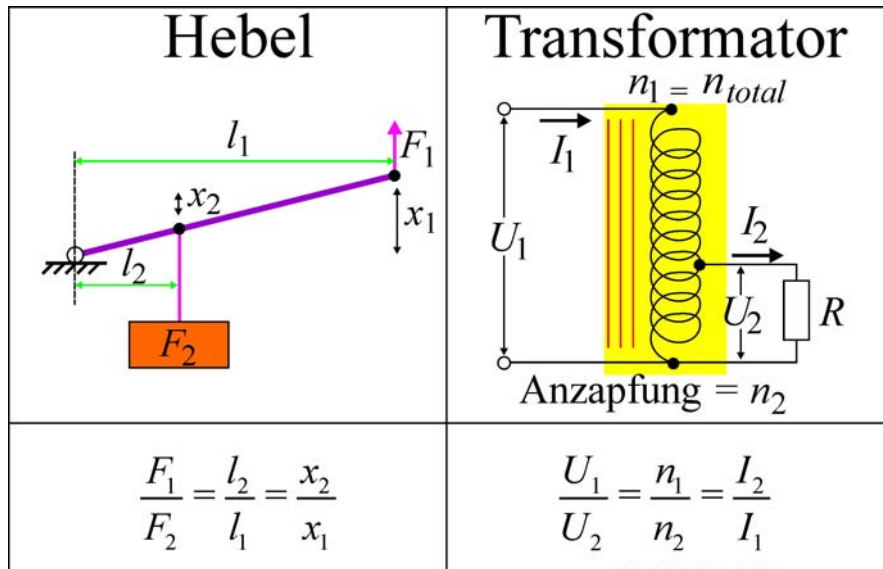
So ist es möglich, *eine Größe auf Kosten* der anderen zu vergrößern, *zu verstärken*

Der *Hebel* ermöglicht es die stark begrenzte *menschliche Kraft*  $F$  zu verstärken

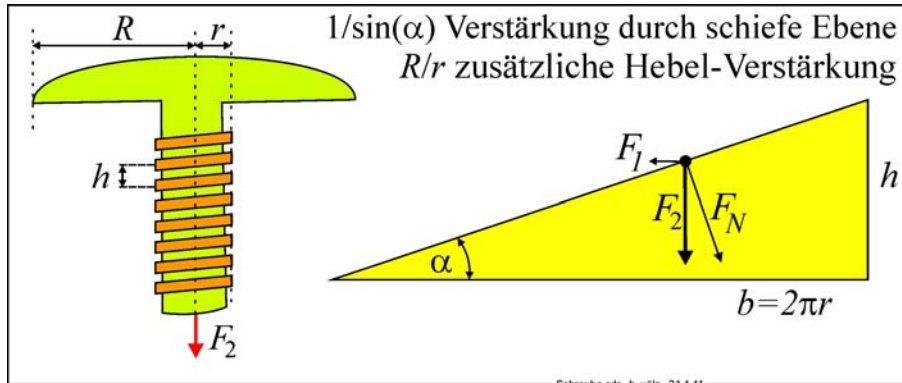
Der *Trafo* kann ähnlich den *Strom*  $I$  vergrößern

In *Umkehrung* kann natürlich kann auch der Weg  $l$  bzw. die Spannung  $U$  verstärkt werden

Beispiele sind der *Panthograph* (Storchschnabel) und *Hochspannungstrafo*



## Die Schraube entspricht einer schiefen Ebene



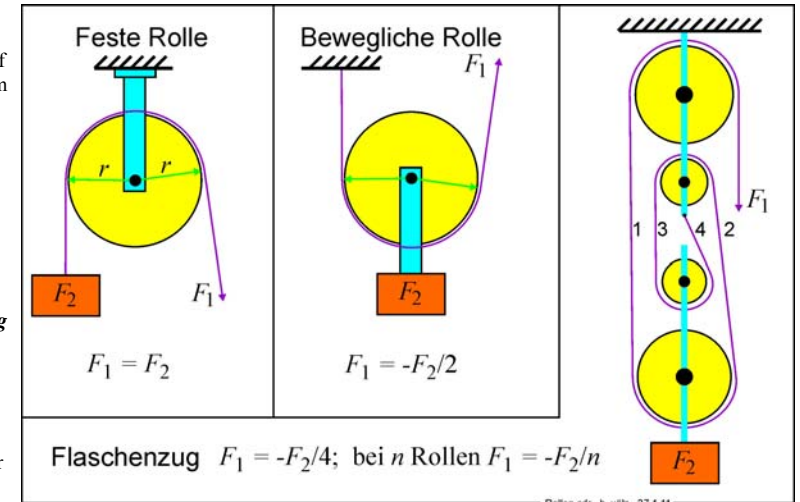
Schraube.odr h.völz 21.1.11

## Rollen und Flaschenzug

sind Übertragungen der Hebelgesetze auf Rollen, die einem **gleicharmigen Hebel** entsprechen

Sie können unterschiedlich und **kombiniert** benutzt werden

Der **Flaschenzug** ermöglicht entsprechend seiner Anzahl von Rollen eine **sehr große Verstärkung** der Kraft



Rollen.odr h.völz 27.1.11

## Hydraulik

ähnelt dem Hebel, setzt jedoch **Inkompressibilität** von Flüssigkeit voraus

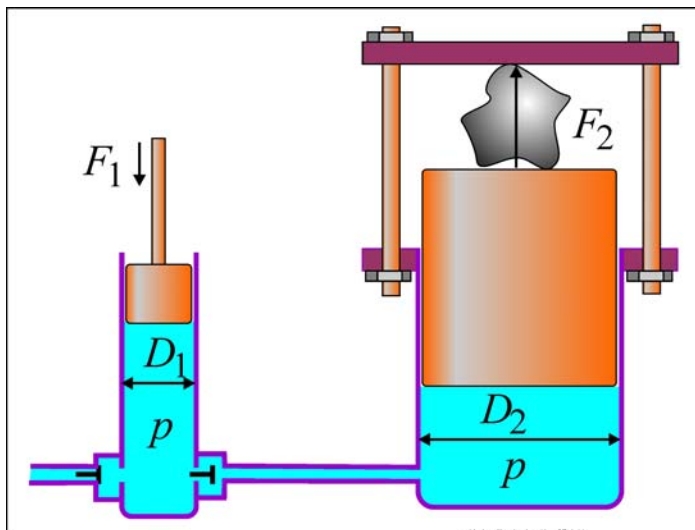
Dann ist der **Druck p** überall gleich. Folglich gilt mit den Durchmessern  $D$

$$p \sim F_1/D_1^2 = F_2/D_2^2 \text{ bzw.}$$

$$F_2 = F_1 \frac{D_2^2}{D_1^2}$$

Für einen großen Hub bei  $F_2$  muss ständig Flüssigkeit nachgeliefert werden. Daher die **Ventile**

Kolben bei  $F_1$  wird **periodisch** auf-/abbewegt



Hydraulik.odr h.völz 27.1.11

## Vielfalt der Umformungen

**Hebel, Rollen und Pneumatik** bewirken **Kraft-Anpassungen**

**Transformatoren** ermöglichen die Anpassung von **Strom und Spannung**, sowie indirekt die von Widerständen

$$\text{Gemäß } N = I^2 \cdot R \text{ gilt } R_1 = R_2 \cdot (n_1/n_2)^2$$

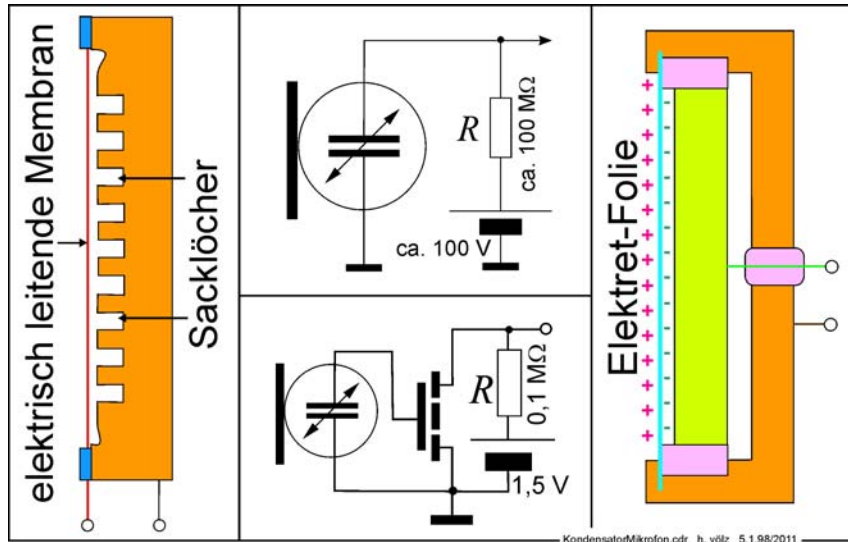
Ähnlich bewirkt die Membranbewegung  $\Delta d$  eines **Kondensator-Mikrofons** eine Spannungsänderung  $\Delta U$ :

$$\text{Wegen } Q = C \cdot U \text{ und } C = \frac{\epsilon \cdot A}{d} \text{ folgt } U = \frac{Q \cdot d}{\epsilon \cdot A}$$

Darin sind  $Q$  = Ladung,  $C$  = Kapazität,  $A$  = Membran-Fläche,  $d$  = Membran-Abstand,  $\epsilon$  Dielektrizitätskonstante

Es gibt **viele weitere** Umformungen, Wandlungen (s. u.)

Sie nutzen alle aus, dass ein konstant zu haltender Wert das **Produkt** bzw. der **Quotient** von **zwei Größen** ist



## Getriebe

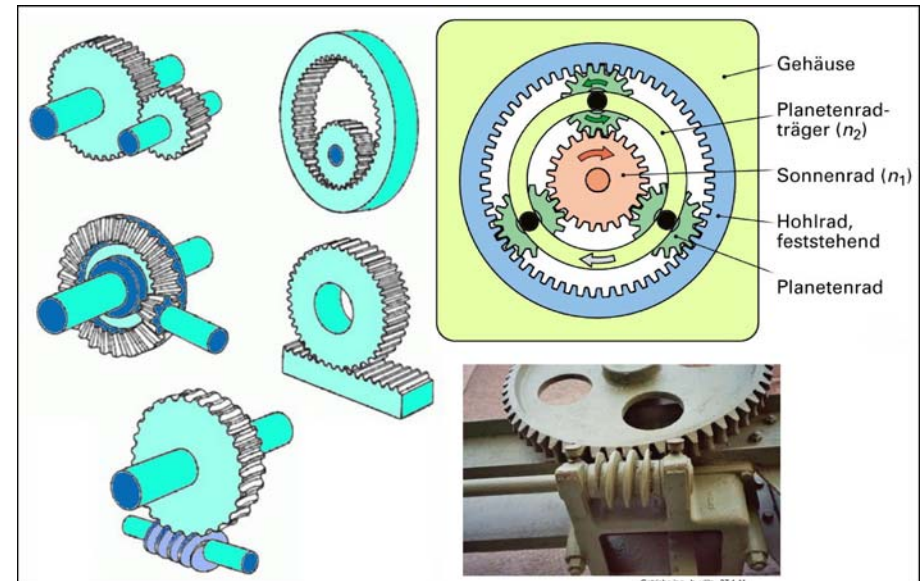
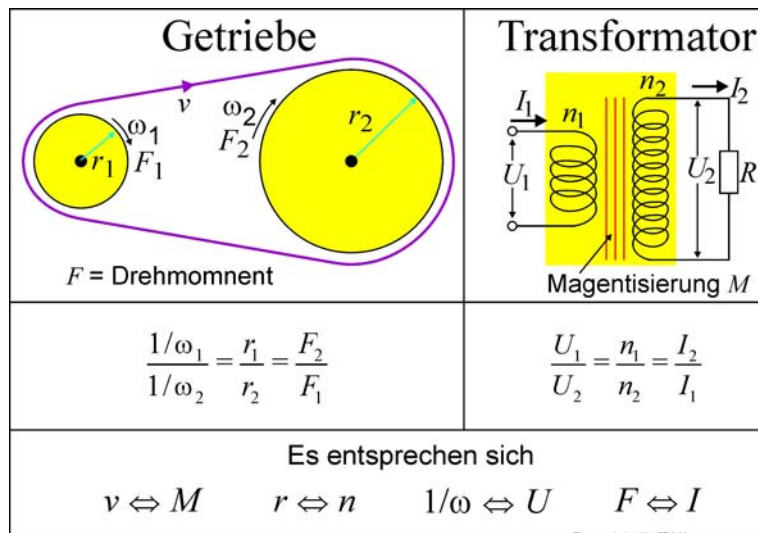
sind *mechanische Bauteile, Maschinenelemente*  
existieren u.a. als **Riemen-, Ketten-, Reibrad- und Zahnrad-**Getriebe  
ermöglichen vor allem die *Wandlung, Anpassung von*

- *Drehzahlen*
- *Drehmomenten*
- *Kräften*
- *Drehrichtungen*
- *Trägheitsmomenten*

*Spezielle Getriebe* sind u. a. Planeten-, Ausgleichs-, Differential- und Schalt-Getriebe,

Besonders übersichtlich ist der *Analogie-Vergleich* mit einem *Trenntransformator*

## Getriebe und Trafo





## Mechanische Impulse

Umgangssprachlich sind auch *Wucht* bzw. *Schwung* gebräuchlich  
Mit Masse  $m$  und Geschwindigkeit  $v$  gilt

$$p = m \cdot v \quad [\text{N} \cdot \text{s} = \text{kg} \cdot \text{m/s}]$$

Hierzu gehört die kinetische (Bewegungs-) *Energie*

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

Verwandt mit dem Impuls ist der *Kraftstoß* = Impulsänderung gemäß

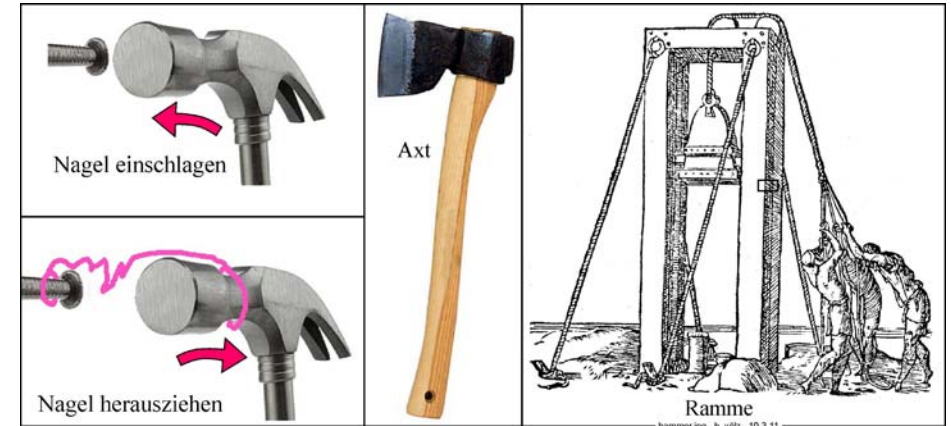
$$I = F \cdot \Delta t$$

Unter Einhaltung des *Impuls-Erhaltungssatzes* kann der Impuls übertragen werden  
Bei *Hammer*, *Axt* bzw. *Ramme* erfolgt das mit *indirekter Verstärkung* für  $\Delta t \rightarrow 0$   
Bei Hammer und Axt *sammeln* wir *auf einen längeren Weg* die Geschwindigkeit  $v$   
Ein Hammer kann auch mit einem Seil umgekehrt zum „*Herausziehen*“ von Nägeln usw. genutzt werden  
Bei der Axt wird zusätzlich die Wirkung eines *Keils* genutzt  
Die *Ramme* nutzt die Fallgeschwindigkeit aus der Höhe  $h$  und die Erdbeschleunigung  $g$

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad \text{und dem daraus folgenden Impuls } p = m \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h}$$

Daher wird die Energie übertragen

$$E_{\text{kin}} = m \cdot g \cdot h$$



## Ergänzungen

Es gibt *verschiedene Rammen*, die sich durch den „Antrieb“ unterscheiden  
u. a. Schlagramme, Dampf-, Explosions-, Pressluft-, Diesel- und Hydraulik-Ramme  
Bei der *Vibrations-Ramme* werden die Schläge periodisch wiederholte

### Geschichte

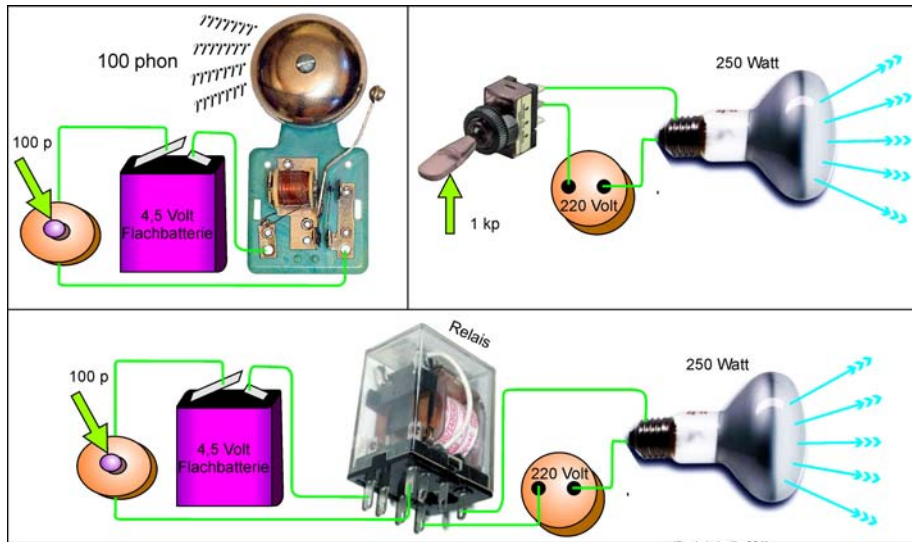
Die Wirkung des *Hammers* dürfte schon in der *frühen Steinzeit* genutzt worden sein  
Für die (*Stein-*) *Axt* liegen Funde aus mindesten **6000 v. Chr.** vor  
Die *Ramme* ist *relativ* spät erfunden worden, erstmalig erwähnt wurde sie 1475  
Ursprünglich dürfte sie in Kriegen zur Zerstörung von Festungen eingesetzt gewesen sein

### Photon

Hier gilt  $m = 0$  und  $v = c =$  Lichtgeschwindigkeit. Der Impuls beträgt

$$p_{\text{Photon}} = h/\lambda$$

## Taster, Schalter, Relais usw.



## Auslöse-Prinzip und Steuerung

Bei der *Klingel* bewirkt ein *kleiner Druck* – der noch viel kleiner sein kann – eine *beachtliche Lautstärke*. Beim *Lichtschalter* genügt sogar eine *einmalige leichte Betätigung* um *grelles Licht* einzuschalten. Ein zwischengeschaltetes *Relais* „*verstärkt*“ die *Wirkung des Tasters* zusätzlich und *trennt ihn von 220 V*.

In allen drei Fällen wird also *mechanische Wirkung* „*verstärkt*“, und es geschieht etwas ganz anderes. Es wird lediglich eine *Energiequelle* – Batterie bzw. Lichtnetz – in ihrer *Wirkung gesteuert*. Hierfür hat NORBERT WIENER (1894 - 1964) in seiner *Kybernetik* den Begriff *Auslöse-Effekt* eingeführt (s. u.). Er hat ihn leider *nirgends erklärt*, sondern *nur beschrieben*, bisher hat dies offensichtlich *niemand getan*. Eigentlich liegt *Steuerung* vor, die u. a. den Begriff *Information* erforderlich machte und immer noch fordert.

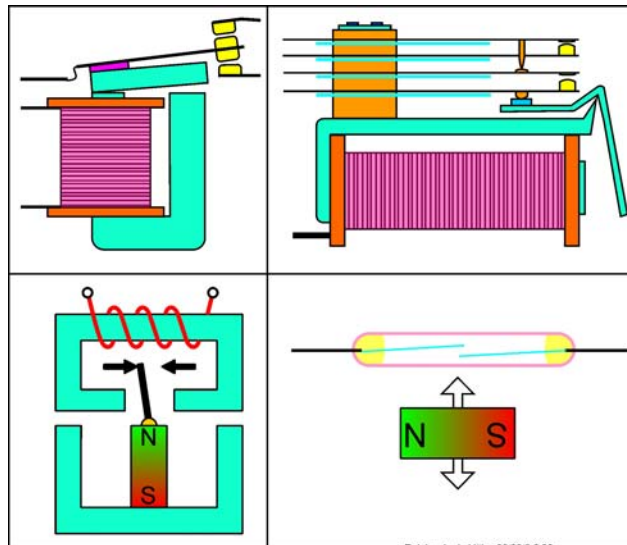
Ein *Informations-Träger* (Stoff bzw. Energie) beeinflusst ein System und löst eine *systemtypische Wirkung*, das *Informat* aus.

Das ist eine besondere *Steuerung*, doch auf *welchen Gesetzen, Theorien, Hypothesen beruht sie?*

Es gibt viele, z. T. recht unterschiedliche Relais, u. a.

1. die nur bei Strom-Erregung umschalten
2. die durch Strom-Impulse umschalten, z. B. Telefon-Relais
3. die durch Fremdeinflüsse, z. B. Magnetfelder ein- bzw. aus- oder umschalten, z. B. Reed-Kontakte
4. mit ein oder mehreren Kontakten

Bei *großen elektrischen Leistungen* werden *Schütze* benutzt, enthalten u. a. zusätzlich *Funkenlöschkammern*.



## Zur Geschichte von Relais

*Französisch relai* zurücklassen, *relais* Relais, Poststation, Umspann-Ort, Zwischenstation

Ursprünglich (Relais-) Station für Pferdewechsel (Postverkehr, Militär)

Auch an bestimmten Orten aufgestellte Reiter, die der Überbringung von Befehlen, Nachrichten dienten. Außerdem: Weg zwischen Wall und Graben einer Festung.

1837 SAMUEL FINLEY BREESE MORSE (1791 - 1872) baut das erste Relais

1838 CHARLES WHEATSTONE (1802 - 1875) baut Relais für *Telegrafie*

1883 Industrielle Anwendungen von Relais

1908 Erstes Relais der *Fernsprechtechnik*

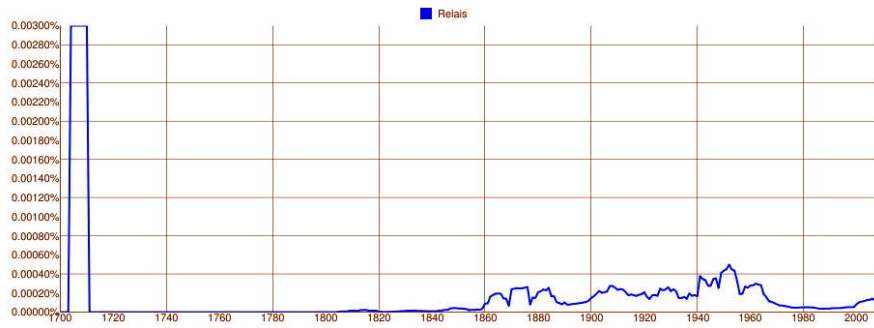
1925 *Thyratron* eingeführt, s. u.

1927 Das *Flachrelais* wird eingeführt

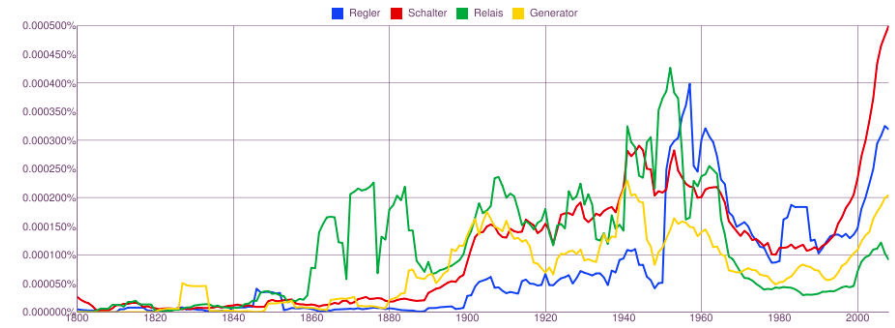
1936 *Relais-Rechner* Z1 von KONRAD ZUSE (1910 - 1995) in der elterlichen Wohnung fertig gestellt

1936 *Reed-Kontakt* von W. B. ELWOOD (Bell Laboratories) wird patentiert, aber erst seit 1950 produziert

1957 *Thyristor* entsteht, s. u.



Das auffällige Maximum um 1710 hat offensichtlich nichts mit dem elektromagnetischem Relais zu tun  
Zum Zusammenhang mit Röhre und Transistor s. u.

