

Grundlagen der Elektronik für Medienwissenschaftler Teil 3

Aktive, kontinuierliche Vierpole

Seminar HU; WS 2012/13

Prof. Dr. Horst Völz

Diese Einführung benutzt hauptsächlich:

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

als PDF-Datei downloadbar: <https://dl.dropbox.com/u/67035524/Horst%20V%20C3%B6lz%20-%20Elektronik.pdf.zip>

Dieses Material wurde heruntergeladen von r-h-voelz.de

Für privaten Gebrauch ist es frei nutzbar.

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

Bei kommerzieller Nutzung ist eine Abstimmung mit mir erforderlich.

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

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

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

Zusammenfassung

Im Zentrum steht die Notwendigkeit von Verstärkern und Selektion. Begrenzend wirken sowohl unvermeidbare Störungen, wie thermisches und Quanten-Rauschen als auch reduzierbare Störungen, wie Fremdsignale, Netz- und Gewitterstörungen. Wichtig ist die selektive Filterung durch Resonanz. Sie kann mit dem Superheterodyn-Prinzip wesentlich verbessert werden. Außerdem sind auch Abschirmungen, Symmetrierungen und richtige Erdpunkte wichtig. Es folgt eine allgemeine Einführung in das Verstärker-Prinzip. Dann müssen vor allem Klein- und Großsignal-Verstärker unterschieden werden. Hierfür kommen heute hauptsächlich Halbleiterbauelemente zum Einsatz. Bei den Schaltungen ist die Gegen-, Rückkopplung besonders wichtig. Spezielle Eigenschaften besitzen die Differenz- und Operationsverstärker. Aus den Verstärkern leiten sich die Oszillatoren ab. Als Besonderheiten werden noch behandelt: Spannungs- und Stromstabilisation, sowie parametrischer Verstärker und Laser als Verstärker.

Gliederung

1. Signal-Störungen

2. Verstärkung allgemein

3. Röhren

4. Halbleiter

5. Schaltungen

6. Schwingungserzeuger

7. Leistungsverstärker

8. Ergänzungen

Drei Aspekte

Aus den folgenden drei Aspekten leiten sich notwendige *Verstärker* und besondere *Signalbehandlungen* ab. Diese Inhalte lassen sich oft kaum trennen und müssen daher zumindest teilweise gemeinsam behandelt werden.

1. Zu kleine Signale

Die meisten *Eingangs-, Ursprungssignale* sind *sehr klein*, z. B. von Mikrofonen (μV), Antennen (nV), Sensoren. Außerdem treten immer *Verluste bei der Übertragung* auf.

Mit der Entfernung r nehmen sie zu, sind *proportional* $a \cdot r$ (Leitungen), $a \cdot r^2$ (Oberflächen) oder $a \cdot r^3$ (räumlich). Durch *Bündelung* (Richtantennen, Schalltrichter usw.) kann nur der Faktor a gesenkt werden.

2. Störungen sind allen Signalen überlagert. Es gibt zwei Varianten:

a). *Unvermeidbare Störungen*, z. B. thermisches und quantenphysikalisches (Eigen-) Rauschen (inneres Rauschen).

b). *Fremdsignale* (äußeres Rauschen) z. B. Netzstörungen, von Motoren, Zündkerzen, Gewitter und aus dem All.

U. a. werden sie durch *Frequenz-Selektion (Filter), Abschirmung, Symmetrie, richtige Erdpunkte reduziert*

Die Frequenzselektion erfolgt durch *Resonanz* und wird deutlich mit dem *Superheterodyn-Prinzip* verbessert.

Brummstörungen, Einstreuungen usw. sind mittels *Trenntrafo, optischer Kopplung* usw. weitgehend vermeidbar.

Wichtig sind auch *richtige Erdpunkte* um Erdschleifen zu vermeiden, Abschirmung, Kompensation usw. (s. u.).

Insbesondere bei digitalen Signalen kommen auch adaptive Systeme und Fehlerkorrektur zur Anwendung.

3. Oft werden große, leistungsstarke Signale benötigt

Insbesondere für den Betrieb von Lautsprechern, Motoren, Sendeantennen, digitalen Schaltungen usw.

Teilweise sind so nur bestimmte *Wirkungen* in Systemen auszulösen.

Zur Geschichte des elektronischen Rauschens

Rauschen geht auf das Mittelhochdeutsche zurück und betrifft ein gleichmäßiges, anhaltendes dumpfes Geräusch u. a. Rauschen von Blättern im Wind und bei Regen.

Elektrisches Rauschen ist betrifft messbare unregelmäßige Stromschwankungen.

Es ist in gewissen Umfang immer vorhanden und dann unvermeidbar.

Es wurde erstmalig **1918** durch WALTER SCHOTTKY (1886 - 1976) beschrieben.

In der Arbeit wird auch das **Schrot-Rauschen** als Folge der statistisch auftreffenden Elektronen erklärt.

Etwa 10 Jahre später hat JOHN BERTRAND JOHNSON (1887–1970) die **thermische** Ursache experimentell belegt

Er fand dabei auch das **Funkel-Rauschen** mit dem Frequenzgang $1/f$.

HARRY NYQUIST (1889 -1976) führte für das Rauschen die gemittelte (frequenzabhängige) Leistungsdichte ein.

Inzwischen sind viele **physikalischen Rauschphänomene**, entdeckt worden u. a.

das **Stromverteilungsrauschen** bei Röhren und das Rauschen bei Halbleitern.

Auch die **Quanteneffekte** erzeugen ein elektrisches Rauschen.

Viele physikalische Rauschphänomene sind auch heute noch Gegenstand intensiver Untersuchungen.

Rauschen als unvermeidbare Störung

Rauschen ist gekennzeichnet durch:

1. **Effektivwert** der Spannung, entspricht dem statischen Mittelwert, folgt aus der **Leistungsdichte**.
2. **Statistik** der Signale; infolge der Vielfalt der Einflüsse liegt oft GAUß-Verteilung vor.
3. **Frequenzgang**, vielfach frequenzunabhängig bis zu einer oberen Grenzfrequenz (weißes Rauschen), bei einigen Rauschquellen tritt auch „farbiges“ Rauschen auf, z. B. das zu tiefen Frequenzen ansteigende, z. B. $1/f$ -, Funkel-, Stromverteilungs- (Röhren) und Generations-Rekombinations-Rauschen (Halbleiter) bzw. das $1/f^2$ -Rauschen.

Das **thermische Widerstandsrauschen** entsteht durch die statistische Bewegung der Ladungsträger (Elektronen). Es ist vorwiegend „weiß“. Mit der benutzten Bandbreite B , der absoluten Temperatur T , der Boltzmann-Konstante $k \approx 1,38 \cdot 10^{-23}$ Ws/grd gilt für die Rauschleistung

$$P_r = k \cdot T \cdot B.$$

Für die Rausch-Spannung muss der Arbeitswiderstand R berücksichtigt werden:

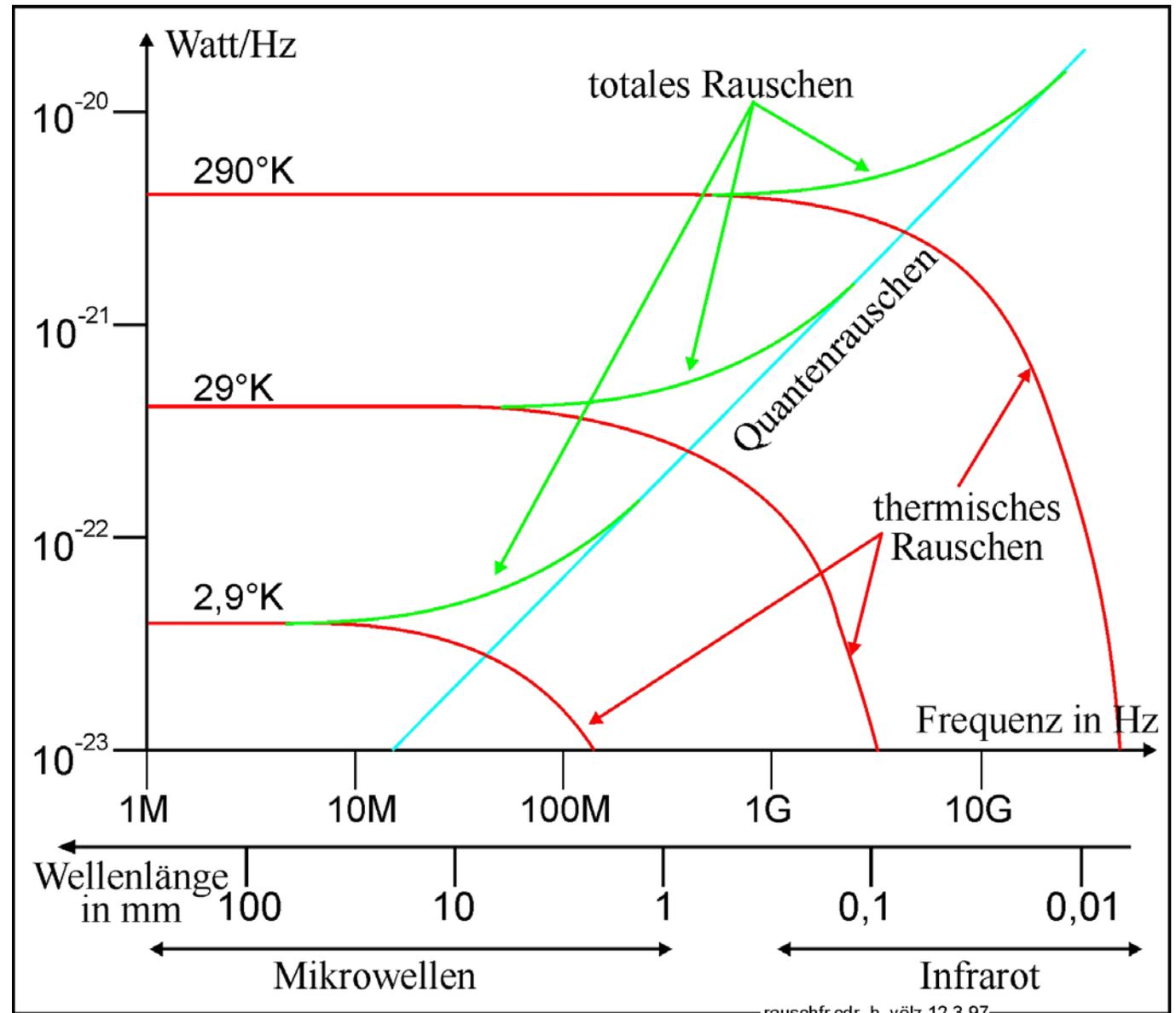
$$\bar{U}_r = \sqrt{P_r \cdot R} = \sqrt{k \cdot T \cdot B \cdot R}.$$

Das **Quantenrauschen** entsteht durch das statistische Auftreten von (Quanten-) Teilchen, z. B. Photonen. Es ist unabhängig von der Temperatur, aber proportional zu deren Frequenz ν , daher folgt

$$E = h \cdot \nu.$$

Erwähnt seien noch das Rauschen von **Kontaktstellen** zwischen Leitern und/oder Halbleitern sowie das **BARKHAUSEN-Rauschen** infolge des spontanen Umklappens magnetischer Bezirke.

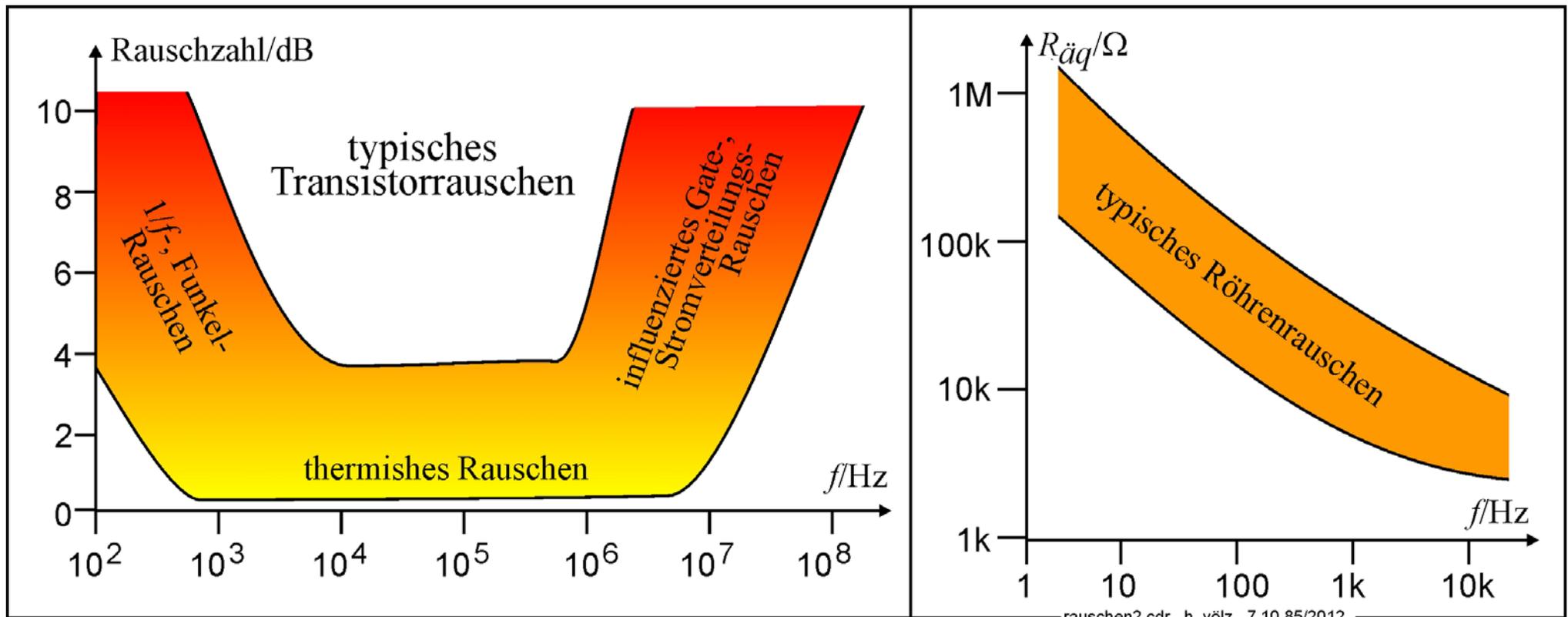
Bei Zimmertemperatur $T \approx 290 \text{ K}$ überwiegt die Rauchleistungsdichte des Quantenrauschens die des thermischen Rauschens erst oberhalb von etwa 1 GHz



Zwei typische Beispiele für Transistoren und Röhren

Die **Rauschzahl** gibt an um wie viel das Transistorrauschen über dem thermischen Grundrauschen liegt.

Der **äquivalente Rauschwiderstand** $R_{\ddot{a}q}/\Omega$ ist eine Umrechnung des Rauschens auf den Eingang des Verstärkers.



Externe Störungen

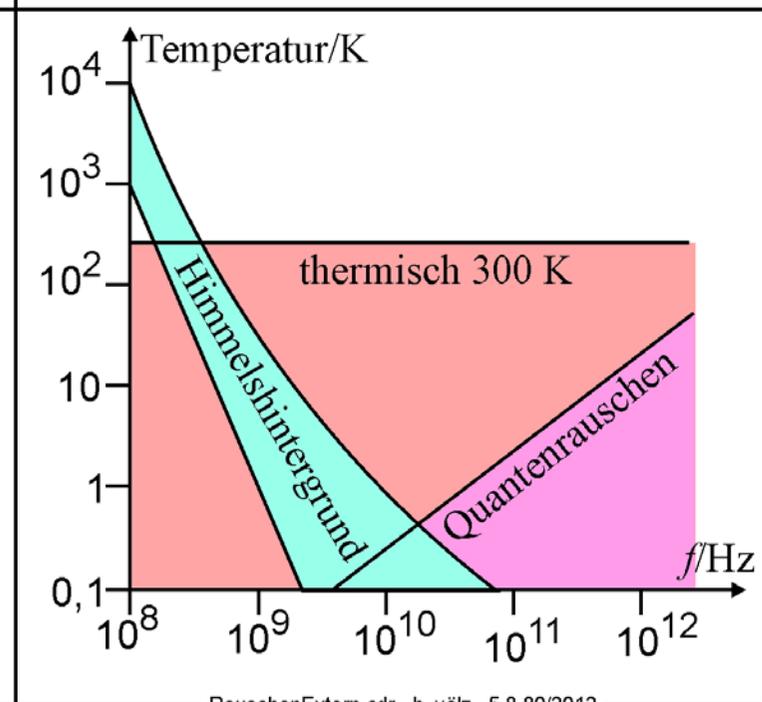
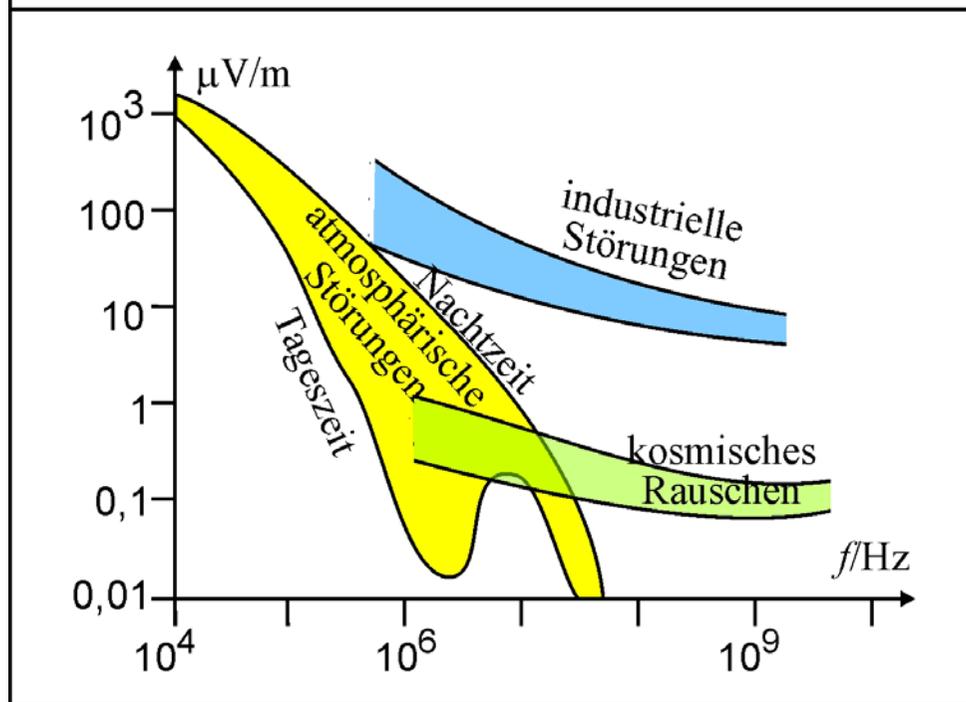
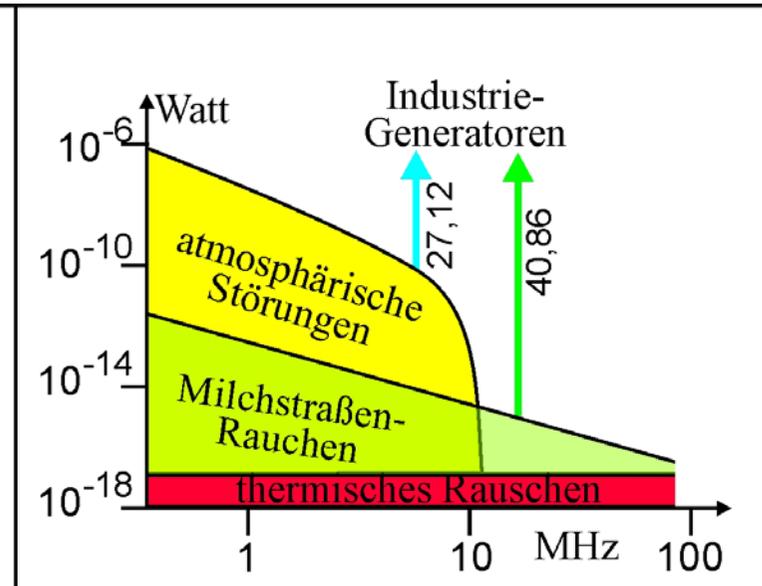
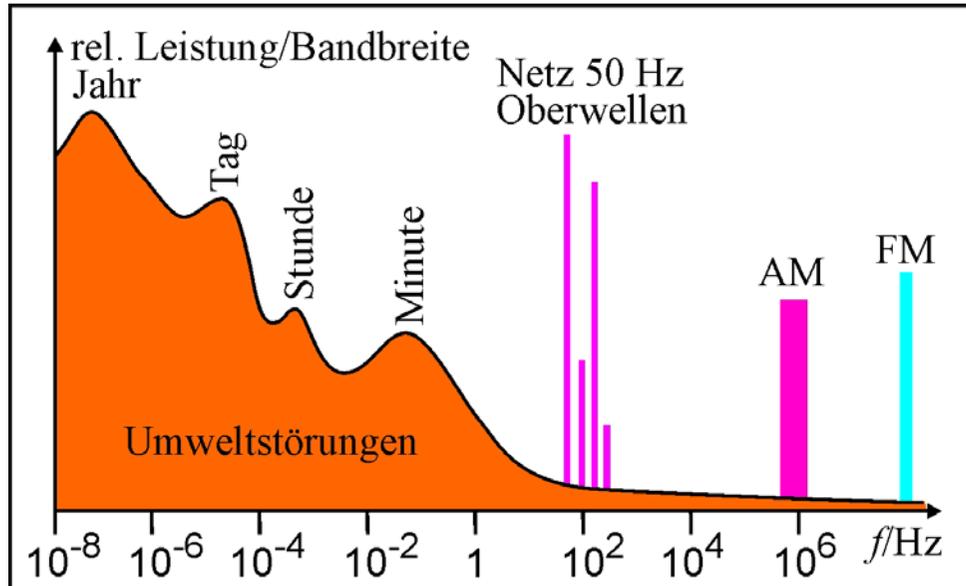
Es gibt eine Vielzahl externer Signalstörungen

- **Außerirdisch:** kosmisches Rauschen der Rest- bzw. Hintergrundstrahlung (**Überbleibsel** des Urknalls). Hinzu kommen Strahlungsausbrüche der Sonne und Fixsterne des Milchstraßensystems, nehmen mit $\approx 1/f^3$ ab.
- **Terrestrischen** Ursprungs sind insbesondere das **atmosphärisches Wärmerauschen und Blitzentladungen**.
- **Technisch** verursacht: **unerwünschte** HF-Sender, Zündfunken, Bürstenfeuer von Maschinen und Schaltvorgänge.
- **Rückwirkungen** durch **Verkopplung** mit **anderen** (schaltungs-) Teilen des Empfangsystems, z. B: Erdschleifen.

Sie lassen sich durch angepasste Maßnahmen stark reduzieren. Die wichtigsten sind

- **Frequenzselektive Ausfilterung** der nur gewünschten Signale (s. u.).
- **Abschirmung** des Störers oder des Empfangssystems
- **Symmetrisierung, Kompensation** usw. durch definierte zusätzliche, gegenpolige Einkopplung der Störung
- Definierte **gemeinsame Erdpunkte** gegen störende Verkopplungen.

Vorlesung Elektronik an HU hierüber geschieht zufällig kurz nach der Errichtung der Mauer!

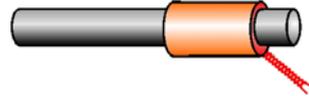


RauschenExtern.cdr h. vözl 5.8.80/2012

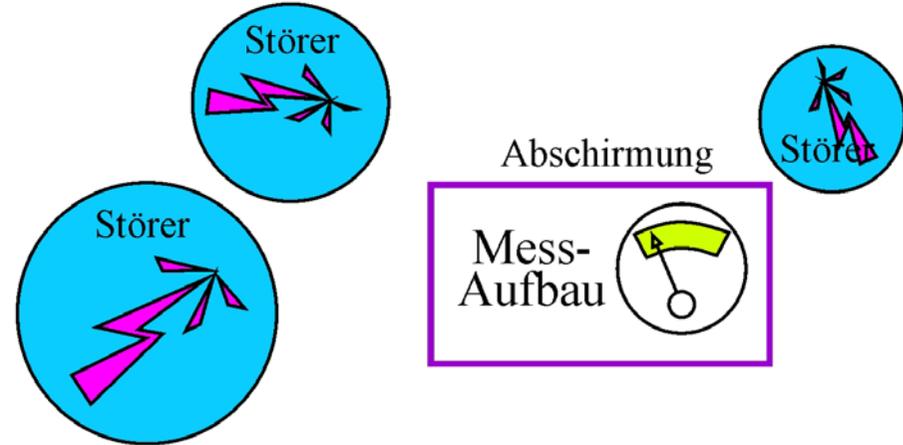
Abschirmung



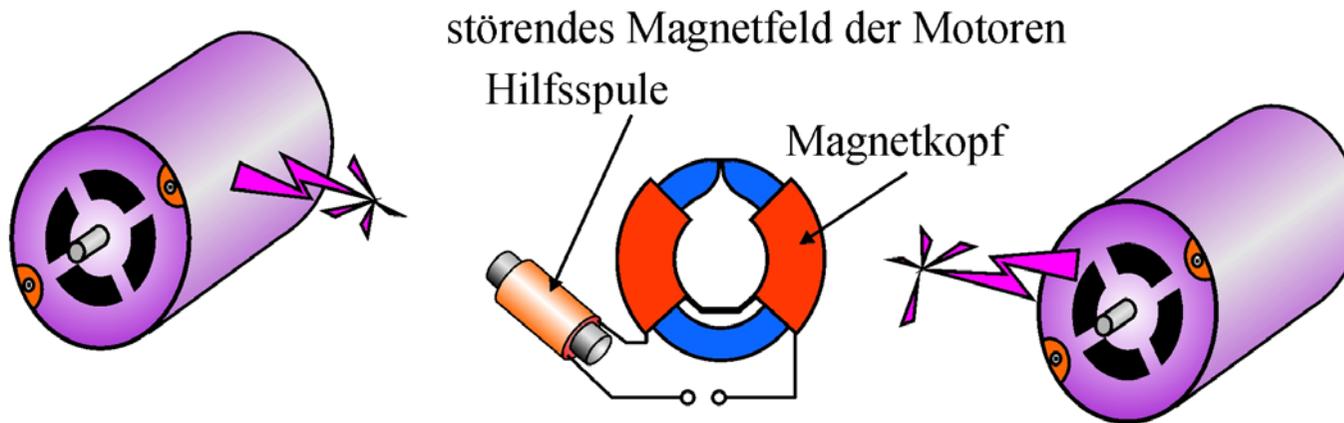
z. B. Ferrit-Antenne



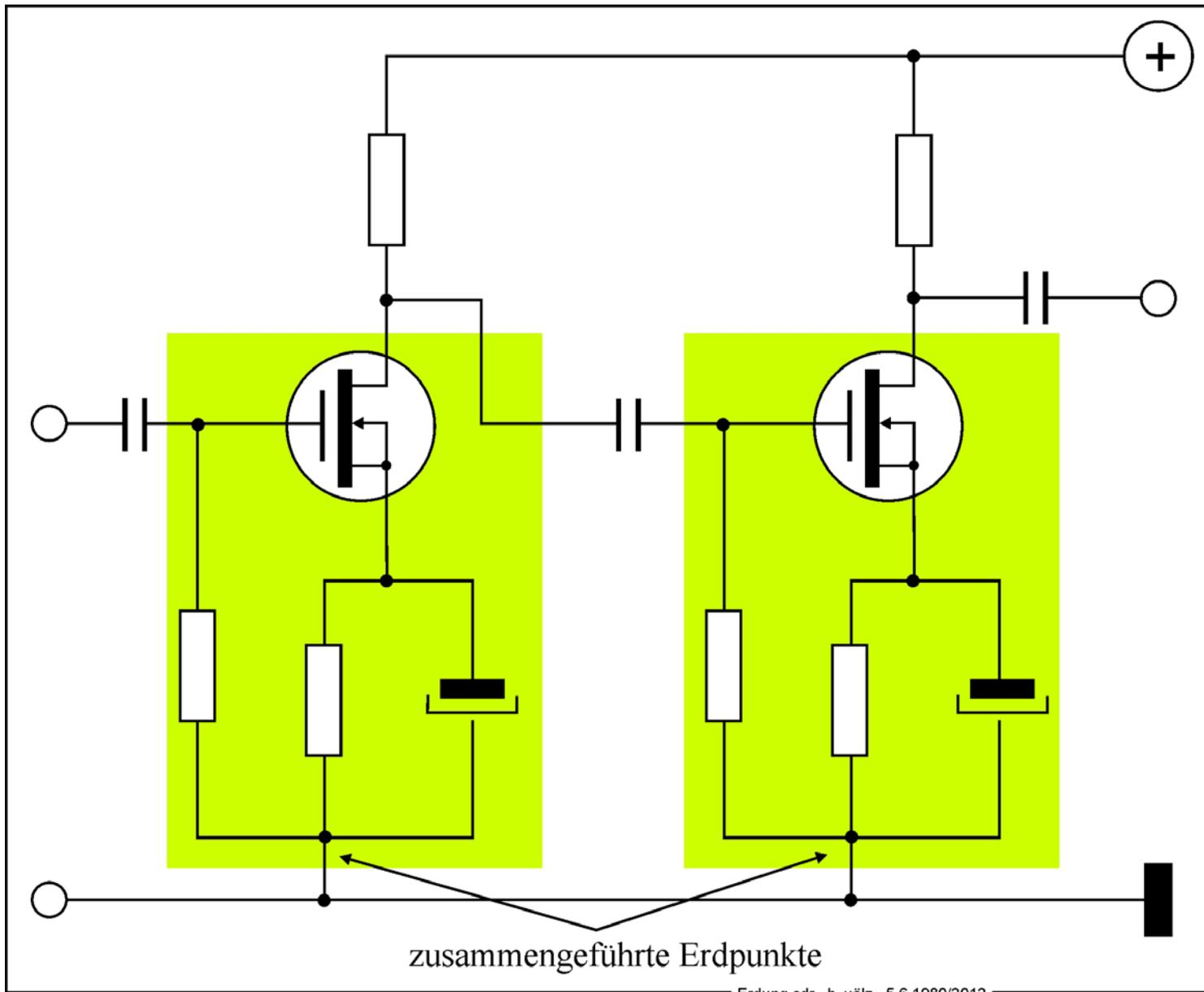
Abschirmung einer erreichbaren Störquelle



**Abschirmung des Empfängers
bei unerreichbaren oder vielen Störquellen**



Kompensation durch zusätzliche Spule



Filterung mittels Resonanz.