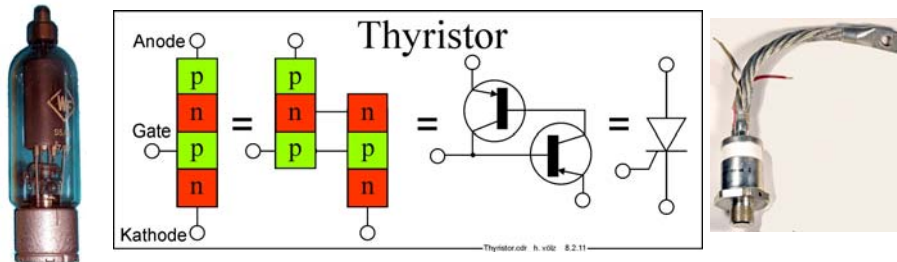


**Relais** Schwerpunkt zunächst um 1870  
**gemeinsam** mit anderen **nach 2. Weltkrieg**  
**Schalter und Regler** steiler Anstieg nach 1990

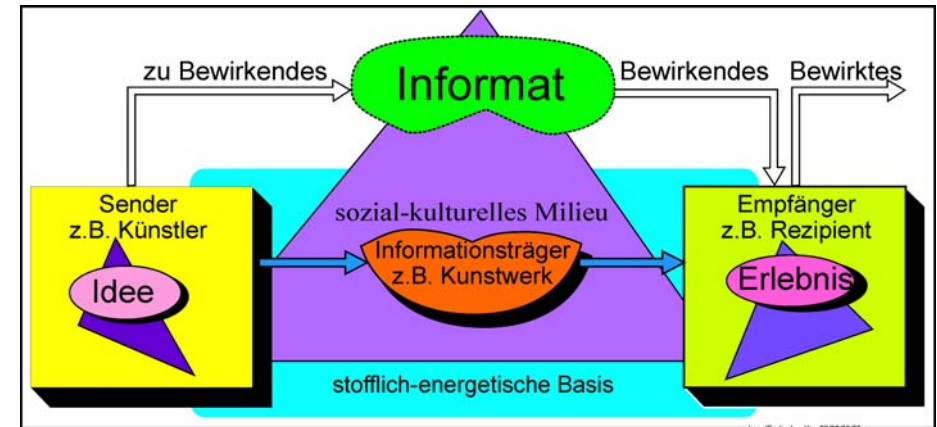
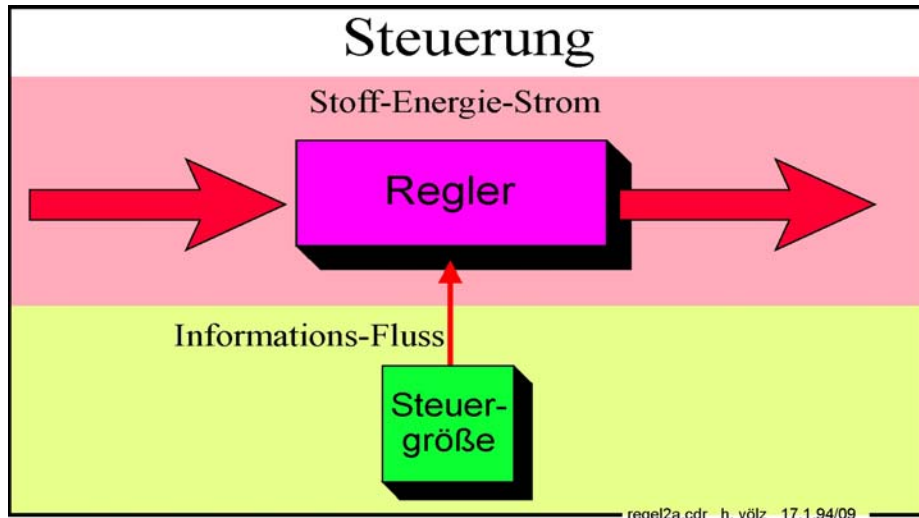
## Elektronische Relais: Thyatron und Thyristor

Griechisch *Thyra* Tor, großer Stein als Tür vor den Eingang gelegt, großer türförmiger Schild

**Thyatron** entstand um 1925 = mit Gitter steuerbarer, gasgefüllter Röhrengerichtiger mit Glühkathode  
Ähneln einer Triode jedoch mit Füllgas: Quecksilberdampf, Xenon, Neon, Krypton oder Wasserstoff  
Es gab mehrere Sonderausführungen z. B. Ignotron  
Wird ab etwa 1960 durch **Thyristor** auf Halbleiterbasis ersetzt, von Thyatron und Resistor abgeleitet  
1957 begann Entwicklung bei General Electric, Vorarbeiten von SHOCKLEY, EBERS, MOLL bei Bell Laboratories  
hießen zunächst SCR (Silicon Controlled Rectifier) Begriff Thyristor setzte sich erst in den 60er Jahren durch  
Schaltet mehrere 100 A bis zu 1000 Volt  
Ähnlich: **Triac**, **IGBT**, **IGCT** (Integrated Gate xxx Thyristor), GTO-Thyristor (Gate Turn Off, abschaltbar) usw.



## Steuerung - Regelung

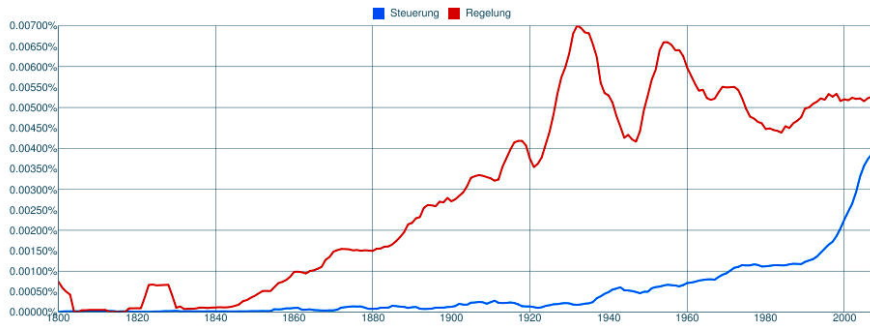


## Steuerungs- und Regelungs-Technik

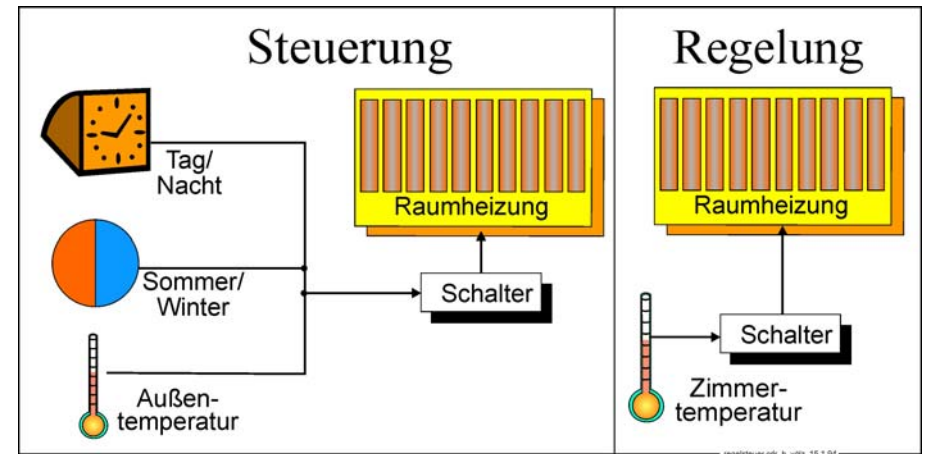
hat *breite (technische) Anwendung* gefunden und weitgehend den Inhalt von Kybernetik ersetzt  
 Doch das technische Hauptziel ist die *Konstanthaltung von Werten*  
 Durch *Störwertaufschaltung* werden zusätzlich *Störungen gemildert*, z. T. *ausgeschaltet*  
 Der *Fliehkraftregler* von JAMES WATT (1736 - 1819) gilt als die erste große technische Lösung  
*Steuerung* im eigentlichen Sinn setzt sich erst recht spät mit dem *Computer* durch  
 Im Sinne von *Auslösung* kommt sie dabei nur nebenbei vor, noch weniger im Sinne von *Verstärkung*

## Zur Geschichte von Steuerungs- und Regelungstechnik

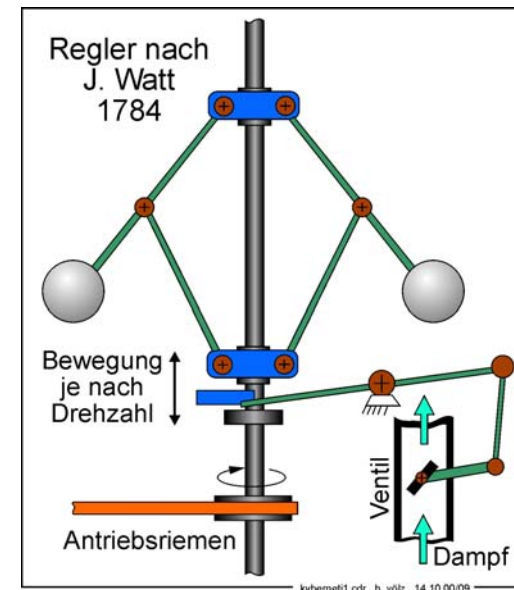
- 100 HERON von Alexandria *automatisches Theater, Türöffner, Programmwalze*
- 1784 *Fliehkraftregler* von JAMES WATT, konstante Drehzahl bei wechselnder Last
- 1925 WAGNER beschreibt *biologische Regelung*
- 1930 W. R. HESS: Die *Regelung des Blutkreislaufes*
- 1933 FRISCH: *Volkswirtschaftliche Regelkreise*
- 1940 H. SCHMIDT: *Denkschrift*: Gründung eines Instituts f. Regelungstechnik
- 1944 R. OLDENBOURG u. H. SARTORIUS: *Dynamik selbsttätiger Regelungen*
- 1948 N. WIENER: „*Kybernetik*, Steuerung und Informationsübertragung in Lebewesen“
- 1950 J. TINBERGEN, N. F. MOREHOUSE und H. MITTELSTAEDT: *Regelkreise in der Wirtschaft*
- 1959 H. ROHRACHER: *Psychologische Regelprobleme*

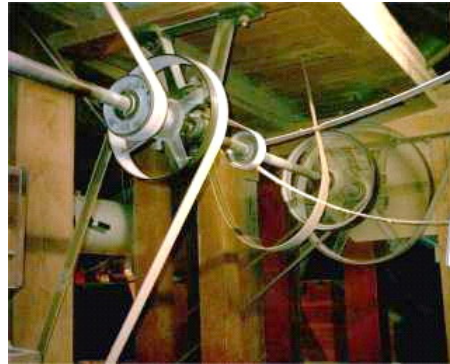


Steuerung beginnt eigentlich erst mit der Massenanwendung des Computers



Regelung ist nie exakt, benötigt immer einen **Toleranzbereich** zum Schalten, Beeinflussen  
Kühlschrank z. B.  $10 \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$   
Steuerung kann, aber muss nicht exakt sein, es müssten alle Einflüsse erfasst werden  
Abweichung ergeben sich durch nicht erfasste Störungen





# Elektronische Verstärker

## Hinweise und Abgrenzung

Intuitiv für elektronische Verstärker fast nur die Verstärkung von **Signale** erfasst  
Dabei ist eine **Trennung von Störungen** wichtig. Was sind dann **Frequenzfilter? Frequenz-Verstärker!**  
Wichtig sind auch **Leistungs-Verstärker**, die z. B. bei Sendern oder für Lautsprecher notwendig sind  
Für Sonderzwecke werden auch **Impuls-Verstärker** benötigt  
Sind **Wandler für Gleichspannung** von z. B. 1,5 auf 500 Volt auch Verstärker?  
Eigentlich gehören hierzu auch **Transformatoren und Übertrager**

### Zum weiteren Vorgehen

Zunächst wird die Vielfalt **Signalverstärker mit Röhren und Transistoren** behandelt  
Es folgen Varianten der **Leistungsverstärker**  
**Frequenzfilter** werden später bei den **Oszillatoren** berücksichtigt  
**Impulsverstärker** und **Wandler** werden nur nebenbei bei anderen Inhalten erfasst

## Varianten der Signal-Verstärkung

Es sind **5 Effekte** besonders wichtig

- Beeinflussung, Steuerung von **freien Ladungsträgern**, z. B. Röhre, Transistor
- **Negative Kennlinie, Widerstand**, z. B. Tunnelodiode, Gasentladung, (Gunndiode), Rück-, Gegenkopplung
- **Parametrische Verstärker**, z. B. mit Variaktoren, eine Analogie ist Schaukeln
- **Laufzeit-Effekte**, z. B. Klystron, Magnetron, Wanderfeldröhre
- **Quanteneffekte**, u. a. Maser und Laser

**Daneben** gibt es noch recht **spezielle Techniken**

## Versuch einer Klassifikation Bauelementen und Systemen

$x$  = unabhängige (Eingangs-) Größe

$y$  = abhängige (Ausgangs-) Größe, auch Hilfs-Energie

		kontinuierlich			diskret, digital	
		linear 	nichtlinear 	hysteretisch 	schaltend 	speichernd 
passiv		klassische Naturbeschreibung		Magnetband	flüssig $\leftrightarrow$ fest (Taste)	Ferritkern Kippschalter
aktiv		Verstärker			Relais	Telefonrelais

Die Steilheit  $dy/dx$  entspricht der Verstärkung, sie soll **möglichst groß** und konstant sein  
Die von der **Linearität abweichenden** Kurven sind meist **störende Nebeneffekte**

## Kohle-Mikrofon als Verstärker

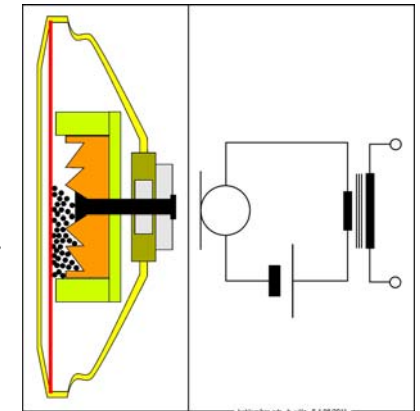
1860 JOHANN PHILIPP REIS (1834 - 1874) Widerstandsänderung (Platinkontakt) als Mikrophon für sein Telephon

1877 EMILE BERLINER (1851 - 1929) Patent: Telefon-Mikrofon = loser Kontakt zwischen zwei Kohlestücken

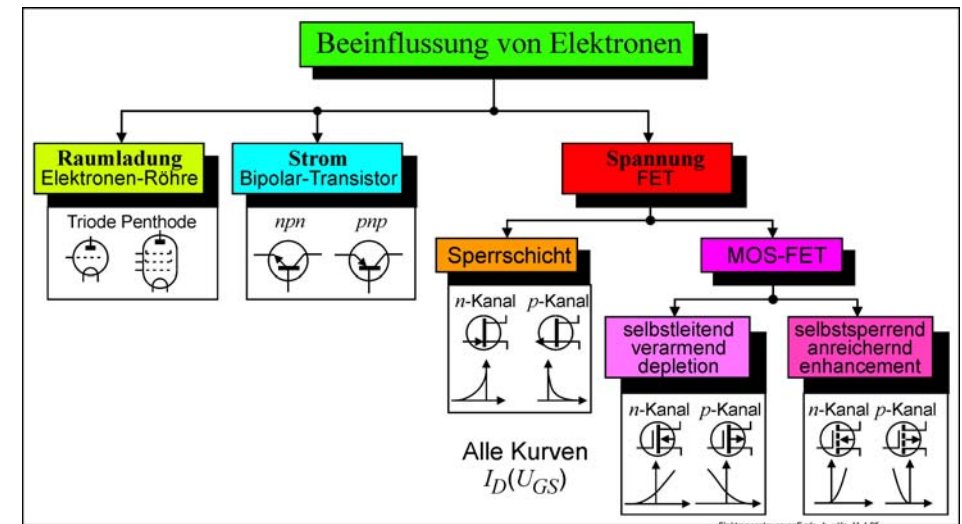
1877 THOMAS ALVA EDISON (1847 - 1931) unabhängige Entwicklung des Kohle-Mikrofons

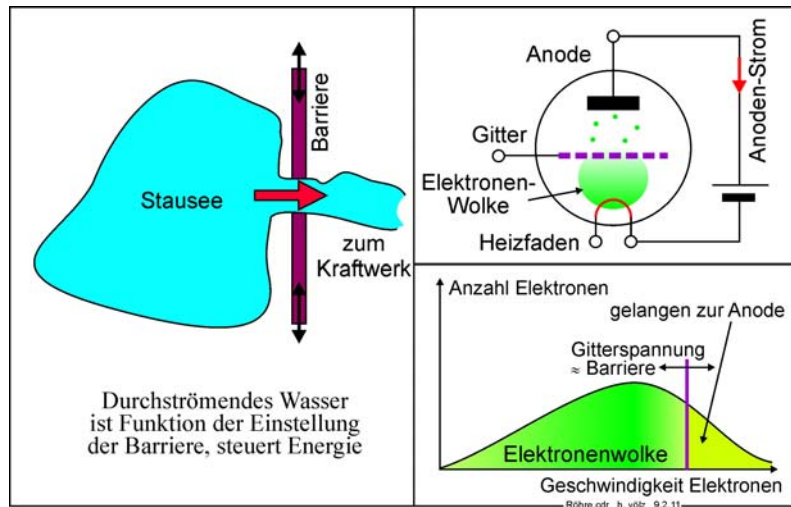
Die **Kontaktflächen** zwischen den Kohlekörnern bestimmen den **Widerstand** des Mikrofons.  
Ihre Summe wird über die Bewegung der Membran geändert

Zur Leistungssteuerung entstand später der **Kohleldruckregler**, bei dem viele Kohlescheiben zu einer Säule aufgereiht sind, wurde u. a. zur **Steuerung von Motoren** eingesetzt

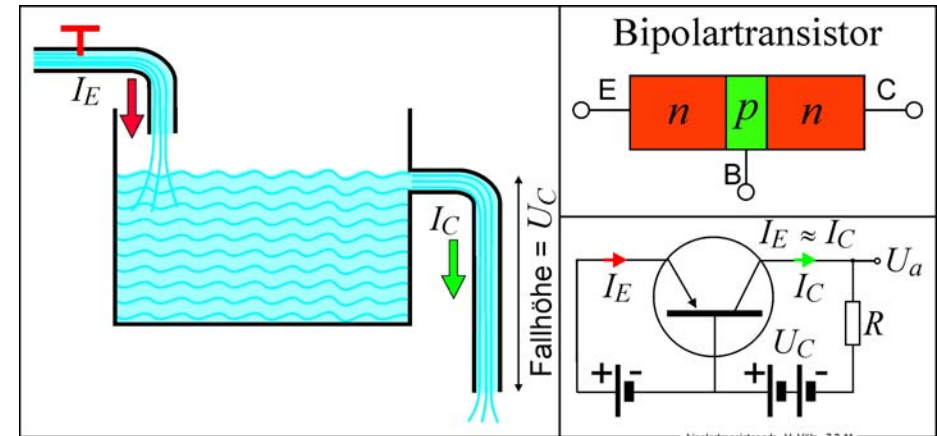


## Steuerung frei beweglicher Elektronen

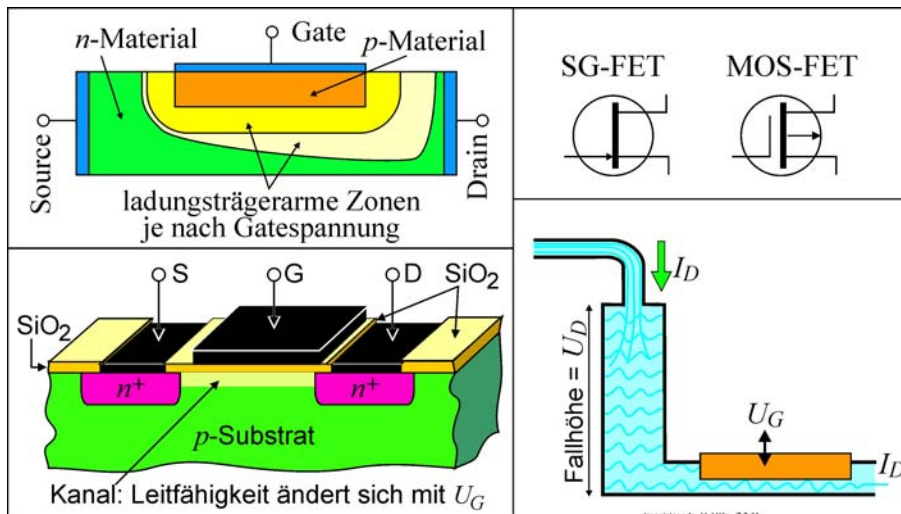




Warum wird so gut wie keine Energie für die Verstellung der Barriere benötigt?  
 Warum steuert die negative Gitterspannung praktisch leistungslos den Anodenstrom?



Der Strom  $I_E$  wird eingeschleust und dann nahezu vollständig zu  $I_C$  übernommen  
 Die Leistungs-Verstärkung erfolgt mittels  $U_C \sim \text{Fallhöhe}$



Die Steuerung von  $I_D$  erfolgt über  $U_G$  gemäß dem Kanal-Widerstand

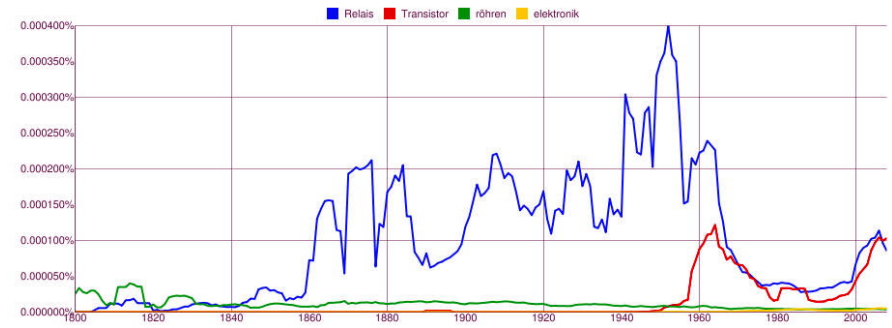
## Geschichte der Elektronenröhre

- 1883 THOMAS ALVA EDISON (1847 - 1931) entdeckt **Glüh-effekt**, Elektronenausstritt, Zusatzelektrode (Diode)
- 1879 WILLIAM CROOKES (1832 - 1919) beschreibt wesentliche Eigenschaften der **Katodenstrahlen**
- 1897 KARL FERDINAND MARQUIS DE BRAUN (1850 - 1918) erfindet mit JONATHAN ZENNECK die **Katodenstrahlröhre**
- 1901 OWEN WILLIAMS RICHARDSON (1879 - 1959) Gesetz der **Glühemission**
- 1906 ROBERT VON LIEBEN (1878 - 1913) Patent **quecksilbergefüllte Verstärkerröhre, 2 Elektroden**, elektrische oder magnetische Beeinflussung
- 1902 PETER COOPER-HEWITT patentiert **Quecksilberdampfgleichrichter**
- 1904 JOHN AMBROSE FLEMING (1849 - 1945) patentiert **Vakuum-Diode**
- 1906 LEE DE FOREST (1873 - 1961) meldet **gasgefüllte Audionröhre** mit zusätzlichem Gitter zum Patent an
- 1912 FOREST von Bell Telephone Laboratories stellt **Röhrenverstärker** vor
- 1913 Röhrenverstärker für **Telefonverbindungen** zwischen New York und Baltimore
- 1914 Röhrenverstärker für **Atlantik-Seekabel**
- 1916 Bei Siemens & Halske entwickelt WALTER SCHOTTKY (1886 - 1976) **Tetrode** (Schirmgitterröhre)
- 1924 Französische Firma Métal produziert **Doppelgitter-Röhre** als Mischröhre für Radioempfänger
- 1926 BERNARD D. H. TELLEGEN (1900 - 1990) entwickelt bei Philips die **Pentode** zur Serienreife
- 1926 MANFRED BARON VON ARDENNE (1907 - 1997) mit SIEGMUND LOEWE Mehrsystemröhren = **Dreifachröhre**
- 1928 RICHARDSON **Nobelpreis** für Physik (Glühemission)

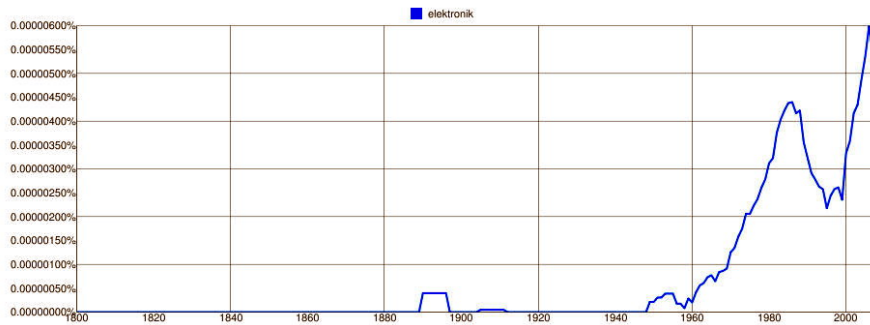


## Transistor Geschichte

- 1925 JULIUS EDGAR LILIENFELD (1881 - 1963) meldet elektronisches Bauelement (*FET*) an
- 1934 OSKAR HEIL konstruiert und patentiert ersten *FET mit isoliertem Gate*
- 1948 JOHN R. PIERCE prägt *Begriff Transistor*
- 1942 HERBERT MATARÉ experimentiert bei Telefunken mit *Duodiode* für Doppler-Funkmeß-Systeme (RADAR)
- 1947 William Bradford SHOCKLEY (1910 - 1989) und John PEARSON (1908 - 1991) funktionierenden *Bipolar-Spitzen-Transistor* Bell Labs
- 1948 Patentanmeldung für europäische Erfindung „*Transistron*“
- 1955 Beginn der *Planartechnik*
- 1956 SHOCKLEY, JOHN BARDEEN (1901 - 1991) und WALTER Houser BRATTAIN (1902 - 1987) *Nobelpreis für Physik*
- 1962 P. WEIMER entwickelt *Dünnschichttransistoren* (thin film transistor, *TFT*)
- 1966 CARVER MEAD entwickelt *Feldeffekttransistor* (MESFET) mittels *GaAs*



Geschichte der *Röhren* ist nicht über den Begriff erkennbar, jedoch *Transistor*  
Der Begriff *Elektronik* ist dagegen recht aussagekräftig



Inhalt des *Gebrauchs um 1900* ist unklar  
Für die *Lücke um 1990* ist kein Grund erkennbar