Viele Signale (z. B. HF-Sender) besitzen eine relativ geringe Bandbreite B . Dann können die störenden Signale anderer Frequenzen durch Schwingkreise geschwächt werden. Außerdem verstärkt die Resonanz von Schwingkreisen das gewünschte Signal. (s. Teil 2 Resonanzteiler) Entscheidend ist hierfür die (Schwingkreis-) Güte G . Bei einem Parallelschwingkreis aus R, C, L gilt

$$G = R\sqrt{\frac{L}{C}} \quad \text{und dem Wirkwiderstand} \quad \frac{1}{|R|} = \sqrt{1 + G^2 \left(\Omega - \frac{1}{\Omega} \right)^2}.$$

Mit einem Abfall auf $1/\sqrt{2} \approx 0,707$ gegenüber der Resonanzfrequenz f_0 gilt bei der für die nutzbare Bandbreite B

$$B = f_0/G.$$

Vor allem infolge der Spulenverluste beträgt die typische Güte etwa 100. Daraus ergeben sich folgende Bandbreiten:

Bereich	Langwelle	Mittelwelle	Kurzwelle	UKW	LOF Satellit	Satellit
Typische f_0	200 kHz	1 MHz	10 MHz	100 MHz	1 GHz	10 GHz
Nutzbare B	2 kHz	10 kHz	100 kHz	1 MHz	10 MHz	100 MHz

Sie entsprechen meist nicht den Forderungen der Technik.

Daher sind Bauelemente anderer Güte (z. B. Quarze) bzw. Filter aus mehreren Schwingkreisen erforderlich

Beispiele für typische Gütefaktoren

Bauelement	G
Aperiodischer Grenzfall	0,5
Elektrodynamischer Lautsprecher	0,2 - 1,2
Einfache RC-Schaltungen	1 - 3
Elektrischer Schwingkreis	100
BaTiO ₃	350
PZT	1000
Pendeluhr	10 ⁴
Schwingquarz 10 MHz	(3-10)·10 ⁵
Frequenzstabilisierter Laser	10 ⁹
Cäsium-Atomuhr	10 ¹²
Mößbauer-Effekt (γ -Strahlung)	10 ¹⁵

Bei $G = 0,5$ treten keine Schwingungen auf. Wirksame Resonanz tritt erst ab $G > 10$ auf.

Für die Filterung von Signalen sind nur Schwingkreise, Piezokeramik (BaTiO₃, PZT) und Quarze nutzbar.

Auf Oberflächenwellenbauelemente und digitale Schaltungen wird hier nicht eingegangen.

Für die meisten Anwendungen werden jedoch komplizierte Schaltungen benutzt (s. u.):

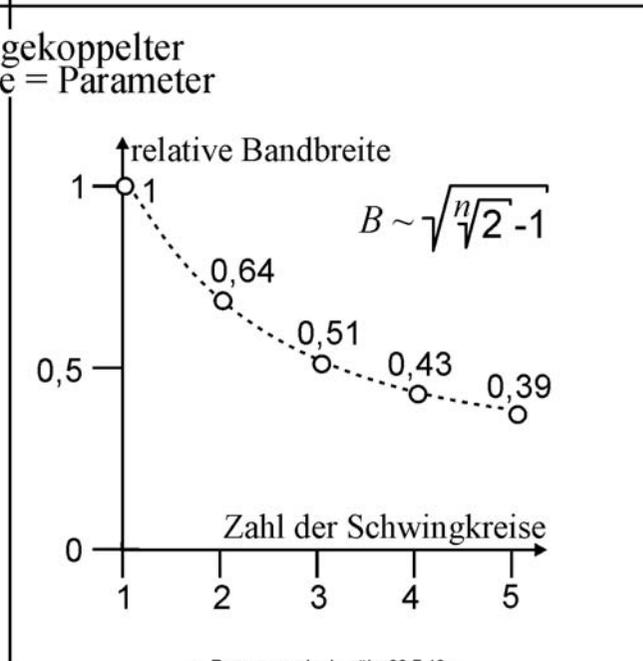
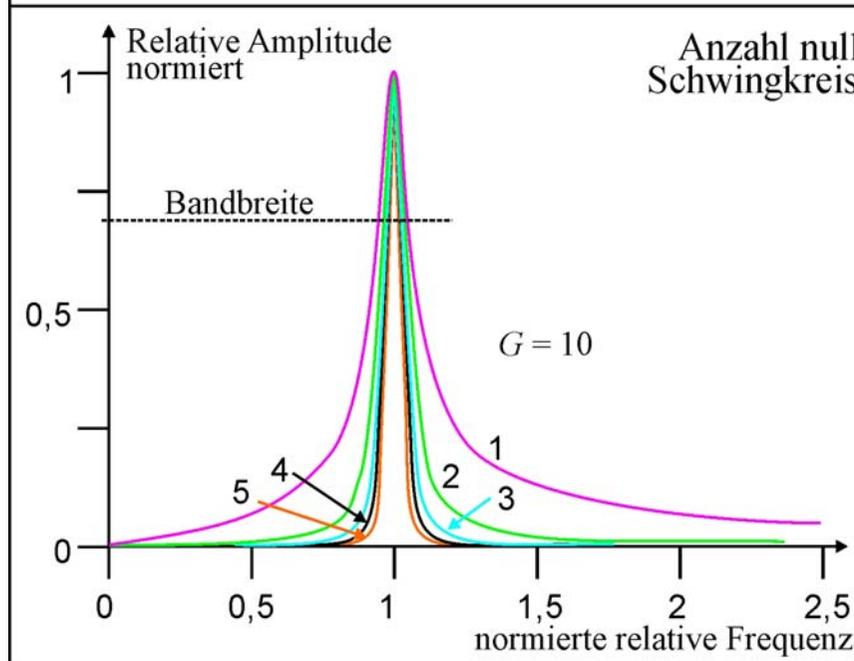
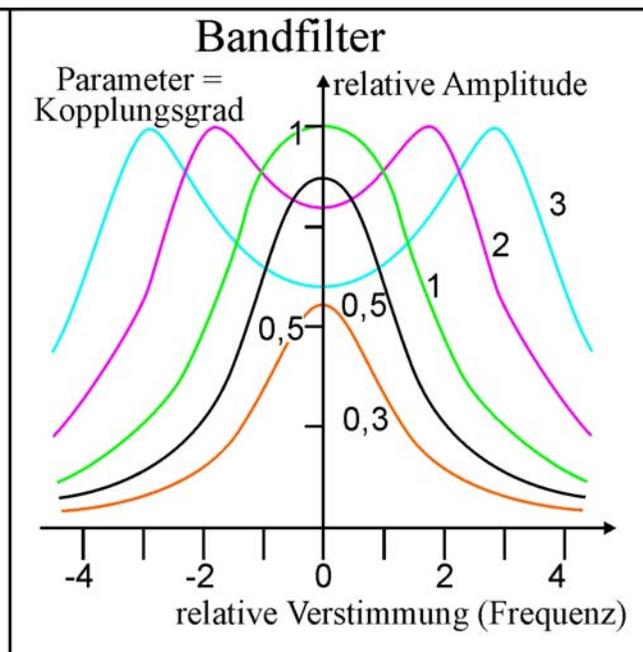
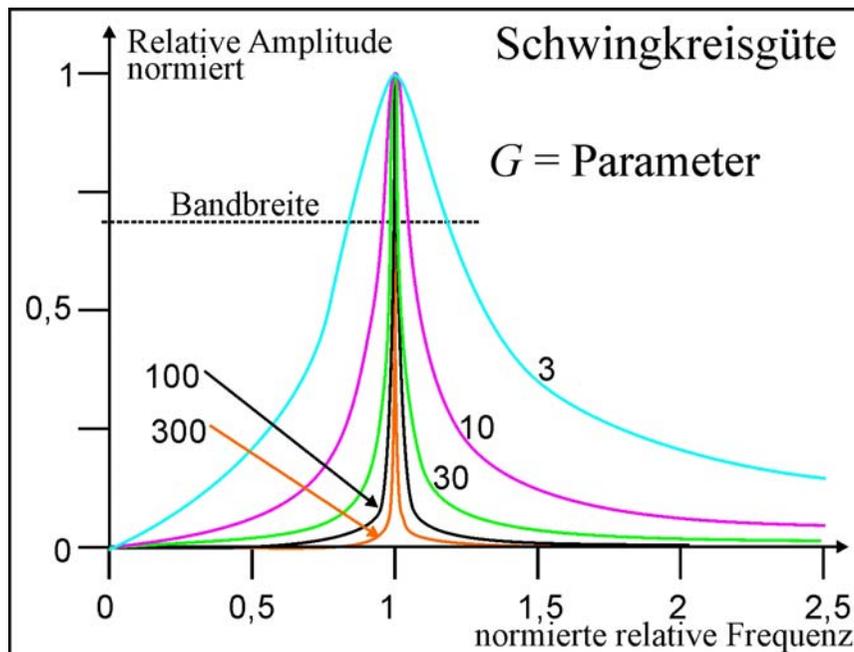
1. **Zusammenschaltungen** mehrerer Schwingkreise, vor allem Bandfilter, z. T: auch RC-Glieder.
2. **Rückkopplungen** zur Verbesserung der Güte.
3. **Superheterodyn**-Schaltungen.

Die relative Bandbreite ist ganz wesentlich durch die **Güte G** des Schwingkreises bestimmt. (links oben)

Sie ist jedoch wesentlich durch die **Bauelemente** bestimmt und daher wenig veränderbar. Größere Möglichkeit bietet dabei die **Rückkopplung**.

Eine einfache, **ungekoppelte Zusammenschaltung** mehrerer Schwingkreise bringt wenig Verbesserung, außer für die Weitabselektion (unten).

Günstiger ist die Kopplung von Schwingkreisen zu einem **Bandfilter**. Mit dem Grad der Kopplung ist ein relativ breites Dach bei steilen Flanken zu erreichen. (rechts oben)



Der Überlagerungsempfänger

Viele Empfänger müssen auf verschiedene Frequenzen abgestimmt werden.

Dazu sind dann Mehrfach-Dreh-Kondensatoren oder mehrere gleichartige Kapazitäts-Dioden notwendig.

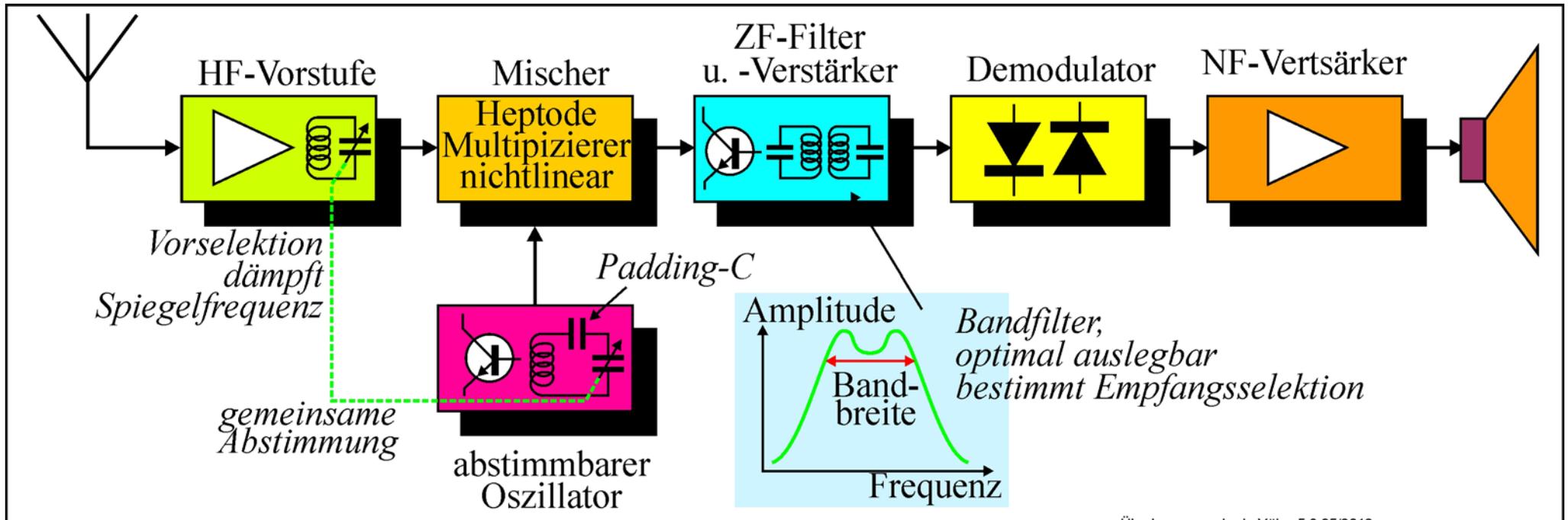
Als Ausweg entstand der Überlagerungs- oder Superheterodyn-Empfänger, kurz Superhet oder Super.

Heterodyn setzt sich zusammen aus *lateinisch super* über, *griechisch hetero* verschieden“ sowie *dynamis* Kraft.

Bei ihm werden die Empfangs- (Vorsektion) und Oszillator-Frequenz f_E bzw. F_O gemeinsam so verändert, dass ihre Differenz eine gleich bleibende **Zwischen-Frequenz** $f_Z = F_O - f_E$ ergibt.

Für ihre Filterung können dadurch selbst komplexe Schwingkreis-Schaltungen optimal ausgelegt werden.

Der Mischer für f_E und f_O wird durch eine Heptode oder nichtlineare Bauelemente realisiert.



Geschichte

Der *Erfinder* des Überlagerungsempfängers ist nicht eindeutig, die Idee ist um 1918 entstanden. Folgende Angaben wurden gefunden:

Wahrscheinliche Erfinder	Zeitpunkt und Ort der Idee	Patent angemeldet/erteilt
EDWIN HORWARD ARMSTRONG (1890 - 1954)	Frankreich (stationiert), 1918	1919/1920 USA
LUCIEN LÉVY	Frankreich 1917	?/1919+1920 Frankreich
WALTER SCHOTTKY (1886 - 1976)	Deutschland 1918	?/?

In Frankreich gab es 1923 drei *Heimempfänger* der Fa. Lucien Lévy: „Radio L.L.“.

Erster *kommerzieller* Superhet war „Radiola AR-812“ von RCA, wurde 1924 - 1927 ca. 150.000 Mal verkauft.

In Deutschland entwickelte die DeTeWe 1924/1925 den „Ultradyn“.

Achtung! Es gibt auch etwas ähnlich funktionierende *Homodyn*-Empfänger.

Bei ihnen ist die Zwischenfrequenz faktisch gleich 0 Hz.

= Direktempfänger = Direktmischer. Ihr Hauptproblem ist das starke $1/f$ -Rauschen.

Dadurch kann keine hohe Empfindlichkeit erreicht werden.

Grundlagen

Bei einer Heptode werden die Signale von Gitter₁ und Gitter₃ in erster Näherung multipliziert. Für harmonische Schwingungen gilt dabei die Formel

$$\cos(\alpha) \cdot \cos(\beta) = \frac{1}{2} \cdot [\cos(\alpha - \beta) + \cos(\alpha + \beta)].$$

Grundsätzlich treten **Summen- und Differenzwinkel** bei allen Nichtlinearitäten auf.

Entsprechend einer Potenzreihenentwicklung ab dem quadratischen Glied $y = a + b \cdot x + c \cdot x^2 + \dots$

Allgemein bilden sich dann aber zusätzlich auch die Kombinationen gemäß $n \cdot \alpha \pm m \cdot \beta$ (n, m ganzzahlig).

Für den Superhet bedeuten sie zusätzliche Störungen und sollten deshalb möglichst gut vermieden werden.

Sind α und β die Eingangs- bzw. Oszillatorfrequenz, so treten am Ausgang die **beiden Frequenzen** $|f_O \pm f_E|$ auf.

Zur gewählten Zwischenfrequenz (ZF) f_Z gehören somit zwei Frequenzen.

Falls wie üblich, $f_O > f_E$ gewählt wird, gilt für sie:

- die gewünschte **Empfangsfrequenz** $f_E = f_O - f_Z$
- die unerwünschte **Spiegelfrequenz** $f_S = f_O + f_Z = f_E + 2 \cdot f_Z$.

Die Spiegelfrequenz muss durch die **Vorselektion** unterdrückt oder zumindest stark geschwächt werden.

Deshalb muss die ZF dem jeweiligen Empfangsbereich angepasst werden (s. u.).

Zum **Gleichlauf**:

Bei jeder Abstimmung muss die Zwischenfrequenz erhalten bleiben, d. h. f_O und f_E müssen sich gleichviel ändern.

Dabei ist jedoch der relativ durchzustimmende Betrag gemäß $\Delta f_O / f_{Om} < \Delta f_E / f_{Em}$ unterschiedlich.

Daher sind für beide Schwingkreise unterschiedliche Drehkondensatoren oder Kapazitäts-Dioden notwendig.

Bei gleichen Bauteilen wird der Oszillatorteil durch einen **Padding-Kondensator** „verkürzt“.

Zusätzlicher Vorteil und Daten

Beim Superhet erfolgt die eigentliche Selektion Δf in der (letzten) Zwischenfrequenz f_Z .

Die hier realisierte Bandbreite überträgt sich auf die Empfangsfrequenz f_E .

Meist ist dabei $f_E > f_Z$, wodurch für die Empfangsfrequenz eine um f_E/f_Z erhöhte Güte wirksam wird.

So ergeben sich die folgenden typischen Kenndaten.

Bereich mit Frequenz-Richtwerten	übliche ZF	Sender-Abstand	Güte-Gewinn
Langwelle: 77 - 200 kHz	450, 477 kHz	9 kHz ¹⁾	0,2 - 0,5
Mittelwelle: 500 - 1 500 kHz	450, 477 kHz	9 kHz ¹⁾	1 - 3
Kurzwelle: 3 - 30 MHz (10 - 100 m)	40 - 80 MHz + 455 kHz	9 kHz ¹⁾	8 - 60
UKW: 85 - 110 MHz	10,7 MHz	300 kHz ²⁾	8 - 10
TV 55 - 87; 170 - 220, 300 - 800 MHz	38,9 MHz	5,5 MHz	1 - 20
Satellit 10,7 - 12,75 GHz	950 - 2150 MHz ³⁾	5,5 MHz	≈ 2000 ⁴⁾

¹⁾ Vorteil mit 9 kHz NF-Sperrfilter.

²⁾ unwesentlich wegen geringer Reichweite der Sender.

³⁾ für Empfängerkabel, LNB-Oszillator 9,75 bzw. 10,6 GHz (22 kHz Steuerung), 14/18 V für Polarisation.

LNB = Low Noise Block Converter der Satelliten-Schüssel.

⁴⁾ bezogen auf die endgültigen Fernsehkanäle.

Neben diesen Beispielen gibt es noch viele spezielle Anwendungen, z. B. in Messtechnik, Radar und Astronomie. Ferner sei darauf hingewiesen, dass es u. a. in der Digitaltechnik völlig andere Filtermethoden gibt.

Gliederung

1. Signal-Störungen
2. Verstärkung allgemein
3. Röhren
4. Halbleiter
5. Schaltungen
6. Schwingungserzeuger
7. Leistungsverstärker
8. Ergänzungen

Etymologie

Ihr gemeinsamer Stamm *stark* existiert bereits im 8. Jh. im Sinne von starr.

Über unbeugsam, nicht nachgebend und fest, kraftvoll erfolgt die Wandlung zur heutigen Bedeutung.

Stärke betrifft so Vorteile oder besondere Eigenschaften eines Materials, Objekts, Geschehens oder Menschen.

Davon weicht jedoch die weiße, pulvrige Substanz *Stärke* ab, die u. a. zum *Stärken* von Wäsche benutzt wird.

Zum **Komparativ** *stärker* gehört das Verb *verstärken* und dessen Geschehen, die *Verstärkung*.

Synonym sind etwa beschleunigen, forcieren, intensivieren, kräftiger werden, nachhelfen, stabiler machen, steigern, vergrößern, vermehren, verschärfen, vertiefen, vorantreiben, wachsen und zunehmen.

Dabei ist der *Verstärker* das Objekt, welches die *Verstärkung* bewirkt.

Wesentlich ist hierfür ist ein **Vergleich**, genauer eine **Messung** bezüglich *Ausprägungen* von Eigenschaften.

Dabei gibt es zwei Relationen, die auch gemein zutreffen können:

- *zeitlich* im Sinne von vorher (Input) und nachher (Output).
- *räumlich* in Bezug auf verschiedene Orte.

Nach diesem Schema können Verstärker und Verstärkung *hinreichend beschrieben* werden.

Es gibt jedoch *keine* allgemeingültige *Erklärung* dafür, warum es überhaupt Verstärker gibt und wie sie entstehen!

Details siehe: r-h-voelz.de/pdf/HU/Verstaerker.pdf.

Verstärker und Verstärkung gibt es in fast *allen Bereichen*.

Hier werden aber nur technisch-physikalischen Verstärker weiter behandelt. Deshalb ein Hinweis auf zwei Bereiche:

- **Psychologie: Konditionierung** (Lob, Geld) kann die Wirkung eines Reizes, z. B. beim *Lernen* verstärken.
- **Medienwirkung**: Massenkommunikation kann die Verstärkung bestehender Einstellungen bewirken.

Klassifizierung von Verstärkern und Verstärkung

Es lassen sich deutlich 2×2 Klassen mit Unterklassen unterscheiden:

A. Ursache und Wirkungsweise

1. **Erhaltungssätze** (Physik): eine Größe wird auf Kosten einer anderen vergrößert. Mindestens zwei Größen sind in einer Formel verknüpft.
2. **Systeme mit Steuerung**. Sie setzen meist eine „Hilfsenergie“ voraus. Es gibt mehrere Unterklassen:
 - a) Auslegung: *Klein-* \Leftrightarrow *Großsignal-*Verstärkung.
 - b) Betriebsarten: *diskret* (Relais) \Leftrightarrow *kontinuierlich* (Röhre, Transistor).

Problem: wie entstehen und funktionieren sie?

B. Zeiteinfluss

1. **unmittelbar**. Der Output folgt immer gleich bleibend und praktisch unverzögert dem Input. Die Eigenschaften des Verstärkers ändern sich dabei nicht mit der Zeit.
2. Es ist eine **Rückwirkung** oder **Rückkopplung** vorhanden:
 - a) Der Output, die aktuelle Ausprägung wirkt *kontinuierlich*, oft *exponentiell* ständig auf den Input zurück
 - b) Die Rückführung erfolgt *iterativ*, ähnlich wie die Rekursion beim Rechner.

Es existiert ein *Wachsen mit der Zeit*, das schließlich auch zur *Evolution* führt.

Überwiegend kann a) und b) als eine *Weiterentwicklung* von B1. betrachtet werden.

Anwendung von Erhaltungssätzen

Zu den fundamentalen Gesetzen der Physik zählen Erhaltungssätze (hängen eng mit Symmetrien zusammen)
Sie betreffen u. a. **Masse, Energie, Impuls und Drehimpuls**.

Auf ihrer Grundlage lassen sich Verstärkungen einer Größe auf Kosten einer anderen realisieren

So setzt sich die **elektrische Leistung** N aus der Spannung U und dem Strom I gemäß $N = U \cdot I$ zusammen.

Mit einem **Transformator** kann so U auf Kosten I bzw. I auf Kosten von U vergrößert (verstärkt) werden.

Bei einem **Hebel** gilt die für das Produkt Kraft F mal Weg l

Ähnlich gilt für **Keil, schiefe Ebene, Schraube, Flaschenzug** usw.

Ganz ähnlich kann bei einem **Getriebe** die Drehzahl ω auf Kosten der Drehkraft verändert werden.

Nicht ganz so übersichtlich sind die Verhältnisse bei der Vergrößerung mittels **Panthograph, Linse** oder **Mikroskop**.

Umgekehrtes geschieht bei der **Bündelung** von Richtstrahlern: Die nutzbare Energie steigt auf Kosten der
„ausgeleuchteten“ Fläche

Mittels magnetischer **Leitbleche** oder **Dielektrika** kann so an ausgewählten Orten die magnetische bzw. elektrische
Feldstärke vergrößert werden.

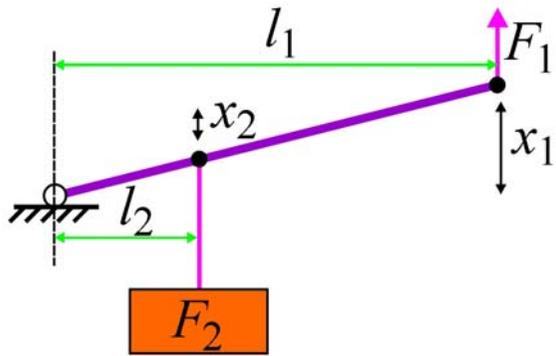
Allgemein gilt daher:

Enthält eine Formel mehreren Größen so kann durch entsprechende Geräte eine auf Kosten anderen verstärkt werden.

Bedingt gilt dieses u. a. auch für den **Resonanzteiler** (Teil 2)

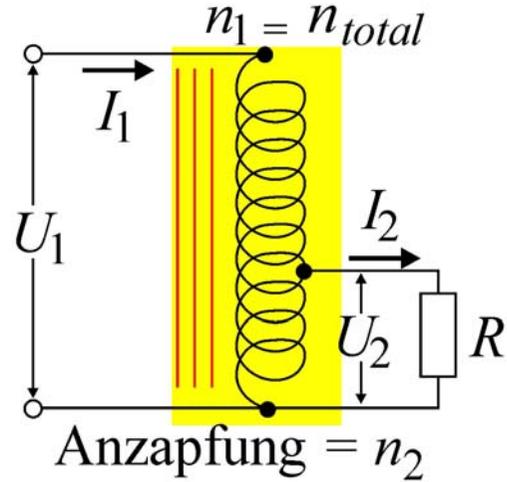
Doch genau genommen tritt hier die Spannungsverstärkung erst nach mehreren Schwingungen (Zeit) ein (s. u.)