## Leistungs-Verstärker

### (Klein-) Signal-Verstärker

Die notwendige *Hilfsenergie* ist hier *unwesentlich*,  
denn andere im Verstärker vorhandener Energieverluste bestimmen wesentlich den Energie-Verbrauch  
das gilt selbst dann, wenn sie – wie üblich – groß gegenüber der Energie des Eingangs- und Ausgangs-Signal ist

### Leistungs-Verstärker

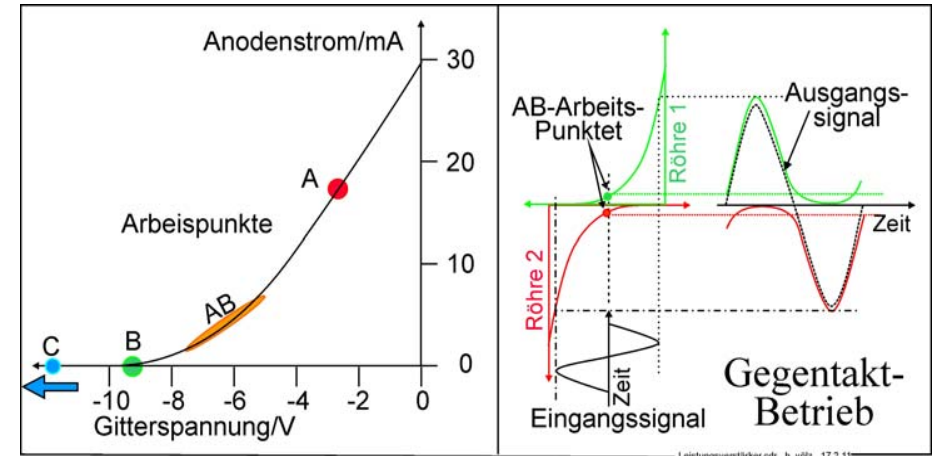
Mit ihm soll eine erhebliche *Energie des Ausgangssignals* erreicht werden  
*Andere Energie-Verluste* im Verstärker sind dann meist *klein* gegenüber der geforderten Ausgangsenergie  
Hinzu kommt, dass alle Energie-Verluste in *Wärme umgesetzt* werden  $\Rightarrow$  zusätzliche *Kühlung*  
Daher ist meist der *Wirkungsgrad* der Wandlung bezüglich Hilfs- zu Ausgangsenergie wesentlich  
Das erfordert deutlich *andere Dimensionierungen und Schaltungen*

## A-, B- und AB-Verstärker

Beim **A-Verstärker** liegt der Arbeitspunkt auf der *Mitte des geradlinigen Teils* der Kennlinie  
 Ohne Aussteuerung fließt der Ruhestrom  $I_0$ , die maximale *Stromänderung* beträgt  $\Delta I < \pm I_0$   
 Nur bei **Voll-Aussteuerung** ist ein Wirkungsgrad  $\eta$  von *nahezu 50 %* zu erreichen  
 Bei kleineren Aussteuerungen gilt  $\eta \ll 50\%$ , für sehr kleine sogar mit  $\eta \rightarrow 0$

Der **B-Verstärker** legt den Arbeitspunkt in die Nähe von  $I_0 = I_A = \rightarrow 0$   
 Dann treten aber starke **Signal-Verzerrungen** auf, es wird nur die *positive Halbwellen* des Signals verstärkt  
 Für die *negative Halbwellen* ist ein *zweiter „reziproker“ Verstärker* erforderlich  
 Beide Verstärkerteile werden anschließend im **Gegentakt-Betrieb** zum A-Verstärker zusammengefügt  
*Englisch push and pull* = ziehen und schieben  
 Bei **Vollaussteuerung** gilt hier  $\eta \rightarrow 1$   
 Zur Senkung von Verzerrungen ist auch im B-Betrieb ein *endlicher Ruhestrom*  $I_0$  erforderlich  
 Dadurch bleibt dann  $\eta$  deutlich kleiner als 1, und für kleine Aussteuerungen gilt weiter  $\eta \rightarrow 0$

Der **AB-Verstärker** ist ein Mittelweg zwischen den Extremen A und B  
 Der Arbeitspunkt wird durch einen Ruhestrom  $0 < I_{AB} < I_A$  bestimmt  
 Gegenüber B besitzt er geringe Verzerrungen bei einem schlechteren Wirkungsgrad



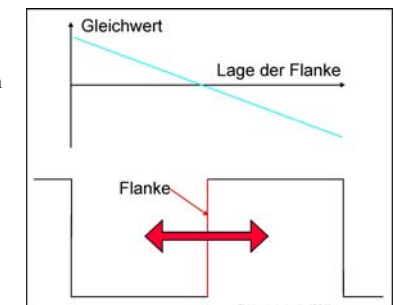
## Der C-Verstärker

Sein Arbeitspunkt ist so weit *nach links* verschoben, dass nur *Signalspitzen* einen Ausgangsstrom bewirken  
 Dadurch treten sehr **starke Verzerrungen** auf, die z. B. bei *Sendern mit einer Trägerfrequenz* zulässig sind  
 Es wird dann eben nur die Grundwelle herausgefiltert und genutzt  
 So ist fast immer ein Wirkungsgrad  $\eta$  in der Nähe von 1 erreichbar  
 Heute werden C-Verstärker kaum noch angewendet

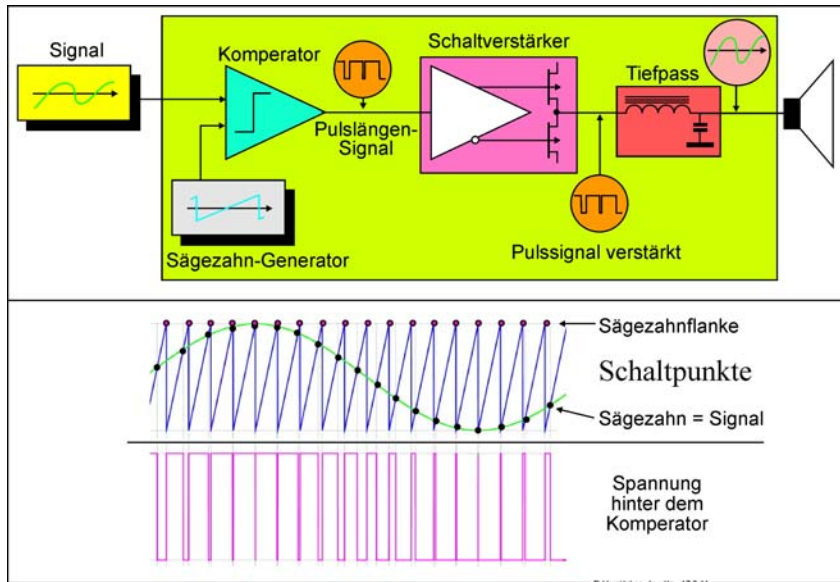
## Der D-Verstärker

Benutzt ein deutlich **anderes Verstärkerprinzip**  
 Obwohl es lange bekannt ist, wurde es erst mit der **Digitaltechnik** praktisch nutzbar  
 Insofern steht das **D nicht für digital** sondern ist eine schlichte Fortzählung von A über B und C  
 Bei einer Rechteckschwingung kann der **mittlere Übergang verschoben** werden  
 Dadurch ändert sich ihr **Gleichwertanteil**

Beim D-Verstärker wird er mit der **Signalfrequenz  $f_s$**  verschoben  
 Dazu muss allerdings für die **Impulsfrequenz  $f_p \gg f_s$**  gelten  
 Abgetrennt wird dann die Signalleistung mit einem **Tiefpass**

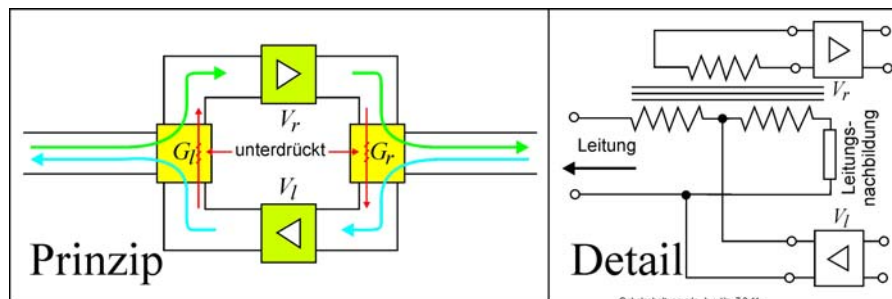


# Negative Kennlinie und negativer Widerstand



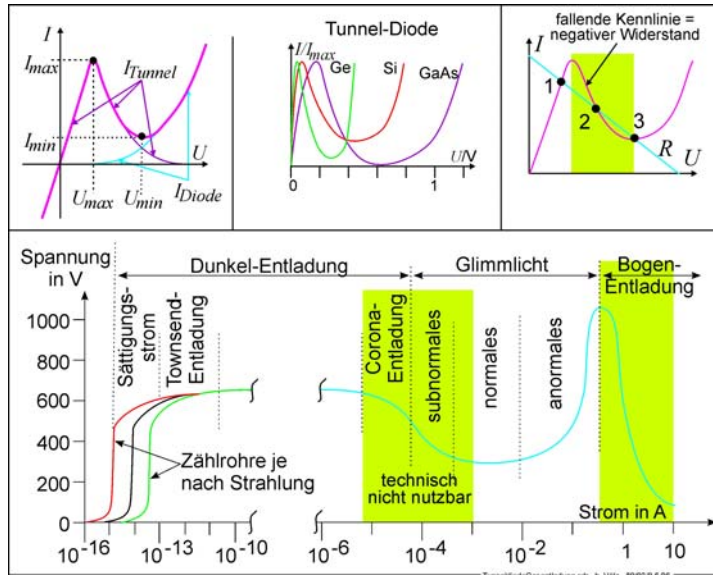
## Verstärkung auf Leitungen

Auf Telefonleitungen usw. wird gewöhnlich Information *gleichzeitig in beide Richtungen* übertragen. Infolge der Verluste (Dämpfungen) auf den Leitungen sind *Verstärker für beide Richtungen* notwendig. Hierbei besteht die Gefahr der gegenseitigen Rückkopplung und damit Schwingungserregung. Aus diesem Grund entstand die *Gabelschaltung*, welche das ausschließt. Inzwischen werden für die beiden Richtungen meist unterschiedliche Frequenzen benutzt.



## Bauelemente

Bei OHM-schen Widerständen ist der fließende Strom  $I$  der angelegten Spannung  $U$  proportional:  $I = U/R$ . Bei vielen Bauelementen ist der Zusammenhang jedoch *nichtlinear*, bleibt aber dennoch *monoton*. *Wenige Bauelemente* besitzen Gebiete mit *negativem Widerstand, fallender Kennlinie*:  $U \uparrow \Rightarrow I \downarrow$ ;  $R = -\Delta U / \Delta I$ . Typisch hierfür sind u. a. Tunnelioden und die Gasentladung. Die Gebiete mit negativer Kennlinie können zur *Verstärkung* benutzt werden. Durch sie können vor allem die *Verluste auf Leitungen* usw. weitgehend *kompensiert* werden. U. a. sind so auch die *Gabelschaltungen unnötig*. Die „negativen Bauelemente“ werden parallel zur Leitung geschaltet und *wirken dann in beide Richtungen*. Ist der Betrag des negativen Widerstands größer als die Dämpfung, so tritt *Selbsterregung* auf  $\Rightarrow$  Oszillator. *Stabiles Verhalten* wird meist dadurch erreicht, dass der *Strom* und nicht die Spannung *vorgegeben* werden.



### Mechanische Analogie

Für den negativen Widerstand ist *leider keine gute Analogie* bekannt  
 Die Verluste einer Leitung können brauchbar mit *Reibungsverlusten* verglichen werden  
 Ein *negativer Widerstand* entspricht dann ihrer *Reduzierung*  
 Die ist z. B. durch *Ölen oder Schmieren* möglich, dann bleibt in Körper *länger in Bewegung*  
 Bei *mechanischen Schreibern* war es auch üblich, den Reibungswiderstand durch *Vibriieren* zu senken  
 Durch Bewegung der *Sinneshärchen im Gehör* können wir deutlich besser hören  
 Leider entsteht dadurch zuweilen auch Tinnitus, der dann durch entsprechenden Schall verschwindet  
 Das Bestreichen des *Geigenbogens mit Seife* wird im Theater benutzt, dieses Geigen wird dann unhörbar

### Indirekter, negativer Widerstand

Es gilt die BARKHAUSEN-Beziehung aus Steilheit  $S$ , Durchgriff  $D$  und Innenwiderstand  $R_i$   
 HEINRICH BARKHAUSEN (1881 - 1956)

$$S \cdot D \cdot R_i = 1$$

Mit dem Arbeitswiderstand  $R_a$  folgt die Steuergleichung  $i_a = S(u_i + D \cdot u_a)$  und  $u_a = -i_a \cdot R_a$ , somit gilt

$$V = \frac{u_a}{u_i} = \frac{1}{D} \cdot \frac{R_a}{R_a + R_i} = S \cdot \frac{R_a \cdot R_i}{R_a + R_i}$$

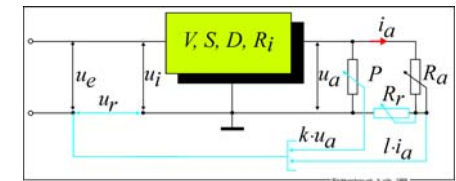
Es gibt Rückkopplungsfaktoren  $k$  für die Ausgangsspannung  $u_a$  und  $I$  für den Ausgangsstrom  $i_a$

Mit der Rückkopplungsspannung gemäß  $u_r = -k \cdot u_a + I \cdot i_a$  und

$$\begin{cases} \text{sign } k \\ \text{sign } I \end{cases} = \begin{cases} + \\ - \end{cases} \text{ bei } \begin{cases} \text{Mitkopplung} \\ \text{Gegenkopplung} \end{cases}$$

folgt dann für die Werte mit Rückkopplung

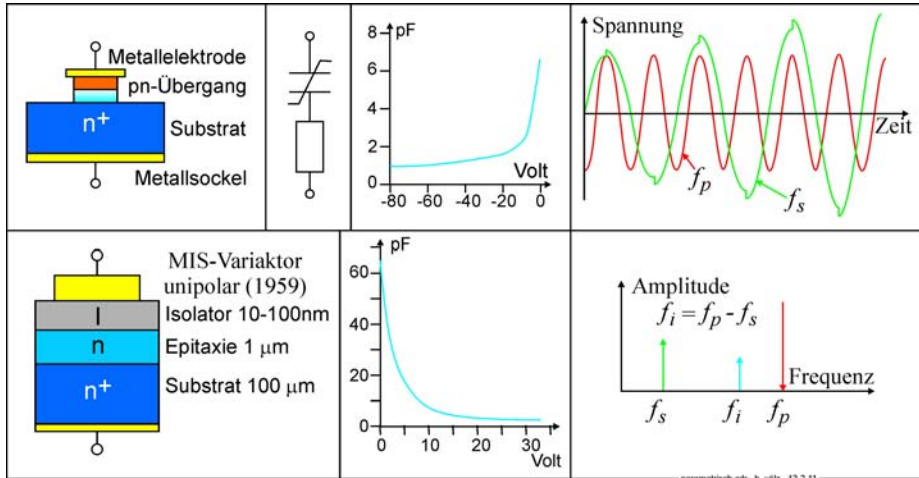
$$S^+ = \frac{S}{1 - I \cdot S}; \quad D^+ = D - k; \quad R_i^+ = R_i \cdot \frac{1 - I \cdot S}{1 - k/D}$$



Es ist also leicht möglich den wirksamen *Innenwiderstand negativ*, *Verluste* von z. B.  $R_a$  unwirksam zu machen  
 Auch so können indirekt Verstärkungen in beide Richtungen einer Leitung realisiert werden [Völz 59 bzw. 89]

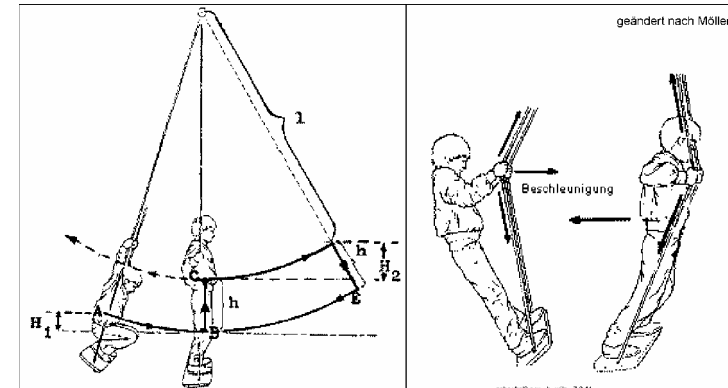
## Parametrische Verstärker = Reaktanz-Verstärker

Es wird eine *Kapazität* (Induktivität) benutzt, deren Wert von der angelegten Spannung abhängt  
 = Variaktor, z. B. pn-, Impatt-Diode, MIS-Variaktor (Metall Isolation Silizium) oder SCHOTTKY-Kontakt  
 Sie wird in einem *Schwingkreis* benutzt, der auf die *Signalfrequenz  $f_s$  abgestimmt* ist  
 Das Signal wird mit einer relativ kleinen Amplitude angelegt  
 Zusätzlich wird die Diode mit einer *Pumpfrequenz  $f_p \approx 2 \cdot f_s/2$*  und erheblich höherem Pegel angeregt  
 Dadurch ändert sich die Resonanzfrequenz im Takt der Pumpfrequenz  
 Infolge dieser periodischen *Parameter-Änderungen* wird die Signalfrequenz deutlich verstärkt  
 Die Schaltung wirkt auf sie wie ein *negativer Widerstand*  
 Insgesamt treten auch Vielfache *Summen- und Differenzfrequenzen* auf:  $f_x = n \cdot f_p \pm m \cdot f_s$   
 Am schlechtesten lässt sich die *Idler-Frequenz* (=Hilfsfrequenz)  $f_i = f_p - f_s$  ausfiltern (*englisch idler* Müßiggänger)



## Analogie-Model der Schaukel

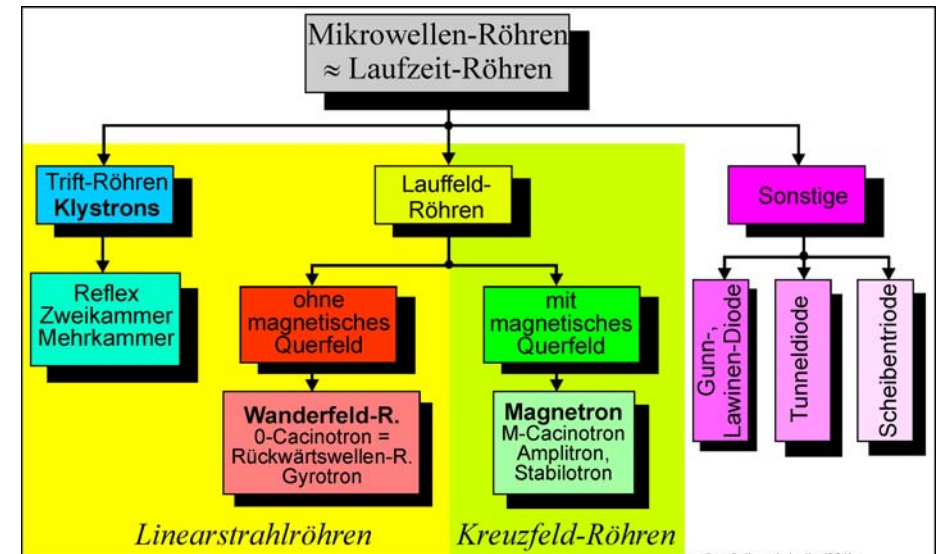
Das in die Hockegehen und sich Ausstrecken entspricht der **Pumpfrequenz**. Ausstrecken erfolgt im jeweils tiefsten Punkt (Mitte), Ausstrecken in den höchsten Punkten, rechts und links. Die **Signalfrequenz** entspricht der **Schaukelschwingung**  $\approx \frac{1}{2}$  vom Wechsel Erheben  $\leftrightarrow$  Hocke. Mit diesen Bewegungen kann jedoch die Schaukel nicht von der Ruhe in Bewegung gebracht werden. Hierzu sind andere Schwerpunktverlagerungen notwendig.



## Mikrowellen-, Laufzeit-Röhren

Die übliche Röhren und Transistoren sind nur bis zu einer **oberen Frequenzgrenze** zu benutzen. Bei höheren Frequenzen stört die **Laufzeit der Elektronen** von der Kathode  $\Rightarrow$  Anode, Source  $\Rightarrow$  Drain. Außerdem begrenzen die immer vorhandenen Kapazitäten und Induktivitäten. Oberhalb einiger GHz kann dann die Steuerspannung nicht mehr effektiv die Ausgangsgröße verändern.

Wie auch sonst in der Technik üblich, lassen sich auch hier der **begrenzende Effekt konstruktiv** indirekt nutzen. Das wird mittels der **Laufzeitröhren in unterschiedlichen Varianten** genutzt. Statt der üblichen Leitungen sind **Wellenleiter oder Koaxialkabel** erforderlich. In einigen Fällen kommen zur **zusätzlichen Verzögerung** auch **Drahtwendeln** vor. Die Schwingkreise werden durch **Hohlraum-Resonatoren** (auch als Schlitze oder Vertiefungen) ersetzt.



## Zwei-Kammer-Klystron = Triftröhre

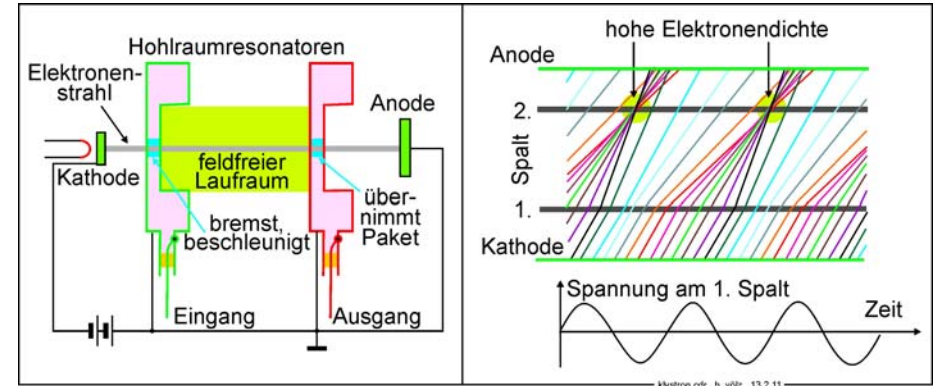
griechisch *κλύζειν* anbranden; *-tron* = Suffix zur Bezeichnung eines Gerätes, Werkzeugs

Es besteht im Wesentlichen aus einer **Elektronen-Strahl-Kanone** und **zwei Hohlraum-Resonatoren**  
 Die Elektronen durchfliegen nacheinander beide Resonatoren  
 Gemäß dem aktuellen **Feld im ersten Resonator** werden sie bzgl. ihrer Geschwindigkeit **beschleunigt, gebremst**  
 Nach einer gewissen **Laufzeit** (= Driftstrecke) überholen die schnellen Elektronen die langsameren  
 Es entsteht eine **Dichtemodulation** des Elektronenstrahls  
 An bestimmten Orten bilden sich so **Elektronen-Pakete** (= bunche) aus, die von „Lücken“ getrennt sind  
 Der **zweite Resonator** wird an den Ort der Pakete gelegt, und so zu **verstärkten Schwingungen** angeregt

Höhere Verstärkerleistung und größer Bandbreite ermöglichen **Mehrkammerklystrons**  
 = Hintereinanderschalten von etwas unterschiedlich abgestimmten Resonatoren und Triftstrecken

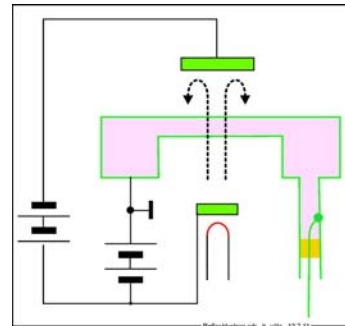
Der **dichtemodulierte Elektronenstrahl** enthält viele Oberwellen  
 Daher ermöglichen Klystrons auch leistungsfähige **Frequenzvervielfacher**

Klystrons sind für **Frequenzen** von 0,5 bis 500 GHz geeignet  
 Dauerstrich-**Leistungen** reichen bis 1 MW, Impulsleistungen bis 100 MW



## Reflexklystron

Es wird nur **ein Hohlraum-Resonator** verwendet  
 Durch eine **Gegenspannung** werden die **Elektronen reflektiert**  
 So erreichen die entstandenen Elektronen-Pakete wieder den Resonator  
 Regen ihn dadurch verstärkt an und es entsteht **Selbsterregung**  
 Das Reflexklystron ist also ein **Oszillator** für hohe Frequenzen  
 Änderung der Reflektorspannung ermöglicht **Frequenzmodulation**  
 Oft ist zusätzlich der **Hohlraum mechanisch verstimmbar**