Hebel



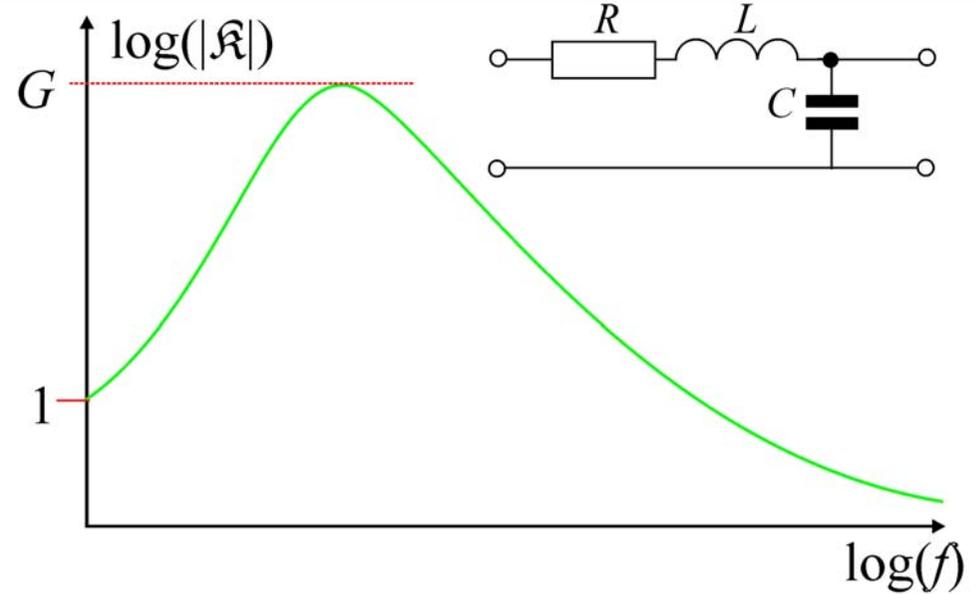
$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{l_2}{l_1} = \frac{x_2}{x_1}$$

Transformator



$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

HebelTrafo.cdr h. vözl 28.1.11



RC_Schaltung7T.cdr h. Vözl 17.1978/2012

Steuerung \Leftrightarrow Verstärker

In der *Kybernetik* ist der *Regler* ein wichtiges Bauelement.

In den meisten Fällen dient er der *Beeinflussung* oder *Steuerung* eines *Stoff-* oder *Energiestromes*.

Dabei sind *drei Größen* vorhanden: **1. Input**, **2. Output** und **3. Beeinflussungs-, = Steuerungsgröße**.

Ein besonders einfacher Fall ist der *Schalter* für die Ein- und Ausschaltung eines elektrischen Gerätes.

Dabei ist der Input das *Lichtnetz*, der Output der Strom zum elektrischen *Gerät* und die Steuerung der *Schalter*.

Ein anderes Beispiel ist der Druck auf einen *Klingeknopf*. Er kann ein Klingeln aber auch eine Atomexplosion auslösen.

Allgemein wird von *Auslöseeffekten* gesprochen, die jedoch auch *kontinuierlich* erfolgen können.

So kann mit einem verstellbaren *Ventil* ein Stoffstrom kontinuierlich beeinflusst werden.

Ähnlich führt die ganz leichte Berührung einer *Mimose* zur unterschiedlich starken Erschlaffung ihrer Blätter.

Ein *Dimmer* ermöglicht es, die Helligkeit einer Beleuchtung wunschgemäß einzustellen.

In diesen Fällen ist die ausgelöste Wirkung (Energie) *größer* als die auslösende.

In einigen Fällen kann sogar Auslösendes und Bewirktes die *gleiche* (physikalische) *Eigenschaft* besitzen.

Dann ergibt die Vertauschung der drei o. g. Größen einen *Verstärker*.

Dabei wird der ursprünglich Input als *Hilfs-Energie* fast nebensächlich.

Die *Steuerungsgröße* ist der Input, der verstärkt zum Output wird.

Diese *Beschreibung* erklärt aber nicht, wie Regler bzw. Verstärker *entstehen*, was ihr *allgemeines Prinzip* ist.

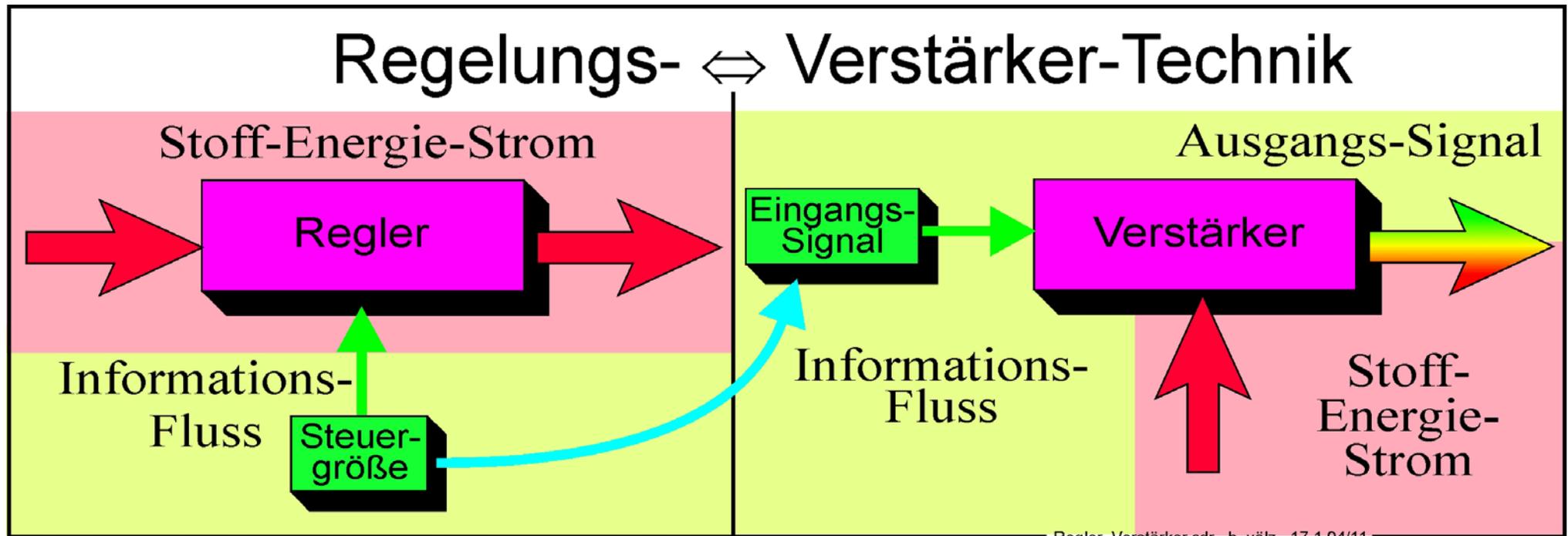
Gewiss, der Mensch kann sie mit seiner *Kreativität* erschaffen.

Sie müssen aber bereits *deutlich früher in der Natur* und dann im Leben „*automatisch*“ *entstanden* sein.

Andernfalls hätte es keine *Entwicklung* und *Evolution* gegeben (vgl. r-h-voelz.de/pdf/HU/Verstaerker.pdf).

Durch Vertauschen der drei Größen

1. Input, 2. Output und 3. Steuergröße
gehen Regler und Verstärker ineinander über



Regler_Verstärker.cdr h. vözl 17.1.94/11

Die Bauelemente

Entscheidend für Regler und Verstärker sind spezielle Bauelemente, allgemein Systeme.

Für die Technik wurden *drei wichtige Varianten* erfunden: Relais, Elektronen-Röhren und Transistoren.

Relais waren für die Telegrafie entscheidend.

Sie ermöglichen nur ein effektives *Ein- und Aus-Schalten*.

und sind heute weitgehend sind sie heute durch *Transistoren* ersetzt.

Sie sind grundlegend für *digitale Signale* (s. Skript, Teil 4).

Für *kontinuierliche* Signale sind *Röhren* und *Transistoren* die wesentlichen Bauelemente.

Bei beiden ist die *Beeinflussung freier* (beweglicher) *Elektronen* das wesentliche Geschehen.

Nach deren Prinzip lassen *Röhren, Bipolar- und Feldeffekt-Transistoren* unterschieden (s. u. Bild).

Dabei sind heute auch die Röhren fast vollständig durch Transistoren ersetzt.

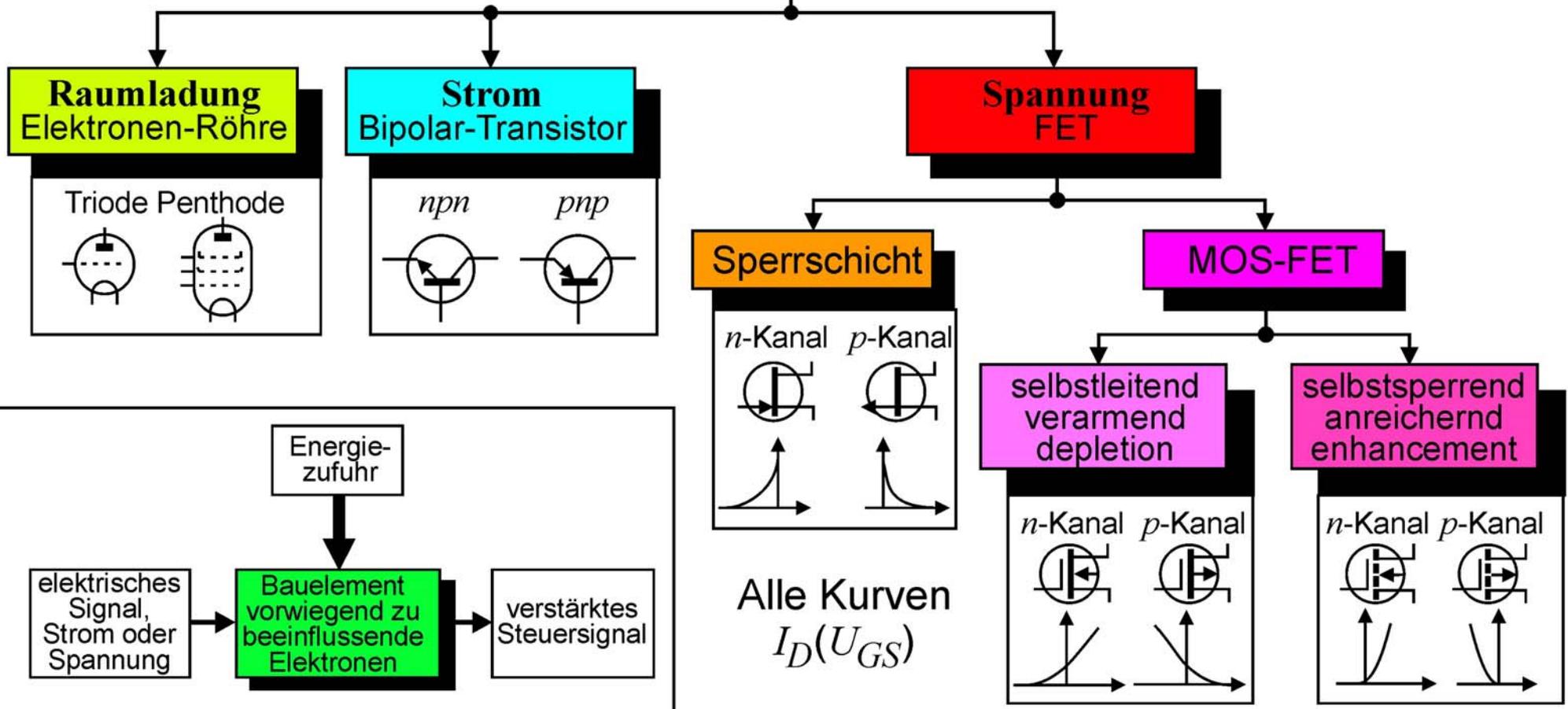
Da aber die Verstärkung bei *Röhren leichter zu verstehen* ist, wird auf sie zunächst eingegangen.

Es ist ungewiss, ob es künftig *weitere verstärkende Bauelemente* z. B. für Licht oder Magnetismus geben wird.

Etwas Geschichte

- 1837 SAMUEL FINLEY BREESE MORSE (1791 - 1872) baut erstes Relais
- 1838 CHARLES WHEATSTONE (1802 - 1875) Relais für *Telegrafie*
- 1858 |----- JULIUS PLÜCKER, HEINRICH GEIßLER gasgefüllte leuchtende *Geißler-Röhre*
- 1897 |----- KARL FERDINAND BRAUN *Kathodenstrahlröhre* (Oszilloskop)
- 1906 |----- ROBERT VON LIEBEN Patent „Katodenstrahlenrelais“ = *Verstärkeröhre*
- 1907 |----- LEE DE FOREST erfindet die *Triode*
- 1908 Erstes Relais der *Fernsprechtechnik*
- 1913 |----- *Röntgenröhre* mit Wolframglühkathode
- 1922 |----- *Loewe-Mehrfachröhre* von MANFRED VON ARDENNE
- 1923 |----- WLADIMIR KOSMA ZWORYKIN baut die *Ikonoskop* zur Bildabtastung
- 1925 *Thyratron* (Röhre) eingeführt
- 1925 |----- | _____ JULIUS EDGAR LILIENFELD *Transistor-Prinzip*, keine technische Lösung
- 1934 |----- | _____ OSKAR HEIL entwickelt einen *Feldeffekt-Transistor*
- 1934 |----- erste *Leuchtstoffröhren*
- 1939 *Relais-Rechner Z2* von KONRAD ZUSE (1910 - 1995)
- 1947 |----- | _____ J. BARDEEN / W. H. BRATTAIN / W. B. SHOCKLEY *Spitzentransistor*
- 1949 |----- RCA beginnt mit Entwicklung der *Lochmaskenröhre*
- 1957 *Thyristor* (Halbleiter) entsteht
- 1957 |----- *Vidicon*-Fernsehröhre
- 1958 |----- | _____ JACK KILBY Grundlagen der *integrierten Technik*
- 1959 |----- | _____ MARTIN ATELLA und DAWON KAHNG *MOSFET*, isoliertes Gate
- 1964 |----- | _____ **C-MOS**-Technik entsteht
- 1965 |----- | _____ *Produktion* von Transistoren übertrifft die von Röhren
- 1968 |----- | _____ *CMOS-Schaltkreise*
- 1971 |----- *Mikroprozessor* Intel 4004 mit 2300 Transistoren

Beeinflussung von Elektronen



ElektronensteuerungF.cdr h. vözl 11.4.05

Gliederung

1. Signal-Störungen
2. Verstärkung allgemein
- 3. Röhren**
4. Halbleiter
5. Schaltungen
6. Schwingungserzeuger
7. Leistungsverstärker
8. Ergänzungen

Funktion der Elektronen-Röhre

Eine wesentliche Grundlage der Elektronenröhre ist der *glühelektrischer Effekt*.

Er wird auch RICHARDSON- oder EDISON-Effekt bzw. Glüh-, thermionische oder thermische Elektronenemission genannt.

Erstmals wurde er 1883 von THOMAS ALVE EDISON (1847 - 1931) beobachtet.

Eine erste theoretische Deutung erfolgte 1901 von Sir OWEN WILLIAMS RICHARDSON (1879 - 1959).

1908 entdeckte er die MAXWELL-Verteilung der austretenden Glühelktronen.

1911 wurde die RICHARDSON-Gleichung für die Stromdichte J [A/m²] formuliert

$$J = A \cdot T^2 \cdot e^{-W_a / k \cdot T} .$$

Darin sind T = absolute Temperatur, W_a = Austrittsarbeit der Katode, k = BOLTZMANN-Konstante, A = Konstante,

Die emittierten Elektronen bilden eine negative *Raumladung* um die Katode.

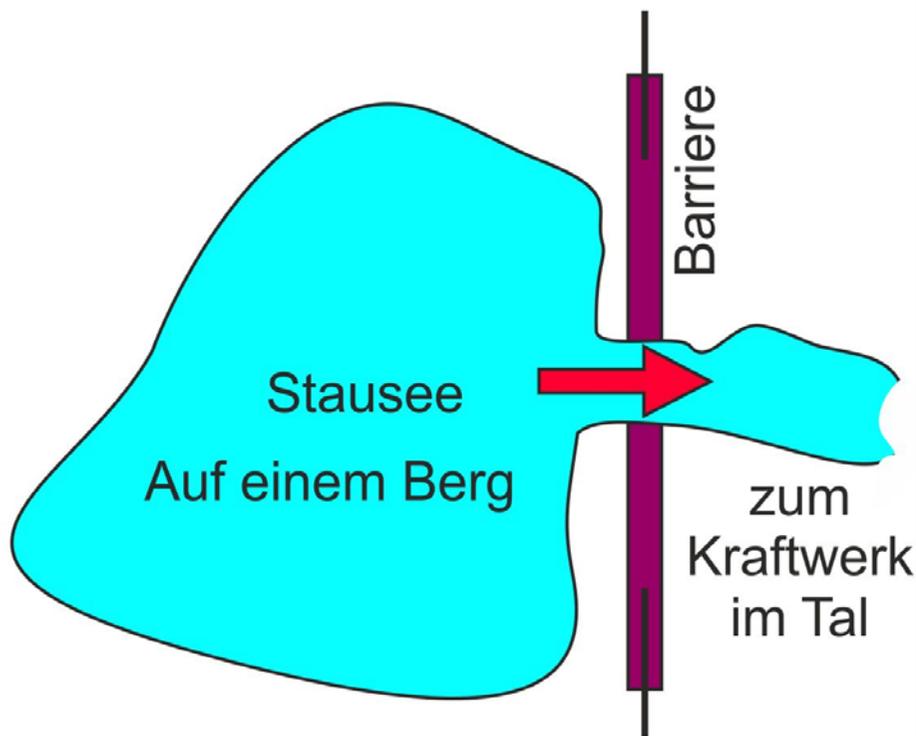
Dadurch begrenzen sie den Austritt weiterer Elektronen.

Mit einer hinreichend stark positiv geladenen *Anode* können alle Elektronen „abgesaugt“ werden.

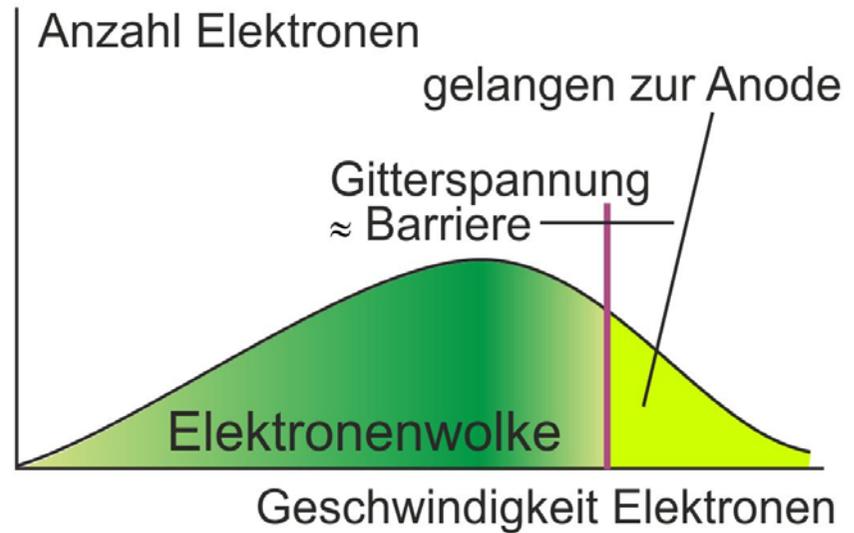
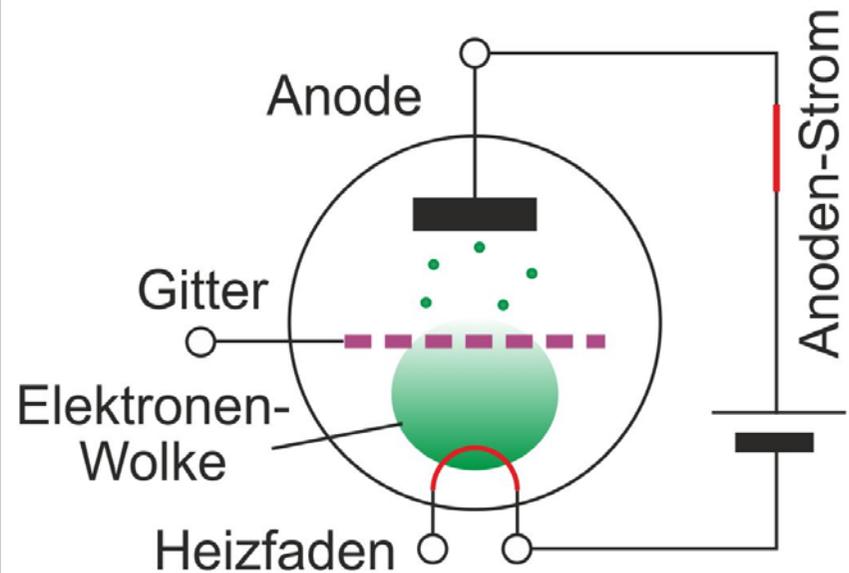
Durch ein eingefügtes negatives *Gitter* kann der Anodenstrom verringert (gesteuert) werden.

Da *kein Gitterstrom* fließt, erfolgt die Steuerung praktisch *leistungslos*.

Als anschauliches Modell kann hierfür ein Pumpspeicherwerk dienen



Die Menge des durchströmendes Wassers ist Funktion der Einstellung der Barriere, sie steuert die nutzbare Energie



Röhre.cdr h. völz 9.2.11

Röhren-Kennlinien

Allgemein ist der Anodenstrom I_a eine Funktion von Gitter- und Anodenspannung:

$$I_a = f(U_g, U_a).$$

Infolge der MAXWELL-Verteilung der Elektronen ist er stark *nichtlinear*.

Daher werden hierfür meist *keine Formeln* angegeben, sondern *Kennlinien* benutzt.

Für eine *Verstärkung* wird jedoch primär eine *Ausgangsspannung* $u_a = f(u_g)$ benötigt.

Sie wird mit einem *Arbeitwiderstand* R_a gewonnen.

Sein Spannungsabfall *reduziert* jedoch die wirksame Anodespannung.

Zusätzlich wird sie auch noch mit der Steuerung *verändert*.

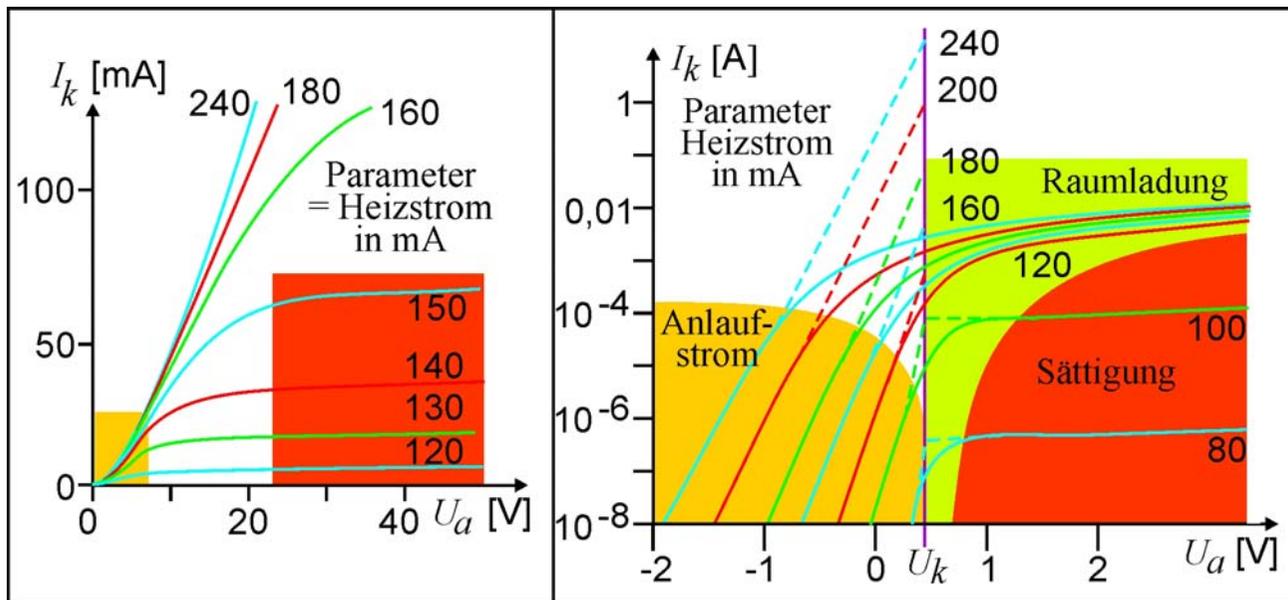
Dadurch werden die Zusammenhänge noch komplizierter.

Es entstehen die so genannten *Arbeitskennlinien*. Sie lassen sich konstruieren.

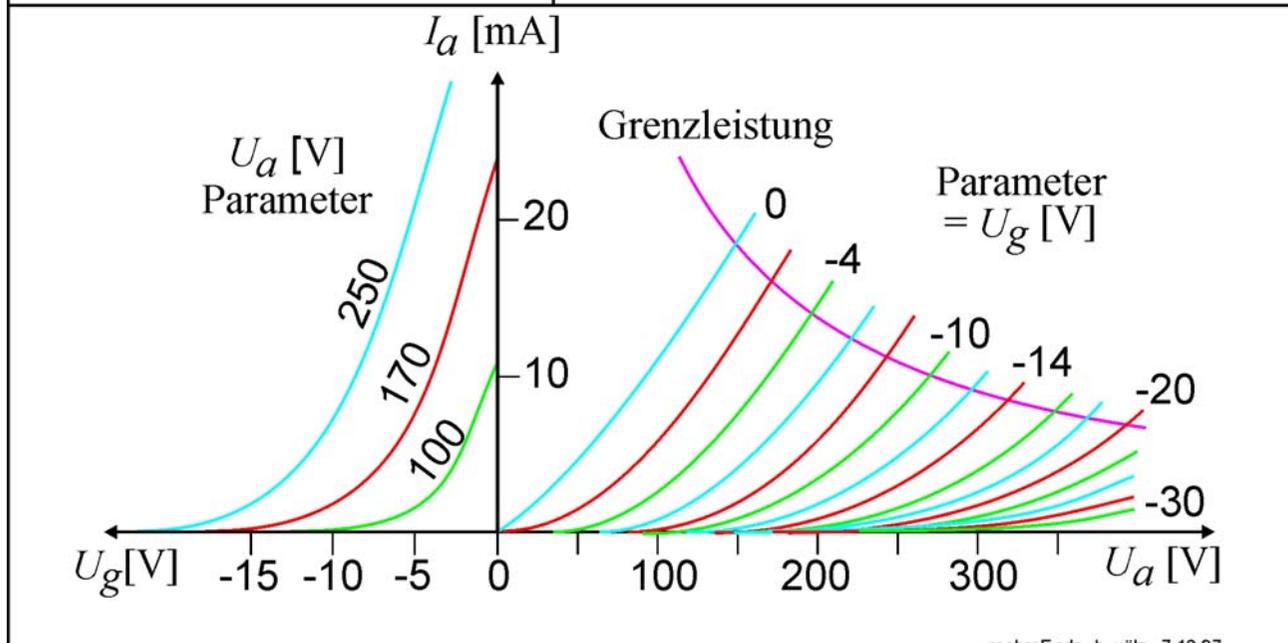
Achtung! Es ist üblich die Gleichwerte mit großen und die Wechselwerte mit kleinen Buchstaben zu bezeichnen.

Oben links ist der gesättigte Kathoden- = Anodenstrom I_k als Funktion der Anodenspannung U_a und des Heizstromes (bewirkt die Temperatur der Katode) dargestellt.

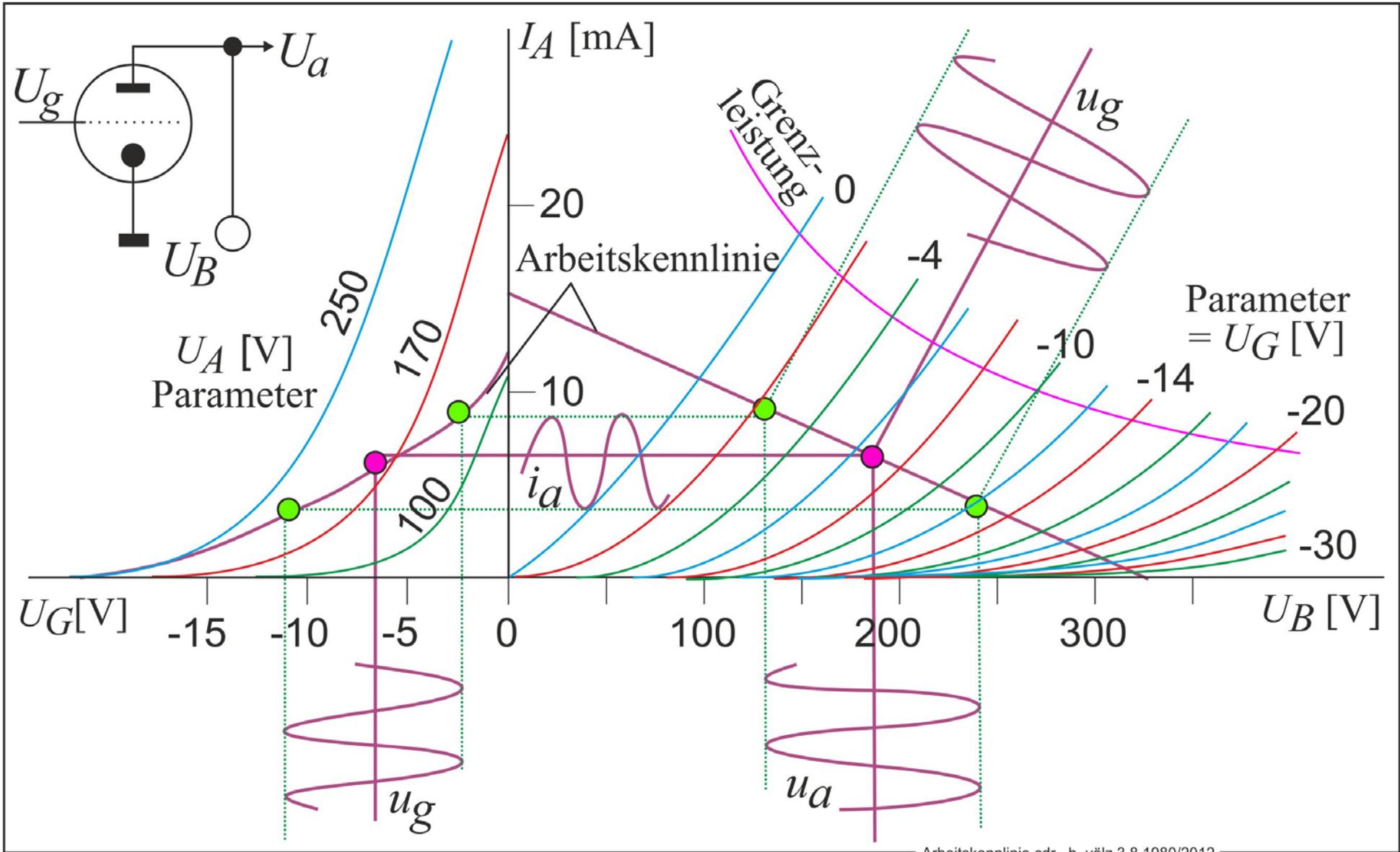
Daneben steht dieselbe Darstellung, jedoch für den Logarithmus von I_k . Das verdeutlicht den so genannten MAXWELL-schen Anlaufstrom.



Unten ist die übliche Kennlinien-Darstellung für eine Triode gezeigt. Mit ihr lässt sich die Arbeitskennlinie konstruieren. Das ist im folgenden Bild gezeigt.



roehreF.cdr h. vözl 7.12.97



Einfügen weiterer Gitter

Im Verlaufe der Geschichte wurden mehrfach zusätzliche Gitter eingefügt.

1913 entwickelt IRVING LANGMUIR eine erste **Mehrgitter**elektronenröhre, sie fand keine Verbreitung.

1926 schuf dann HENRY JOSEPH ROUND die **Tetrode** (von 4).

Dazu fügte er hinter dem Steuergitter ein **Schirmgitter** mit positiver Spannung ein.

Seine konstante Spannung unterbindet die Rückwirkung der durch das Steuergitter der veränderten Anodenspannung.

Die Kennlinien $I_a(U_g)$ besitzt dadurch ein sehr gutes Sättigungsverhalten.

An der Anode lassen sich jedoch Sekundärelektronen nicht vollständig vermeiden.

Um sie unwirksam zu machen wurde schließlich noch ein **Bremsgitter** eingeführt.

So entstand die besonders wichtige **Pentode**. (von fünf Elektroden).

Die Weiterentwicklung führt zur **Heptode** und **Hexode** mit 5 bzw. 6 Gittern.

Sie ermöglichen eine etwa **multiplikative Mischung** der Signale an G_1 und G_3

Sie werden deshalb vor allem bei **Superhet** benutzt.

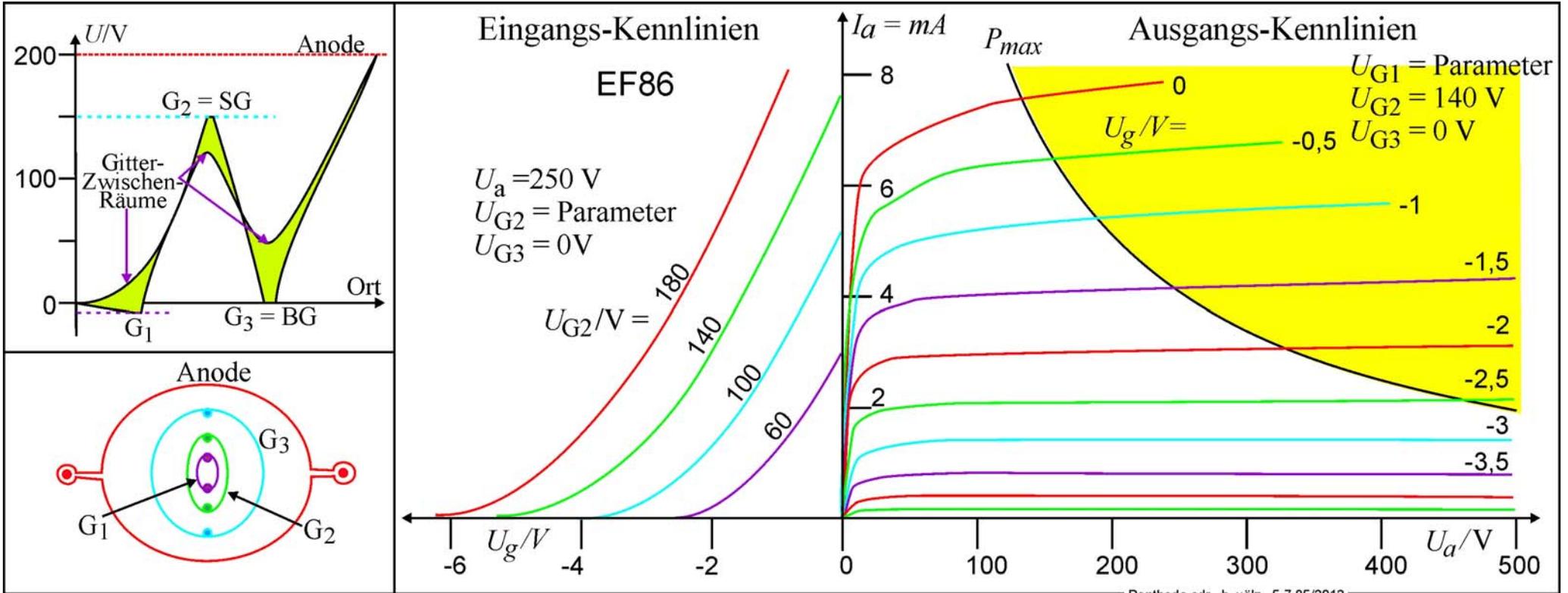
Bei Röhren sind beachtliche Anodenspannungen von mehr als 100 V erforderlich.

Deshalb fügte 1915 GEORG HEINRICH BARKHAUSEN (1881 - 1923) vor dem Steuergitter ein **Raumladegitter** ein.

Es saugt mit relativ **kleiner positiver Spannung** (≈ 10 V) alle emittierten Elektronen ab.

Das Steuergitter verteilt sie dann zwischen Raumladegitter und Anode U_a (ebenfalls ≈ 10 V).

Schließlich sei noch die 1922 von ARDENNE entwickelte, quasiintegrierte Löwe-Mehrfachröhre erwähnt.



Verstärker-Formeln

Wesentliche Beschreibungen der Röhrenverstärker schuf GEORG HEINRICH BARKHAUSEN (1881 - 1923).

Im jeweiligen Arbeitspunkt führt er die drei Kenngrößen *Steilheit S*, *Durchgriff D* und *Innenwiderstand R_i* ein:

$$S = \frac{\partial I_a}{\partial U_g}; D = \frac{\partial U_g}{\partial U_a}; R_i = \frac{\partial U_a}{\partial I_a}.$$

Sie sind durch BARKHAUSEN-Formel $S \cdot D \cdot R_i = 1$ verknüpft.

Entsprechend diesen linearen Näherungen der Kennlinie kann die *Steuergleichung* gebildet werden

$$i_a = S \cdot (u_g + D \cdot u_a).$$

Mit dem Arbeitwiderstand R_a lässt sich dann die *Verstärkung* berechnen:

$$V = -\frac{u_a}{u_g} = \frac{1}{D} \cdot \frac{R_a}{R_a + R_i} = S \cdot \frac{R_a \cdot R_i}{R_a + R_i}.$$

Für $R_a \gg R_i$ folgt die (maximale) *Grenzverstärkung* μ

$$V_\infty = \mu = 1/D$$

1925 wurde erstmals eine *Verstärkung* von **100 000** mit mehreren Röhren erreicht.

Heutige Röhren-Anwendungen

Vorrangig sind das Röhren der *Höchstfrequenztechnik* oberhalb von 5 GHz.

Z. B. Klystrons, Wanderwellenröhren und Magnetrons (Mikrowellenherd).

Eine beachtliche Bedeutung haben immer noch *Röntgen-* und *Gasentladungsröhren* (Beleuchtung)

Bis vor reichlichen zehn Jahren erfolgte die *Bildaufnahme* und *-wiedergabe* mit Katodenstrahlröhren.

Hierfür gilt der folgende zeitliche Ablauf:

1878 SIR WILLIAM CROOKES entwickelt *Kathodenstrahlröhre*

1897 KARL FERDINAND BRAUN verhilft der *Kathodenstrahlröhre* zum Durchbruch (Oszilloskop)

1949 Bei RCA beginnt mit Entwicklung der *Lochmaskenröhre*

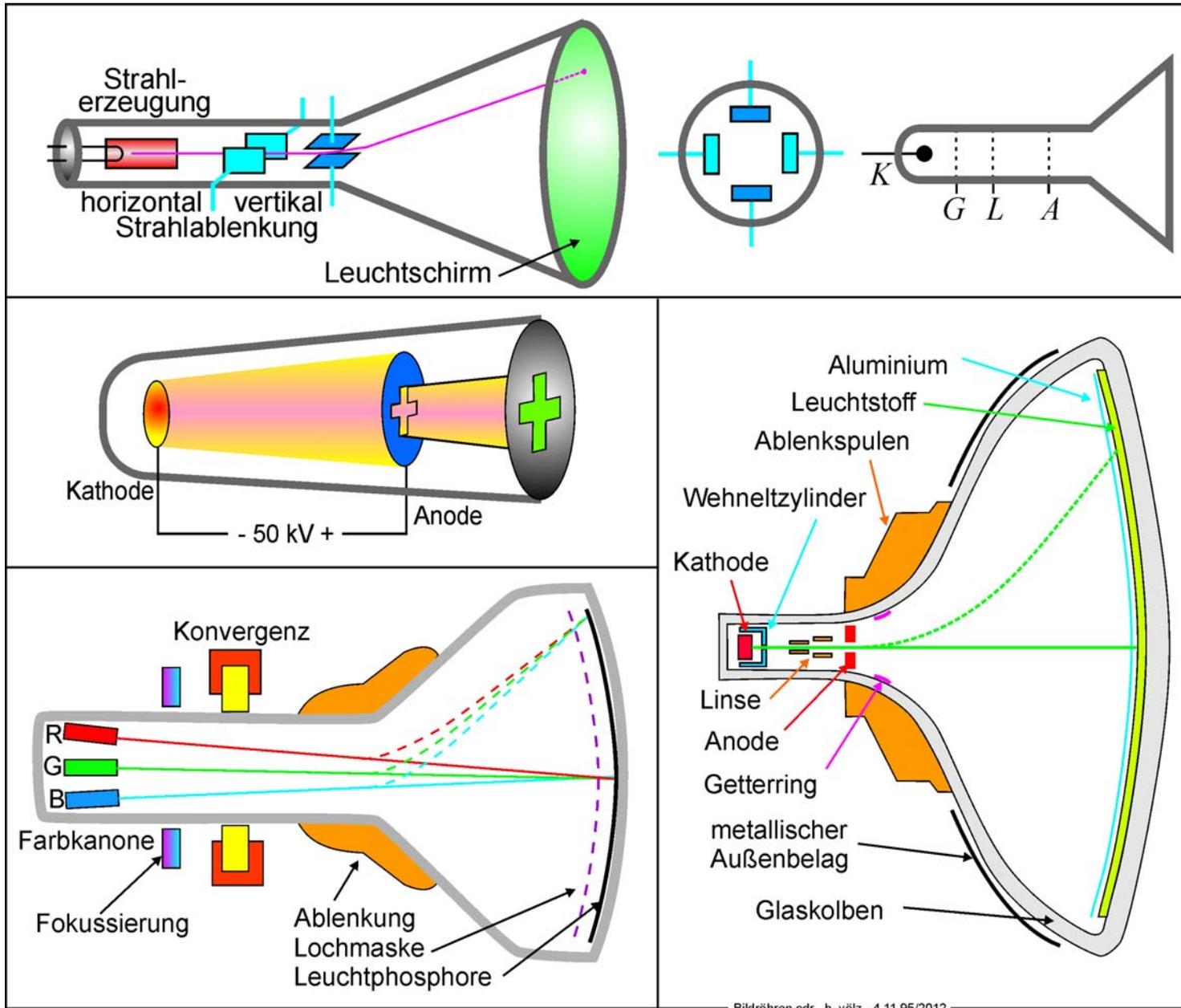
1923 WLADIMIR KOSMA ZWORYKIN baut die *Ikonoskop* zur Bildabtastung

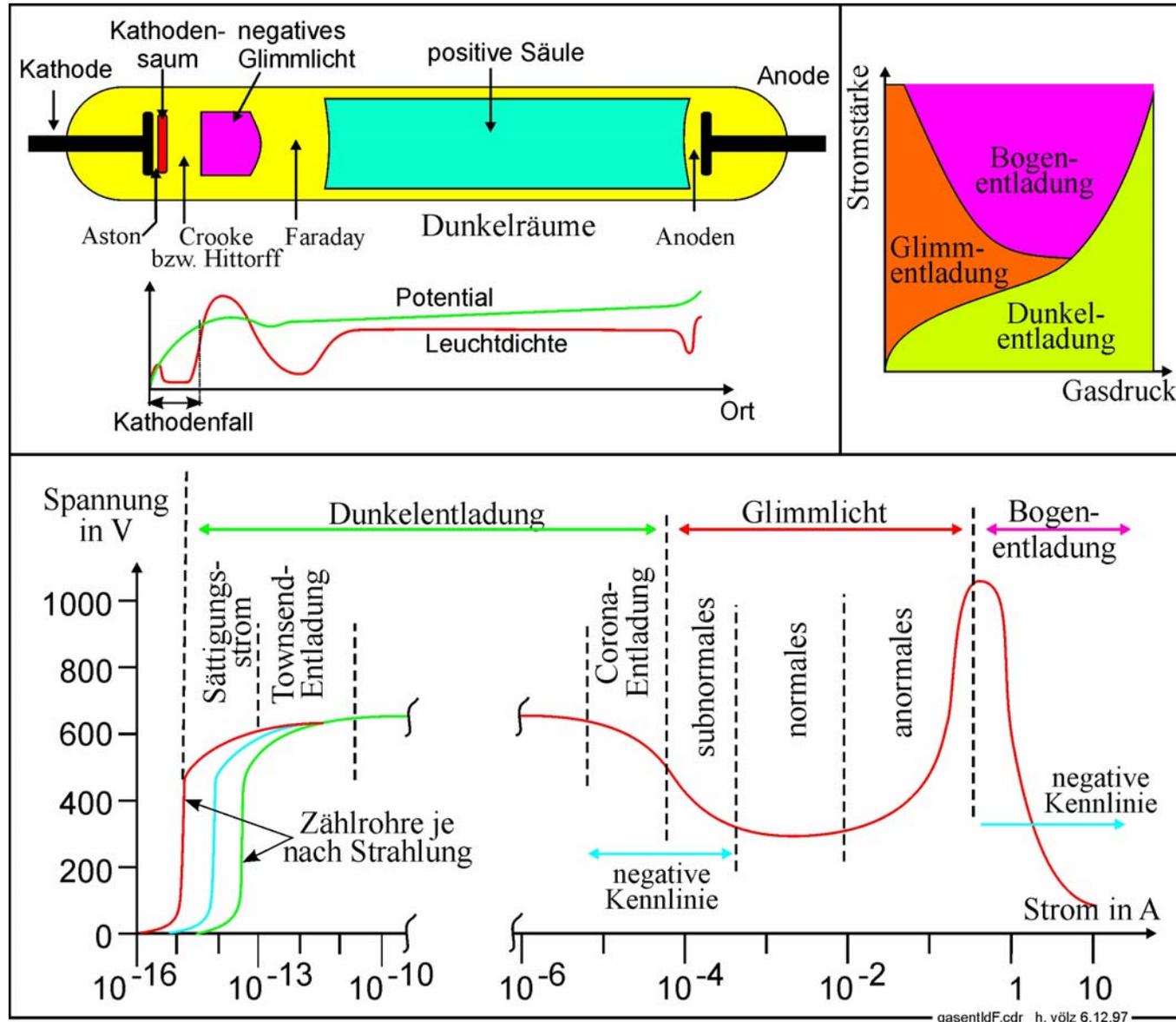
1957 *Vidicon*-Fernsehröhre

1964 RCA stellt *Farbfernseh-Bildröhre* mit 58-cm-Diagonale her

Ab 1970 wurde die *Anzeige* schrittweise durch *LCD-* bzw. *Plasma-Panels* (Flachbildschirme) ersetzt.

Ebenfalls ab 1970 entstanden für die *Aufnahme CCD-* und *CMOS-Sensoren* (elektronische Fotoapparate)





Gliederung

1. Signal-Störungen
2. Verstärkung allgemein
3. Röhren
- 4. Halbleiter**
5. Schaltungen
6. Schwingungserzeuger
7. Leistungsverstärker
8. Ergänzungen

Bändermodell

Zur Erklärung der Halbleiter ist die *Quantenphysik* erforderlich.

Bei einem einzelnen Atom können die Elektronen nur genau definierte Energiezustände (*Quantenzahlen*) annehmen.

Klassisch können sie durch einzelne *Kreis-* und *Ellipsen-Bahnen* umschrieben werden.

Für mehrere fest verkoppelte Atome z. B. im Kristall gilt aber das **PAULI-Verbot**. (WOLFGANG PAULI; 1900 - 1958).

Danach dürfen in einem System keine gleichen Quantenzustände auftreten.

Daher verschieben sich die Energieterme etwas gegeneinander, z. B. durch zusätzliche thermische Energie.

So werden aus den einzelnen Quantenzuständen *Energie-Bänder* für die Elektronen.

Für höhere Terme geht die *Zuordnung* der Elektronen zu den Atomen durch Überlappung verloren

Diese Elektronen sind *frei beweglich* (s. DRUDE-Theorie).

Die *Wahrscheinlichkeit* $f(W)$ der Energie W aller Elektronen gehorcht der FERMI-Statistik (ENRICO FERMI 1901 - 1954).

$$f_F(W) = \frac{1}{1 + e^{\frac{W - W_F}{k \cdot T}}}$$

Darin ist W_F das *Fermi-Niveau*. Bei dieser Energie ist die Hälfte der Quantenzustände besetzt.

Es bedeuten k = Boltzmann-Konstante und T = absolute Temperatur.

Für $T \rightarrow 0$ ist das FERMI-Niveau die Obergrenze aller Elektronen-Energien.

Die Energiebänder

Für die *Eigenschaften von Materialien* sind die beiden besetzten obersten Bänder wichtig:

- Das **Valenzband** (*lateinisch valentia* Stärke, Kraft) ist das höchste Band, bei dem alle Zustände besetzt sind. Auch wenn die Elektronen keinem Atom zugeordnet sind, besteht keine Bewegungsfreiheit (fehlende Terme!). Es reicht bis zur Energie W_V und bestimmt die *chemischen Eigenschaften* des Elements.
- Darüber befindet sich das **Leitungsband**. Es ist unvollständig mit Elektronen gefüllt oder enthält keine Elektronen. Seine untere Energiegrenze ist W_L .
- Zwischen beiden Bändern liegt das **verbotene Band**. Es entspricht dem Abstand zwischen Bandgrenzen. Es ist für Elektronen verboten, seine Energiebreite beträgt $W_g = W_L - W_V$ (von englisch gap).

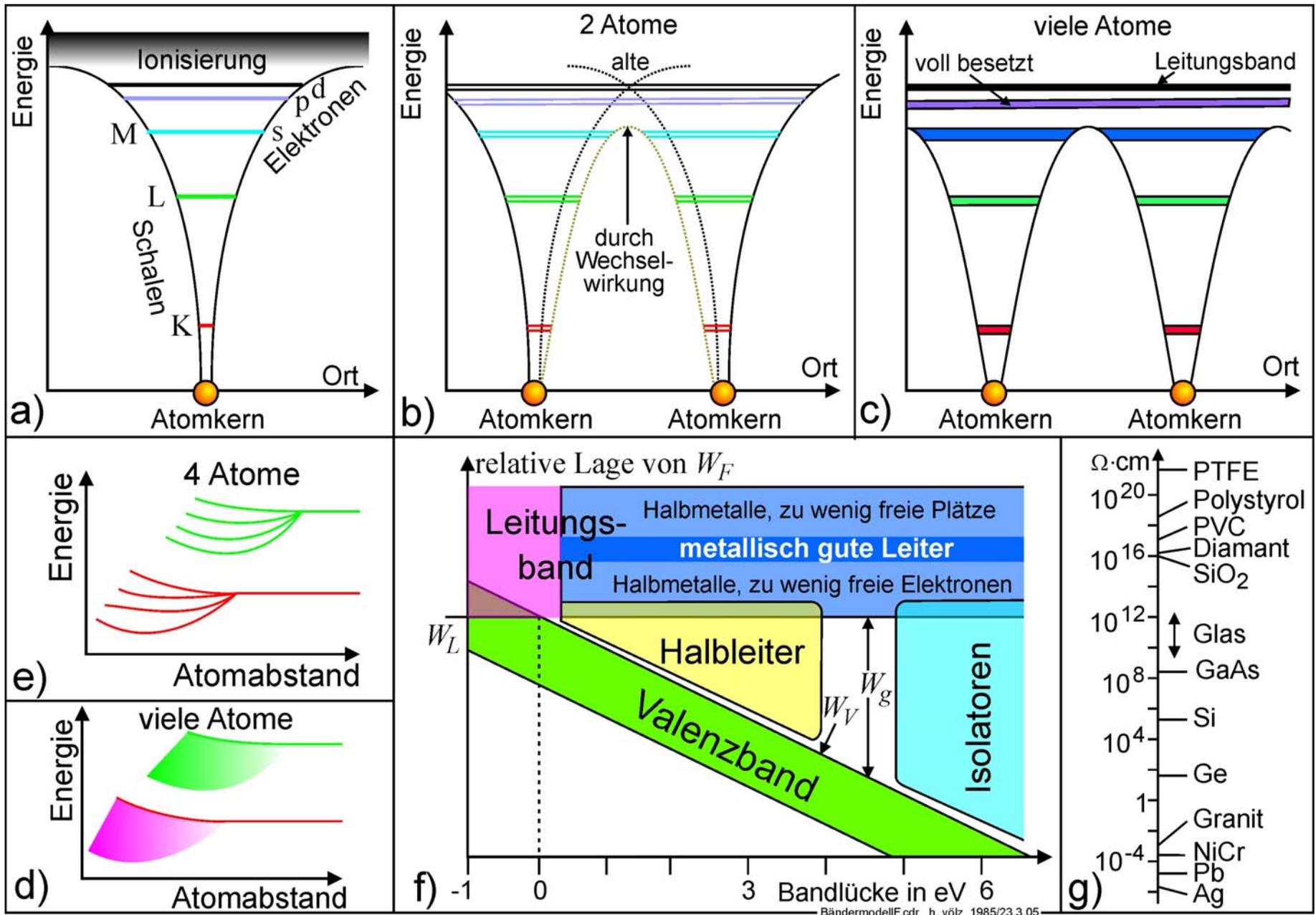
Je nach der *Breite* W_g des verbotenen Bandes werden *unterschieden*:

- $W_g > 7$ eV **Isolatoren**: Es gibt so gut wie keine frei beweglichen Elektronen.
- $W_g \approx 0$ eV **Leiter**: Die beiden Bänder überlappen sich. Es gibt daher viele frei bewegliche Elektronen. Außerdem besitzt die Leitfähigkeit eine geringe Temperatur-Abhängigkeit.
- $0 < W_g < 7$ eV **Halbleiter**. Die Besetzung des Leitungsbandes wird wesentlich durch die Temperatur verändert. Mit steigender Temperatur gelangen immer mehr Elektronen über den Gap ins Leitungsband. Dadurch nimmt Leitfähigkeit etwa proportional mit e^T zu. Das ergibt eine Gerade bezüglich $1/T$.

Generierung von Trägern = *thermische Energie* $W_{th} > W_g$ hebt Elektronen statistisch ins Leitungsband.

Rekombination = Elektron im Leitungsband kann wieder zurück ins Valenzband „fallen“, erzeugt (Licht-) Quant.

$W_g = \Delta E = h \cdot \nu = h \cdot c / \lambda$; Wellenlänge λ bzw. Frequenz ν , h die Plancksche Konstante, c die Lichtgeschwindigkeit.



BändermodellF.cdr h. vözl 1985/23.3.05

Dotieren von Halbleitermaterial

Die bisherigen Betrachtungen gelten für fehlerfreie *Monokristalle*.

Zu ihnen gehört die stark temperaturabhängige *Eigen-* bzw. *intrinsische Leitung*

(*lateinisch intrinsecus*, von *intra*, *secus* inwendig, innerlich, von innen her, aus eigenem Antrieb)

Fehlstellen entstehen durch unbesetzte Gitterpunkte, Fremdatome, besetzte Zwischengitterplätze \Rightarrow zusätzliche Terme. Absichtliche Erzeugung von Fehlstellen durch Fremdstoffe heißt **dotieren**, verändert Grundmaterial und FERMI-Niveau.