## Wanderfeld-Röhre

Englisch **Travelling Wave Tube (TWT)**

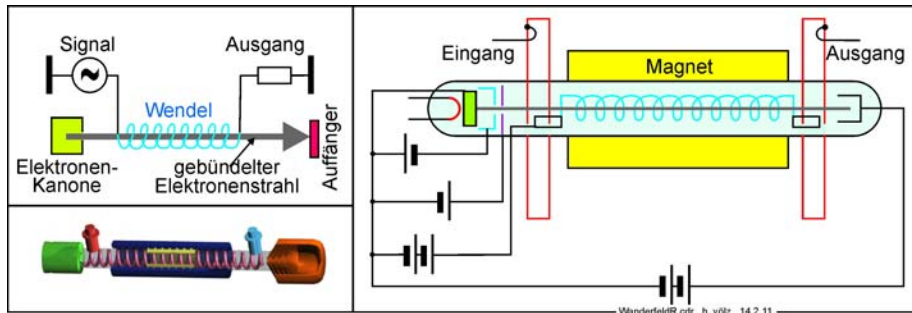
Entscheidend ist **Wechselwirkung** zwischen **Elektronenstrahl** und **bewegtem elektrischem Feld**  
 Elektrische **Felder** breiten sich immer mit etwa **Lichtgeschwindigkeit**  $\approx 3 \cdot 10^8$  m/s aus  
 Elektronen fliegen wesentlich langsamer, 1 kV **beschleunigt** gilt  $v_e \approx 7 \cdot 10^6$  m/s  
 Feldausbreitung wird mittels einem **spiralförmigen Leiter** (Helix) auf  $v_h$  reduziert, das nur wenig kleiner als  $v_e$  ist  
 Der **Elektronenstrahl** wird fein **fokussiert** durch Helix geleitet, hierzu dient ein statisches **Magnetfeld**  $\approx 0,1$  Tesla  
 Die bewegten Elektronen übertragen dann **Energie auf die Helix** und **verstärken** so ein dort **vorhandenes Signal**  
 Wegen  $v_e > v_h$  wirkt der **CERENKOV-Effekt**, infolge der Laufzeit treten nämlich wieder **Pakete** (bunches) auf  
 Ein- und Auskopplung des Signals erfolgt mittels koaxialem Anschluss; Hohlraum-Resonator oder Hohlleiter

Wanderfeldröhren erzeugen im Bereich **von 1 bis 20 GHz** kleine bis mittlere Leistung  
 Trotz **großer Verstärkung**  $> 20$  dB sind sie sehr **breitbandig**  $\approx 300$  MHz

Die hohe Verstärkung der Wanderfeldröhre kann leicht zur **Selbsterregung** führen nämlich dann,  
 wenn auf der Wendel **zurücklaufende Signale** wirksam werden  
 daher wird oft in der **Röhrenmitte** ein **Dämpfungsglied** eingefügt

**Verwandte Typen sind u.a.:**

**Carcinotron** (Rückwärtswellenröhre) als Oszillator  
**Gyrotron** starker Mikrowellengenerator bis zu Millimeterwellen



## Magnetron

ist **keine Verstärkerröhre**, nutzt aber ebenfalls **Laufzeiteffekte** aus

Dabei sind die **Hohlraum-Resonatoren**, Schlitze, Spalte usw. endlos **kreisförmig** angeordnet

Sie bilden die **geerdete Anode**. Die **Kathode** ist **zentral** eingefügt, besitzt negative Spannung von **einigen kV**

In Richtung der Achse wirkt ein homogenes Magnetfeld (**Permanentmagnet**)

⇒ Bezeichnung **Kreuzfeldröhren** (englisch crossfield amplifier = CFA) ab

Zusammenwirken von radial elektrischen und axial magnetischem Feld zwingt Elektronen auf **Zykloidenbahnen**

Nur Elektronen mit der „richtigen“ Geschwindigkeit erreichen die Resonatoren der Anode streifend

Dabei bildet sich verstärkt die Oszillatorfrequenz aus, annähernd gilt  $f \approx 20 \text{ GHz} \cdot B[\text{T}]$

Typische **Frequenzen** 0,3 bis 30 GHz, **Wirkungsgrad** sehr hoch bis zu 80 %, **Lebensdauer** 5000 h recht gering

Im **Dauerbetrieb** werden bis zu 30 kW, im **Impulsbetrieb** (u. a. Radar-Anlagen) bis 10 MW erreicht

**Dauerstrichmagnetrons** mit 2,45 GHz (Industriefrequenz) kommen zur Anwendung:

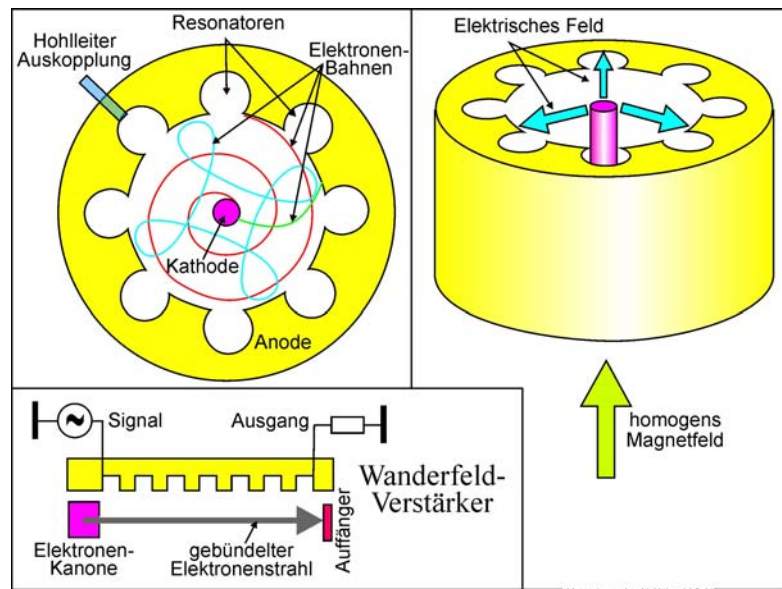
**Industriell** (u.a. Trocknung  $\leq 6 \text{ kW}$ ), **Haushalt** (Mikrowellenherde  $\approx 1 \text{ kW}$ ), **Medizin** (Erwärmung  $\approx 200 \text{ W}$ )

**Asynchronmotor**, besser -generator ist ein mechanischer Vergleich

Das Magnetron-Prinzip ist auf **linear angeordnete Resonatoren** (Rundzelleiter) übertragbar

Dann entstehen **Verstärker**, die auch **Wanderfeld-Verstärker** genannt werden, u.a. das **Amplitron**

Mittels Rückkopplung entstand das **Stabilotron**. Wegen **geringer Stabilität** erlangten sie alle keine Bedeutung



## Zur Geschichte

1912 entwickelt HEINRICH GREINACHER (1880 - 1974) eine Röhre zur **Messung von e/m** bei Elektronen

1921 bestimmt hierauf ALBERT W. HULL die Theorie der Flugbahnen von Elektronen und baut das **Magnetron**  
ursprüngliches Ziel war allerdings ein **Verstärker**

1921 unabhängig bauen ERICH HABANN in Jena (100 MHz) und AUGUST ŽÁČEK in Prag (1 GHz) ein Magnetron

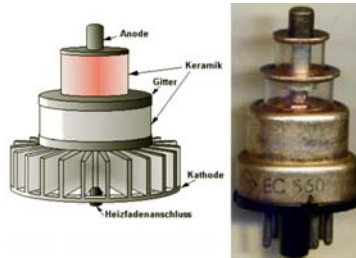
1935 meldet HANS ERICH HOLLMANN Patent für das Vielschlitz-Magnetron, erteilt 1938

1937 **Klystron** von RUSSELL und SIGURD VARIAN unter Mithilfe von WILLIAM WEBSTER HANSEN erfunden

## Scheiben-Triode und BARKHAUSEN-KURZ-Röhre

Beide sind ähnlich *wie klassische Röhren* aufgebaut

Bei der **Scheibenröhre** ist der **Gitter-Kathoden-Abstand** extrem verkleinert  $r < 10 \mu\text{m}$ .  
Dadurch können bis etwa 10 GHz die Laufzeiten in der Röhre und damit Laufzeiteffekte vernachlässigt werden



Der **BARKHAUSEN-KURZ-Effekt** entsteht bei **positivem Gitter und negativer Anode**.  
Dann pendeln die Elektronen um das Gitter und erzeugen dabei hohe Frequenzen.  
Sie ist daher ein **Oszillator**, wurde aber nur sehr kurzzeitig benutzt.  
HEINRICH BARKHAUSEN (1881 - 1956)

## Gunn-Element

besteht nur aus unterschiedlich **n-dotierten Halbleiterbereichen**, vorwiegend GaAs, GaN, InP.  
Obwohl es also **keinen pn-Übergang** besitzt, ist auch der falsche Name **Gunn-Diode** gebräuchlich.  
Der zuständige **Effekt** wurde 1963 von JOHN BATTISCOMBE GUNN (1928 - 2008) an GaAs entdeckt.  
An der **mittleren, weniger stark dotierten Zone** ( $\approx 10 \mu\text{m}$  lang), fällt die überwiegende Spannung ab.  
Hier nimmt die **Elektronenbeweglichkeit** mit steigender Feldstärke ( $> 2 \text{ kV/cm}$ ) ab.  
Bei höherer Spannung wird der Strom geringer = **negative Kennlinie**, das bewirkt Instabilität.  
**Ursache: Elektronen-Transfer** vom Bandminimum geringer zum höherer Energie und kleiner Beweglichkeit.  
Als Folge **wandern Zonen** geringer Elektronenbeweglichkeit und hoher Feldstärke durch die Schicht.  
Je nach Kristallabmessungen usw. entstehen so Frequenzen von bis 150 GHz, bei GaN bis 3 THz,  $\leq 300 \text{ mW}$ .

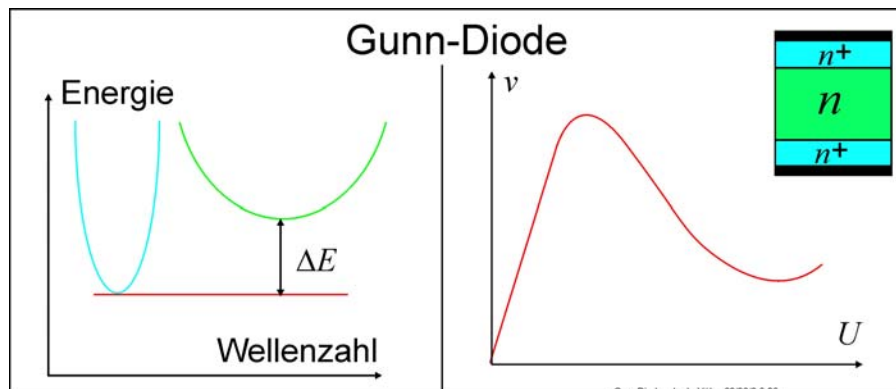
### Weiteres zu Halbleiter-Bauelementen für Mikrowellen

**Das Baritt-Prinzip** (Barrier injection transit time) entdeckte bereits 1934 J. MÜLLER

für Halbleiter wurde es 1954 WILLIAM BRADFORD SHOCKLEY (1910 - 1989) eingeführt

**Das Lawinen-, Laufzeit-Prinzip** wurde 1958 von W. T. READ gefunden

**Die Tunnel-Diode** (1958) geht auf LEO ESAKI (\*1925) zurück, beruht auf quantenmechanischem Tunneln (s.o.)  
s. u. a. [Haruth, Claassen]



## Maser - Laser

microwave bzw. light amplification by stimulated emission of radiation  
Mikrowellen- bzw. Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung

Beim Maser auch Begriffe wie **Molekular-** oder **Quanten-Verstärker** gebräuchlich

Beide nutzen die **gleichen physikalischen Gesetze**, jedoch bei unterschiedlichen Frequenzen

- Die **stimulierte Emission**
- Das quantenphysikalische **Bändermodell**

**Maser**  $\approx 100 \text{ kHz} - 100 \text{ GHz}$ ,  $\lambda \approx \text{mm bis km}$

**Laser** vorwiegend im **sichtbaren** Bereich von 400 - 800 nm

Es gibt auch Laser für **Infrarot** und **UV**, sogar für **Röntgenstrahlung**

In den letzten Jahren sind analog funktionierende **Atom-** und **Molekulaser** entstanden  
kohärente Atom-, Molekülstrahlen = kohärente **Materiewellen**



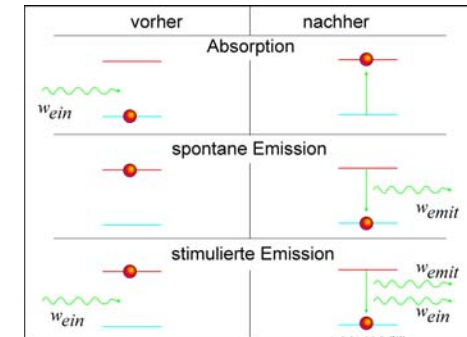
## Zur Geschichte

1916 ALBERT EINSTEIN (1879 – 1955) sagt **Stimulierte Emission** voraus  
 1928 RUDOLF LADENBURG (\*1882) und HANS KOPFERMANN (\*1895) weisen stimulierte Emission nach  
 1951 CHARLES HARD TOWNES (\*1915) **Idee des Lasers**, unabhängig auch JOSEPH WEBER  
 1953 mit JAMES P. GORDON und HERBERT ZEIGER **Ammoniak-Maser** realisiert  
 1956 NICOLAAS BLOEMBERGEN (\*1920) **Festkörper-Maser**, 1957 von DERRICK SCOVIL realisiert  
 1957 ARTHUR LEONARD SCHAWLOW (1921 – 1999) **Infrarot-Laser**  
 1957 CHIHIRO KIKUCHI demonstriert **Rubin-Maser**  
 1958 NIKOLAJ GENNADIJEWITSCH BASSOW (\*1922) schlägt **Halbleiter-Laser** vor  
 1959 GORDON GOULD (\*1920) wesentliche **theoretische Arbeit** zur Definition des Lasers  
 1960 NORMAN FORSTER RAMSEY (\*1915) baut **Wasserstoff-Maser**  
 1960 THEODORE HAROLD MAIMAN (\*1927) Laser mit Rubin-Kristall und Blitzlampe für 694 nm  
 1962 BASSOW realisiert Injektions-Halbleiter-Laser mit GaAs  
 1964 TOWNES, BASSOW und ALEXANDER MICHAJLOWITSCH PROCHOROW (1916 - 2002) **Nobelpreis** für Physik.  
 1978 **Laserdisk** mit He-Ne-Gaslaser  
 1982 **CD-Spieler** mit Halbleiterlaser  
 2004 weltweit  $>5 \cdot 10^8$  Laser **produziert**,  $^{2/3}$  für CD-/DVD-Laufwerke,  $<^{1/3}$  für Nachrichtentechnik

**Anwendungen** u.a. Werkstoffbearbeitung, Medizin, Messtechnik, Wissenschaft, Holographie, Daten- und Militärtechnik, speziell z. B. Laserpointer, Lasershow, RGB-Projektoren

## Drei Wechselwirkungen zwischen Licht und Materie

1. **Absorption:** Licht (oder andere Energie) hebt ein Elektron auf eine höhere Bahn (Term, Band)  
 Das Elektron bzw. Atom befindet sich dann im „**angeregten Zustand**“
2. **Spontane Emission:** das angeregte Elektron geht zu einer Bahn mit niedriger Energie über  
 Die **Energiedifferenz  $\Delta E$**  wird als **Photon** mit der Frequenz  $\nu = \Delta E/h$  **abgestrahlt**
3. **Stimulierte Emission:** angeregtes Elektron mit  $\Delta E$  wird durch ein Photon mit  $\Delta E$  quasi resonanzartig in den Grundzustand überführt. So werden zwei Photonen **phasenstarr als ein Wellenpaket** abgestrahlt  
 Das bedeutet **Lichtverstärkung**



## Bändermodell

Zu jedem Atom gehören **Energie-Zustände**, entsprechen, **Kreis-, Ellipsen-Bahnen** der Elektronen  
 Vereinfachung lineares **Energie-Orts-Bild**

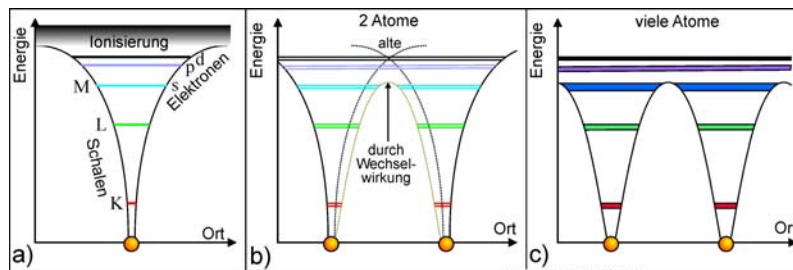
Bei mehrere Atomen im Kristall beeinflussen sich die Bahnen

**PAULI-Verbot** (WOLFGANG PAULI; 1900 - 1958) es können keine „**gleich-energetischen**“ auftreten

**Energierterme** verbreitern sich dadurch **zu Bändern**

Ab einer bestimmten Energie (Bahn) gehören die **Elektronen** zu keinem einzelnen Atom

Sie gehören zum gesamten Kristall, sind **frei beweglich = Leitungsband**



## Direkter und indirekter Übergang

**Bänder** im Energie-Orts-Diagramm (Wellenzahl) sind oft nicht auf konstanter Höhe, sind **verbogen**

### direkter Übergang

Minimum vom oberen und Maximum vom unteren Band befinden sich am gleichen Ort (Wellenzahl)

Entsprechend der Temperatur stellt sich eine stabile Belegungsdichte beider mit Elektronen ein

Im Mittel werden gleichviel Elektronen auf das höhere Niveau gehoben wie herunterfallen

Belegungsdichte gehorcht der thermodynamischen BOLTZMANN-Verteilung

### Indirekter Übergang

Maximum vom unteren Band ist seitlich gegenüber Minimum vom oberen verschoben

Zum Herunterfallen wird eine „**seitliche**“ (**thermische**) **Energie** benötigt

Der **thermische Zufall** bestimmt, wann dies geschehen kann, Verzögerung **bis zu Stunden möglich**

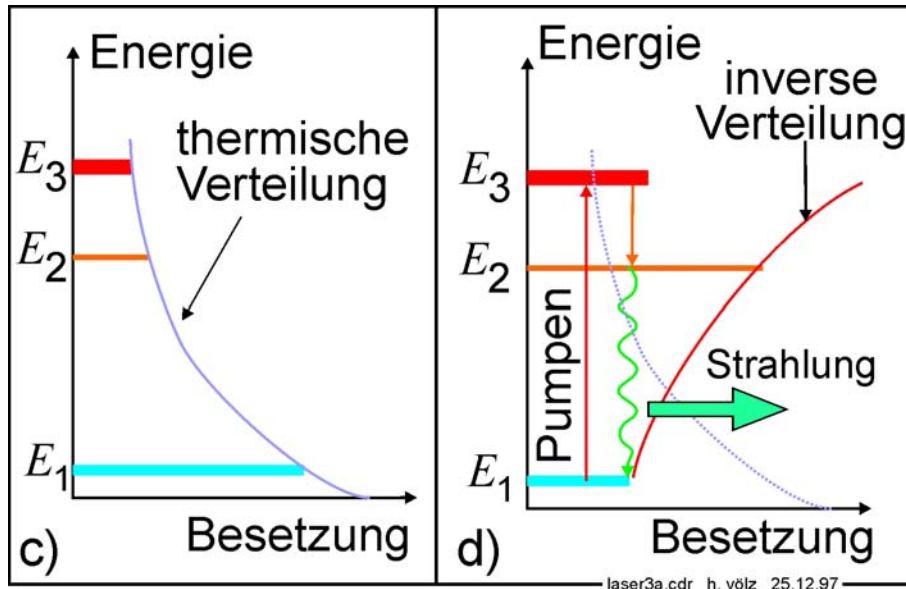
Ein solcher Zustand heißt **metastabil**, auf ihn können viele **Elektronen „gespeichert“** werden

Typisch für diesen Effekt sind **Nachleuchten**, z. B. Lumineszenz, Phosphoreszenz

Das absichtlich durchgeführt Speichern der Elektronen im metastabilen Zustand heißt **Pumpen**

Er ist die entscheidende Voraussetzung für einen Laser

Das beschleunigte und damit erheblich verstärkte Herunterfallen bewirkt die **stimulierte Emission**



## Wirkungsweise Maser, Laser

Die **Pumpenergie** hebt eine **3-Term-Substanz** auf Term  $E_3$

Sie muss deutlich als die thermische Energie sein

Es fällt sofort auf den metastabilen Term  $E_2$ , der dadurch hoch belegt wird

Zum Term  $E_1$  (Grundzustand) führt **Energie  $\Delta E = E_2 - E_1 = h \cdot \nu$**  hierfür gibt es **zwei Möglichkeiten**

1. Ein **Signal** mit  $\Delta E$  bewirkt **stimulierte Emission**
2. **Thermische Energie** erzeugt **zufällig** (spontan) eine Quasi-Signal mit  $\Delta E$

Damit **alle Ladungsträger** von  $E_2$  herunterfallen, ist ein **auf  $\nu$  abgestimmter Resonator** notwendig

Geeignet sind hierfür u. a. **Interferometer** oder **Hohlraum-Resonatoren**

Durch ihn entsteht im Material eine **stehende Welle**, die **resonanzartig** alle angeregten Teilchen herabzieht

Bei **1.** wird so das Signal **verstärkt** = Verstärker, bei **2.** wird eine **Schwingung erzeugt** = Oszillator

Durch **fortlaufendes Pumpen** ist ständige Verstärkung bzw. Schwingungserzeugung möglich

In beiden Fällen muss das **Ausgangssignal** aus dem Resonator **ausgekoppelt** werden

Bei Interferometer muss ein Spiegel für das Signal teilweise so (licht-) durchlässig sein,

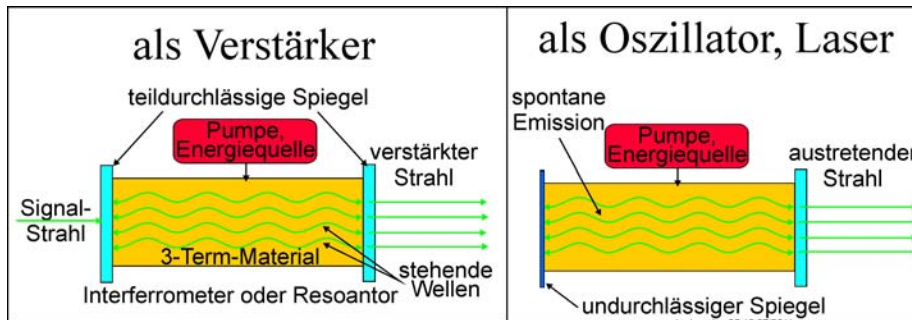
dass **die stehende Welle erhalten bleibt**

Beim **Maser** werden hierzu **Hohlleiter** oder **Koaxialkabel** verwendet

Im Material ist daher stets eine höhere Schwingungsenergie vorhanden, als am Ausgang

Das bedeutet eine hohe **Energiebelastung** des Materials  $\Rightarrow$  Begrenzung der **Lebensdauer**

**Bemerkung:** nebeneinander werden **quanten- und strahlenphysikalische Beschreibung** verwendet:



## Begriffe

**Interferometer** besteht aus zwei parallel angeordneten Spiegeln = **FABRY-PÉROT-Resonator**

Wurde bereits weit vorher benutzt von CHARLES FABRY (1867 – 1945) und ALFRED PÉROT (1863 – 1925)

**Interferometer:** lateinisch *ferire* schlagen, treffen

**Resonator:** lateinisch *re-* wieder, zurück; *sonare* tönen, hallen; *resonare* wieder ertönen

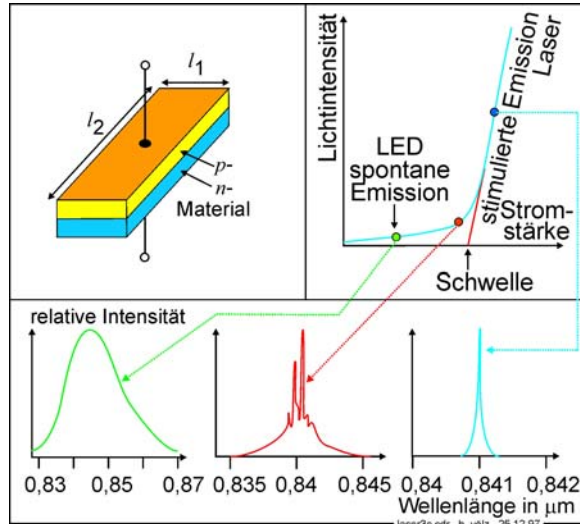
## Spontan-Emission beim Halbleiterlaser

Das Pumpen erfolgt durch **Träger-Erzeugung** in einem **pn-Übergang**

Das **Interferrometer** wird durch Spiegel an den Seitenflächen hergestellt

Ihr Abstand  $l$  ist ein Vielfaches der erzeugten Wellenlänge, das ermöglicht **mehrere Moden** mit unterschiedlichen  $n \cdot l = \lambda$

Erst ab einer gewissen **Pumpenergie** (Stromstärke > Schwelle) entsteht **stimulierte Emission = Laser-Strahlung**



## Maser

Genutzt u.a. **Molekülschwingungen** oder **magnetische Dipolübergängen** in Atomen, Vorwiegend **paramagnetische Ionen**, u. a. **Cr-, Fe-, Gd- und Ni-Ionen** mit geringer Konzentration im **nicht magnetischen Kristall**, u.a.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (Rubin). K-Co-zyanid und TiO paramagnetisches Ion = atomarer magnetischer Dipol, nur diskrete Stellungen zum Magnetfeld möglich Kristall in **Hohlraumresonator**, **Koaxialleitungskreis** auf  $f_s$  und  $f_p$  abgestimmt Abtrennung reflektierter Welle durch nichtreziprokes Dämpfungsglied, z. B. **Zirkulator** Tiefe Temperatur  $\Rightarrow$  z. B.:  $f_s = 4 \text{ GHz} + f_p = 30 \text{ GHz}$ .  $E_3 < 5\%$  besetzt  $\Rightarrow T < 3,2 \text{ K} \Rightarrow < 4,2 \text{ K}$  flüssiges He  $\Rightarrow$  geringer Rauschpegel + kein Schrotrauschen (Röhre, Transistor) = Verstärkung extrem schwacher Signale