Zu ihnen gehört Energie W_D . Es gibt 2 Arten von **Störstellen-** bzw. **extrinsischer Leitung**

(*lateinisch extrinsecus* von *extrim*, *exterus secus* von außen her angeregt)

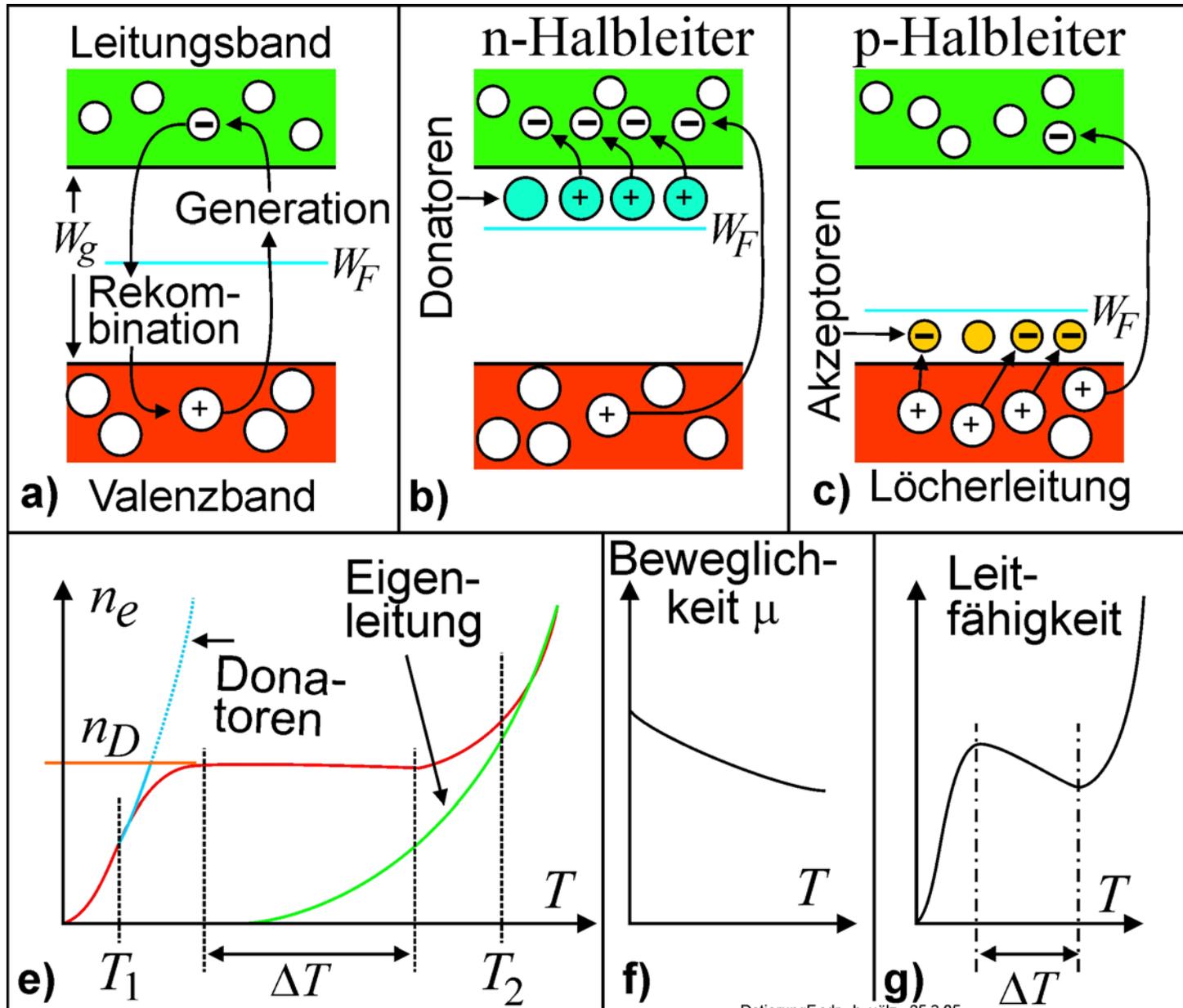
- **Donatoren** (*lateinisch donator* Geber, Spender, Stifter) erzeugen Terme in Leitungsband-Nähe. Thermische Energie kann wegen $W_D \ll W_g$ kann von dort leichter Elektronen in das Leitungsband heben. ***n-Leitung***.
- **Akzeptoren** (*lateinisch acceptor* Empfänger) Störstellen in Valenzband-Nähe, entziehen bei geringer thermischer Energie dem Valenzband Elektronen, hinterlassen dort Atome mit fehlenden Elektronen \rightarrow Löcher. Es entsteht ***Löcherleitung*** mit virtuellen positiven „Elektronen“ ***p-Leitung***.

In einem Material können Elektronen oder Löcher überwiegen.

Daher gibt es unabhängig von n- und p-Leitung **Majoritäts-** und **Minoritäts-Leitung**

Zusammenwirken von Eigen- mit p- bzw. n-Leitung führt zu verschiedenen Leitungsmechanismen $f(T)$.

Für viele Anwendungen ist der **lineare** (temperatur-unabhängige) **Teil der Kurve** entscheidend.



pn-Übergang

Werden p - und n -Material **unmittelbar aneinander gefügt**, so entsteht ein pn -Kontakt (-Übergang).

In seiner Umgebung verschieben sich bei beiden Materialien das Leitungs- und Valenzband.

So diffundieren Ladungsträger in beide Richtungen (*lateinisch dis* auseinander, zwischen *fusum* gießen, fließen lassen).

Dadurch entsteht eine Raumladung, die der Diffusion entgegen wirkt \Rightarrow **dynamisches Gleichgewicht**.

Das Diffusionspotential U_D bewirkt einen verbogenen Feldstärkeverlauf in der Umgebung der Raumladung.

Die **Raumladungszone** (-gebiet) = Sperrzone besitzt eine Länge $\approx 0,1 \mu\text{m}$ und großem elektrischem Widerstand:

$$U_D = \frac{k \cdot T}{e_0} \ln \frac{n_i^p}{n_i^n}.$$

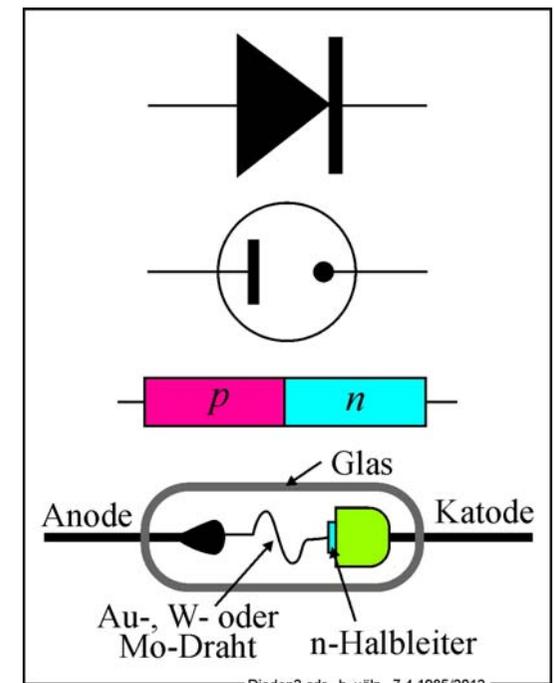
Je nach Stromrichtung gibt es einen **Durchlass-** und **Sperrbereich**.

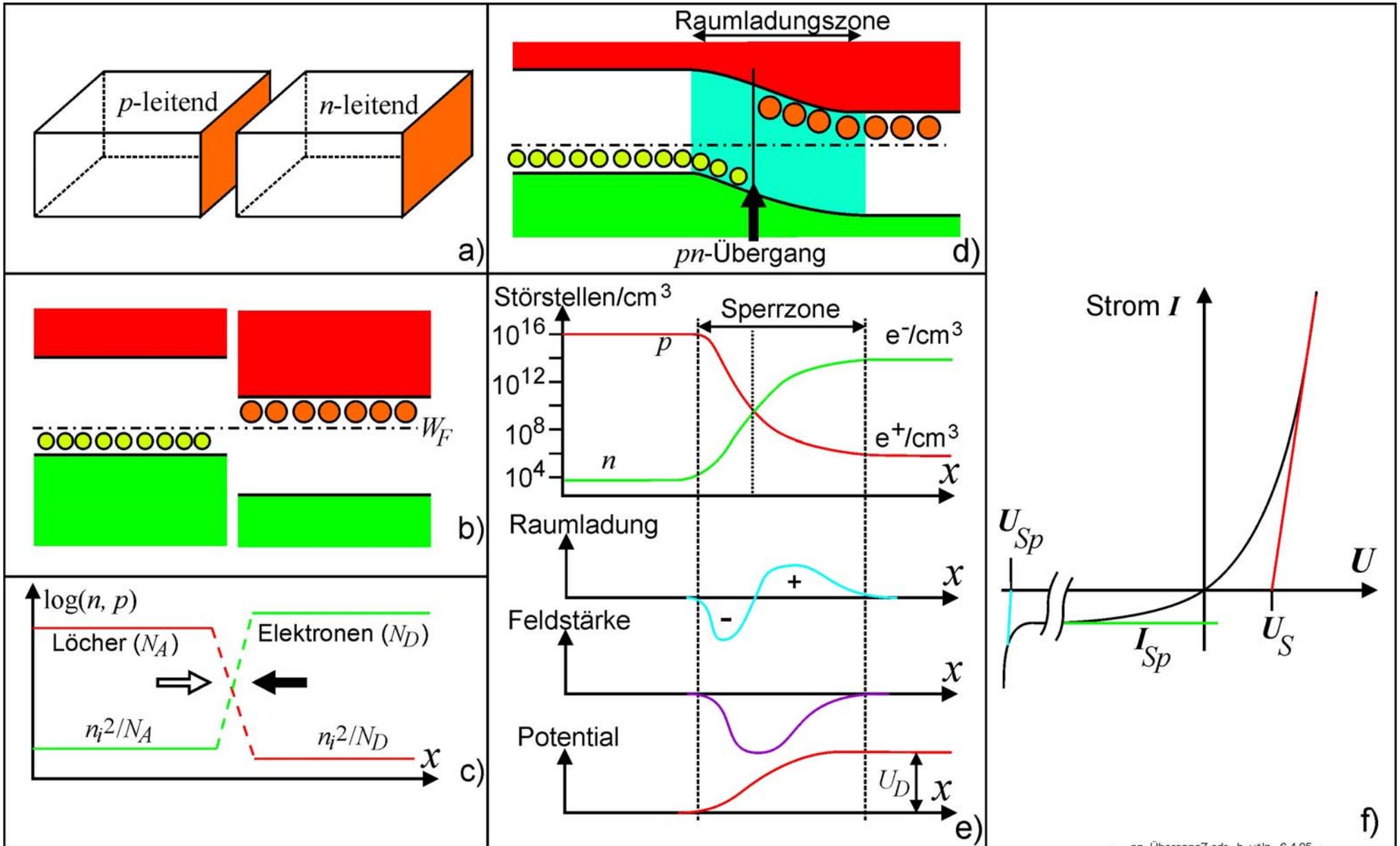
In Sperrrichtung existiert ein **Sättigungssperrstrom** I_{Sp} (kleine Dioden $\approx 10^{-3} \mu\text{A}$)

Mit der angelegten Spannung U gilt die grundlegende Gleichung der Halbleitertechnik.

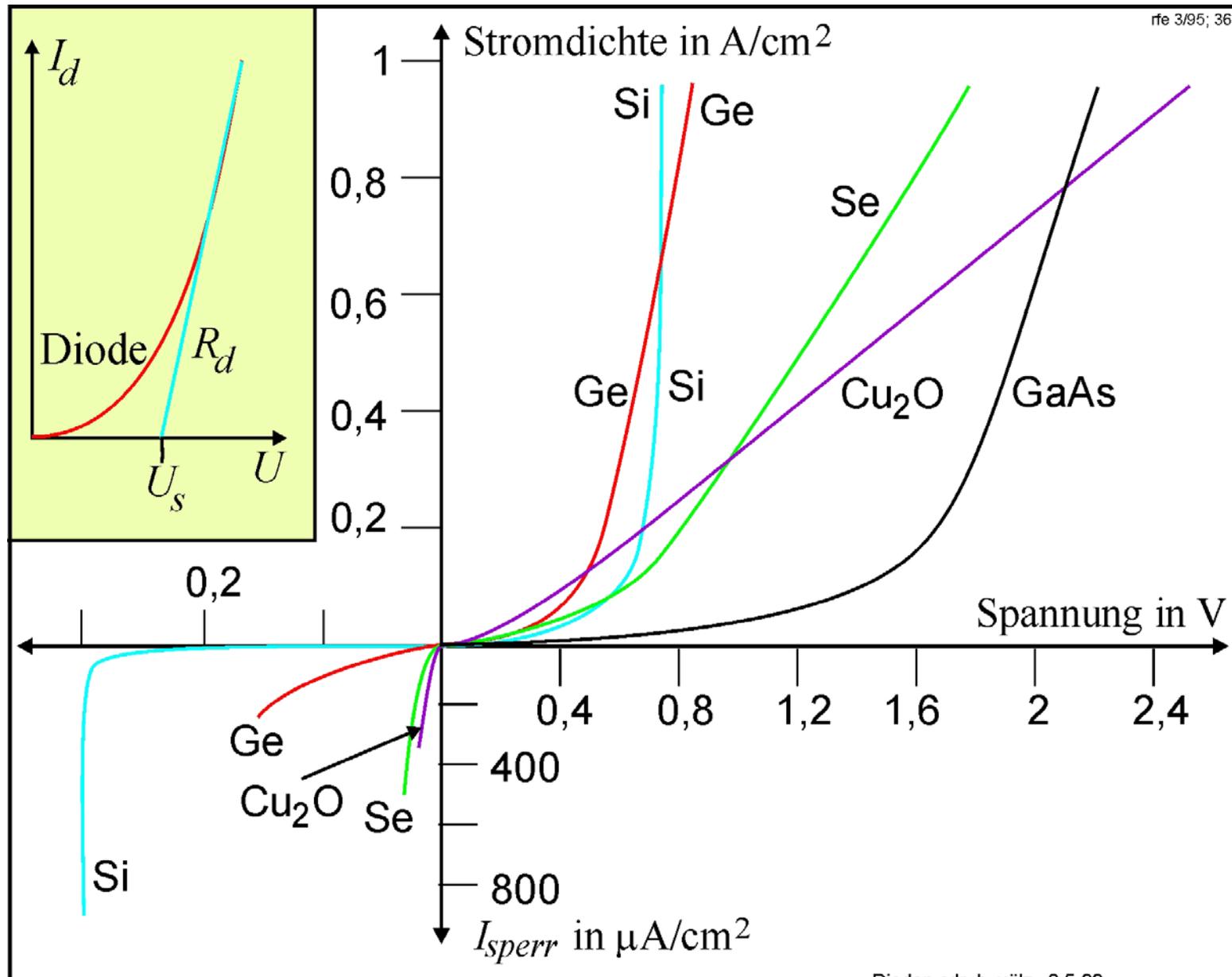
$$I = I_{Sp} \left(e^{\frac{e_0 \cdot U}{k \cdot T}} - 1 \right).$$

bei Zimmertemperatur beträgt $k \cdot T / e_0 \approx 26 \text{ mV}$



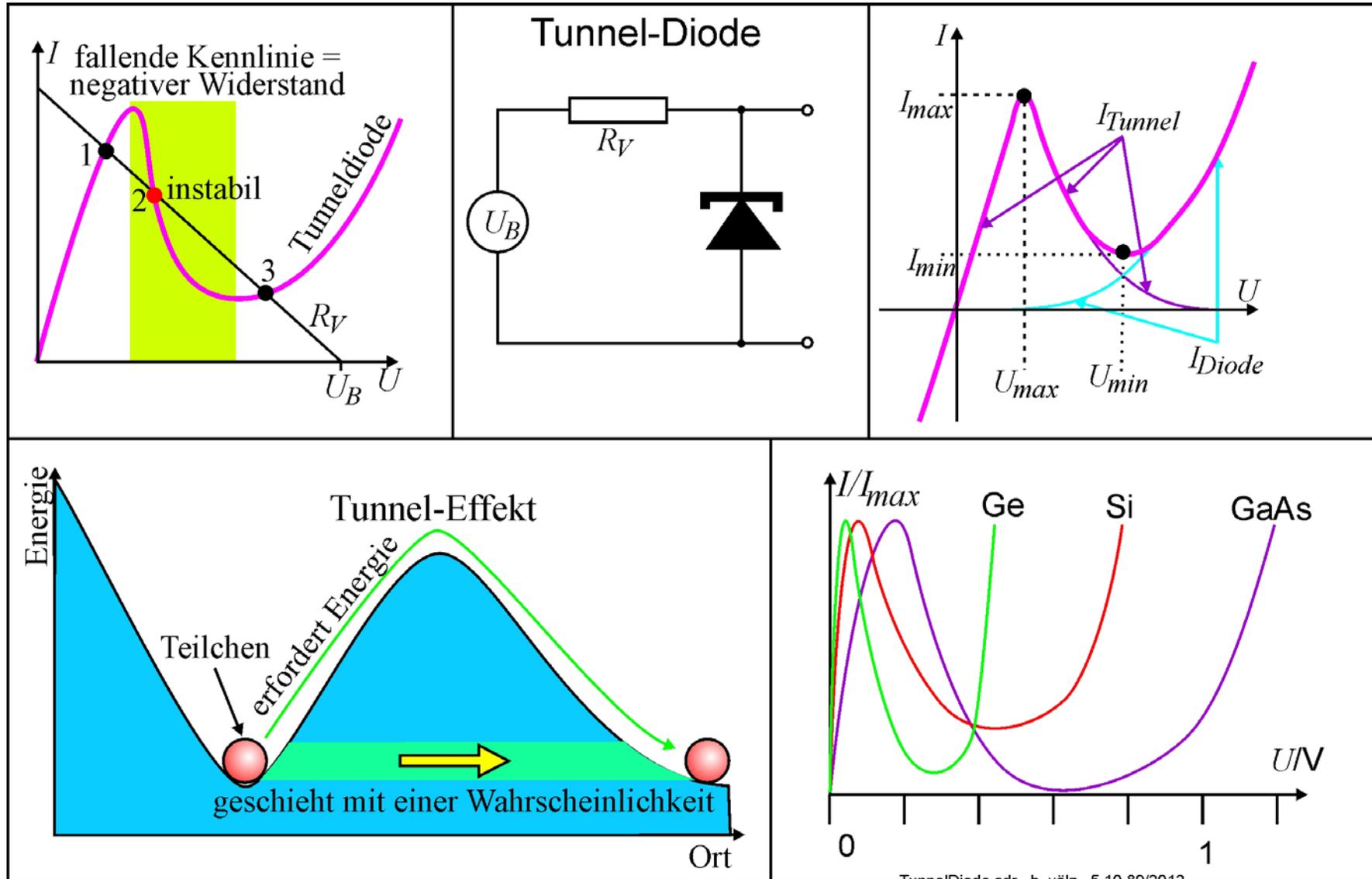


pn_ÜbergangZ.cdr h. völz 6.4.05



Dioden.cdr h. vözl 2.5.99

Bei einer **Tunnelodiode** „durchwandern“ Ladungsträger den Potentialwall des sehr kurzen Raumladungsgebiets. Dabei entsteht eine Strom-Spannungskennlinie mit *negativen Kennlinienteil* (s. u.).



TunnelDiode.cdr h. vözl 5.10.89/2012

Metall-Isolator-Halbleiter-Übergang

Für viele Halbleiter ist der Metall-Isolator-Halbleiter-Übergang (**MIS**, semiconductor) wesentlich.

Auf Si-Kristall (**Bulk**) ist ein Isolator (meist SiO_2) der Dicke d_i und drüber ein Metall-Kontakt, das **Gate**, angeordnet.

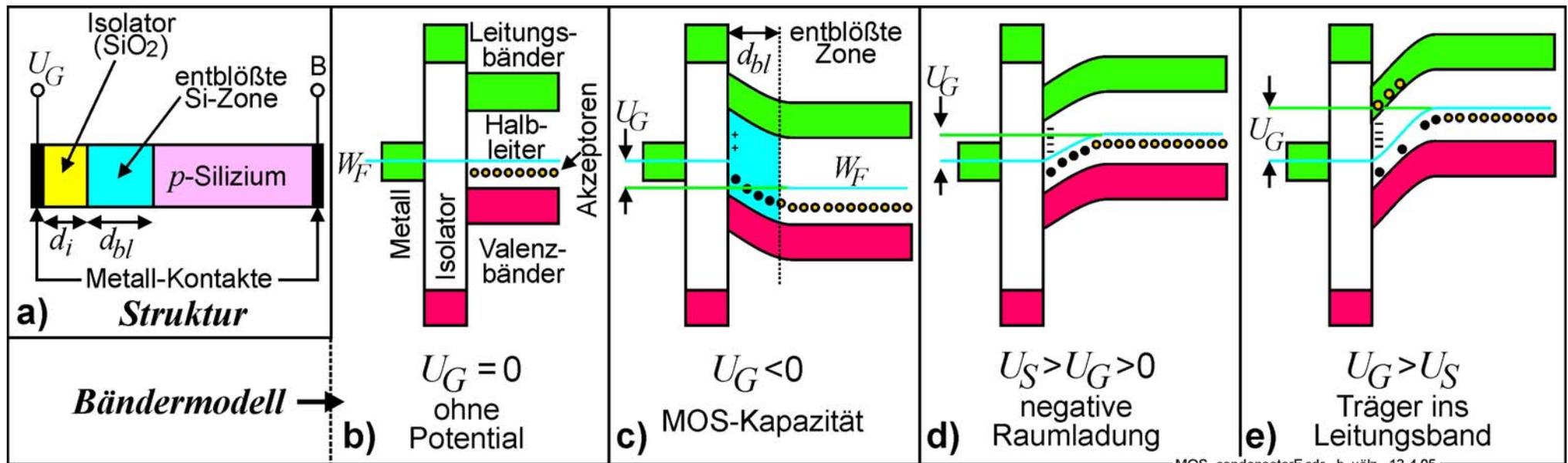
Die drei Substanzen sind **quantentheoretisch** eine **Einheit**.

Dabei muss das FERMI-Niveau W_F eine waagrechte Linie ergeben.

Mittels der Spannung U_G erfolgt eine Verschiebung der Bänder.

Dabei tritt eine Verarmungs- = **entblößte Zone** d_{bl} auf.

Ihre Tiefe (Breite) lässt sich mit der Spannung verändern \rightarrow Änderung der Kapazität C_{BG} .



MOS_condensatorF.cdr h. vözl 13.4.05

CCD

Die Dicke d_{bl} der entblößten Zone wird mit U_G verändert. Mit den Konstanten d_0 und U_0 gilt näherungsweise:

$$d_{bl} \approx d_0 \sqrt{U_G - U_0}.$$

In diese Zone können **Minoritätsladungen** eingebracht und relativ langlebig (ms bis s) „**gespeichert**“ werden. Dieser Effekt führt zur **CCD** = charge coupled device = ladungsgekoppelte Bauelement.

In d_{bl} verhalten sich diese Träger wie eine **Flüssigkeit** in einem Topf, daher die Bezeichnung **Potentialtopf**.

Die Trägerinjektion kann u. a. von einem *pn*-Übergang oder durch Lichtquanten erfolgen.

Die speicherbare Ladungsmenge hängt von d_{bl} , ε_i des Isolators, Potentialtopf-Tiefe $X_p(U_G)$ und Fülltiefe X_f ab:

$$Q \approx \frac{\varepsilon_i}{d_{bl}} \cdot (X_p - X_f).$$

Befinden sich mehrere Potentialtöpfe in unmittelbarer Nachbarschaft so kann ein „**hinüberfließen**“ der Ladung erfolgen.

Mit je einen **pn-Übergang** für den **Ein-** und **Ausgang** entsteht eine sehr einfache Halbleiterstruktur notwendig.

Ihr Prinzip wurde 1971 von BOYLE und SMITH vorgestellt.

Da in jedem Topf die Ladungsmenge kontinuierlich verändert werden kann, lassen sich **mehrere Bit/Topf** speichern.

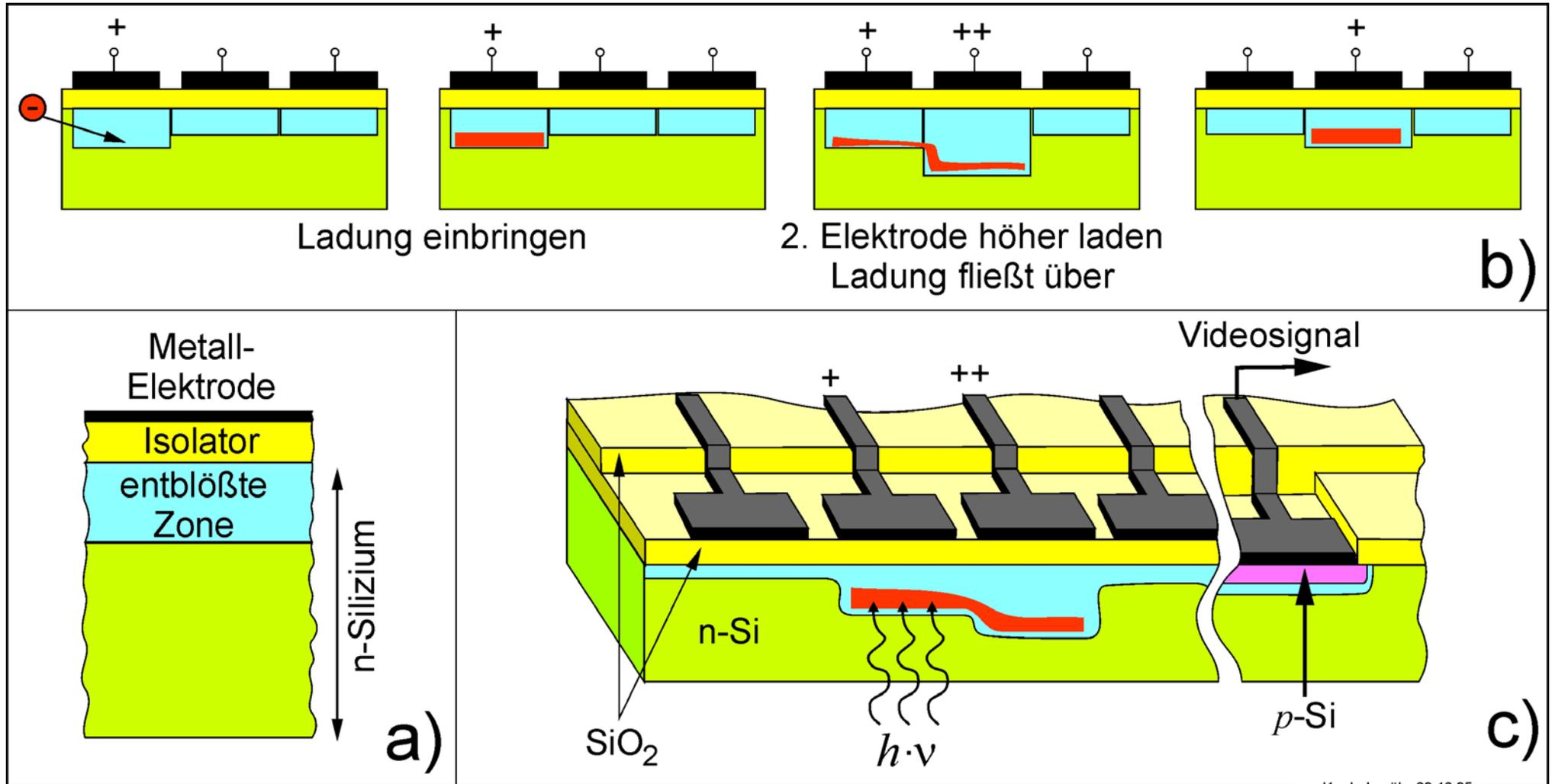
Ende der 70er Jahre lagen CCD-Speicher mit 64 KBit vor und es wurden große **Hoffnungen** in diese Technologie gesetzt.

Doch bald überholten sie die **dRAM** und es verlagerte sich die Entwicklung auf **optische Sensoren**.

Heute sind viele **Zeilesensoren für Scanner** und **Bildsensoren für elektronische Fotoapparate** so aufgebaut.

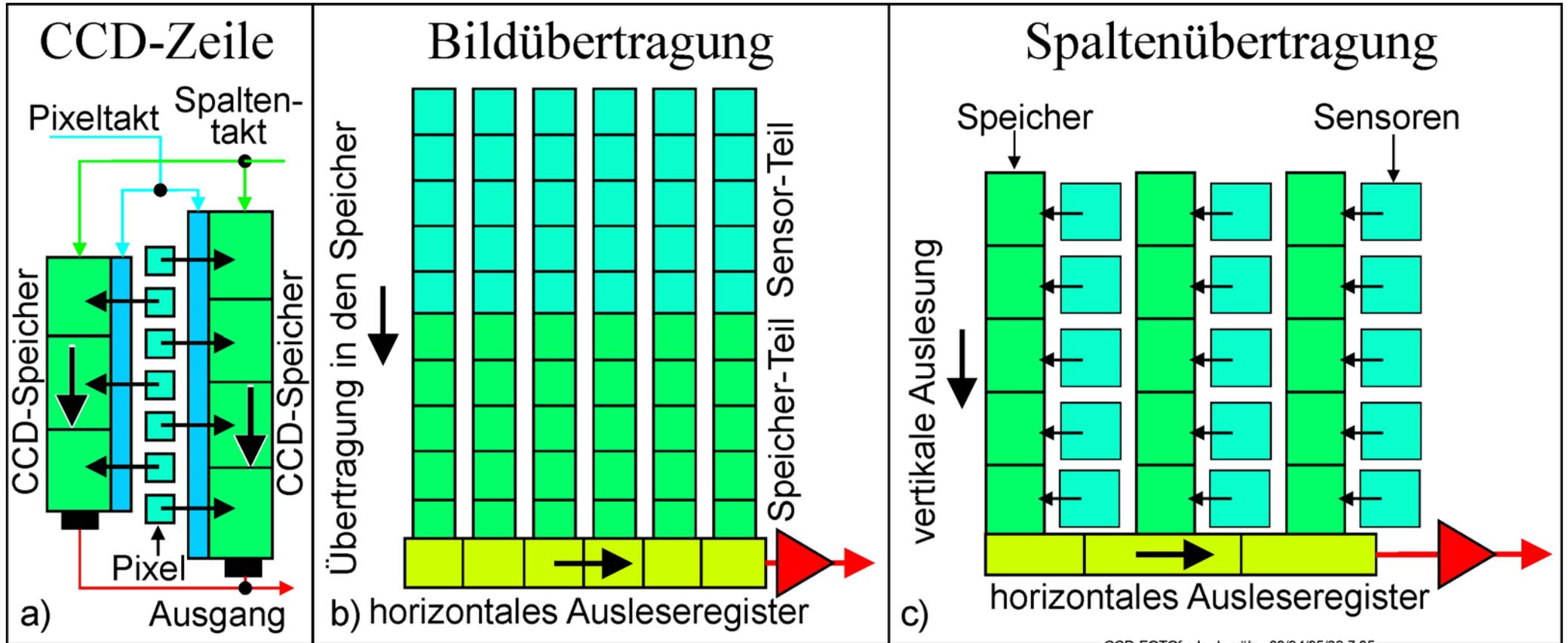
Hinzugekommen sind noch eine CMOS-Varianten großer Ähnlichkeit.

Prinzip der Ladungsverschiebung und Grundstruktur der CCD



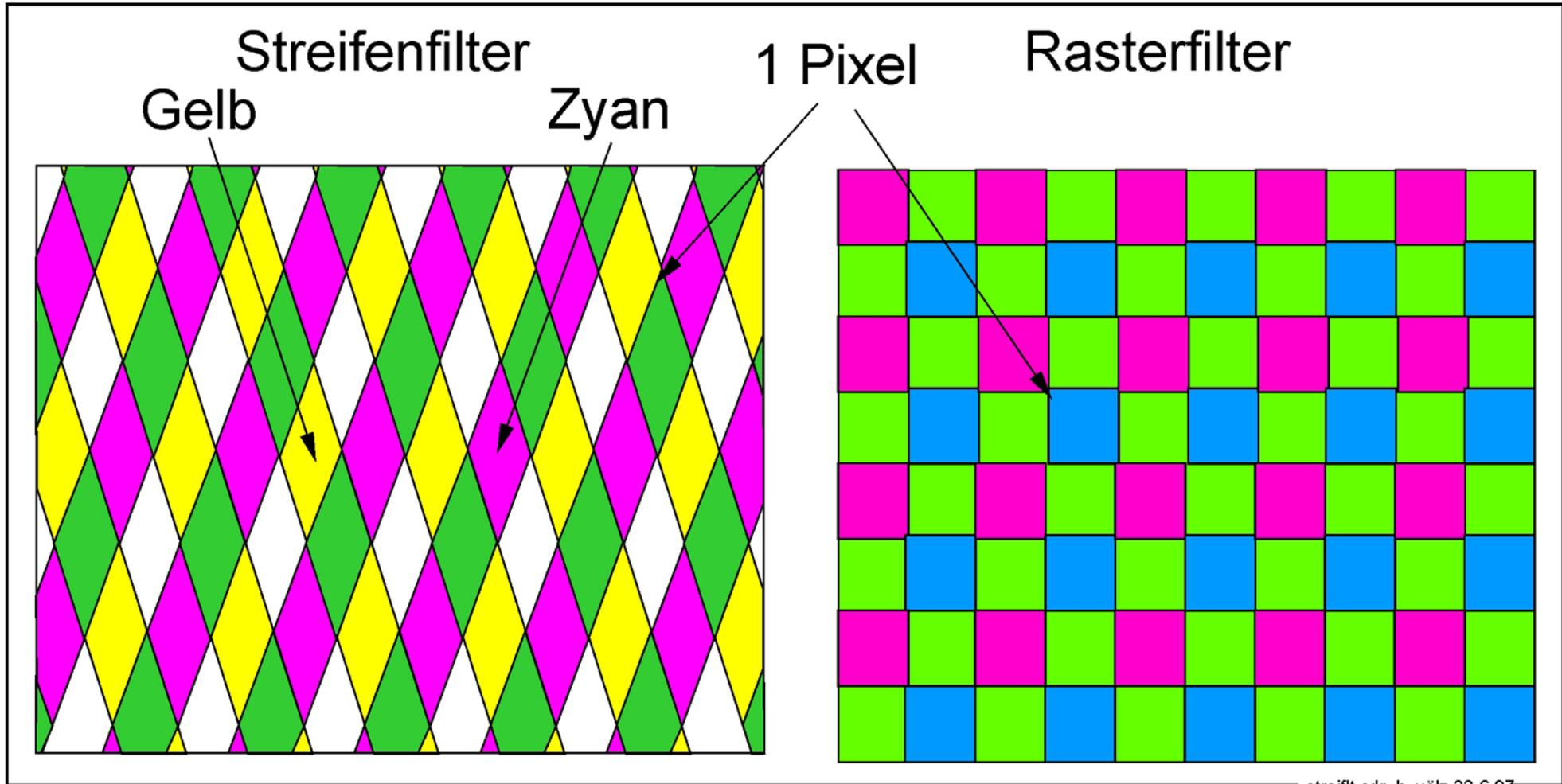
cod1.cdr h. vözl 29.12.95

Aufbau von CCD-Sensoren für elektronische Fotoapparate



CCD-FOTOof.cdr h. völz 89/94/95/23.7.05

Zwei Beispiele für vorgelagerte Farbfilter



Feldeffekt-Transistoren

Historisch legt der **Bipolar-Transistor** den technologischen Beginn der Halbleiterverstärker auf 1947 fest. Gedanklich ist der **Feldeffekt-Transistor** (FET) deutlich älter, war jedoch technologisch zunächst nicht realisierbar. Außerdem ist seine **Wirkungsweise einfacher** zu beschreiben. Ferner benötigt er wie die Röhre **keine Steuerleistung**. Bereits 1926 meldete sein Prinzip JULIUS EDGAR LILIENFELD (1881 – 1963) zum Patent an. Ferner schlug ihn 1934 OSKAR HEIL vor. Verwirklicht wurde er jedoch erst 1960 in der MOS-Technologie.

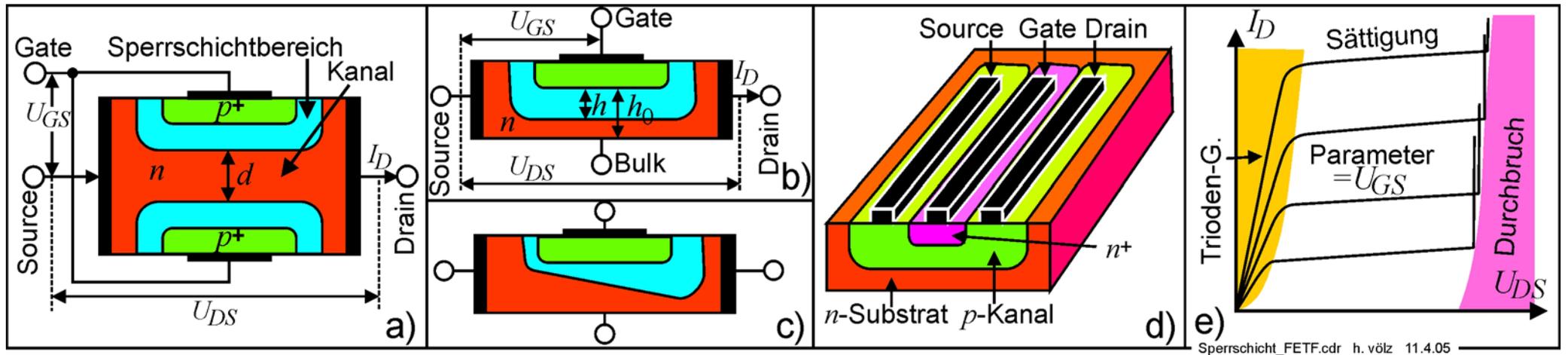
Ein Vorläufer ist der **SFET** (Sperrschicht), auch **JFET** (*englisch* junction Anschluss, Knoten Übergang) genannt. Bei ihm wird die trägerverarmte – nahezu isolierende – Raumladungszone des pn-Übergangs genutzt. Ursprünglich wurde ein **dünnere Zylinder** *n*-leitendes Halbleitermaterial, an Enden kontaktiert. Rundherum wird im Mittelteil ein *p*-Kontakt als Gate angebracht und gesperrt betrieben. Mit der angelegten Sperrspannung verändern sich die Restbreite und damit der Widerstand des „Kanals“. Es existieren also die **drei Anschlüsse**

- **Source** (S; *englisch* Quelle) = Bezugspotential für die weiteren Spannungen.
- **Drain** (D; *englisch* Abfluss, Abzug, Senke)
- **Gate** (G; *englisch* Tor, Tür, Zugang, Eingang, Pforte)

Da der **Sperrstrom** für Silizium $<10^{-9}$ A beträgt ergibt ein **Eingangswiderstand** $\approx 10^9 \Omega$ fast \Rightarrow **leistungslose Steuerung**. Bezüglich der Kennlinie lassen sich folgende **Bereiche** unterscheiden

- **Diode**-Bereich.
- **Abschnür**- = Pentoden- = Sättigungsbereich oder Pinch-off-Effect = **üblicher Betrieb**.
- **Durchbruch**.

Es gibt auch eine **Planar-Variante**, bei der das Grundmaterial = **Bulk** heißt (*englisch* Größe, Masse).



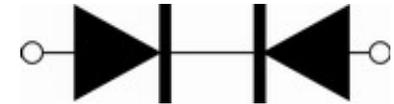
MOSFET

metal oxide semiconductor; *lateinisch conductor* Mieter, Pächter und *semi* halb

Er eine **Kombination** von 2 *pn*-Übergängen mit einem MIS-Anschluss.

Die beiden *pn*-Übergänge sind gemäß dem Bild gegenpolig hintereinander geschaltet.

Dadurch ist bei jeder Polung der angelegten Spannung immer **ein *pn*-Übergang gesperrt**.



Nahe dem relativ langen mittleren Gebietes wird isoliert (meist SiO_2 ca. $10^{15} \Omega$) eine **Gate** angeordnet.

Eine hier angelegte Spannung kann dort **Träger induzieren** (durch Inversion).

Sie können dann als Strom den jeweils gesperrten *pn*-Übergang passieren.

So steuert das Gate **leistungslos den Stromfluss** von Source nach Drain in einem quasi-leitenden **Kanal**.

Es ergeben sich ähnliche Eigenschaften wie beim SFET

Der MOSFET heißt auch **MISFET** (metal insulated semiconductor oder Si) oder

IGFET (insulated gate; *lateinisch insularis* eine Insel betreffend) oder

im Gegensatz zum Bipolar-Transistor **Unipolar**-Transistor

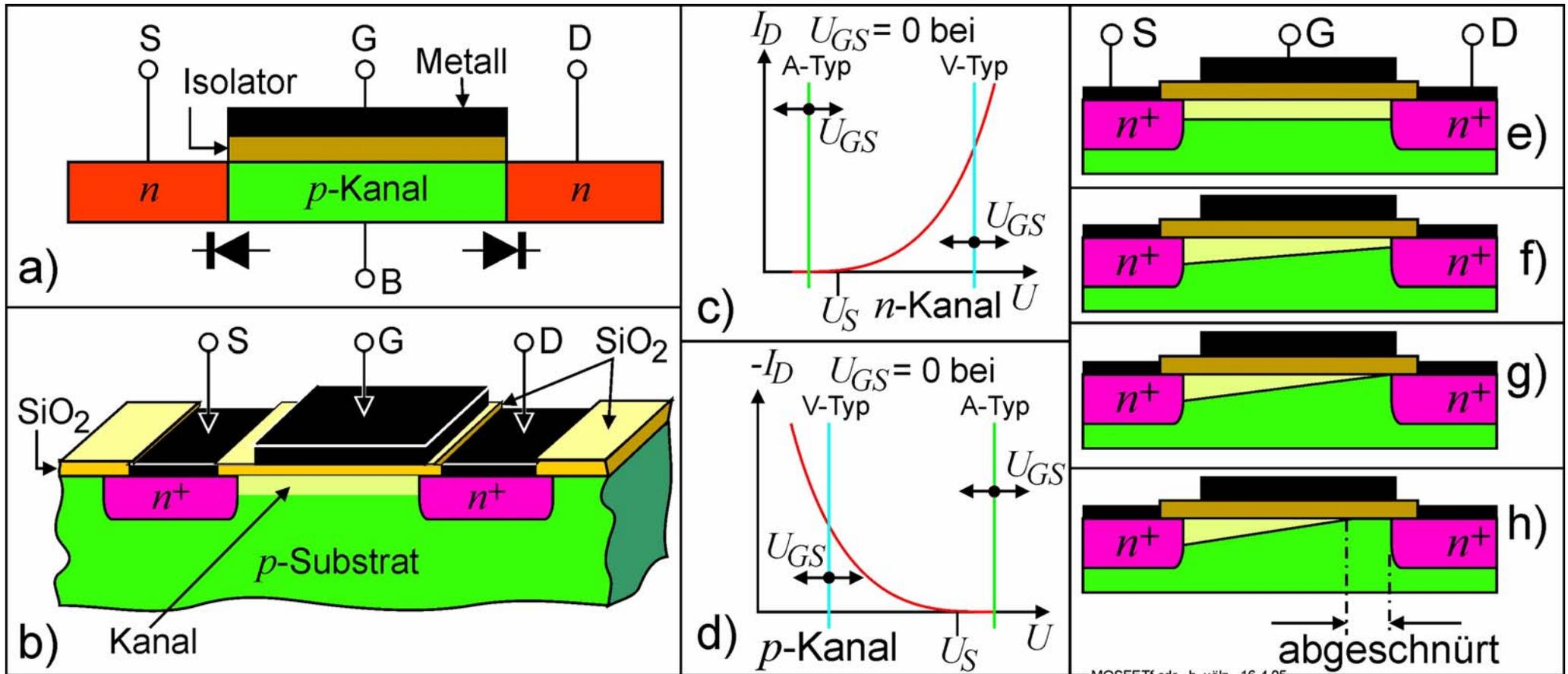
Es gibt zwei komplementäre Varianten: *pn*p- und npn-MOSFET

Sie ermöglichen die die CMOS-Technik (complimentär) s. Digitaltechnik Teil 4

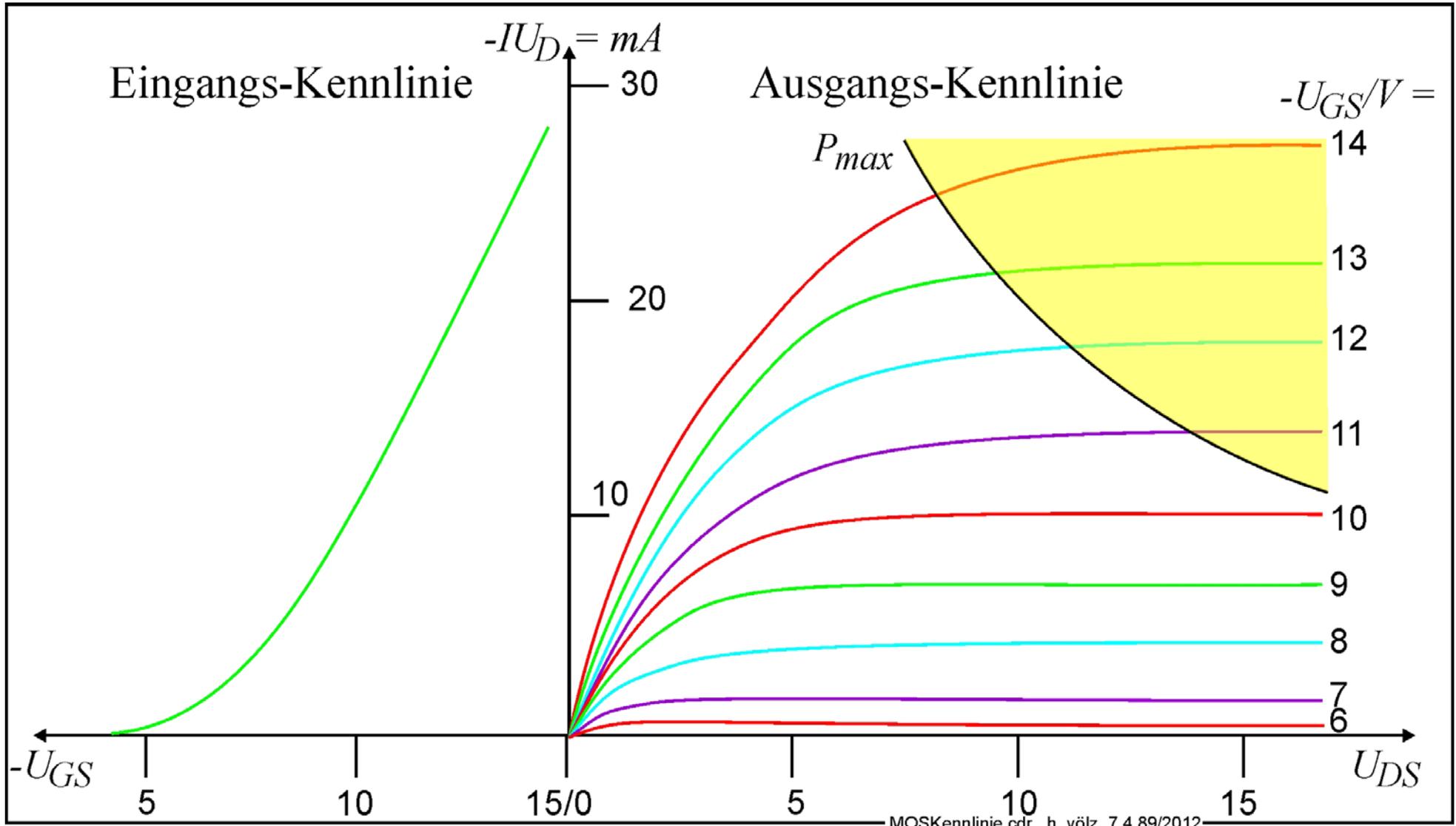
Je nach der Lage des Beginns der Kennlinien werden unterschieden:

- **Anreicherungs**-Typ (A-Typ) $\rightarrow U_{GS} = 0$ kein Drainstrom ($I_D = 0$); häufig *p*-Kanal
= selbstsperrender bzw. **Enhancement**-Typ (*lateinisch Enhancement* Erweiterung, Anreicherung, Steigerung)
- **Verarmungs**-Typ (V-Typ) bei $U_{GS} = 0$ fließt ein Strom
= Entblößungs-, selbstleitender bzw. **Depletion**-Typ (*lateinisch deplere* ausleeren); häufig *n*-Kanal

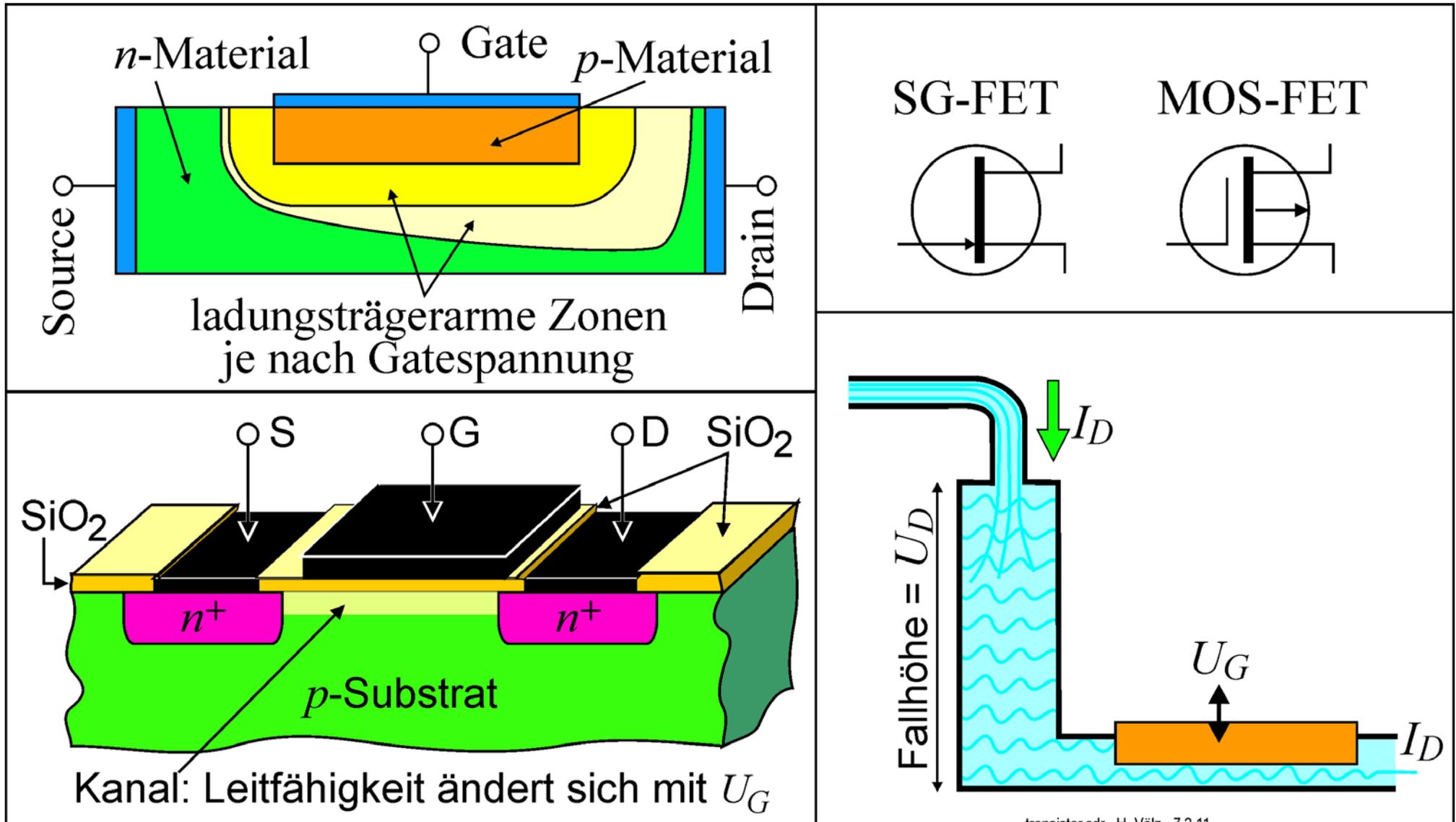
Aufbau und Eigenschaften eines MOSFET



Typische Kennlinien eines MOSFET



Anschauliche Darstellung der FET-Wirkungsweise



Bipolar-Transistor

Ähnlich den MOSFET besteht ein Bipolar-Transistor aus zwei pn -Übergängen, jedoch:

- Die mittlere Zone (n oder p) ist *extrem schmal*.
- Sie ist über einen Kontakt (**Basis B**) herausgeführt.
- Eine Diode (**Emitter E**) arbeitet im Durchlassbetrieb mit U_{EB} und injiziert durch I_E so Ladungsträger.
- Die zweite Diode (**Kollektor C**) wird gesperrt betrieben.
Dorthin diffundieren die Ladungsträger und werden dann stark beschleunigt.

Der Emitter-Strom I_E ist die **Eingangsgröße** und bewirkt den fast gleichen Kollektor-Strom $I_C \approx I_E$ als **Ausgangsgröße**.

Es erfolgt also *keine leistungsarme* oder gar -freie Steuerung!

Die **Verstärkung** erfolgt durch die erhebliche Beschleunigung des von I_E durch die große Kollektor-Spannung U_{CB} .

Beachten! $N = U \cdot I$

Emitter (lateinisch *emittere* herausgehen lassen, ausschicken).

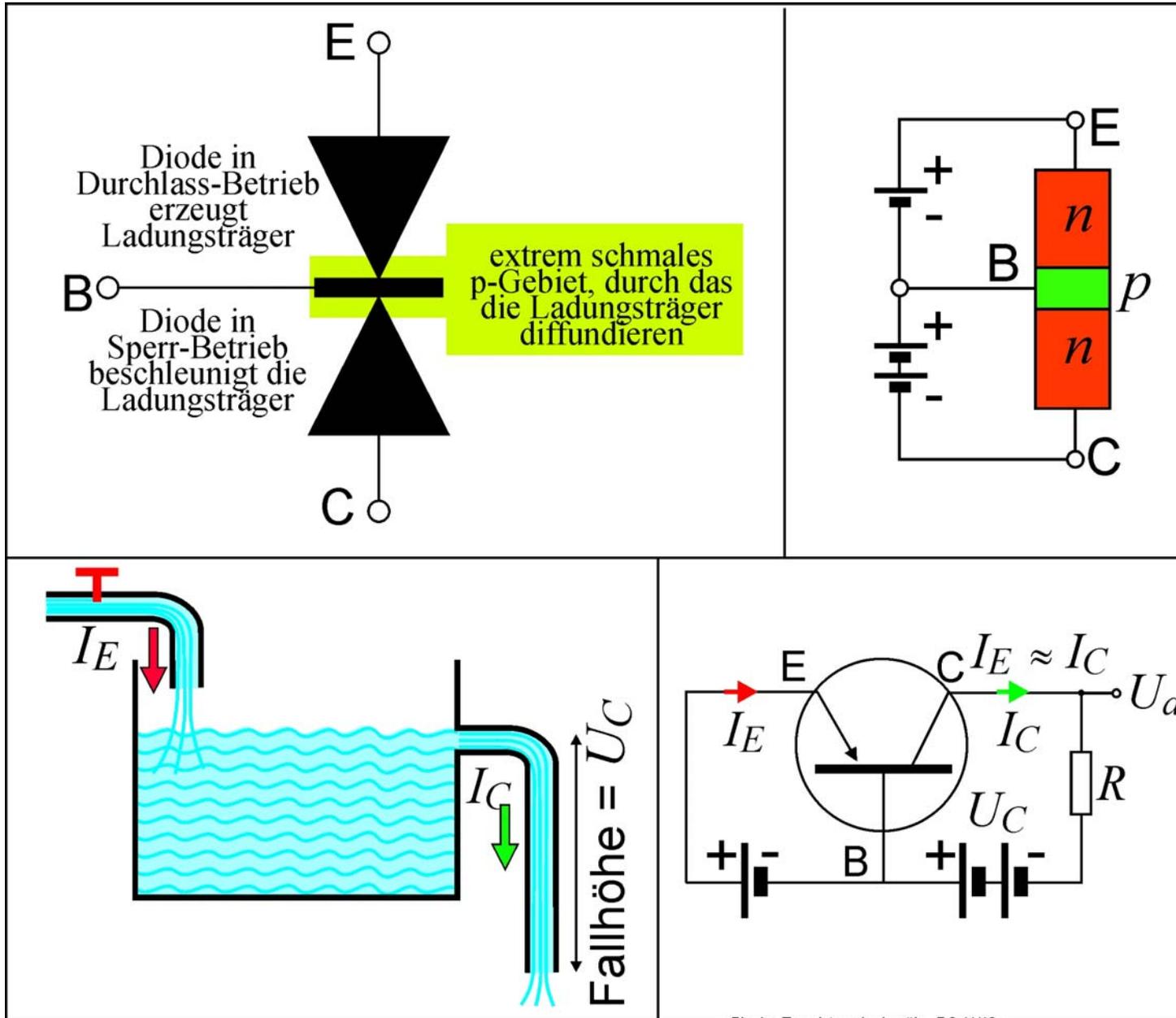
Induzieren (lateinisch *inicere* hineinwerfen, einflößen).