### Beispiele

**Rubin-Maser:**  $f_s = 3,7$  bis  $4,2 \text{ GHz}$ ,  $f_p = 30 \text{ GHz}$ ,  $N_p \approx 100 \text{ mW}$ , Leistungsverstärkung  $10^3$ , Bandbreite  $50 \text{ MHz}$ , Magnetgleichfeld  $\approx 3 \text{ kOe}$ , muss längs des Kristalls auf  $1\%$  eingehalten werden Rauschtemperatur  $\approx 3,5 \text{ K}$ , magnetisch durchstimmbare  $\approx 350 \text{ MHz}$

**H-Maser: Hyperfeinstruktur bei atomaren H:** Atomkernspin parallel oder antiparallel zum Elektronenspin  $\Delta E \approx 10^{-5} \text{ eV} = 1,42 \text{ GHz} = 21\text{-cm-Linie}$ , Lebensdauer  $\approx 1\text{s}$ ; freie H-Atome in mit Teflon ausgekleideter „Speicherkugel“ aus Quarz,  $\Delta f < 1 \text{ Hz}$

**$\text{NH}_3$ -Maser;**  $\lambda = 12,7 \text{ mm}$ : H-Atom schwingt durch von 3 Wasserstoffatomen aufgespannte Ebene hindurch

**Ein-Atom-Maser** als nichtklassische Strahlungsquelle  $\Rightarrow$  **Quantencomputer**

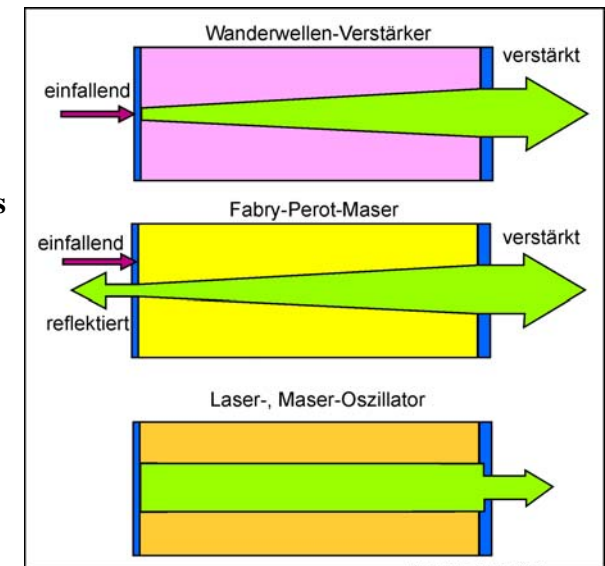
**Bemerkung:** Maser erscheinen als künstliche Geräte, da die Besetzungsinversion erst erzwungen Überraschung: um 1960er mit **Radioteleskopen** im Kosmos entdeckt u. a.  $18\text{-cm-Linie}$  des OH- und  $1,35\text{-cm-Linie}$  des H-Moleküls

## Laser-Varianten

Wichtige Unterscheidungen betreffen das **Lasermaterial** und z. T. die **Energie des Pumpens**

- Festkörper-Laser** benutzen speziell dotierte Kristalle als Laser-Material, z. B. Rubin ( $694,3 \text{ nm}$ ) Lateinisch **rubens** rot = Edelstein aus Korund ( $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ), durch geringe Mengen  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  tiefrot gefärbt YAG (Yttrium-Aluminium-Granat), Neodym ( $1,064 \mu\text{m}$ ), Ytterbium ( $940 \text{ nm}$ ) und Titan ( $670 - 1100 \text{ nm}$ ) Pumpen erfolgt mittels energiereicher Blitzröhren
- Gas-Laser:** Resonator mit Gas gefüllt, z. B. HeNe ( $632 \text{ nm}$ ),  $\text{CO}_2$  ( $11 \mu\text{m}$ , wichtiger Industrie-Laser), CO ( $6 - 8 \mu\text{m}$ ),  $\text{N}_2$  ( $337 \text{ nm}$ ), Ar (mehrere Linien  $450 - 500 \text{ nm}$ ), He ( $442 + 325 \text{ nm}$ ),  $p = 10$  bis  $10^6 \text{ Pa}$  Pumpen: elektrische Gasentladung, seltener Mikrowellen, Spektralbereich reicht fernes IR bis UV
- Farbstoff-Laser** nutzen organische Farbstoffe in alkoholischer Lösung (oft Methanol oder Ethanol) bzw. durchsichtigen Werkstoff mit Farbzentren. Pumpen mit Blitzröhren oder Stickstoff-Gas-Laser Sind zuweilen in einen Wellenbereich durchstimmbare
- Chemische Laser** nutzen zum Pumpen von chemische Reaktionen
- Halbleiter- = Injektions-Laser** nutzt den Stromfluss eines **pn-Übergangs** zum Pumpen besitzt negativen Temperaturkoeffizienten  $\Rightarrow$  Gefahr der Selbstzerstörung  $\Rightarrow$  Strombegrenzung notwendig Problem der Intensitätssteuerung, oft nur ein- und ausschaltbar

## Versuch eines Vergleichs



## Licht-Verstärkung im Raum

Sie Erfolgt vor allem durch *Linsen* und *Spiegel*, im erheblichen Umfang im „Brennpunkt“  
Auch durch *Laufzeiteffekte* und *Wellenlängen-Dispersion* ist eine Energiekonzentration möglich  
Sie erfolgt u.a. bei der *Impuls-Versichtung* für Kurzeitimpulse der Laser

*Indirekte Verstärkung* liegt bei einigen optischen Instrumenten vor  
Das erfolgt z. B. bei *Lupe*, *Mikroskop* und *Fernrohr* als *Vergrößerung* eines *Bildes*

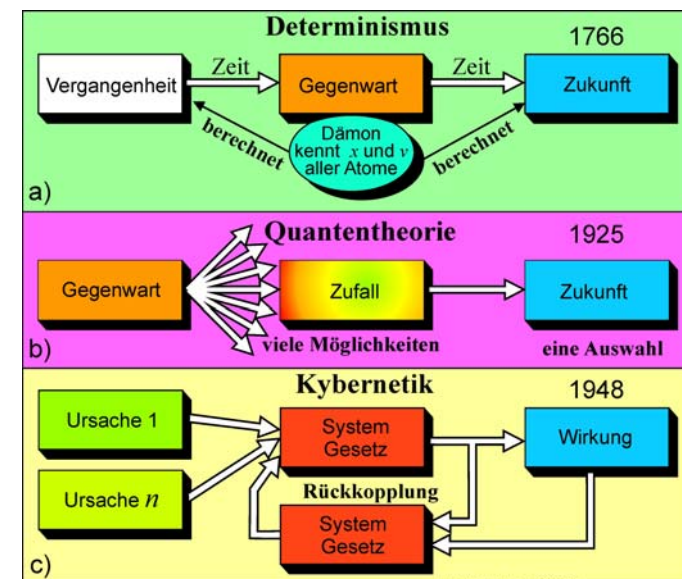
## Einschub Natur-Erkenntnis

## Zwei, drei oder mehr Wege

- Bereits in Griechenland entstand der **Determinismus**: eine jede Erscheinung hat (eine) Ursache  
Höhepunkt ist der **LAPLACE'sche Dämon** von 1766 (PIERRE SIMON LAPLACE 1749 - 1827)  
Er ist *technisch nicht realisierbar*, würde auch *freien Willen und Verantwortung ausschließen*
- ab 1900 Beginn der **Quantentheorie**: im Mikroskopischen wirkt der Zufall  
Zu jedem (diskreten) **Zeitpunkt** wählt die **Wirklichkeit** eine der unendlich *vielen Möglichkeiten* aus  
Dennoch sind die **Gesetze** der Quantentheorie bestens *in der Realität bestätigt*  
Erst im Makroskopischen erfolgt ein Übergang zur Verknüpfung von **Ursache und Wirkung**
- Kybernetik** führt u.a. **Rückkopplung** (Wirkung wird wieder Ursache), **Multistabilität** und **Auslöse-Effekt** ein

### Wir müssen uns damit abfinden

Vieles ist mit einer gewissen, aber oft *kalkulierbaren Unsicherheit* behaftet  
Ich weiß, dass ich nichts weiß  $\Rightarrow$  Ich weiß um die Unsicherheit meines meist erfolgreichen Wissens  
Dies ist notwendig, um die Gefahr von Agnostizismus und Mystizismus zu vermeiden.



## HENRI POINCARÉ

1887 schrieb der **König Oskar II** von Schweden einen wissenschaftlichen Preis von 2500 Goldkronen aus  
Es sollte die Frage beantwortet werden: **Ist das Planetensystem stabil?**

Den Preis gewann trotz seiner Negativaussage HENRI POINCARÉ (1854 - 1912). Er stellte 1903 fest:

„Die kanonischen Gleichungen der Himmelsmechanik besitzen kein (außer bei speziellen Anfangsbedingungen) geschlossenes analytisches Lösungsintegral außer dem Energieintegral.“ ... „Eine sehr kleine Ursache, die wir nicht bemerken, bewirkt einen beachtlichen Effekt, den wir nicht übersehen können, und dann sagen wir, der Effekt sei zufällig. Wenn die Naturgesetze und der Zustand des Universums zum Anfangszeitpunkt exakt bekannt wären, könnten wir den Zustand dieses Universums zu einem späteren Moment exakt bestimmen. Aber selbst wenn es kein Geheimnis in den Naturgesetzen mehr gäbe, so könnten wir die Anfangsbedingungen doch nur annähernd bestimmen. Wenn uns dies ermöglichen würde, die spätere Situation in der gleichen Näherung vorherzusagen – dies ist alles, was wir verlangen –, so würden wir sagen, daß das Phänomen vorhergesagt worden ist und daß es Gesetzmäßigkeiten folgt. Aber es ist nicht immer so; es kann vorkommen, daß kleine Abweichungen in den Anfangsbedingungen schließlich große Unterschiede in den Phänomenen erzeugen. Ein kleiner Fehler zu Anfang wird später einen großen Fehler zur Folge haben. Vorhersagen werden unmöglich, und wir haben ein zufälliges Ereignis.“

Diese Aussagen gewann er bereits am **Dreikörperproblem**

Hier können kleinste Änderungen in den Parametern zu völlig unvorhersehbaren Bahnen führen können

Seine Untersuchungen haben noch heute für Satellitenbahnen Bedeutung (Regelung, Steuerung)

Damit war u. a. eigentlich die **Katastrophen-Theorie** geboren

Doch infolge des 1. Weltkrieges ging dieses Wissen weitgehend verloren

## Übergang zum Fraktalen

1960 simulierte EDWARD NORTON LORENZ (\*1917) ein relativ einfaches Wettermodell

**Kleine Variationen** der Anfangsdaten der Variablen bewirkten **stark abweichende Wetterstrukturen**

**Kleine Ursache  $\Rightarrow$  große Wirkung:** wurde **Schmetterlings-Effekt** (butterfly) bekannt:

Der Flügelschlag eines Schmetterlings in China kann in der folgenden Woche in USA einen Hurrikan auslösen

Die Natur zeigt häufig, z. B. bei **Turbulenzen** und **Wirbeln** chaotisches Verhalten (REINOLD-Zahl)

Ähnlich ist es mit Instabilitäten, z. B. Eintreten von Brüchen beim **EULERSches Knickmoment**

Auch die **Katastrophen-Theorie**, **kybernetische Multistabilität** usw. sind hier einzuordnen

1972 entwickelt RENÉ THOM (1923 - 2002) die Katastrophentheorie

1978 findet MITCHELL JAY FEIGENBAUM (\*1944) in praktisch allen chaotischen Systemen übereinstimmende Muster, stehen im Zusammenhang mit den Fraktalen

Er findet die Kenngrößen für Periodenverdopplung = FEIGENBAUM-Konstante  $F = 4,6692016090\dots$

1982 definiert BENOIT B MANDEBROT (1924 - 2010) die Fraktale Geometrie (Apfelmännchen)

## Beispiele für Auslöse-Effekte

- Fast jeder **Schalter und Taster** löst entsprechende Effekte aus
- **Ein-Click-Befehle** der Rechner sind eine Anwendung und können daher sehr gefährlich sein
- Bei leichter Berührung ( $\approx$ mg) legt die **Mimose** ihre Blätter zusammen, ganze Stängel hängen schlaff herab
- Leichte Bewegung am **Abzug eines Gewehrs** löst den Schuss aus
- Bei Erhöhung des senkrechten Druckes auf einen **Stab bricht er aus** und zerbricht
- **Brücken** zerbrechen durch Resonanz einer darüber **marschierenden Truppe**
- Ein **Knopfdruck** kann **vernichtende Atomraketen auslösen** und so ganze Landschaften zerstören

### Beispiele für folgenschwere Ein-Click-Befehle

1986: **Tschernobyl:** Ein Notfallknopf, der den Reaktor des Atomkraftwerkes eigentlich abschalten soll, bewirkt das genaue Gegenteil: Der Reaktor überhitzt und es kommt zu einer Explosion

2008: **Formel-1-Panne:** Ein Mechaniker drückt zu früh auf die Startampel beim Boxenstopp  
Fahrer Felipe Massa zieht beim Losfahren einen Tankschlauch hinter sich her, kostet den Sieg

2008: **Nerpa-Unfall:** Testfahrt des Atom-U-Boots "Nerpa", ein Matrose spielt an den Temperaturreglern  
Durch Knopfdruck aktiviert er die Feuerlöschanlage. Das austretende Gas erstickt 20 Menschen

2010: **Wasserschaden,** Bei einer Theaterprobe in Düsseldorf werden Spezialeffekte getestet  
Ein Mitarbeiter erwischt dabei den falschen Knopf und löst die Löschanlage aus  
10 000 Liter Wasser fluten das Gebäude

## Fakten zu Auslöse-Steuerungs-Effekten

Sie stoßen immer gegen das klassische Prinzip: **kleiner Ursache  $\rightarrow$  kleiner Wirkung**

Stehen nicht selten in (scheinbaren?!) Widerspruch zum **Energie-Erhaltungssatz**

Führen häufig zu sprunghaftigen **Verzweigungen im Geschehen, zu Instabilität, besitzen Multivariabilität**

Wir erfahren sie **so häufig**, dass sie uns (ohne Nachzudenken) als **selbstverständlich erscheinen**

Sie werden nur **beschrieben** und **nicht erklärt**

Auf sie beruhen so wichtige Erscheinungen wie **Evolution, Emergenz und Synergetik**

## Zusammenfassung zur Verstärkung

Es gibt viele unterschiedliche Effekte, die eine Verstärkung bewirken

- **Auf Kosten anderen Größen** bei Energieerhaltungssatz (z. B. Hebel, Rolle, Keil, Getriebe, Transformator)
- **Impulsverstärker**, z. B. Hammer, Axt und Rammme
- **Konzentration bei Licht**, u. a. Lupe, Mikroskop, Fernglas und Abbildungen
- Durch **Auslösemechanismen**: Es gibt keine allgemein brauchbare Erklärung (u.a. Taster, Relais, Regler, Katastrophen)
- **Steuerung von Ladungen**, nur Teilerklärungen ( vor allem Röhre, Transistor)
- **Negative Kennlinie**, negativer Widerstand, Bistabilität = Kompensation von Verlusten
- **Parametrische Verstärker** = systematische Änderung von Eigenschaften (aktiv wirkender) Bauelemente, auch Schaukel
- z. T. auch Leistungs-Verstärker
- **Laufzeiteffekte** = zeitweilige Zusammenführung von z. B. Elektronen + Rückkopplung (u. a. Mikrowellen-Röhren)
- **Nutzung metastabiler Zustände**: Maser, Laser (Quantenphysik)
- **Resonanz-Verstärkung**, exponentieller Anstieg, Pendel-Rückkopplung (s. Schwingungserzeugung)

Es **fehlt** also eine gemeinsame **wissenschaftliche Grundlage**

Insbesondere gilt dies für die vielen und vielfältigen **Auslöse-Steuerungs-Effekte**

# Schwingungen - Oszillatoren

## Begriffe

### Oszillator

= selbsttätiger **Schwingungserzeuger, Generator** für Wechselstrom  
*Lateinisch. oscillare* sich schaukeln, *oscillum* Schaukel

### Generator

*Lateinisch generator* Erzeuger

- **Maschine, Gerät** wandelt mechanische in elektrische Energie um, erzeugt elektrische Spannung/Strom
- **Schachtofen, Apparat** erzeugt Gas aus festen Brennstoffen wie Kohle u. Koks

### Schwingung

*Deutsch* 8 Jh. Zusammenhang mit Schwang, Schwank, schwanken, schwenken

- **Physik**: periodische Änderung einer oder mehrerer Größen (Wellen), u.a. als Sinus, Rechteck, Sägezahn
- **Allgemein**: annähernd regelmäßig wiederkehrende Bewegung, Erscheinung
- **Psychologie**: durch einen Anlass bewirkte Regung, Reaktion, etwa seelische Schwingung
- **Räumlich, Architektur**: bogenförmiger Verlauf: die Brücke besitzt eine eleganter Schwingung

## Wichtige Schwingungs-Begriffe

**Periode**: *griechisch periodos* Umhergehen, Gang um etwas herum, Kreislauf der Zeit und der Gestirne, regelmäßige Wiederkehr in der Zeit, Zeitabschnitt, abgerundeter Redesatz, Abteilung im Vers.  
*lateinische periodus* Kreislauf, gegliederter Satz und Satzschlusszeichen

**Resonanz**: *lateinisch resonare* widerschallen, widerhallen, von *re-* wieder, zurück, *sonare* tönen, hallen

**Rhythmus**: *griechisch rhythmós, latein. rhythmus* gleichmäßige Bewegung, Takt, Gleichmaß, Tonfall der Rede  
zu *griechisch rhein* fließen.strömen

**Synchronisation**: *griechisch synchronos* gleichzeitig, von gleicher Dauer und Zeit; *griechisch chronos* Zeit

**Takt**: *Lateinische tactus* Berührung, Gefühlssinn, Gefühl, *tangere (tactum)* berühren, beeindrucken, zurück

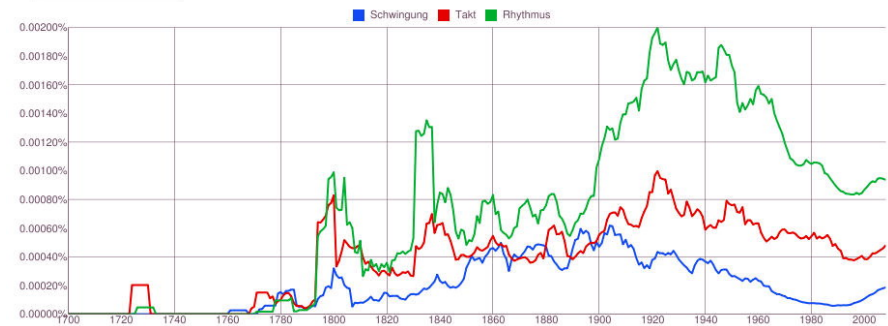
**Zyklus** *Griechisch kyklos* Kreis, Umkreis, Rad, kreisförmiger Gegenstand, Kreislauf  
*Lateinische cyclus* Kreis, astronomischer Zeitkreis, Erd-, Sonnen-, Mondkreis

## Rhythmus und Takt

LUDWIG KLAGES (1872 – 1956) hat als erster den Unterschied deutlich herausgearbeitet.

Bezug	Takt	Rhythmus
Frequenz	so konstant wie möglich bester Wert: Cs-Uhr $\Delta f/f \approx 10^{-14}$	stark schwankend um einen Mittelwert, den Takt
Eigenschaften	wiederholt stur	erneuert, anpassungsfähig, kreativ, ergibt Sinn
Anwendung	Vor allem in der Technik Taktgenerator, Viertaktmotor, Stimmgabel, Uhr Synchronisation	Auf das Leben, den Menschen bezogen Metrum der Musik (aber Taktstrich), Betonung im Gedicht Bewirkt musikalischen, künstlerischen Genuss und Erleben Gefühl für Anstand und Schicklichkeit
Gefahren Probleme	Senkung des thermischen und Quantenrauschen, der Störungen Resonanzkatastrophe, z. B. Kolonne marschiert über eine Brücke Für Menschen ist der Takt ermüdend, anstrengend, bei Herzinfarkt schlägt Herz vollständig regelmäßig Klapperverse	

**Taktik** bei Spielen und beim Militär?!



Hier lassen sich kaum inhaltliche Folgerungen ableiten

## Feder und Masse bzw. Schwingkreis

An einer **Spiralfeder** hänge eine **Masse  $m$**

Sie **wird herabgezogen**, dadurch wird die Feder gespannt, sie besitzt eine (potentielle) **Federkraft  $F$**

**Lässt man die Masse los**, so zieht diese Kraft die **Masse nach oben und beschleunigt** sie

Wenn die Masse bei ihrem **ehemaligen Ruhepunkt** angekommen ist, besitzt eine **Geschwindigkeit  $v$**

Dazu gehört die **Energie  $E_{kin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$** . Sie bewirkt, dass sich die **Masse weiter nach oben** bewegt

Sie muss dabei **gegen die Schwer- und Federkraft** wirken, das geht solange **bis  $E_{kin}$  aufgebraucht** ist.

Dann ist sie zu **Ruhe** gekommen und wird **durch Schwer- und Federkraft heruntergezogen**

Dadurch erlangt **Geschwindigkeit** und wird so **beschleunigt**, dass wieder über den **Ruhepunkt hinaus**schwingt

Dies Spiel wiederholt sich theoretisch **periodisch unendlich lange**

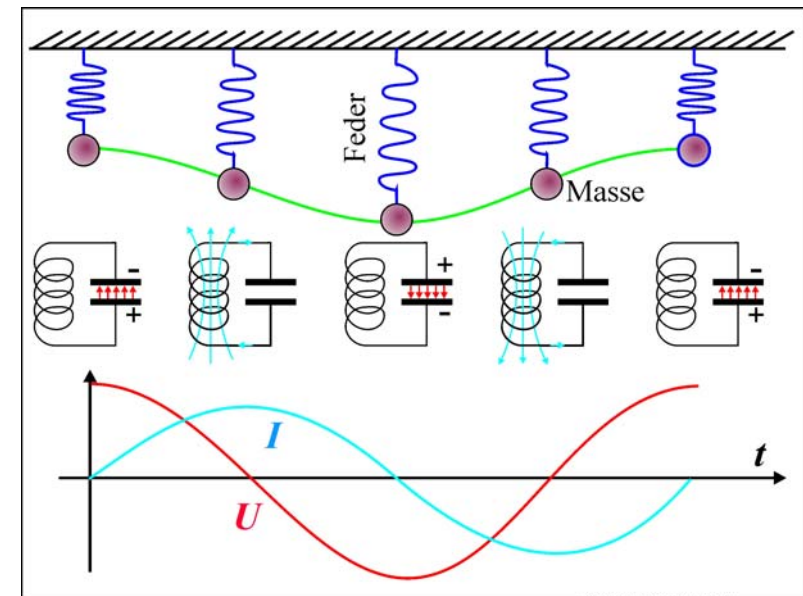
Es bedarf der **Luftreibung und Verluste** in der Feder damit die Schwingamplitude abnimmt

Bei einem elektrischen **Schwingkreis aus Induktivität und Kapazität** geschieht Äquivalentes

Die **Energie wechselt** hier zwischen der **magnetischen** in der Spule und der **elektrischen** im Kondensator

Verluste in der Spule (ohmscher Widerstand, Wirbelstrom usw.) und im Kondensator lassen die

Schwingungsamplitude abnehmen



## Gesetz der Trägheit

Es gibt *nur* zwei *elementare Bewegungszustände*:

1. **Ruhe**
2. **gleichförmige Bewegung**

Von sich aus kann ein *passiver Körper* den jeweiligen **Zustand nicht ändern**, dazu bedarf es **äußerer Kräfte**

- Um einen **ruhenden Körper** zu **bewegen**, muss ihm ein **Impuls** erteilt bzw. eine Energie zugeführt werden
- Um **Bewegung zu verändern** bedarf es äußerer Kräfte
- Durch **Verluste**, z. B. Reibung wird **Bewegung verringert** und schließlich **beendet**

Wesentlich sind hierzu Erkenntnisse von Galileo GALILEI. (1564 - 1642) und ISAAC NEWTON (1642 - 1727)

Sie folgerten sie u.a. aus den **Planetenbewegungen** und dem **freien Fall**

und führten zur **Gravitation** als Ursache der Schwerkraft, den Gesetzen der Planetenbewegung usw.

## Verallgemeinerung und Folgerungen

Eine **einmalige äußere Kraft** kann eine **periodische Schwingung auslösen**

wenn in einem System z. B. **zwei gegeneinander austauschbare Energien** auftreten bzw. möglich sind

Periodische Schwingungen klingen durch **unterschiedliche Verluste** unterschiedlich schnell ab

Die **Frequenz  $f_0$**  der Schwingung ist durch **Parameter des Systems**, z. B. ihrer Elemente bestimmt

Die **Schwingungsenergie** des Systems  $E_S$  und die **Energieverluste  $E_V$**  bestimmen die Dauer der Schwingung

Werden die **Verluste  $E_V$**  durch sich **wiederholende Energiezufuhr** ausgeglichen, so tritt **Dauerschwingen** auf

Ein **Sonderfall** liegt dann vor, wenn auch die Energiezufuhr **mit der Frequenz  $f_0$**  erfolgt

Die dann benötigte Energie braucht dann für **Dauerschwingungen nur die Verluste auszugleichen**

Da oft  $E_S \gg E_V$  gilt, ist dann das Verhältnis  $E_S/E_V$  als **Verstärkung** interpretierbar

Eine andere Ausdrucksweise hierfür ist **Resonanz**

Wir eine Energie  $E > E_V$  **zugeführt**, so **vergrößert** sich die Schwingamplitude und -Energie **exponentiell**

$E_S$  kann aber nicht beliebig wachsen, irgendwann wird durch sie das **System zerstört**

Diese **Resonanz-Katastrophe** kann z. B. auftreten, wenn Truppen im Gleichschritt über eine Brücke marschieren

## Anwendung von Resonanz

Resonanz ist bei allen **schwingfähigen Gebilden**, z. B. Schwingkreis, Pendel, Saite usw. möglich

Die Resonanzwirkung (Verstärkung) ist proportional  $E_S/E_V$ .

In technischen Systemen ist auch der Begriff **Güte  $G$**  gebräuchlich (s.u.)

Durch Resonanz wird aus vielen Frequenzen (Störungen) die **Resonanzfrequenz** herausgefiltert

Entspricht bzw. bewirkt **hoch selektive Verstärkung**

Typisch sind z. B. Rundfunk, Fernsehen, Handy, Laser, Schaukel, auch Biorhythmen

Leider wird der Begriff auch **nicht ganz korrekt** benutzt, z. B. beim **Resonanzboden** von Musikinstrumenten

Die Saite der Violine wird per Bogen zur Resonanz angeregt

Doch sie kann wegen ihrer **geringen Oberfläche** keinen gut hörbaren Schall abstrahlen

Deshalb wird über den Steg das **Holzgehäuse** zum Mitschwingen gebracht

Eigentlich geht dabei **sogar Energie der Saite zusätzlich verloren**, Ihre Resonanz wird geschwächt

## Mathematische Zusammenhänge

Die Auslenkung  $x$  einer Masse  $m$ , dem Reibungskoeffizienten  $R$  und der Federkonstante  $D$  gilt die Differentialgleichung

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + R \frac{dx}{dt} + Dx = \text{Anregung } f(x)$$

Bei elektrischen Schwingkreisen aus der Induktivität  $L$ , dem Widerstand  $R$  und der Kapazität  $C$  wird am besten die **Ladung  $Q$**  und die **Anregungs-Spannung  $U(t)$**  benutzt

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

Zur Lösung ist der **Ansatz  $Q = A \cdot e^{pt}$**  geeignet, er führt zur **quadratischen Gleichung** mit den Lösungen

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

Das sind **komplexe Frequenzen** gemäß  $\delta \pm j\omega_0$  mit

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



## Stoß-Anregung

Zu einem Zeitpunkt  $t = 0$  werde die Spannungsquelle von Null auf  $U$  umgeschaltet. Das entspricht einer einmaligen Stoßanregung (Rampenfunktion), als Folge sind drei Fälle zu unterscheiden.

Eine **gedämpfte Schwingung** entsteht, wenn gilt

$$\frac{R^2}{4L^2} < \frac{1}{LC} \quad \text{bzw.} \quad R\sqrt{\frac{C}{L}} < 2$$

Es gibt einen ausgezeichneten **aperiodischen Grenzfall** bei

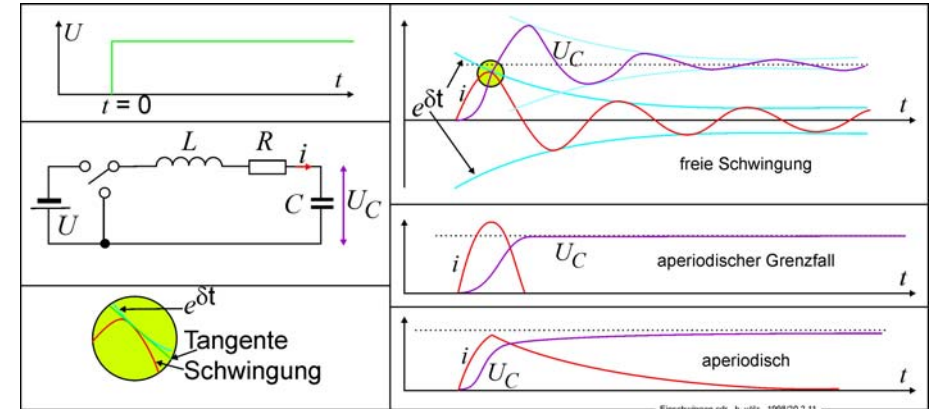
$$\frac{R^2}{4L^2} = \frac{1}{LC} \quad \text{bzw.} \quad R\sqrt{\frac{C}{L}} = 2$$

Hier kommt nach dem einmaligen Sprung von  $U$  das System *in der kürzestmöglichen Zeit zur Ruhe*. Dieser Wert ist z. B. für **Messinstrumente** usw. wichtig, für den **Menschen** ist er weniger vorteilhaft. Eine **Bahn brems**, der Mensch wird nach vorn bewegt: Die Bahn kommt zur Ruhe, der Mensch fällt zurück.

Hier ist der **überaperiodisch Fall** günstiger

$$\frac{R^2}{4L^2} > \frac{1}{LC} \quad \text{bzw.} \quad R\sqrt{\frac{C}{L}} > 2$$

Es *dauert* zwar bis Ruhe einkehrt *länger*, dafür treten aber *weniger starke Beschleunigungen* auf. Er wird daher nach Möglichkeit bei **Stoßdämpfen** benutzt.



## Synchronisation

Ein System mit der **Resonanz-Frequenz**  $f_0$  wird von außen durch eine **Schwingung**  $f_a \neq f_0$  *angeregt*. Dabei kann **Synchronisation** auftreten, d. h. dem System wird die Frequenz  $f_a$  aufgezwungen. **Anderenfalls** treten **unregelmäßige Schwingungen** auf.

Für die Synchronisation sind **zwei Bereiche** zu unterscheiden:

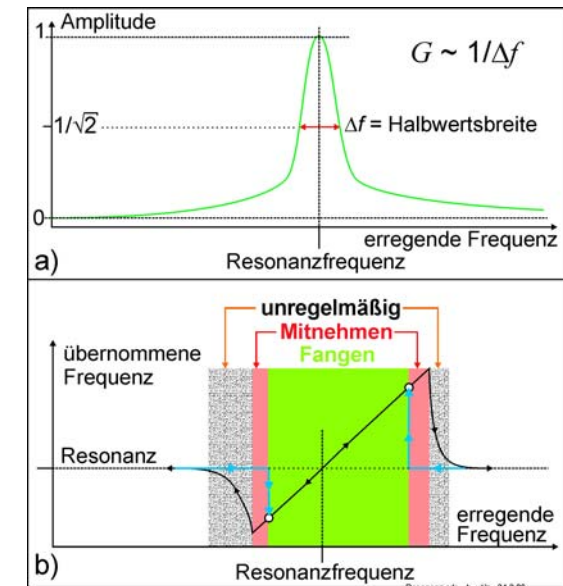
- **Fangbereich**  $f_0 \pm \Delta f_F$ : Sobald  $f_a$  auftritt, erfolgt sofort die Synchronisation.
- **Mitnahmebereich**  $f_0 \pm \Delta f_M$  mit  $\Delta f_M > \Delta f_F$ : wenn bereits Synchronität vorlag, System befand sich im Fangbereich, dann bleibt sie erhalten.

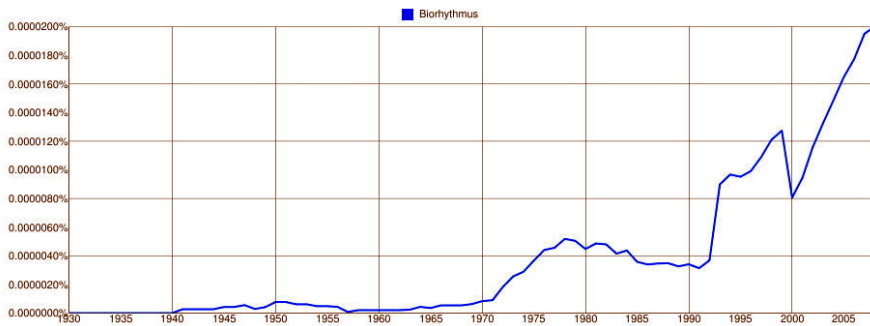
Es ist leichter mit **höherer Frequenz**  $f_a > f_0$  zu synchronisieren = Synchronimpuls zu früh (s. Jetlag). Eine Synchronisation ist auch für **ganzzahlige Verhältnisse** bzgl.  $f_a$  und  $f_0$  möglich:  $n \cdot f_a = m \cdot f_0$ .

Synchronisation ist in vielen Bereichen wichtig, **von Natur über Leben bis zur Technik**. Durch sie wird Ordnung hergestellt.

Die **Uhr** war ein besonders wichtiges Instrument zur Synchronisation des gesellschaftlichen Lebens.

Für das Leben sind oft **Biorhythmen** entscheidend.





Untersuchungen zu Biorhythmen waren erst mit *statistischen Methoden der Computertechnik* möglich  
*Die Möglichkeiten äußerer „Taktgeber“* werden jedoch erst ab 1990 richtig deutlich

## Biorhythmen

Es müssen zwei Arten unterschieden werden

### Kaum durch äußere Einwirkungen beeinflussbar

Sie werden intern erzeugt, treten einfach auf und entsprechen daher *Oszillatoren*  
 Ihre Periodendauer beginnt bei *Sekunden* und endet bei etwa zwei *Stunden*

Beispiele sind *EEG-Wellen*: *Wachsein*:  $\beta > 13$  Hz,  $\alpha = 7 - 13$  Hz, *Schlaf*:  $\theta = 4 - 6$  Hz,  $\delta = 1 - 3$  Hz  
 REM-Schlaf: 90 bis 120 Minuten

### Synchronisierbare Rhythmen

Ermöglichen *Anpassungen an Umwelt* mit sehr *kleiner Energie*

*Tagesrhythmus* (diurnal, circadian) synchronisiert durch *täglicher Hell-Dunkel-Wechsel*

Interner Taktgeber bei Frühaufsteher  $\approx 25$  Stunden; bei Nachteulen  $\approx 26$  Stunden

*Störung* erfolgt bei *Schichtarbeit* und bei *Flug* über mehrere Zeitzonen als *Jetlag*

Es wird eine „falsche“ Taktung mit vegetativen Störungen bewirkt

Intensität ist abhängig Flugrichtung, nach Osten geringer

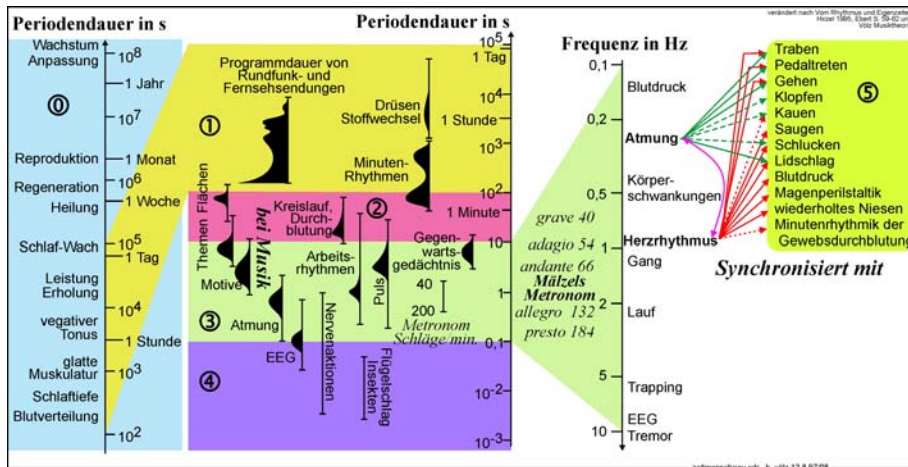
Bei *14 Tage im Dunkeln* entkoppeln sich sogar Schlaf- und Körpertemperatur-Rhythmus

$\approx 33$  Stunden für Schlafen/Wachen und  $\approx 25$  Stunden für die Temperatur

Weitere Synchronisationen erfolgen u.a. bei *Gang-/Herz-Rhythmus* = 1:1

*Atmung-/Herzfrequenz* = 1:4  $\Rightarrow$   $\frac{1}{4}$ -Takt der *Marschmusik*, weiches Schweben  $\frac{3}{4}$ -Takt beim *Walzer*

Weiter bekannt: *Wochen- und Jahres-Rhythmus*, evtl.: *Monat  $\approx$  Mond = Ebbe-Flut*, Menstruation

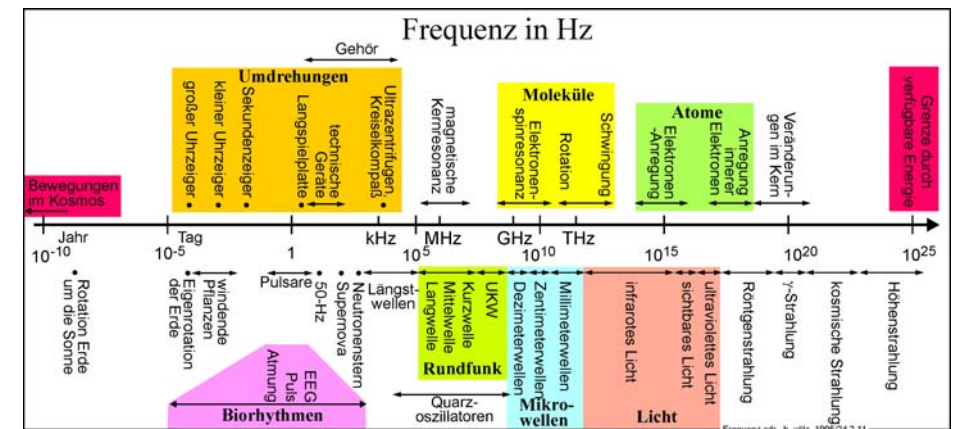


## Auftreten von Schwingungen

Nach EINSTEIN sind sie eine *grundsätzliche Erscheinung der Welt*

Sie treten in einem sehr großen Frequenzbereich auf

Daher gehen sie z. T. auf *unterschiedliche Mechanismen* zurück



## Quantentheorie

Der **Umbruch zur neuen Physik** erfolgte 1900 durch MAX KARL ERNST LUDWIG PLANCK (1858 - 1947)  
Mit seinem **Vortrag am 14.12.1900** in der Physikalischer Gesellschaft zu Berlin  
Als **neue Naturkonstante** musste er die PLANCKSche Konstante  $h=6,626... \cdot 10^{-34}$  J-s einführen  
Seitdem gilt für **jedliche elektromagnetische Strahlung** für **Energie  $\Delta E$**  und **Frequenz  $\nu$**  der Zusammenhang  
$$\Delta E = h \cdot \nu$$

Was das inhaltlich bedeutet bzw. wie dabei die Schwingungen im Detail entstehen, ist nach wie vor unklar  
Die Quantentheorie sagt schlicht: „**Es ist so!**“

## Rotierende Bewegungen

Erfolgen meist **streng periodisch ohne** dass sich **Energien** abwechseln, **Resonanzgebilde** existieren  
Typische Beispiele sind: **Planetenbewegungen**, Erde um die Sonne, Elektronen um Atomkern usw.  
Es erfolgt lediglich eine **anhaltende gleichförmige Geschwindigkeit**, gemäß dem **Trägheitsgesetz**  
Es stehen lediglich **Zentrifugalkraft** und **Anziehung** zum Zentrum im ständigen Gleichgewicht  
Die entstehende **Frequenz** ist durch den **Abstand** zum Zentrum und die beiden Massen bestimmt  
Die **Umlaufbahn** kann auch elliptisch sein, dann **variiert** auch die **Geschwindigkeit** in der Bahn periodisch  
Bezüglich der Frequenz entspricht dies **zusätzlichen Oberwellen**  
Die im System **vorhandene Energie** kann durch **Reibung** gemindert oder **von Außen erhöht** werden  
Dann **ändern sich** u.a. die **Geschwindigkeit** in der Bahn, die **Periode** und der **Abstand**

## Geschichte chemischer, biologischer Oszillationen

1750 ca. JEAN JACQUES D'ORTOUS DE MAIRAN von täglichen **Blattbewegungen der Mimose**  
1751 KARL VON LINNÉ entwarf den **Blumen-Taktgeber**  
1759 JOHANN GOTTFRIED ZINN beschreibt **circadianen** Rhythmus der Gartenbohne  
1825 JOHANN FRIEDRICH HERSCHEL entdeckt Periodische Oszillationen **Eisen-Salpetersäure** (1834 publiziert)  
1828 Publikation oszillierender **chemische Prozesse** durch GUSTAV THEODOR FECHNER  
1842 CHRISTIAN FRIEDRICH SCHÖNBEIN. 1844 JAMES PRESCOTT JOULE berichten über oszillierende Reaktionen  
1910 ALFRED JAMES LOTKA periodische **Populationsdynamik** (LOTKA-VOLTERRA-REGELN, **Räuber-Beute**) s. u.  
1921 WILLIAM C. BRAY oszillierende Reaktion im **homogenen Medium** Wasserstoffperoxid + Iodat  
1950 BORIS PAWLOWITSCH BELOUSSOW entdeckt zufällig BELOUSSOV-ZHABOTINSKY-Reaktion  
1953 ASERINSKI und KLEITMAN entdecken etwa 2-stündigen Rhythmus von **REM-Schlaf**  
1970 KONOPKA stellt bei der **Taufliege** Drosophila melanogaster circadiane **Schlüpf-Rhythmen** fest  
1977 ILYA PRIGOGINE Nobelpreis: Thermodynamik, vom Gleichgewicht entfernte (dissipative) Systeme

## Zu den chemischen Frequenzen

Sie sind **bis heute im Detail unklar** und wurden immer zufällig gefunden  
Oszillationen erfolgen nicht nur in der **Zeit**, sondern auch (zusätzlich) im **Raum**  
Es lassen sich **kaum allgemeine Erklärungen** geben  
Oft sind **viele Reaktionsschritte** beteiligt  
Meist werden folgende **Voraussetzungen** genannt

- Das System muss **weit vom thermodynamischen Gleichgewicht** entfernt sein
- Es besitzt mindestens einen Reaktionsschritt, mit **Rückkopplung** z. B. bzgl. Bildungsgeschwindigkeit, Temperatur, Konzentration, Elektrodenzustand usw.
- **Bistabilität**: Es existieren **mindestens zwei stationäre Zustände**.
- **Offenes System**: Für Stoff und Energie muss eine Austauschmöglichkeit mit der Umgebung bestehen

Zuweilen wird noch hinzugefügt

- **Nichtlinearität**: mindestens einen Reaktionsschritt muss nichtlinearen Verlauf zeigen

## Zu biologischen Frequenzen

Allgemein wird hier von *inneren Uhren* gesprochen  
z.T. wurden (indirekt) ihre *Orte* gefunden  
Der eigentliche Mechanismus ist aber *kaum erklärt*  
Grob gilt die folgende *Aufstellung*

**Einzeller** Seit den 1940er Jahre ist bekannt, dass sie eine „Innere Uhr“ besitzen

**Pflanzen** bisher konnte keine zentrale Steuerung (Uhren, Schrittmacher) gefunden werden, die Bewegungen werden von mehreren, über die ganze Pflanze verteilten Uhren gesteuert

**Tiere** im Zentralnervensystem ist ein Schrittmacherzentren lokalisiert, der oft mit Licht assoziiert

**Insekten** im optischen Loben

**Weichtiere** Basis der Retina

**Wirbeltiere** über Kreuzung der Sehnerven: Nucleus suprachiasmaticus und/oder Zirbeldrüse (Pinealorgan, Epiphyse)

## Übersichtliche mechanische Schwingungserzeugung

Andauernde Sinusschwingungen sind mit *verstärkender Rückkopplung* über einen *Schwingkreis* zu erzeugen

Es gibt aber auch deutlich *andere Möglichkeiten* s. u.

Der *Energieverlust*  $E_V$  des schwingfähigen Gebildes wird so ständig erneut zugeführt

Die zurückgeführte *Menge muss dabei exakt eingehalten* werden

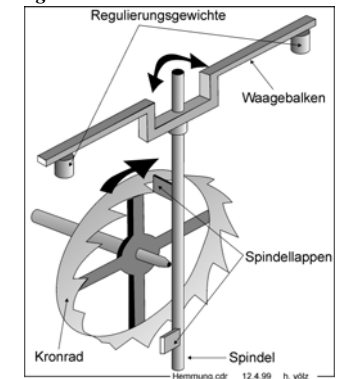
Zuviel würde die Schwingung *exponentiell anwachsen*, zu wenig sie *abklingen lassen*

Deshalb sind *zusätzliche Mechanismen*, Schaltungen oder Regelungen erforderlich

Für eine **Pendel-Uhr** benötigt man z. B.

1. eine *Energiequelle* = das sinkende Gewicht
2. ein *schwingungsfähiges Gebilde* = das Pendel
3. einen *Rückkopplungsmechanismus* = Anker und Steigrad welche die benötigte Energie in den *richtigen Augenblicken* mit der *richtigen Energiemenge* aus der Quelle dem Pendel zuführt

Die entsprechende *Hemmung* entstand erst um 1270



## Rückkopplung

Allgemein kann jede Wirkung (Output) wieder zur Ursache (Input) gemacht werden  
Es ist unklar, wann Rückkopplung (Rückführung, englisch feed back) erstmalig benutzt oder verstanden wurde  
Für die Elektronik sind historisch bedeutsam:

- 1913 EDWIN HOWARD ARMSTRONG (1890 - 1954) Rückkopplungsschaltung mit Triode  $\Rightarrow$  *Audion und Oszillator* = Empfänger- bzw. Senderschaltung  
u.a. auch ALEXANDER MEIBNER (1883 – 1958), LEE DE FOREST (1873 – 1961), WILHELM SCHLOEMILCH
- 1919 WILLIAM HENRY ECCLES (1903 - 1997) und F. W. JORDAN erfinden bistabile Kippschaltung = *Flipflop* = digitale Rückkopplung, heute Fundament vieler elektronischen Speicher
- 1927 HAROLD STEPHEN BLACK (Telefoningenieur) *verbessert Qualität* eines Signalverstärkers, indem er eine *Gegenkopplung* einführt

### Allgemeiner

- 1921 W. C. BRAY entdeckt periodisch *oszillierende chemische Reaktionen*
- 1925 ALFRED LOTKA: „The Elements of Physical Biology“ = *Räuber-Beute-Verhalten* s.u.
- 1927 VON DER POL entdeckt am Röhrenoszillator *chaotische Schwingungen*
- 1940 NORBERT WIENER (1894 - 1964) bemerkt bei seinen Forschungsarbeiten über Flugabwehrmethoden im 2. Weltkrieg, dass *Rückkopplung fundamental für die Automatisierung* ist.

## Varianten der Rückkopplung

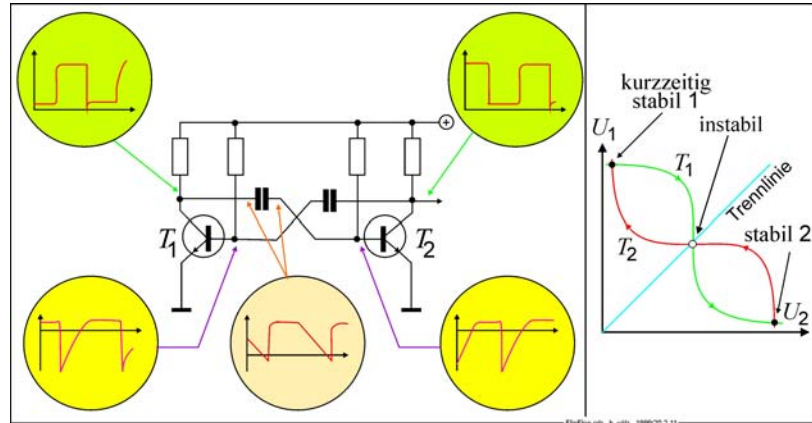
Set langem ist die Rückkopplung ein fundamentales Prinzip in drei unterschiedlichen Varianten

- **Mitkopplung** führt den Output *phasenrichtig* als Input zurück  
Das *erhöht* die *Verstärkung*, ermöglicht *Schwingungserzeugung* sowie *Automaten*, die etwas von selbst tun  
Auch sehr kleine bzw. große *Innenwiderstände* (ideale Spannungs- bzw. Stromquellen) sind erzeugbar
- **Gegenkopplung** führt den Output *gegenphasig* als Input zurück  
Das *senkt* die *Verstärkung* und wirkt meist *stabilisierend* auf alle Systemeigenschaften  
Insbesondere erfolgt dabei eine *Linearisierung von Kennlinien*, senkt die Verzerrungen  
Es erfolgt auch eine *Linearisierung des Frequenzganges* = größere Bandbreite
- **Blindkopplung** führt den Output *mit Phasenverschiebung*  $\varphi \neq 0$  bzw.  $\varphi \neq 180^\circ$  als Input zurück  
So lassen sich u.a. *steuerbare Blindwiderstände* (Kapazitäten, Induktivitäten) erzeugen

Auch *Kombinationen* der Varianten sind möglich, u.a. ermöglichen sie *Innenwiderstände  $\leq 0$* , s. o.