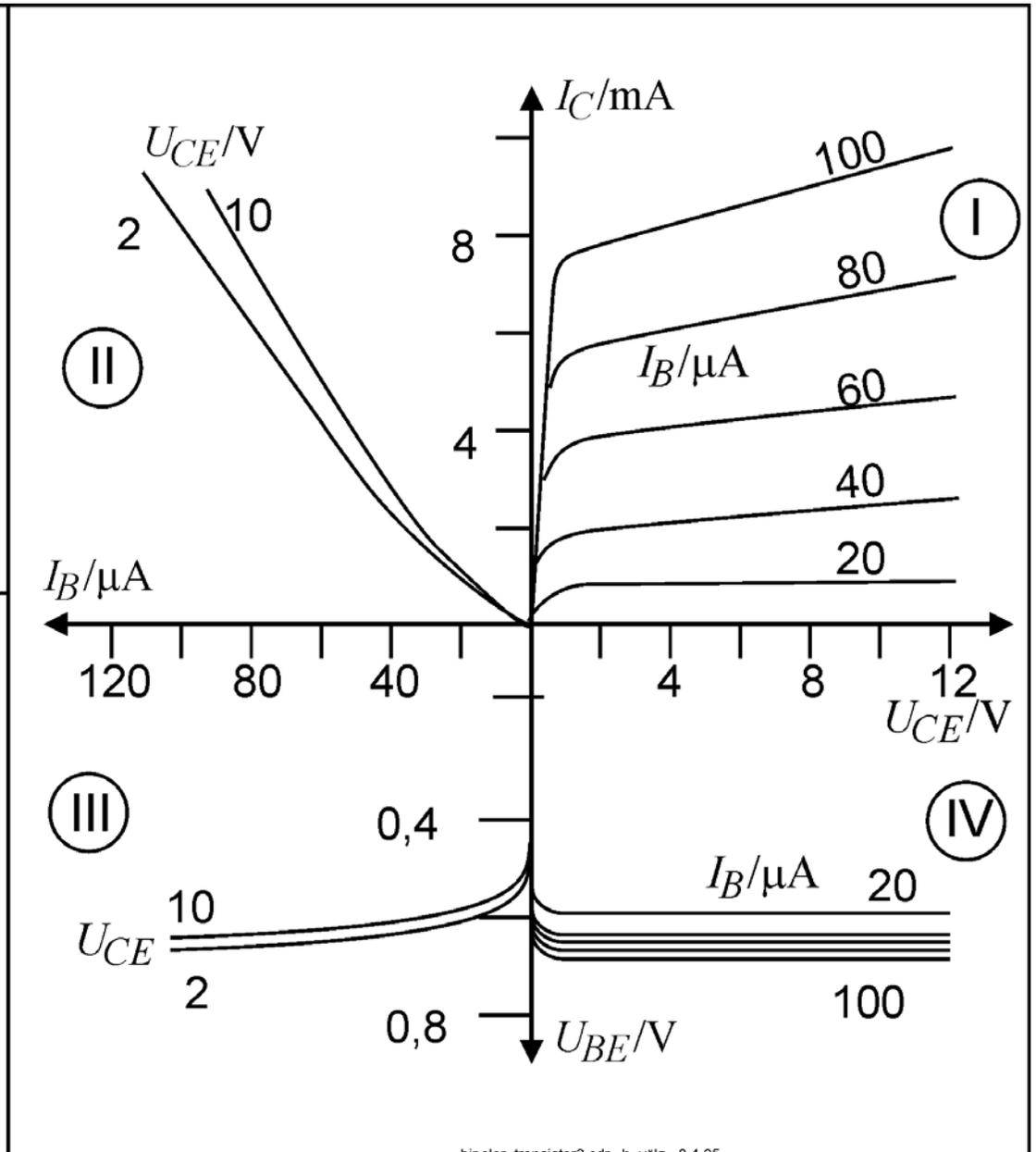
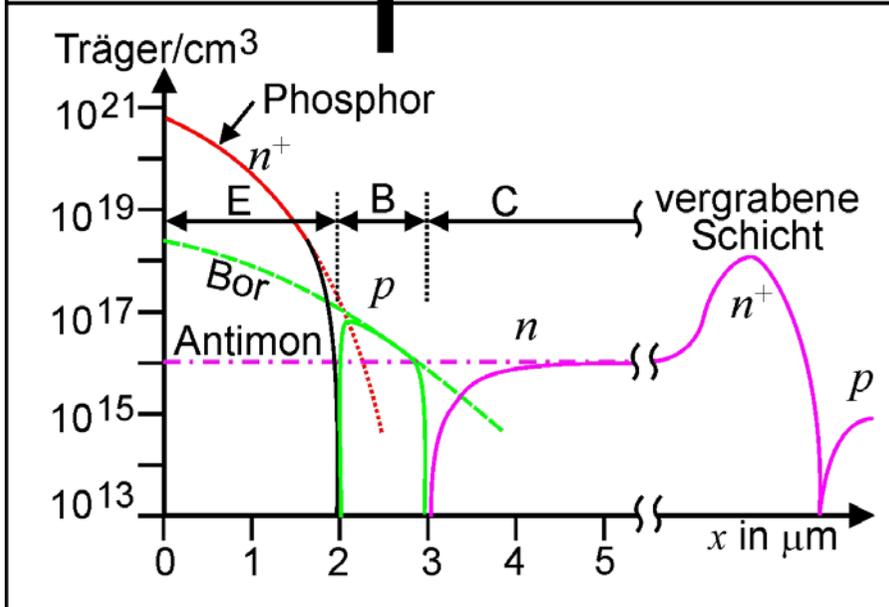
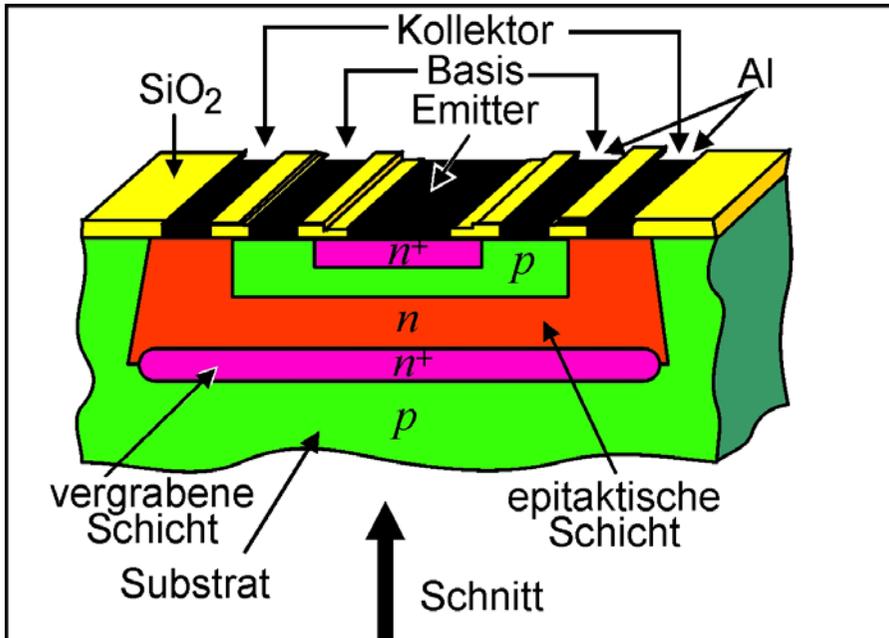
Kollektor (lateinisch *colligere* einsammeln, *collecta*).

Mit Kopplungsfaktoren A_{EC} bzw. A_{CE} gilt vereinfacht:

$$I_C = I_{Sp,C} \left(e^{\frac{e_0 \cdot U_{CB}}{k \cdot T}} - 1 \right) \cdot \left(1 - A_{E,C}(U_{EB}) \right).$$

Für die Kennlinien-Darstellung sind 4 Quadranten erforderlich.





bipolar_transistor3.cdr h. vözl 8.4.05

Gliederung

1. Signal-Störungen
2. Verstärkung allgemein
 3. Röhren
 4. Halbleiter
 - 5. Schaltungen**
6. Schwingungserzeuger
7. Leistungsverstärker
8. Ergänzungen

Verstärkerschaltungen

Um einen Verstärker zu erhalten, müssen verstärkende Bauelemente *in eine Schaltung eingefügt* werden. Neben denen mit aktiven Bauelementen – *Röhren und Transistoren* – gibt es *auch indirekte Verstärker*. Sie nutzen u. a. *negative Kennlinien* (Widerstände), *Resonanz* oder *parametrische* Eigenschaften (s. u.). Der große Variantenreichtum aller Verstärker kann in zwei Hauptgruppen eingeteilt werden:

1. **Kleinsignal**-Verstärker, bei denen Verstärkungsfaktor, Frequenzgang und Linearität wichtig sind. Sie stellen meist nur kleine Ausgangsspannungen von wenigen, selten hundert Volt bereit. Die für sie benötigte (Betriebs-) *Energie* ist meist vernachlässigbar *klein*.
2. **Leistungs-** = *Großsignal*-Verstärker müssen große Signalenergien erzeugen und zwar viele W, z. T. sogar MW und GW oder sehr hohe Spannungen >100V. Hierfür sind besondere Bauelemente (u. a. *Leistungstransistoren*) und *Schaltungen* erforderlich. Wesentlich ist ein guter *Wirkungsgrad* bzgl. Ausgangs- zur Hilfsenergie.

Viele *Verstärkerschaltungen* existieren heute als vollständig *integrierte Bausteine*. Hier folgen nur *Beispiele* von Grundschaltungen für *kontinuierliche Signale*. *Digitale* Verstärker kommen fast nur in der Digitaltechnik vor (s. Abschnitt 4).

Betriebsarten der aktiven Bauelemente

Röhren und Transistoren haben drei wesentliche Anschlüsse:

1. **Eingang:** Gitter, Gate oder Emitter.
2. **Masse = Bezug:** Katode, Bulk (Source) usw.
3. **Ausgang:** Anode, Kollektor oder Drain.

Es ist aber möglich, die drei Elektroden *anders* dem Eingang, der Masse und dem Ausgang *zuzuordnen*. Dabei ergeben sich recht unterschiedliche Eigenschaften mit *speziellen Vor-* und *Nachteilen*.

Für Röhre, FET und Bipolar-Transistor entstehen so:

1. Grundsaltung = Katoden-Basis-, Source- und Emitter-Schaltung.

Sie ermöglichen den *größtmöglichen Verstärkungsfaktor* bei besonders hohem Eingangswiderstand.

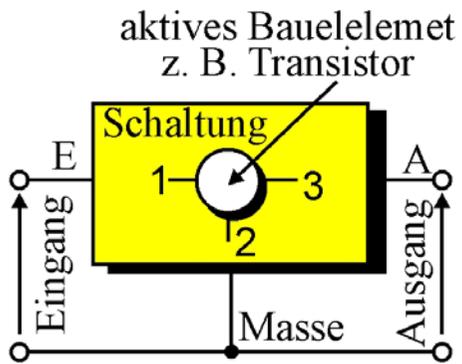
2. Folgeschaltungen = Katodenverstärker, Drain- und Emitter-Folge-Schaltung.

Sie besitzen einen Verstärkungsfaktor ≤ 1 , stellen dafür aber eine *sehr kleinen Ausgangswiderstand* bereit.

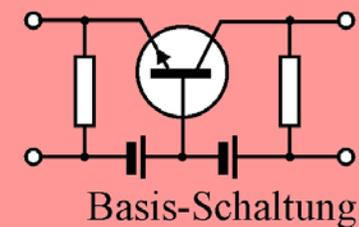
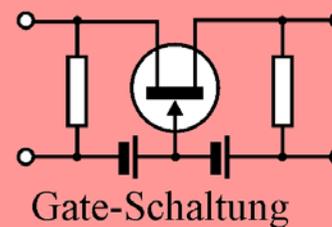
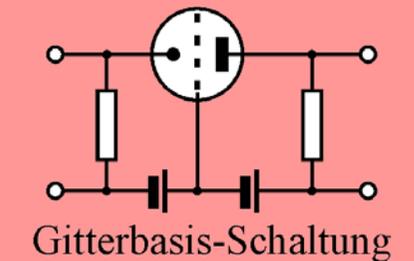
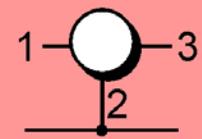
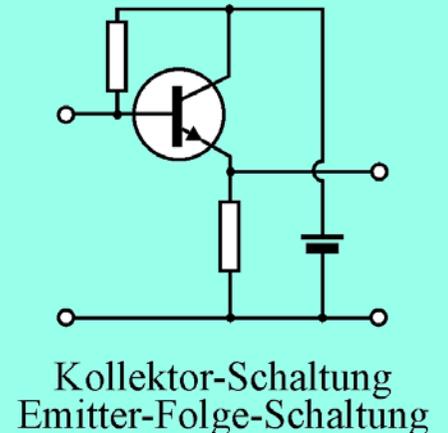
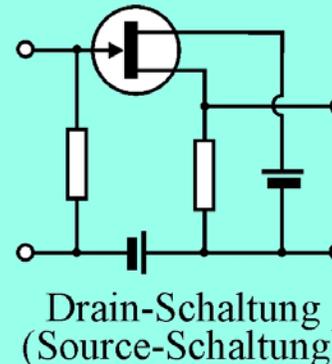
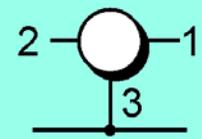
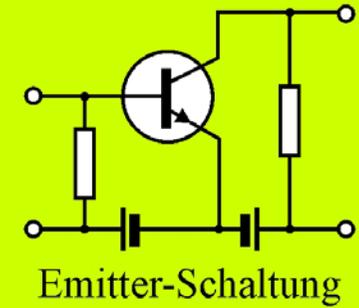
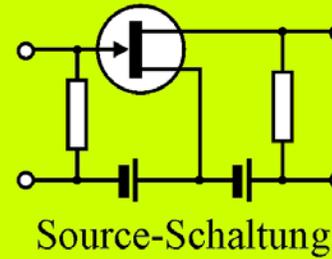
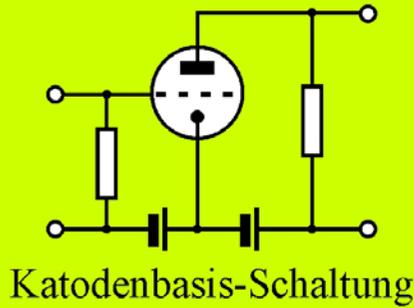
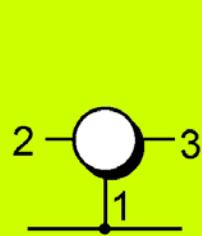
3. Umkehrschaltungen = Gitter-Basis-, Gate- und Basis-Schaltung.

Bei einem relativ *kleinen Eingangswiderstand* (zur Anpassung) besitzen sie einen großen Verstärkungsfaktor

Die meisten Verstärkerschaltungen sind recht unterschiedlich aus *mehreren Grundsaltungen* zusammengesetzt.



M	E	A	
1	2	3	vorwärts
	3	2	invers
2	1	3	vorwärts
	3	1	invers
3	2	1	vorwärts
	1	2	invers



DreiSchaltungen.cdr h. vözl 6.8.80/2012

Rückkopplung

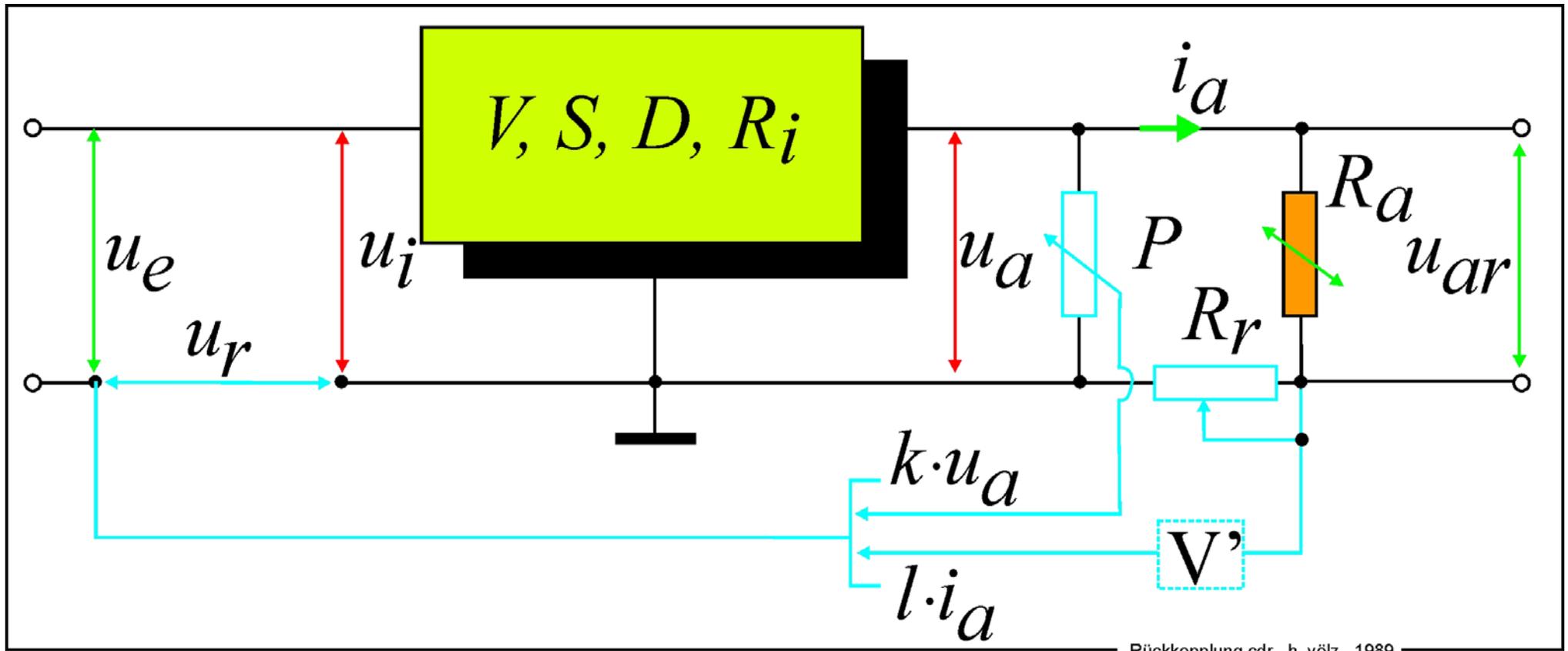
Sie ist ein besonders *wichtiges Prinzip*. Bei ihm werden Ausgangssignalen zum Eingang zurückgeführt. Dabei müssen zwei grundlegende Fälle unterschieden werden. Sie betreffen

1. den *Phasenwinkel* φ zwischen der Eingangsspannung u_e und der Rückkopplungsspannung u_r und werden dann eingeteilt in
 - a) *Mitkopplung* (gleichphasig, $\varphi=0^\circ$),
 - b) *Gegenkopplung* (gegenphasig, $\varphi = 180^\circ$) oder
 - c) *Blind*-Rückkopplung mit einem Phasenwinkel $\varphi \neq 0^\circ$ oder $\varphi \neq 180^\circ$.
2. die *Ableitung* der Rückkopplungsspannung u_r aus
 - a) der Ausgangs-*Spannung* u_a oder
 - b) dem Ausgangs-*Strom* i_a .

Ihre Prinzipschaltung – mit Ausnahme von 1c) – zeigt das folgende Bild.

Auf 1c) wird hier auch nicht weiter eingegangen.

Mit ihm werden vor allem *künstliche*, oft einstellbare oder steuerbare *Kondensatoren* und *Induktivitäten* erzeugt. Es lassen sich sogar negative Werte herstellen, die eventuell echte kompensieren.



Rückkopplung.cdr h. vözl 1989

Berechnung der Eigenschaften

Hierfür ist es günstig, von den klassischen Röhrendaten S , D und R_i auszugehen.

Wenn auch nicht üblich, so können sie dazu auch formal für Transistoren eingeführt werden.

Die **Eingangsspannung** u_i des rückgekoppelten Verstärkers setzt sich zusammen aus der **ursprünglich eingespeisten** Spannung u_e und der **zurückgeführten** u_r gemäß

$$u_i = u_e + u_r \text{ mit } u_r = -k \cdot u_a + l \cdot i_a.$$

k ist der Faktor für Spannungs- und l für Strom-Rückkopplung; dabei gilt

$$\text{Vorzeichen von } k \text{ bzw. } l = \begin{cases} + \\ - \end{cases} \text{ bei } \begin{cases} \text{Mitkopplung} \\ \text{Gegenkopplung} \end{cases}.$$

Werden diese Beziehungen in die Steuergleichung $i_a = S(u_i + D \cdot u_a)$ eingesetzt, so folgt für die neue Steuergleichung

$$i_a \left(\frac{1}{S} - l \right) = u_e + u_a (D - k).$$

Daraus ergeben sich die Kennwerte bei Rückkopplung zu

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

und es folgt:

- Stromrückkopplung ändert die Steilheit,
- Spannungsrückkopplung ändert den Durchgriff.
- Es sind negative Innenwiderstände möglich

Ergänzungen

Nicht ohne weiters sind weitaus wichtigere Änderungen herzuleiten. Die wichtigsten sind:

	Gegenkopplung	Mitkopplung
Verstärkung	Sinkt und wird stabiler gegenüber allen äußeren Einflüssen.	Vergrößert sich, kann zu Eigenschwingungen und damit zur Schwingungserzeugung führen (s. u.).
Frequenzgang	Wird linearisiert, Bandbreite steigt.	Wird betont selektiver → hoch selektiv.
Verzerrungen	Verringern sich.	Werden größer.

Deutlich komplizierter sind die Änderungen des *Innenwiderstandes*.

Mittels gemischter Strom- und Spannung- *sowie* Mit- und Gegenkopplung sind alle, auch negative Werte realisierbar.

Siehe dazu die folgende *Schaltung mit zwei Verstärkerstufen*.

Generell ist hierbei eine Erklärung *negativer Widerstände* erforderlich.

Bezüglich *Gleichspannung* sinkt dann der Strom mit steigender Spannung (s. Tunneldiode und Gasentladung).

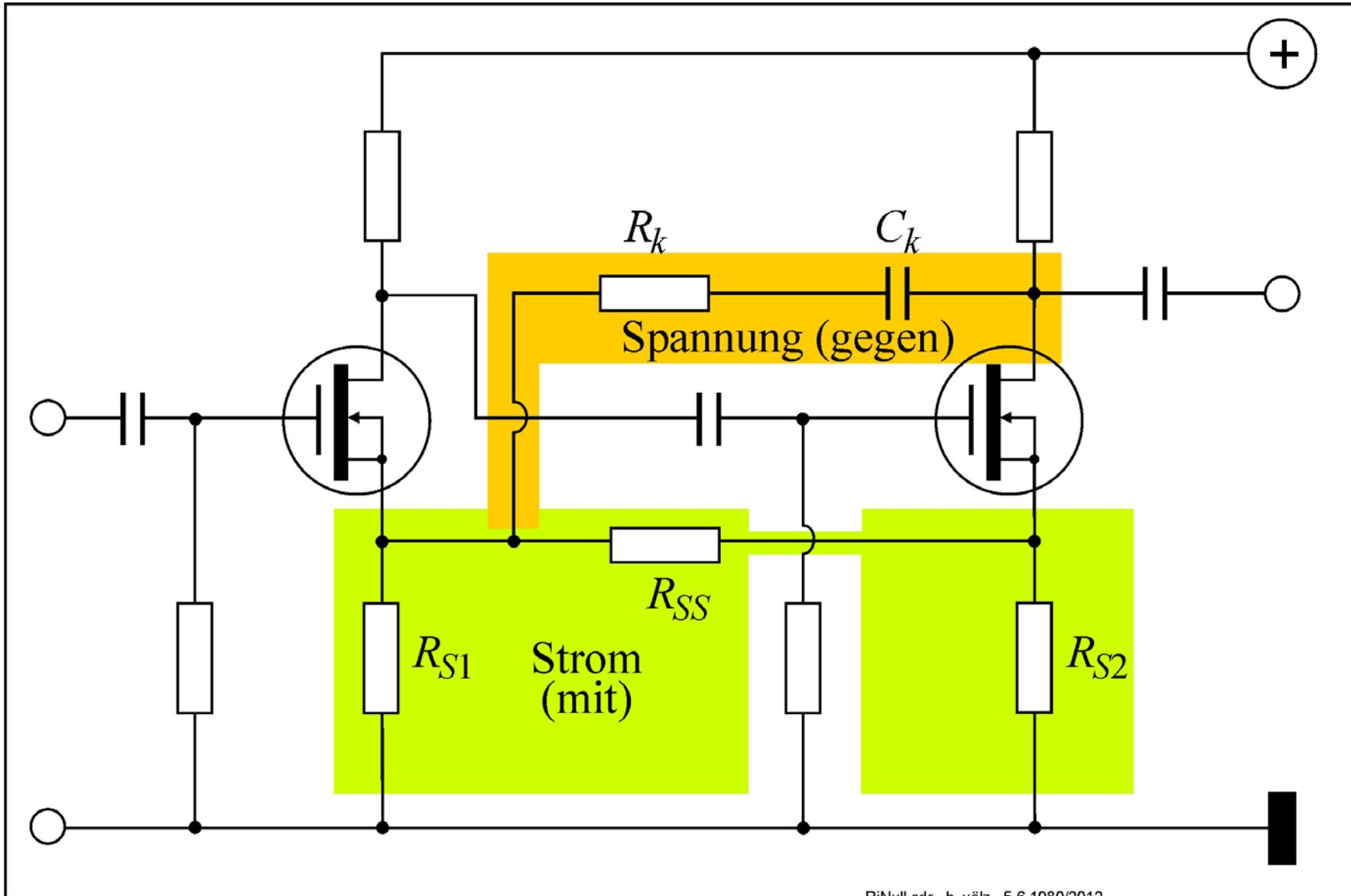
Beim üblichen Verstärker gilt der Innenwiderstand jedoch nur für *Wechselspannungen*.

Dann ist die Zusammenschaltung mit den *anzuschließenden „Lasten“*, Senken zu beachten.

Sie haben einen positiven Widerstand, der dabei mehr oder weniger *kompensiert* wird.

So können z. B. die *Eigenschwingungen* von Lautsprechern deutlich *gedämpft* und damit *reduziert* werden.