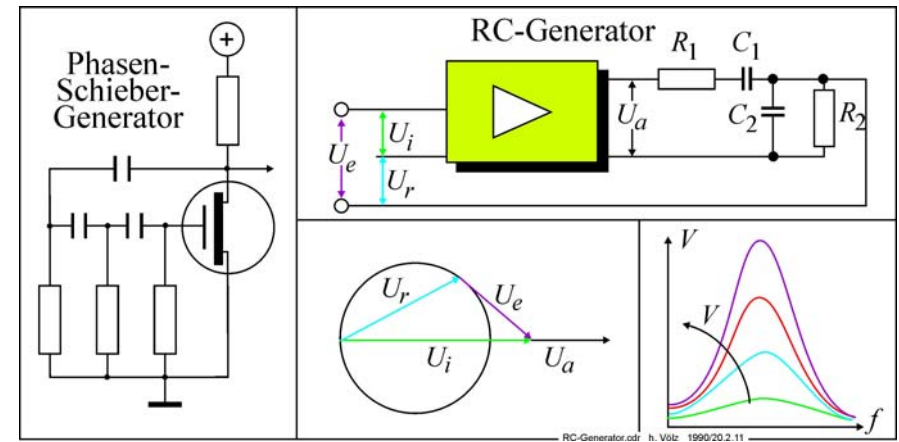
## Multivibrator

Auch *ohne* ein Element mit **Resonanz** kann Rückkopplung zur **Erzeugung von Schwingungen** führen  
 Ein dafür typisches Beispiel ist der Multivibrator (deutsch  $\approx$ Vielfachschwinger) = FlipFlop  
 Er erzeugt eine **Rechteckschwingung**, die **viele Oberwellen** enthält  
 Seine Wirkungsweise ist **schwierig zu erklären**, beide Transistoren erzeugen **zwei gegenlaufende Kennlinien**



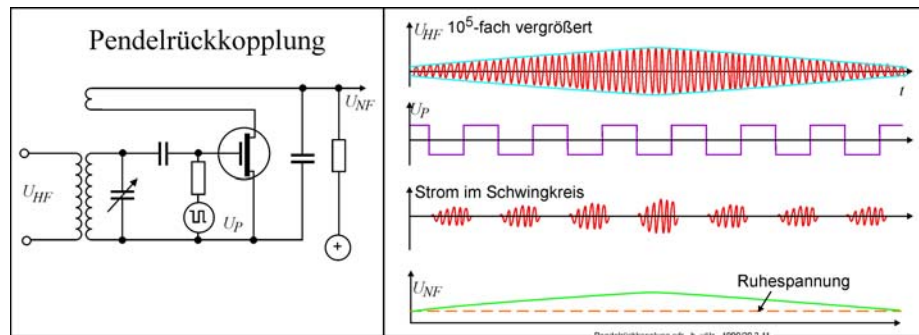
## RC- und Phasenschieber-Generatoren

erzeugen **Sinusschwingungen ohne Resonanz-Anteile**, z.T. wurden „virtuelle“ Induktivitäten angenommen  
 Durch **Rückkopplung** wird eine **hohe Selektivität erzeugt**, die zur **Resonanzüberhöhung** genutzt wird  
 So wird aus sehr schwachen **thermischen Rauschen** eine schwankende **Sinusschwingung  $f_0 \pm \Delta f$**



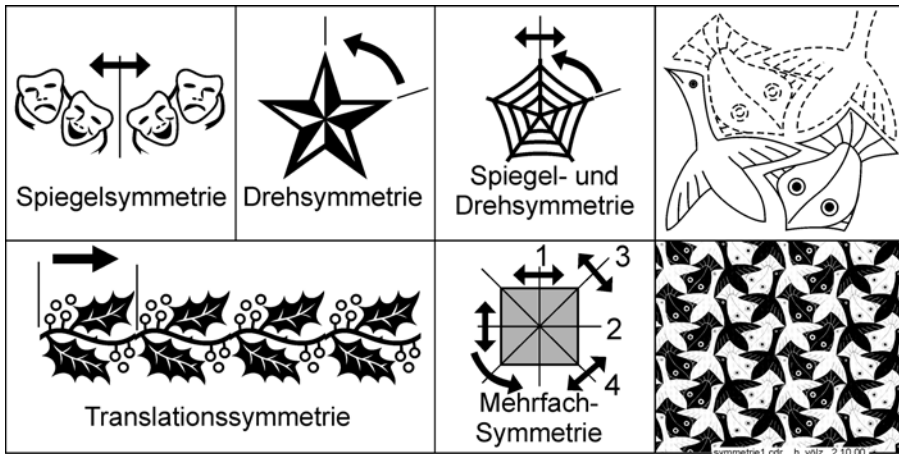
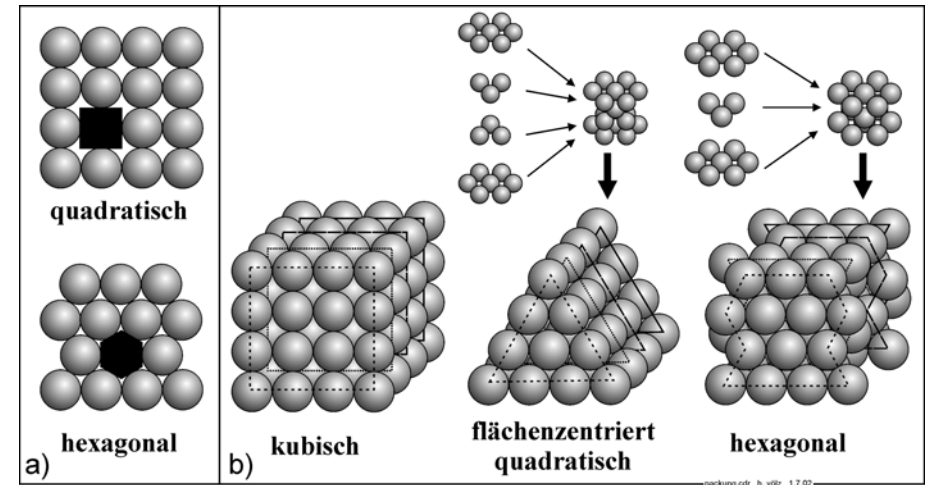
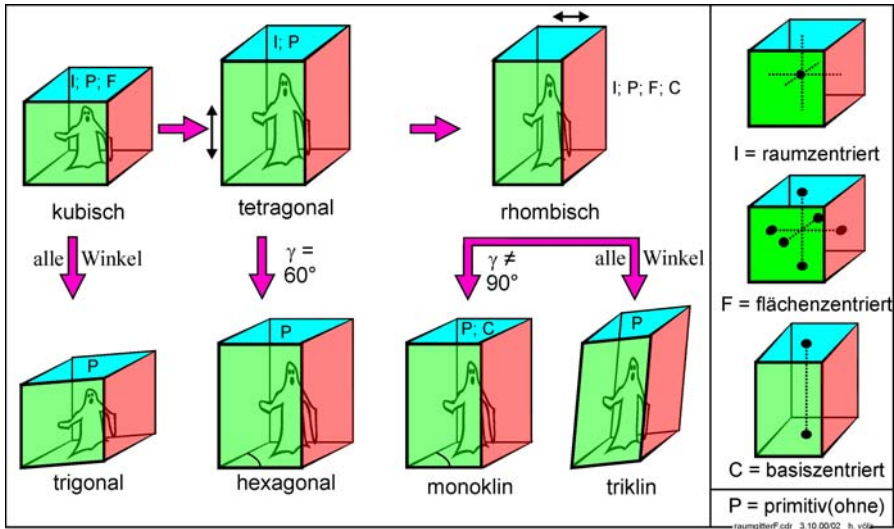
## Pendelrückkopplung

Eine schwache ankommende Schwingung wird mit **zeitbegrenztem exponentiellem Anstieg**  $>1000$ fach verstärkt  
 Ähnliches geschieht bei RC-, und Phasenschieber-Generator, doch mit Amplituden- statt Zeitbegrenzung



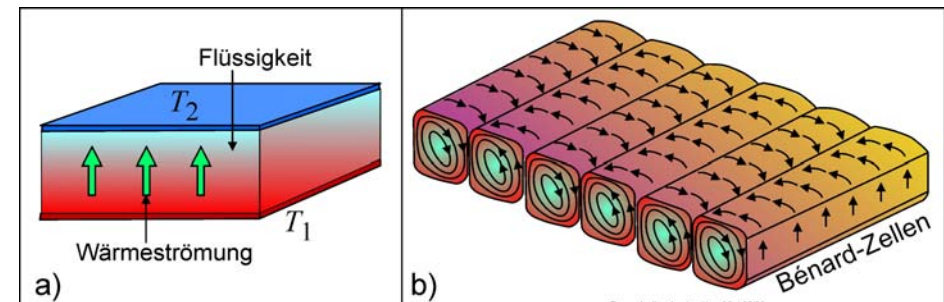
## Festkörper als „Schwingungen“ im Raum

**Atome bzw. Moleküle** können sich zu Festkörpern zusammenfügen  
 Dabei kann eine Vielzahl von **Kristallstrukturen** entstehen  
 Hierzu gehören unterschiedliche **Elementarzellen**  
 Zwischen ihnen bilden sich **optimale richtungsabhängige Abstände** aus  
 Sonderfälle sind besonders **dichte Packungen**, z. B. kugeldicht  
 Ferner sind bei Festkörpern, aber nicht nur bei diesen, einige **Symmetrien** bedeutsam



### Weitere räumliche Strukturen

Sie gibt es nicht nur bzgl. Kristallen, sondern generell *in großer Vielfalt*  
 Ein typisches Beispiel ist die HENRY BÉRNARD-Zelle, die beim *Wärmetransport* durch eine Flüssigkeit entsteht  
 Und zwar dann, wenn die thermodynamisch molekulare Bewegung nicht mehr genügt (gefunden 1900)  
 Dabei *rotieren kleine Gebiete* der Flüssigkeit abwechselnd links und rechts herum  
 Die charakteristische Länge einer *Zelle* liegt meist im Millimeterbereich  
 Das ist ein Millionenfaches der mittleren *Reichweite* der intermolekularen Kräfte von etwa  $10^{-10}$  m  
 Eine einzige Zelle enthält daher  $\approx 10^{21}$  Moleküle. Zur ihrer Ausbildung ist also *Emergenz* erforderlich



## Wellen

**Schwingungen** breiten sich im **Raum als Wellen** aus, für elektromagnetische Transversalwellen gilt dann

$$\frac{d^2 E}{dt^2} = \frac{1}{\epsilon_0 \mu_0} \nabla E \quad \text{und} \quad \frac{d^2 H}{dt^2} = \frac{1}{\epsilon_0 \mu_0} \nabla H$$

Hierin bedeuten  $E$  und  $H$  die elektrische bzw. magnetische Feldstärke und  $t$  die Zeit  
 $\nabla$  (sprich nabla) ist der Operator der zweifach partiellen Ableitung nach den Raum-Koordinaten  
 Bei der Wellen-Ausbreitung entstehen **Periodizitäten im Raum**, die sich allerdings **fortbewegen**

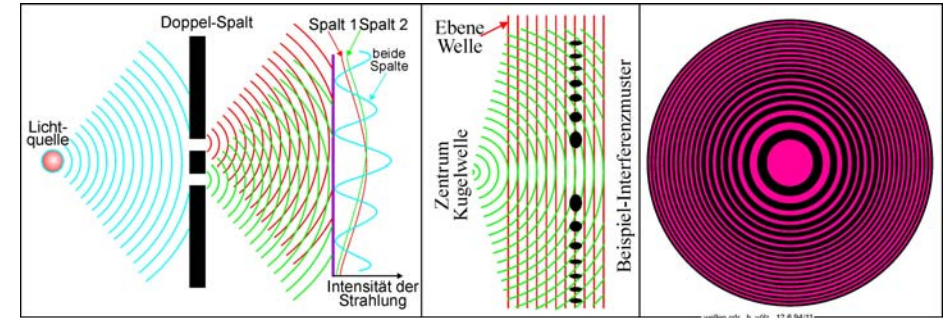
U.a. können durch **Interferenz** auch **räumlich feststehende** Periodizitäten entstehen  
 Typisch dafür sind der **Doppelspaltversuch** und Anwendungen der **Holografie**

**Materiewellen** verhalten sich anders, sie existieren nur indirekt für bewegte Teilchen  
 Für sie gilt die SCHRÖDINGER-Wellengleichung (ERWIN SCHRÖDINGER 1887 - 1961)

$$\nabla \psi = (E - U) \cdot \psi \cdot \frac{2 \cdot m}{h^2}$$

Darin sind  $E$  die Gesamt- und  $U$  die potentielle Energie,  $m$  die Masse und  $h$  die PLANCK-Konstante  
 Die Wellenfunktion  $\psi$  entspricht **nur indirekt einem Ort**  
 vielmehr der **Aufenthaltswahrscheinlichkeit**  $W$  des Teilchens im Volumen  $V$  gemäß

$$dW = |\psi|^2 \cdot dV$$



## Strukturen durch Wiederholung

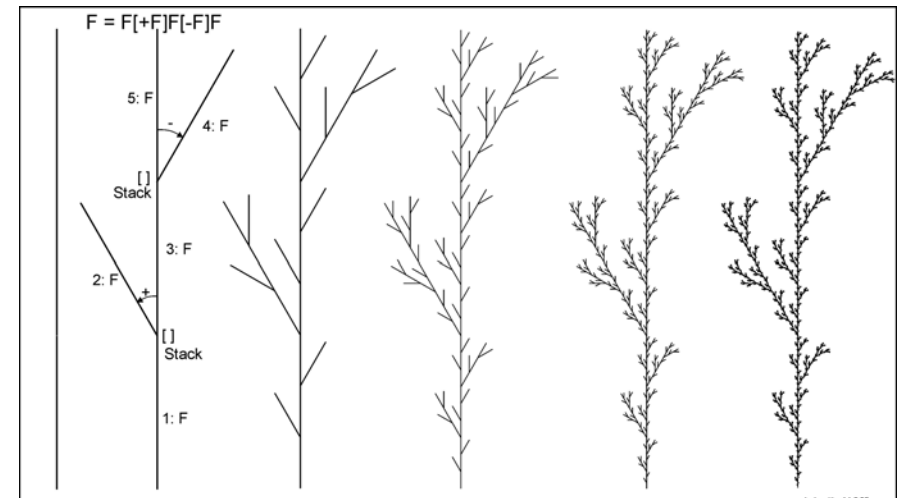
treten vor allem in der Natur auf

Hängen dort offensichtlich mit Rekursion zusammen, es besteht Analogie zu Fraktalen

Wichtig sind L-Systeme von 1968 (ARISTID LINDENMAYER 1925 - 1989) und „Kopierverfahren“

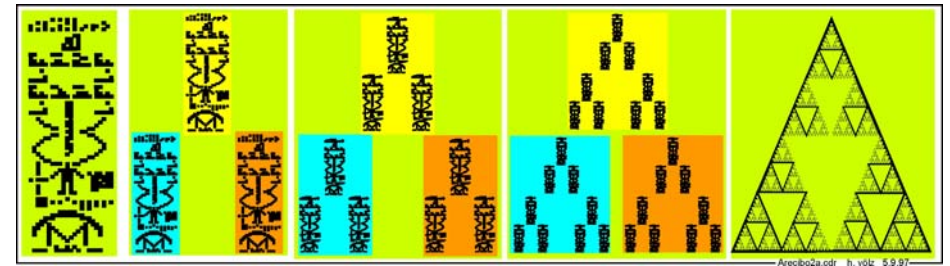
Es könnte daher gelten dass Vervielfältigung generell mit „Schwingungen“ zusammenhängt

Vielleicht besteht sogar Bezug zu Wiederholungen beim Lernen





Verstärker.doc H. Völz angelegt 27.1.11. aktuell 09.04.2011 Seite 157 von 174



Verstärker.doc H. Völz angelegt 27.1.11. aktuell 09.04.2011 Seite 158 von 174

## Soziale, gesellschaftliche Rhythmen

Auch hier existieren viele Beispiele

u.a. bzgl. Epidemien, Moden, Traditionen, Populationen, Angebot-Nachfrage

Bei Technik-Entwicklungen sind die 85%-Regel und die Hype-Kurve bedeutsam

Zwei einsichtige Beispiele sind **Räuber-Beute-Verhalten** und **KONDRATIEFF-Zyklen**

## Räuber-Beute-Verhalten

1925 schrieb ALFRED JAMES LOTKA (1880 - 1949) das Buch: „The Elements of Physical Biology“

Darin wurde das Räuber-Beute-Verhalten bezüglich zweier Tierarten behandelt

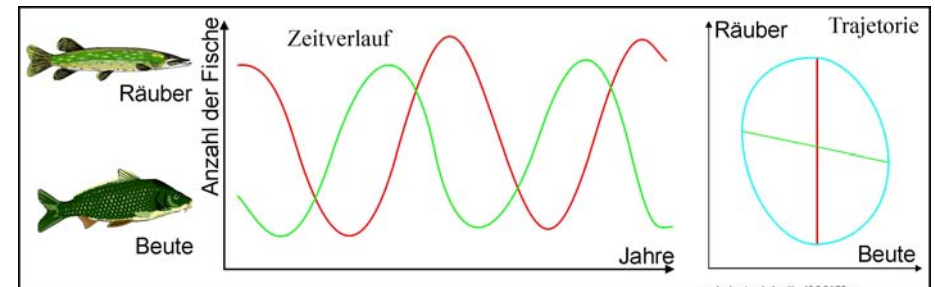
In einem Revier (Teich) leben **Hechte als Räuber und Forellen als Beute** für die Hechte

Bzgl. der Anzahl Forellen und Hechte tritt ein deutlich periodischer Verlauf auf

**Viele Forellen**  $\Rightarrow$  **Hechte** haben gute Nahrungsquelle; ihre Anzahl nimmt **schnell zu**

**Forellenbestand** drastisch **reduziert**  $\Rightarrow$  vielen Hechte haben **nicht** mehr **ausreichende Nahrung**

Anzahl Hechte nimmt ab = **weniger Feinde**  $\Rightarrow$  Anzahl **Forellen** **nimmt zu** usw.



Verstärker.doc H. Völz angelegt 27.1.11. aktuell 09.04.2011 Seite 159 von 174

Verstärker.doc H. Völz angelegt 27.1.11. aktuell 09.04.2011 Seite 160 von 174



## Kondratieff-Zyklen

Ein wichtiges Beispiel wurde 1926 von NIKOLAI DMITRIJEWITSCH KONDRATIEFF (1892 - 1938) publiziert. Er fand, dass es große Wirtschaftszyklen in Wellen von 40 bis 50 Jahren ablaufen.

Sie beginnen mit **Basisinnovationen**, führen über **Wohlstandszuwachs** und **Konsolidierung** zur **Stagnation**. Damals stellte er nur 3 solche Zyklen fest, heute werden mindestens 4 bis 6 (letzter vermutlich) angenommen. Z. Z. gilt Zyklus 4, sein Maximum ist aber bereits überschritten. Zuweilen wird auch für England ein 0. Zyklus als Vorläufer behauptet.

Zyklus	Zeitraum	Basis-Innovationen	Bedürfnisse
1.	1780 - 1849	Dampfmaschine, Textilindustrie	Bekleidung
2.	1849 - 1890	Eisenbahn, Stahl	Transport
3.	1890 - 1940	Elektrotechnik, Maschinenbau, Chemie	Massenkonsum
4.	1940 - 1980	Automobil, IC, Kernenergie	Individuelle Mobilität
5.	1980 bis ?	Informations- und Kommunikationstechnik	Globalisierung, Kommunikation
6.	20?? bis ?	Biotechnologie, Ökologie	Ganzheitliche Gesundheit

## Zusammenfassung zu Schwingungen

Auch bei der Schwingungserzeugung treten *vielen unterschiedlichen Effekte* auf

- **Periodischer Energieaustausch**, z. B. Pendel, Feder-Masse, elektrischer Schwingkreis  
    *≈ Schwingfähige Gebilde* mit genau definierter Energie-Zufuhr wegen Verluste
- Achtung!: Dämpfung und Synchronisation
- **Quantentheorie**:  $\Delta E = h \cdot \nu$ , (wie funktioniert die Umwandlung?)
- **Rotierende Bewegungen**, u.a. Eigenrotation (Erde), Planeten, Galaxien-Rotation (Gleichgewicht Anziehung - Fliehkraft)
- **Chemische Oszillationen** (eigentliche Ursachen immer noch unklar)
- **Bio-Rhythmen** (was ist mit den Taktgebern, wie funktionieren sie)
- Es gibt auch **räumliche Periodizitäten**, z. B. Kristalle, Wellen, Biologie, Fraktale
- **Population**, z. B. Räuber-Beute-Zyklus
- **Gesellschaftliche, soziale Prozesse**, z. B. Hype-Kurve, 85%-Regel, Kondratieff-Zyklen

Es *fehlt* also auch hier eine **einheitliche Theorie**

## Zu fundamentalen Gesetzen

Sie fassen viele Erscheinungen unter einem Aspekt zusammen  
Es folgt nur wenige ausgewählte Beispiele

## JOHANNES KEPLER (1571 - 1630)

Betreffen Umlaufbahnen der Planeten um die Sonne

1. Die Planeten bewegen sich auf elliptischen Bahnen, in deren einem Brennpunkt die Sonne steht.
2. Ein von der Sonne zum Planeten gezogener „Fahrstrahl“ überstreicht in gleichen Zeiten gleich große Flächen
3. Die Quadrate der Umlaufzeiten zweier Planeten verhalten sich wie die dritten Potenzen der großen Bahnhälften

Es gibt Abweichungen, z. B. Kometen bewegen sich häufig auf Parabel-Bahnen

## Gravitation = Schwerkraft

Lateinisch *gravitas* Schwere

Bereits ab 1000 gab es in Indien Ansätze das Massen zum Erdmittelpunkt gezogen werden

GALILEO GALILEI (1564 - 1642) beschrieb **freien Fall** als gleichförmig beschleunigte Bewegung, die unabhängig von seiner Masse oder sonstigen Beschaffenheit ist

ROBERT HOOKE (1635 - 1703) erklärte 1670 die Wirkung der **Gravitation** mit Hilfe von „Gravitationstrichtern“

ISAAC NEWTON (1643 - 1727) mathematisch in seinen Principia beschrieben  
= erste physikalische Theorie, die sich in der Astronomie anwenden ließ.

zwei Massen  $m_1, m_2$  mit der Entfernung  $r$  ziehen sich mit der Kraft  $F$  an ( $G$  = Gravitationskonstante)

$$F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

Weitere Verallgemeinerung erfolgte 1905/1916 durch ALBERT EINSTEIN (1879 - 1955) mit **Relativitätstheorie**

Eine Folge daraus ist das Masse-Energie-Äquivalent:  $E = m \cdot c^2$

## Beispiele weiterer Natur-Gesetze

Gesetz der **Trägheit** Ohne äußeren Einfluss bleibt Bewegung erhalten

**OHM'sches Gesetz:** Strom und Spannung sind proportional. GEORG SIMON OHM (1789 - 1854)

**MAXWELL'sche Gleichungen** der Elektrodynamik, JAMES CLERK MAXWELL (1831 - 1879)

**Vakuum-Lichtgeschwindigkeit** ist unabhängig von Bewegung der Körper im Raum

**Hauptsätze der Thermodynamik**

Thermische **Zustandsgleichung** idealer Gase

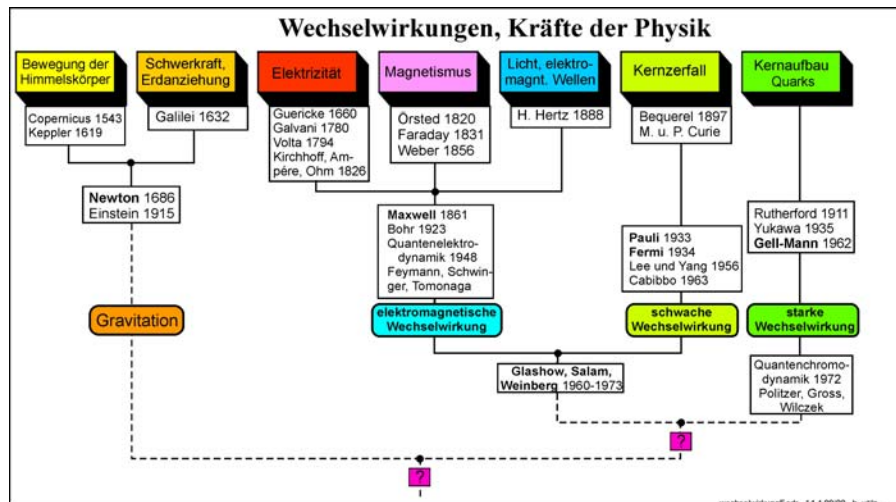
**Evolution** Durchsetzen des Fittesten

**Genetische Information** fließt von DNA nach RNA und nicht umgekehrt

### Achtung!

**Mathematische Gesetze** sind keine Naturgesetze

**Empirische Gesetze** erklären nichts, sondern funktionieren einfach erfahrungsgemäß und gut genug



## Abschließende Folgerungen

Schwingungen und Verstärkung (Auslösung) **treten in sehr umfangreicher Vielfalt** auf

Oft **hängen** sie ziemlich direkt miteinander **zusammen**

Ständig **erfahren wir sie so unmittelbar**, dass kaum das **Fehlen einer einheitlichen Grundlage** bemerkt wird

Beim **Verstärkern** scheint (ist) teilweise sogar das **Gesetz von Ursache und Wirkung, Energieerhaltung** verletzt

Teilweise sind auch die vorhandenen **Begriffsbildungen** ziemlich **unscharf**

Im Prinzip greift hier auch **nicht** die **kybernetische Erklärung** mittels der **Information und Steuerung**

Der **Informationsträger** ist zwar die **Ursache**, aber was im **System** abläuft ist **oft unerklärbar**

Es dürfte daher erforderlich, wünschenswert sein, eine neue „**Wirkungs**“-**Wissenschaft** zu etablieren

Was hierbei zu fordern wäre ist ein **fundamenteller Ausgangspunkt**, wie etwa Gravitation

Die durchgeführte Untersuchung zeigt, dass z. Z. hierfür **keine Voraussetzungen vorhanden** sind

Ferner ist zu fragen, ob das aufgezeigte Ziel überhaupt **möglich ist**

Auf alle Fälle wurde gezeigt, dass **der aktuelle Zustand** sehr **unbefriedigend ist**

## Literatur

Franck, U. F.: „Chemische Oszillationen“. Angewandte Chem., 90, S. 1 - 16, 1978  
Haruth, W. u. Claassen, M.: „Aktive Mikrowellendioden“. Springer Verlag, Berlin - Heidelberg - New York 1981  
Klages, L.: „Vom Wesen des Rhythmus“. Niels Kampmann Verlag, Kampen 1934  
Möller, H.: „Physik des Schaukelns und parametrische Verstärkung“, aus: „Wege in der Physikdidaktik“. Band 2. Verlag Palm & Enke, Erlangen 1991 von www.solstice.de, download am 2.2.11  
Völz, H.: „Das Mensch - Maschine - System“. Expert-Verlag, Renningen - Malsmheim 1999, + CD - ROM  
Völz, H.; Ackermann, P.: Die Welt in Zahlen und Skalen, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg - Berlin - Oxford, 1996  
Völz, H.: „Elektronik - Grundlagen - Prinzipien - Zusammenhänge“. 5. Aufl. Akademie Verlag, Berlin 1989  
Völz, H.: „Handbuch der Speicherung von Information“ Bd. 3 Geschichte und Zukunft elektronischer Medien. Shaker Verlag Aachen 2007  
Völz, H.: „Beitrag zum Verstärker mit extrem kleinem Innenwiderstand“. Frequenz 13 (1959) 7, 212 - 222  
Wiener, N.: „Cybernetics or control and communication in the animal and the machine“ Hermann, Paris 1948  
„Regelung und Nachrichtenübertragung in Lebewesen und in der Maschine“, Econ - Verlag, Düsseldorf - Wien 1963. Econ - Verlag, Düsseldorf - Wien - New York - Moskau, 1992

<http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Spezial:Suche&limit=20&offset=20&ns0=1&redirs=1&search=Fundamente+Gesetze> download 6.2.11

Für die **Zeitkurven** von Begriffen: downloads 2.-20.2.11  
<http://www.culturomics.org/home> und <http://ngrams.googlelabs.com/graph>

Verstärker.doc H. Völz angelegt 27.1.11. aktuell 09.04.2011 Seite 169 von 174

## Archimedes' Tod

Karel Čapek

Die Geschichte mit Archimedes trug sich ein wenig anders zu, als sie überliefert wird; zwar ist es wahr, daß er erschlagen wurde, als die Römer Syrakus eroberten, doch stimmt es nicht, daß ein römischer Soldat in sein Haus eingedrungen wäre, um zu plündern, und daß Archimedes, in die Zeichnung irgendeiner geometrischen Konstruktion vertieft, ihn ärgerlich angeknurrte hätte: "Störe meine Kreise nicht!" Erstens war Archimedes alles andere als ein zerstreuter Professor, der nicht wußte, was um ihn herum geschah - ganz im Gegenteil, er war von Natur aus ein rechter Soldat und hatte für die Verteidigung von Syrakus Kriegsgewehre erfunden; und zweitens war jener römische Soldat kein betrunkenen Marodeur, sondern der gebildete und ehrgeizige Stabshauptmann Lucius, der wußte, mit wem er die Ehre hatte, und der nicht erschien, um zu plündern, sondern auf der Schwelle salutierte und sagte: "Grüß dich, Archimedes."

Archimedes hob den Blick von der Wachstafel, auf der er wirklich etwas zeichnete, und sagte: "Was ist?"

„Archimedes“, hub Lucius an, "wir wissen, daß sich Syrakus ohne dein Kriegsgewehr keinen Monat gehalten hätte: so aber mußten wir uns zwei Jahre mit euch herumschlagen. Glaub mir, wir Soldaten können das einschätzen. Es sind hervorragende Geräte. Meine Anerkennung!"

Archimedes winkte ab. "Was ist das schon! Gewöhnliche Wurfmechanismen - nun, eben Spielzeug. Wissenschaftlich kaum von Wert."

"Aber militärisch!" wandte Lucius ein. "Höre, Archimedes, ich bin gekommen, um dir den Vorschlag zu machen, mit uns zusammenzuarbeiten."

"Mit wem?"

"Mit uns, den Römern. Du mußt doch einsehen, daß Karthago dem Zerfall entgegengeht. Wozu den Karthagern noch helfen! Mit denen fangen wir jetzt ein Tänzchen an, daß dir die Augen übergehen. Ihr solltet lieber zu uns halten, ihr alle."

"Warum?" brummte Archimedes. "Wir Syrakuser sind schließlich Griechen. Warum sollten wir zu euch halten?"

"Weil ihr auf Sizilien lebt, und wir brauchen Sizilien."

"Und wozu?"

"Um das Mittelmeer zu beherrschen."

"Aha", sagte Archimedes und blickte nachdenklich auf seine Tafel. "Und warum wollt ihr es beherrschen?"

"Wer Herr des Mittelmeers ist", sagte Lucius, "ist Herr der Welt. Das ist doch klar."

"Müßt ihr denn Herren der Welt sein?"

"Es ist die Mission Roms, Herr der Welt zu sein. Und ich sage dir, wir werden es sein."

"Mag sein", sagte Archimedes und wischte etwas von der Wachstafel ab. "Aber raten würde ich euch das nicht, Lucius. Höre, Herr der Welt zu sein, das bedeutet, daß euch die Verteidigung einmal ungeheure Anstrengungen kosten wird. Schade um die Arbeit, die ihr darauf verwenden müßt."

"Das ist gleich; aber wir werden ein großes Reich sein."

Verstärker.doc H. Völz angelegt 27.1.11. aktuell 09.04.2011 Seite 170 von 174

"Ein großes Reich", murmelte Archimedes vor sich hin. Ob ich einen kleinen oder einen großen Kreis zeichne, Kreis bleibt Kreis. Grenzen gibt es immer - ihr werdet niemals ohne Grenzen sein, Lucius. Glaubst du, ein großer Kreis ist vollkommener als ein kleiner? Glaubst du, du bist ein größerer Geometer, wenn du einen größeren Kreis zeichnest?"

"Ihr Griechen reitet dauernd auf Argumenten herum", wehrte Hauptmann Lucius ab. "Wir beweisen unsere Wahrheit auf andere Weise."

"Auf welche?"

"Durch die Tat. Wir haben zum Beispiel euer Syrakus erobert. Ergo gehört uns Syrakus. Ist der Beweis klar?"

"Das ist er", sagte Archimedes und kratzte sich mit seinem Griffel in den Haaren. "Allerdings, Syrakus habt ihr erobert -, aber das Syrakus von einst ist es nicht mehr und wird es nie mehr sein. Das war eine große und ruhmreiche Stadt; nun wird es niemals mehr groß sein. Schade um Syrakus!"

"Dafür wird Rom groß sein. Rom muß die größte Macht im ganzen Erdkreis sein."

"Warum?"

„Um sich zu halten, je mächtiger wir sind, desto mehr Feinde haben wir. Deshalb müssen wir die Mächtigsten sein.“

"Jaja, mächtig", brummte Archimedes. "Ich verstehe ein wenig von Physik, Lucius, und ich will dir etwas sagen. Kraft wird gebunden."

„Was bedeutet das?"

"Es ist ein Gesetz, Lucius. Eine Kraft, die wirkt, wird gebunden. je größer ihr werdet, desto mehr von eurer Kraft verbraucht ihr dafür; und einmal kommt der Augenblick ..."

"Was wolltest du sagen?"

"Ach, nichts. Ich bin kein Prophet, Mann! Ich bin nur Physiker. Kraft wird gebunden. Mehr weiß ich nicht."

"Hör zu, Archimedes, willst du nicht doch mit uns arbeiten? Du hast keine Ahnung, welche Möglichkeiten sich dir in Rom eröffnen würden. Du könntest das beste Kriegsgewehr der Welt bauen."

"Du mußt entschuldigen, Lucius; ich bin ein alter Mann, und ich möchte noch einen oder zwei meiner Gedanken ausführen. Wie du siehst, zeichne ich hier gerade etwas."

„Archimedes, lockt es dich nicht, mit uns die Herrschaft über die Welt zu erobern? - Warum schweigst du?"

"Verzeih", brummte Archimedes über seiner Tafel. "Was sagtest du?"

"Daß ein Mensch wie du die Weltherrschaft erobern könnte."

"Hm, die Weltherrschaft", sagte Archimedes, in Gedanken vertieft. "Nimm es mir nicht übel, aber ich habe hier etwas Wichtigeres vor. Etwas Bleibendes, weißt du. Etwas, das wirklich Bestand hat."

"Und was ist das?"

"Gib acht, verwisch meine Kreise nicht! Das ist eine Methode, um die Fläche des Kreissektors zu berechnen."

Später wurde die Nachricht verbreitet, der gelehrte Archimedes sei durch einen Zufall ums Leben gekommen.

Verstärker.doc H. Völz angelegt 27.1.11. aktuell 09.04.2011 Seite 171 von 174

## Reste nur als nicht einbezogene Gedankenstützen

Rückkopplung hängt eng mit Iteration, Rekursion, fraktaler Geometrie, Dissipation, Eigenwerte usw. zusammen

Typisch ist:  $x = \sqrt[n]{\sqrt[n]{\sqrt[n]{x}}}$  für  $0 > x \rightarrow x = 1$

#####

**Kraft F** in Newton: Mal **Länge l**  $\Rightarrow E = \text{Arbeit} = \text{Energie} = \text{Wärmemenge}$  in J = W·s bzw. N·m; Mal **Zeit t**  $\Rightarrow \text{Leistung N}$ ; z. B. in W = V·A

#####

1656 Huygens erfindet Pendeluhr

1711 Stimmgabel erfunden von Shore

#####

**Geschichte**

1750 ca. JEAN JACQUES D'ORTOUS DE MAIRAN von täglichen Blattbewegungen der Mimose

1751 KARL VON LINNE entwarf den Blumentaktgeber

1759 JOHANN GOTTFRIED ZINN beschreibt circadianen Rhythmus der Gartenbohne

1825 JOHANN FRIEDRICH HERSCHEL entdeckt Periodische Oszillationen Eisen-Salpetersäure (1834 publiziert)

1828 Publikation oszillierender chemischer Prozesse durch GUSTAV THEODOR FECHNER [1]

1833 JOHN F. W. HERSCHEL entdeckt periodische Reaktionen beim Auflösen von Eisen in Salpetersäure [2]

1842 berichtet CHRISTIAN FRIEDRICH SCHÖNBEIN und 1844 von JAMES PIESCOTT JOULE über oszillierende Reaktionen

1899 WILHELM OSTWALD experimentelle Untersuchung KORROSIONOSZILLATIONEN an Chrom in Salzsäure, Eisen in Salpetersäure

1910 ALFRED JAMES LOTKA theoretisch periodische Reaktionen.[4] Populationsdynamik (Lotka-Volterra-Regeln, Räuber - Beute, „Schweinezyklus“)

1921 WILLIAM C. BRAY erste oszillierende Reaktion in einem homogenen Medium [3]; Zersetzung Wasserstoffperoxid durch Iodat

1950 BORIS PAWLOWITSCH BELOUSSOW entdeckt Belousov-Zhabotinsky-Reaktion zufällig

1959 BORIS PAWLOWITSCH BELOUSSOW [5] auch mathematische Modellierung

1964 ANATOL ZHABOTINSKY auch bei homogene Reaktionen [6]

1970 KONOPKA stellt bei der Taufleige Drosophila melanogaster circadiane Schlafrhythmen fest.

1972 RICHARD J. FIELD, ENDRE KÖRÖS, RICHARD M. NOYES [7] (FKN-Mechanismus) Modellierung Belousov-Zhabotinsky-Reaktion

1977 ILYA PRIGOGINE: Nobelpreis bzgl. Thermodynamik, vom Gleichgewicht entfernte Systeme (sog. dissipative Strukturen)

#####

1. M. G. Th. Fechner: Über Umkehrungen der Polarität in der einfachen Kette. In: Schweiggers Journal für Chemie und Physik 53, S. 129–151, 1828

2. J. F. W. Herschel: Note sur la manière d'agir de l'Acide nitrique sur le Fer. In: Annales de chimie et de physique. 54, S. 87–94, 1833

3. W. C. Bray: A Periodic Reaction in Homogeneous Solution and Its Relation to Catalysis. In: J. Am. Chem. Soc. 43, S. 1262–1267, 1921

4. A. J. Lotka: Contribution to the theory of periodic reactions. In: J. Phys. Chem. 14, S. 271–274, 1910

5. B. P. Belousov: Eine periodische Reaktion und ihr Mechanismus. In: L. Kuhnert, U. Niedersen (Hrsg.): Selbstorganisation chemischer Strukturen. Verlag Harri Klein, Frankfurt/Main 1981, S. 73–82, Original Russisch 1958/1959

6. A. M. Zhabotinsky: Der periodische Verlauf der Oxidation von Malonsäure in Lösung In: L. Kuhnert, U. Niedersen (Hrsg.): Selbstorganisation chemischer Strukturen. Verlag Harri Klein, Frankfurt/Main 1964, S. 83–89, russisches Original 1964

7. R. J. Field, E. Körös, R. M. Noyes: Oscillations in Chemical Systems II. Thorough Analysis of Temporal Oscillation in the Bromate-Cerium-Malonic Acid System. In: J. Am. Chem. Soc. 94, S. 8649–8664, 1972

I. P. Epstein, K. Kustin, P. De Kepper, M. Orban: Oszillierende chemische Reaktionen. In: Spektrum der Wissenschaft, S. 98–107, Mai 1983

Richard J. Field, Friedmann W. Schneider: Oszillierende chemische Reaktionen und nichtlineare Dynamik. In: Chemie in unserer Zeit. 1988, 22, 1, S. 17–29

U. F. Franck: Chemische Oszillationen. In: Angew. Chem., 90, S. 1–16, 1978

R. J. Field, F. W. Schneider: Oszillierende chemische Reaktionen und nichtlineare Dynamik. In: Chemie in unserer Zeit, 1/22, S. 17–29, 1988

J. Walker: Oszillierende chemische Reaktionen. In: Spektrum der Wissenschaft, S. 131–137, Mai 1980

#####

**Chronobiologie** überprüft periodische (zyklische) Phänomene in lebenden Organismen

Verstärker.doc H. Völz angelegt 27.1.11. aktuell 09.04.2011 Seite 172 von 174

Timing und Dauer bei **Tieren** (essend, schlafend, verbindend, hibernating, Migration, zelluläre Regeneration, etc.) und (b) in den Pflanzen: Blattbewegungen, photosynthetische Reaktionen, etc.

**Infradiane Rhythmen** (von lat. infra, unter, und dies, Tag) = saisonale Rhythmen, Jahreszyklus (Vogelzug, Winterschlaf, Mauer),

**semilunare Rhythmen**, Halb-Neumond = 14 Tage) (Ablaichen der Ahrenfische (Grünzyskus) bei Springflut am Strand)

**Circalunare** Rhythmen Mondzyklus ≈28,5 Tage (Palowurmwurm).

**Infradian Rhythmen**, langfristig, wie die jährlichen Migration, Geburten, Menschen Menstruation

**Circadiane Rhythmen** Lateinisch circa, bedeutet „um“ und Würfel, „Tag“, Wach-Schlaf-Zyklus, Blattbewegungen bei Pflanzen

**Circatidale Rhythmen**, 12,5 Stunden von Ebbe oder Flut

**Ultradian Rhythmen**, mehrmals täglich: Fresszyklen bei Feldmäusen, 90-minütige Schlafzyklus, Freisetzung von Hormonen der Hirnanhangdrüse.

drei Fragenkomplexe im Mittelpunkt.

1. Welche Art von biologischen Rhythmen gibt es, wie beeinflussen sie unterschiedlichste biologische Abläufe?
2. Ist der Rhythmus endogen? Wenn ja, wo ist der Rhythmus generierende Oszillator, der Schrittmacher lokalisiert und wie funktioniert dieser?
3. Welches sind exogene (äußere), rhythmische Faktoren, die so genannten Zeitgeber, und wie wirken sie auf die biologische Uhr?

#### Literatur

Peter Spork: Das Uhrwerk der Natur. Chronobiologie - Leben mit der Zeit. Rowohlt Taschenbuch Verlag, Reinbek 2004, ISBN 3-499-61665-3

Jürgen Zalley, B. Knab: Unsere Innere Uhr. Herder, Freiburg 2003

Arthur T. Winfree: Biologische Uhren. Zeitstrukturen des Lebendigen

G. Hildebrandt, M. Moser und M. Lehofer: Chronobiologie und Chronomedizin. Hippokrates Verlag, 1998

Björn Lemmer: Chronopharmakologie. Tagesrhythmen und Arzneimittelwirkung. Stuttgart 2004

Ludger Rensing, Ulf Meyer-Grahlé, Peter Ruoff: Biologische Uhren - Timing-Mechanismen in der Natur. Biologie in unserer Zeit 31(5), S. 305-311 (2001)

#### Frank: Angewandte Chemie 198

Es lässt sich jedoch zeigen, dass chemische Periodizität durch bestimmte Arten von Kopplungsvorgängen zwischen simultanen Reaktionen oder Transportprozessen verursacht wird. – Obwohl man die Erscheinung der Rhythmizität chemischer, insbesondere elektrochemischer Reaktionen seit langem kennt, ist sie erst in den letzten 20 Jahren Gegenstand intensiver experimenteller und theoretischer Forschung geworden. – Nicht mehr schwingende Systeme besitzen meistens noch Bistabilität, d. h. sie können in zwei stabilen Reaktionszuständen existieren, deren gegenseitige Umwandlung durch Störungen von außen („Retize“) auslösbar ist (Abb. 2a). Für die Beurteilung der Oszillationskinetik ist das Studium der nichtperiodischen Verhaltensweisen sehr wertvoll. Sie zeigen außerdem die nahe Verwandtschaft zu den erregungsphysiologischen Vorgängen der Nerven- und Muskelzellen, die bekanntlich selbst oszillatorisch reagieren können. – Die hier angedeuteten Phänomene entstehen durch kinetische Vorgänge, die den „normalen“ Systemen fehlen. Wie in Abschnitt 3.3 noch eingehend erläutert wird, sind es vor allem kinetische Kopplungen, die zwischen den wirksamen Reaktionen der oszillatorischen Systeme bestehen und verschiedene Formen „chemischer Rückkopplung“ („feedback“) hervorbringen. Wie bei mechanischen und elektrischen Systemen ist offenbar auch bei chemischen Systemen die Entstehung von Oszillationen die Folge von Rückkopplungsprozessen. Es wird deshalb vor allem zu untersuchen sein, wie chemische Rückkopplung überhaupt zustande kommen kann und wie sie beschaffen sein muss, damit sich Oszillationen bilden können. Zurzeit werden in vielen Laboratorien chemische Oszillationen in homogenen Systemen studiert. Trotz des fast unübersehbaren detaillierten Tatsachenmaterials und intensiver Bemühungen konnte bisher noch keine chemische Oszillation spekulationsfrei völlig aufgeklärt werden. Die Gründe hierfür sind folgende: – Periodische chemische Reaktionen treten nur in stark gekoppelten Mehrvariablen-Systemen auf. Diese sind bezüglich der treibenden Kräfte und der getriebenen Flüsse und Reaktionen extrem nichtlinear. – Die Oszillationen betreffen Zustandsänderungen fern vom Gleichgewicht, auf die die klassischen Theorien der Thermodynamik der Gleichgewichtszustände und der gleichgewichtnahen Nichtgleichgewichtszustände nicht mehr ohne weiteres anwendbar sind. – Oszillatorische chemische Systeme enthalten instabile Zustände, die die spontane, rhythmisch auftretende räumliche Ausbreitung von Zustandsänderungen bewirken, so daß dann keine homogenen Systeme im thermodynamischen Sinne mehr vorliegen. – Als **Bray** 1920 beobachtete, dass die Wasserstoffperoxidzersetzung in Gegenwart von Iodsaure und Iod periodisch abläuft, suchte man intensiv nach den für die Oszillationen verantwortlichen Grenzflächenstrukturen, die man in mikroskopischen Sauerstoffbläschen oder auch in Staubpartikeln zu finden glaubte. Inzwischen weiß man, nachdem weitere „homogene“, periodisch reagierende chemische Systeme gefunden wurden, dass für das Zustandekommen von Oszillationen strukturelle Heterogenität nicht erforderlich ist. – Die Phänomenologie der Oszillationssysteme zeigt, dass bestimmte thermodynamische und kinetische Voraussetzungen erfüllt sein müssen, damit periodisches Verhalten auftreten kann. Die wichtigsten seien hier noch einmal kurz zusammengefasst: – a) Oszillatorische Vorgänge betreffen zeitliche Zustandsänderungen, die sich weit vom thermodynamischen Gleichgewicht abspielen. Sie treten als zeitlich unbegrenztes Phänomen nur in thermodynamisch offenen, d. h. stofflich durchströmten Systemen auf. – b) Es sind mehrere kinetische Variablen am periodischen Vorgang beteiligt. Aus den in den Oszillogrammen erkennbaren Phasenverschiebungen folgt, dass die Variablen nicht direkt voneinander abhängen, sondern dass sie nur kinetisch miteinander gekoppelt sind, d. h. sie sind unabhängig voneinander vorgebar, beeinflussen sich jedoch gegenseitig in ihren Änderungsgeschwindigkeiten (Reaktionsgeschwindigkeiten). – c) Oszillatorische Systeme sind in ihren kinetischen Zusammenhängen nichtlinear, und sie enthalten autokatalytische und/oder autoinhibitorische Vorgänge. – Die Tatsache, dass chemische Oszillationen bisher immer nur durch Zufall gefunden und noch kein Oszillationssystem aus bekannten Reaktionen „synthetisiert“ worden ist, und dass von den bekannten Oszillationen noch keine völlig aufgeklärt werden konnte, zeigt die Schwierigkeiten, die bei der Formulierung von periodischen Reaktionen mit stöchiometrischen Reaktionsgleichungen bestehen. – Bei chemischen Reaktionen ist diese Vorstellung ungewohnt, da hier Strom- oder Wirkungskreise nicht so explizit zutage treten. Beim näheren Studium chemischer

Verstärker.doc H. Völz angelegt 27.1.11. aktuell 09.04.2011 Seite 173 von 174

und physikalisch-chemischer Oszillationen erkennt man jedoch, dass offenbar auch hier weitgehend analoge Verhältnisse vorliegen. – Es gibt viele Rückkopplungsmechanismen, die nicht auf die Eingangsgröße, sondern auf das Übertragungssystem selbst wirken. Das reaktionskinetische Analogon ist eine Reaktion, bei der das Reaktionsprodukt die Geschwindigkeitskonstante beeinflusst. In der chemischen Verfahrenstechnik treten chemische und elektrochemische Oszillationen gelegentlich auf, z. B. bei heterogen-katalytischen Oszillationen. Verfahrenstechnisch sind sie dort jedoch nicht signifikant im Sinne einer Verbesserung des Gesamtprozesses. Sie bedeuten hier mehr eine nicht gewünschte Komplikation. – Die Orientierung der Lebewesen in der Zeit, d. h. die explizite Erfassung der Zeitvariablen, die sich bereits in Einzellern nachweisen lässt, ist nur in Form rhythmischer chemischer Prozesse realisierbar; mit anderen Worten: die „biologische Uhr“ hat man sich aller Wahrscheinlichkeit nach als einen oszillatorischen chemischen Mechanismus vorzustellen. Solche Mechanismen sind im Bereich enzymatischer Vorgänge, wegen der vielseitigen systemischen Kopplungen im Stoffwechsel der lebenden Zelle, ohne weiteres möglich. Die Oszillationsfähigkeit der erregbaren Membranen des Nervensystems macht die Fortleitung und Verarbeitung der sich dort abspielenden schnellen Informationsvorgänge möglich.

**Eigenschwingungen** Beispiele: Atomkern ~ 10<sup>22</sup> Hz; gesamtes Atom ~ 10<sup>15</sup> Hz; Molekül ~ 10<sup>13</sup> Hz; Megamolekül (z. B. Peptide) ~ 10<sup>8</sup> - 10<sup>9</sup> Hz; Zelle ~ 1000 Hz; Zellverbände (schwingende Regelkreise) ~ 0,1 - 60 Hz; EEG ~ 1 - 60 Hz; Puls ~ 1 Hz; Atmung ~ 0,25 Hz; Gesamtorganismus ~ 10 Hz

#####

Nach der Entdeckung des **REM-Schlafs** durch Aserinski und Kleitman [Aserinski 1953] wurde die Frage gestellt, ob sich der Zirka-2-Stunden-Rhythmus des REM-Schlafzyklus auch am Tage nachweisen lässt. Das ist in der Tat gelungen. Kleitman [Kleitmann 1963] beschrieb den Basis-Ruhe-Aktivitätszyklus (Basic-Rest-Activity-Cycle = BRAC), der in der Folgezeit von zahlreichen Wissenschaftlern weiter erforscht wurde.

#####

#### Systeme fern vom Gleichgewicht mit zeitlichen und räumlichen Strukturen

3.) **Physikalische Systeme** Wirbelstrukturen in turbulenten Strömungen, Strukturen auf Flüssigkeitsoberflächen kurz unterhalb des Siedepunktes (Bénard-Strukturen)

4.) **Geologische und astronomische Systeme**: Wolkenformationen, Luft- und Wasserströmungen, Druck- Temperaturstrukturen, galaktische Nebel

1.) **Chemische Systeme** Belousov Shabotinsky-Reaktion, Bray-Reaktion, Zersetzung von Dithionit, Thermochemische, anisotherm Reaktionen in der Gasphase: Oxidation von Kohlenwasserstoffen,

Elektrochemische Oszillationen: Elektrodenreaktionen, Oszillationen an Membran-Systemen: Theorell-Oszillator

2.) **Biologische Systeme**: Oszillationen an Zellmembranen, Reizauslösung und Reizübertragung, Oszillierende Enzymreaktionen

5.) **Soziologische und wirtschaftliche Systeme**: Epidemien; Populationsoszillationen, Angebot-Nachfrage-Oszillationen

Verstärker.doc H. Völz angelegt 27.1.11. aktuell 09.04.2011 Seite 174 von 174