Schaltungsbeispiel für einen Verstärker mit negativen Innenwiderstand



Pendelrückkopplung

Eine Rückkopplung tritt immer *etwas verzögert* auf.

So kann *schrittweise* (iterativ) die Verstärkung selbst ein einmaliges Eingangssignal exponentiell wachsen lassen. Damit es dann nicht über alle Grenzen wächst, muss die Rückkopplung nur eine relativ kurze Zeit wirksam sein. Auf diese Weise sind *große Verstärkungen* bis über 1000fach mit nur einem *einzigem Transistor* (Röhre) möglich.

Dieses Prinzip führt zum *Pendelaudion* (= Superregenerativempfänger \neq Superhet!).

Er wurde 1921 von EDWIN HOWARD ARMSTRONG (1890 - 1954) zum Patent angemeldet.

Zunächst wurde das Prinzip in der *Anfangszeit des Rundfunks*,

von 1949 - 1953 auch bei *UKW* benutzt.

Übliche sind dabei nicht hörbare *Pendelfrequenzen* ab 30 kHz.

Seit Mitte der 1960er Jahre bis z. T. auch heute existiert sie in Handfunkgeräten (*Walkie-Talkie*).

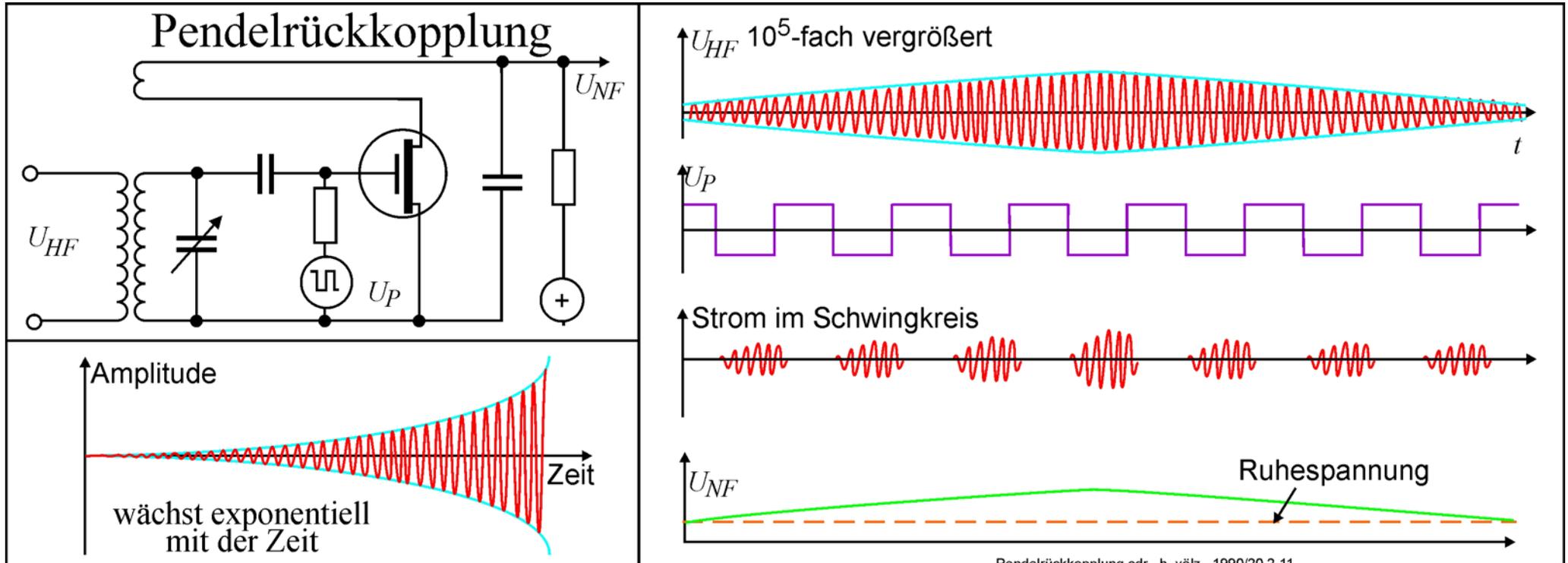
Zuweilen sind damit Geräte der *Fernsteuer-* bzw. *Fernwirktechnik* ausgestattet und

übertragen dann Messwerte in Funkthermometern, Funktürglocken und drahtlosen Alarmmeldern.

Vorteilhaft sind Träger-Frequenzen ab 20 MHz bis weit über 1 GHz,

insbesondere *ISM-Bänder* mit 27 und 433 MHz (industrial, scientific and medical).

Prinzip und Wirkungsweise der Pendelrückkopplung



Operationsverstärker

Eine Vorstufe für den OV ist der *Differenzverstärker*.

Seine Ausgangsspannung ist die Differenz zwischen den beiden Eingangssignalen:

$$u_e = u_{e1} - u_{e2}$$

Einen einfachen Aufbau zeigt die nebenstehende Schaltung.

Bei einem *Operationsverstärker* (OV) ist dieser Eingang durch nachfolgende große Verstärkung ergänzt.

OV existieren heute in vielen integrierten Anwendungen und Leistungsstufen

Sie sind sehr oft die Grundlage komplexer Schaltungen.

Oft wird dabei der negative Eingang vorwiegend für Rücklungen verwendet.

Eine wichtige Anwendung des OV erfolgt in *Analogrechnern*.

Je nach der Rückkopplung können dann u. a.

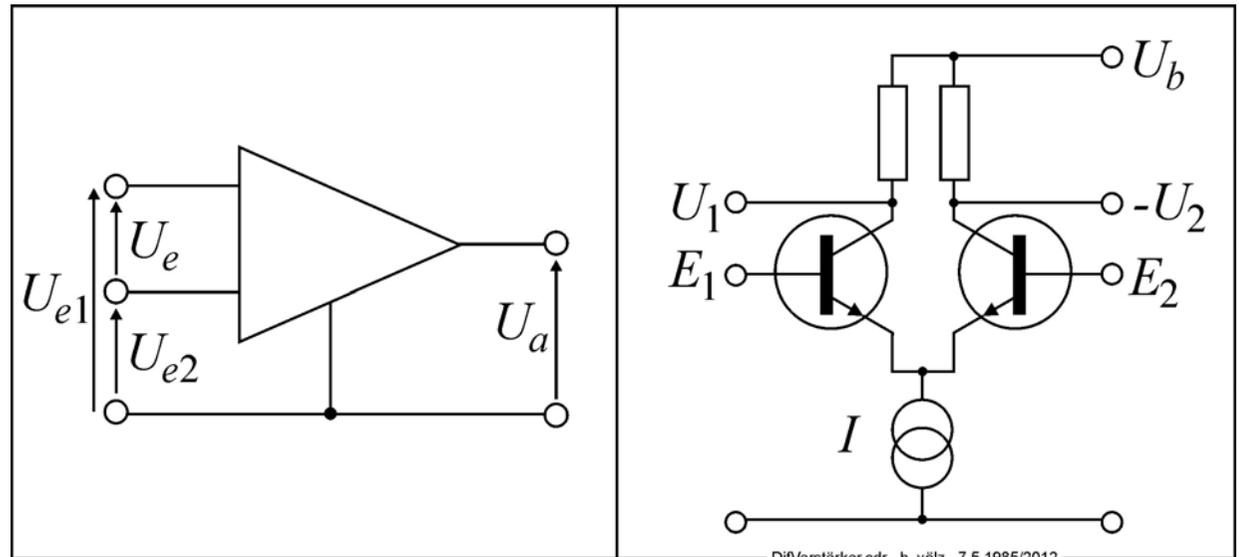
Addierer, Negatoren, Differenzierer oder
Integrierer erzeugt werden.

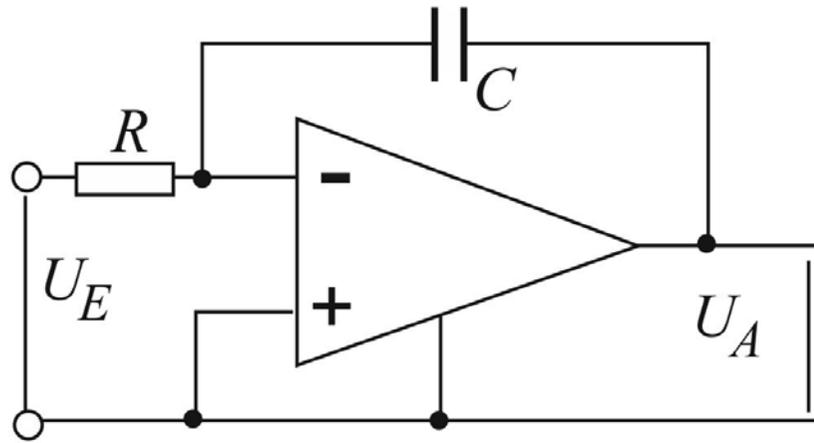
Sehr wichtig ist auch das Einstellen eines sehr

konstanten Verstärkungsfaktors.

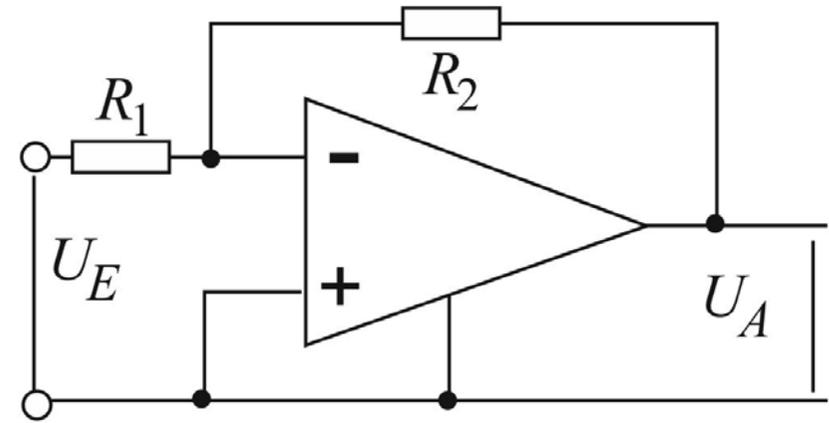
Beispielsweise seien noch erwähnt:

- lineares Ohmmeter,
- Spannungs-Strom-Konverter,
- Strom-Spannungs-Konverter und
- Elektrometer-Wandler.

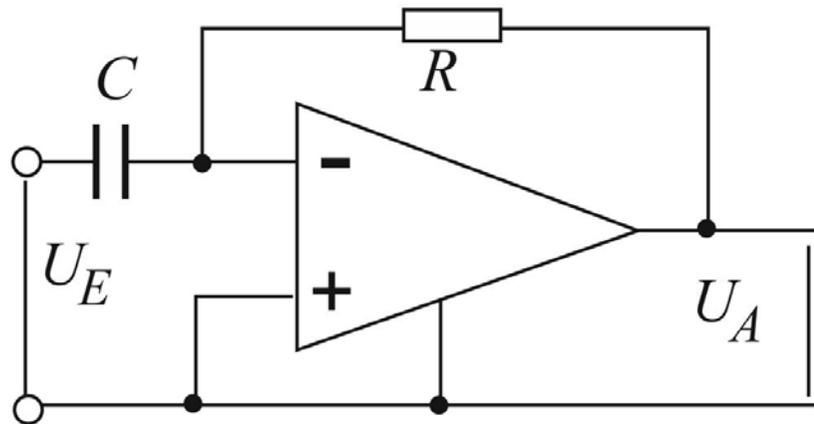




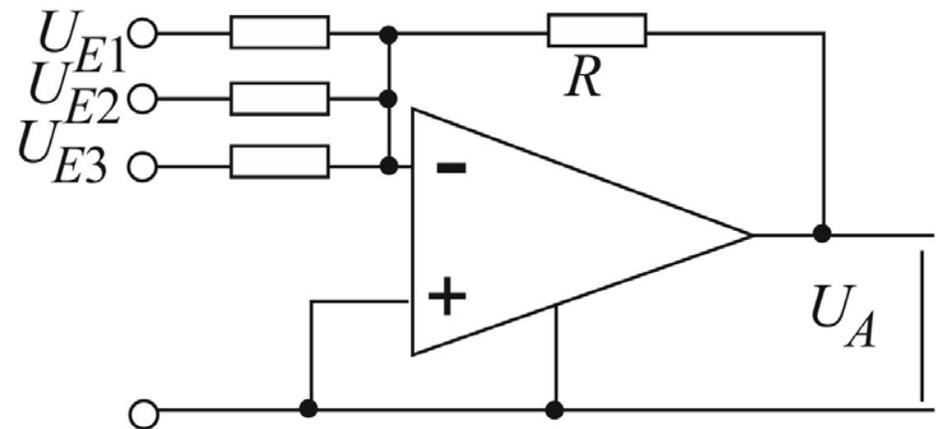
Integrator



Umkehr-Verstärker



Differenzierer



Umkehr-Addierer

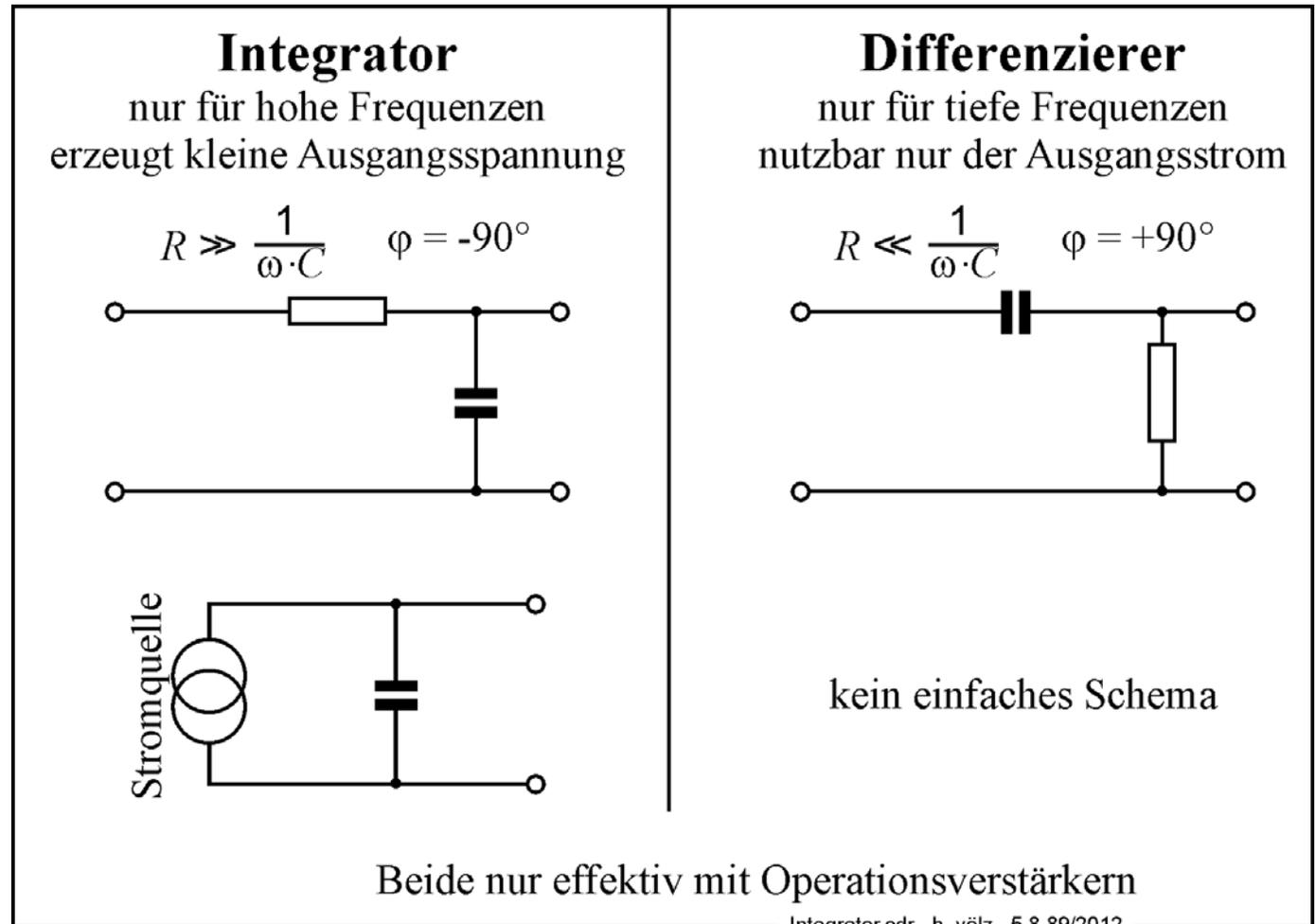
Grundlage für Integrator und Differenzierer

Beide leiten sich aus *RC-Gliedern* ab. Sie sind dann exakt wenn die *Ausgangsspannung* gegen Null strebt, praktisch also *sehr klein* wird.

Daher eignen sich hierfür besonders rückgekoppelte OV mit sehr großer Verstärkung.

Für den *Integrator* auch eine Strom- statt einer Eingangsspannung geeignet.

Für den *Differenzierer* existiert neben dem OV keine einfache Variante.



Gliederung

1. Signal-Störungen
2. Verstärkung allgemein
 3. Röhren
 4. Halbleiter
 5. Schaltungen
6. Schwingungserzeuger
7. Leistungsverstärker
8. Ergänzungen

Oszillatoren

Lateinisch oscillare schaukeln

Oscillum war eine kleine Bacchusmaske, die man an Bäumen zur Abwehr böser Kräfte schaukeln ließ.

In der Technik ist heute der Oszillator eine Schaltung, die periodische Schwingungen erzeugt.

Andere Namen sind *Generatoren* und *Schwingungserzeuger*.

Die Schwingungserzeugung erfolgt vorwiegend über *Entdämpfung* von Schwingkreisen per *Rückkopplung*.

Dabei werden die vorhandenen *Resonanz-Erscheinungen* deutlich *verstärkt*.

Auch *negative Widerstände* sind gut geeignet; sie kompensieren dann die Verlustwiderstände.

Verstärker und Oszillatoren hängen also sehr eng zusammen.

Insgesamt gibt es eine sehr *große Vielfalt* von Oszillator-Schaltungen. Einige Beispiele im folgenden Bild.

Eine stabile *Schwingungsamplitude* wird durch eintretende Nicht-Linearitäten bei der Schaltung erhalten.

In jedem Fall bestimmt die ursprüngliche *Güte* (Resonanzschärfe) die *Stabilität* der erzeugten *Frequenz*.

Deshalb reichen oft Schwingkreise nicht aus.

Quarze sind bedeutend besser. Sie werden meist dann angewendet, wenn eine feste Frequenz erzeugt werden soll.

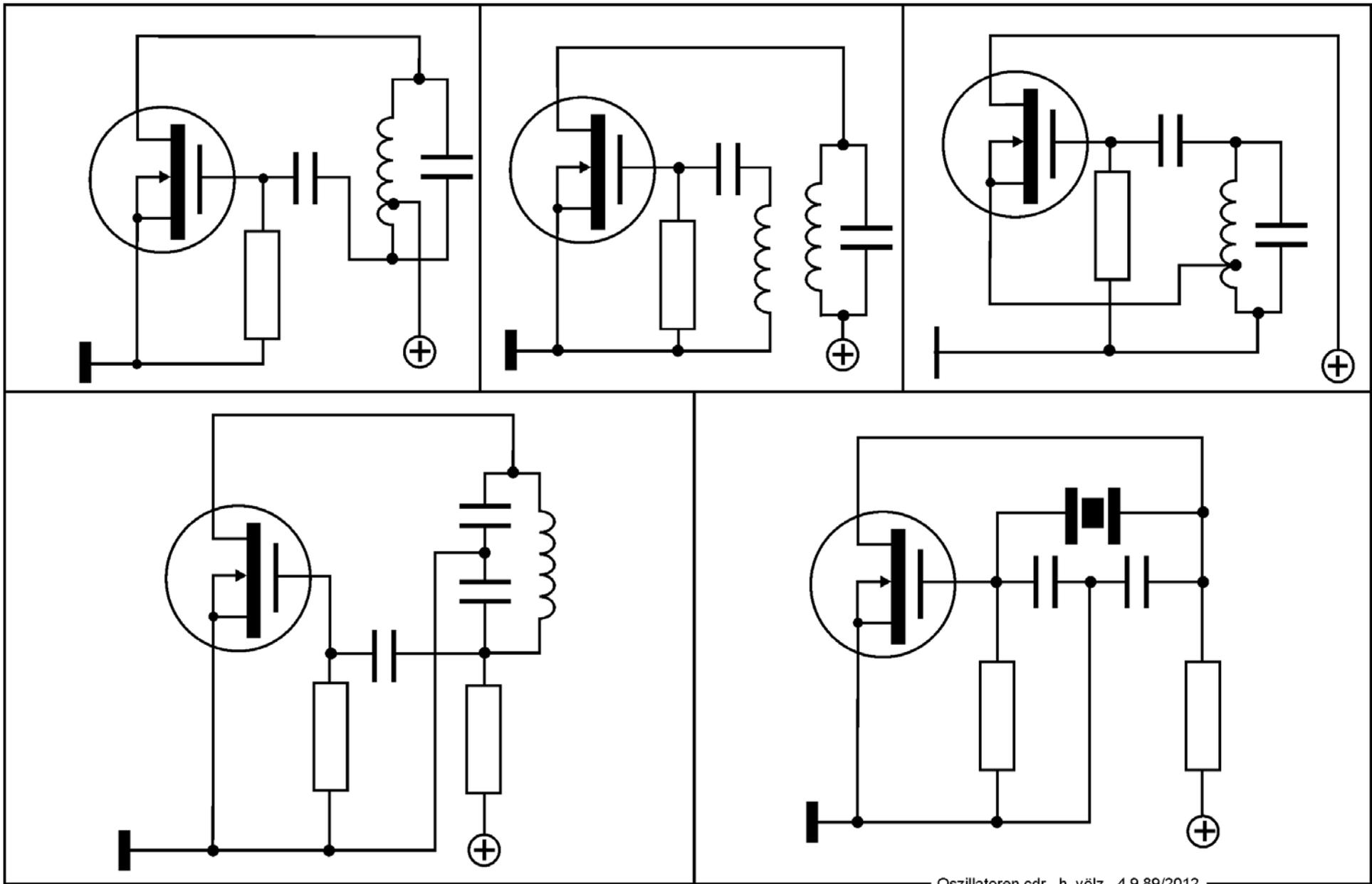
Für sehr hohe Frequenzen, z. B. bei der *Atomuhr*, werden die *Energiezustände von Atomen* und Molekülen genutzt.

Meist wird angenommen, dass zu Schwingungen immer ein *Pendeln zwischen zwei Energien* gehört.

Das Gegenteil beweisen *RC-* bzw. *Phasenschieber-Generatoren*.

Vom Rauschen verstärken sie hochselektiv nur die Frequenz mit der „richtigen“ Phasenlage für die Rückkopplung.

Da alle Oszillatoren Rückkopplung benötigen, gilt dies offensichtlich ganz allgemein.



Oszillatoren.cdr h. vözl 4.9.89/2012

Gliederung

1. Signal-Störungen
2. Verstärkung allgemein
 3. Röhren
 4. Halbleiter
 5. Schaltungen
6. Schwingungserzeuger
- 7. Leistungsverstärker**
8. Ergänzungen

Leistungsverstärker

Bei *beachtlicher Ausgangs-Wechsel-Leistung* n_A ist der *Wirkungsgrad* η wichtig.

Mit der notwendigen *Gleichstrom-Hilfs-Leistung* $N_H = U_A \cdot I_A$ gilt für ihn $\eta = n_a / N_H$.

Um die Signal-Verzerrungen gering zu halten, muss der lineare Teil der Kennlinie benutzt werden.

Dann verlangt ein *Spitzen-Wechselstrom* i_{max} einen *Ruhe-Gleichstrom* $I_R \geq i_{max}$.

Solange nur „Vollaussteuerung“ auftritt, lässt sich dabei ein relativ guter Wirkungsgrad erreichen.

Wegen der fortlaufenden Änderung der Signal-Amplitude ist das aber in der *Elektroakustik* unerfüllbar.

Hier müsste der Ruhengleichstrom I_R für einen guten Wirkungsgrad *fortlaufend angepasst* werden.

Dann treten aber leicht störende *Einschwingvorgänge* auf. Außerdem ist der *Aufwand* sehr hoch.

Wesentlich bessere Möglichkeiten bieten *Gegentaktendstufen*, die mit dem Arbeitspunkt $I_R \ll i_{max}$ arbeiten.

Die beiden Transistoren (Röhren) verstärken dabei jeweils nur *eine Halbwelle*.

Die richtige *Zusammenfassung* beider Halbwellen ergibt jedoch wieder ein nur wenig verzerrtes Signal.

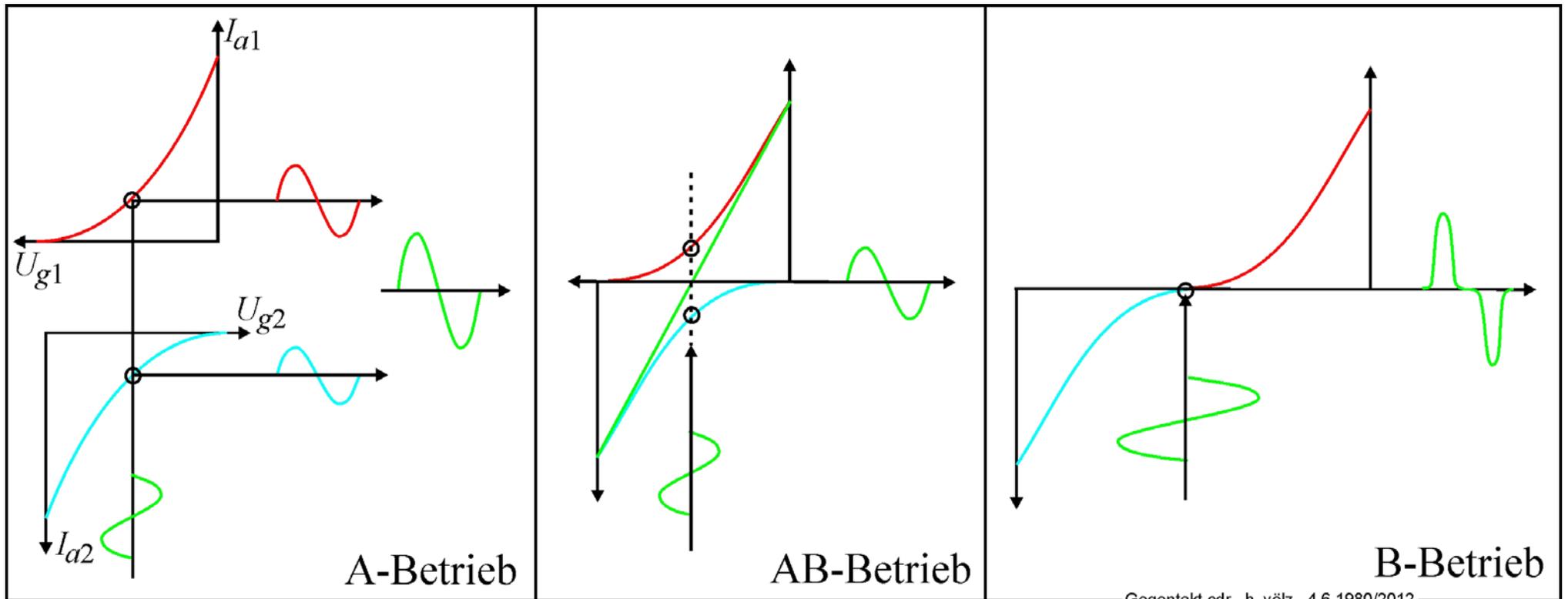
Je nach der Lage des Arbeitspunktes I_R werden in der Technik *A-*, *AB-* und *B-Betrieb* unterschieden (s. Bild).

Ein *C-Betrieb* weit außerhalb der Kennlinie von $I_R = 0$ kommt nur bei Sendern vor.

Ein *D-Betrieb* verlangt eine Digitaltechnik (s. u.)

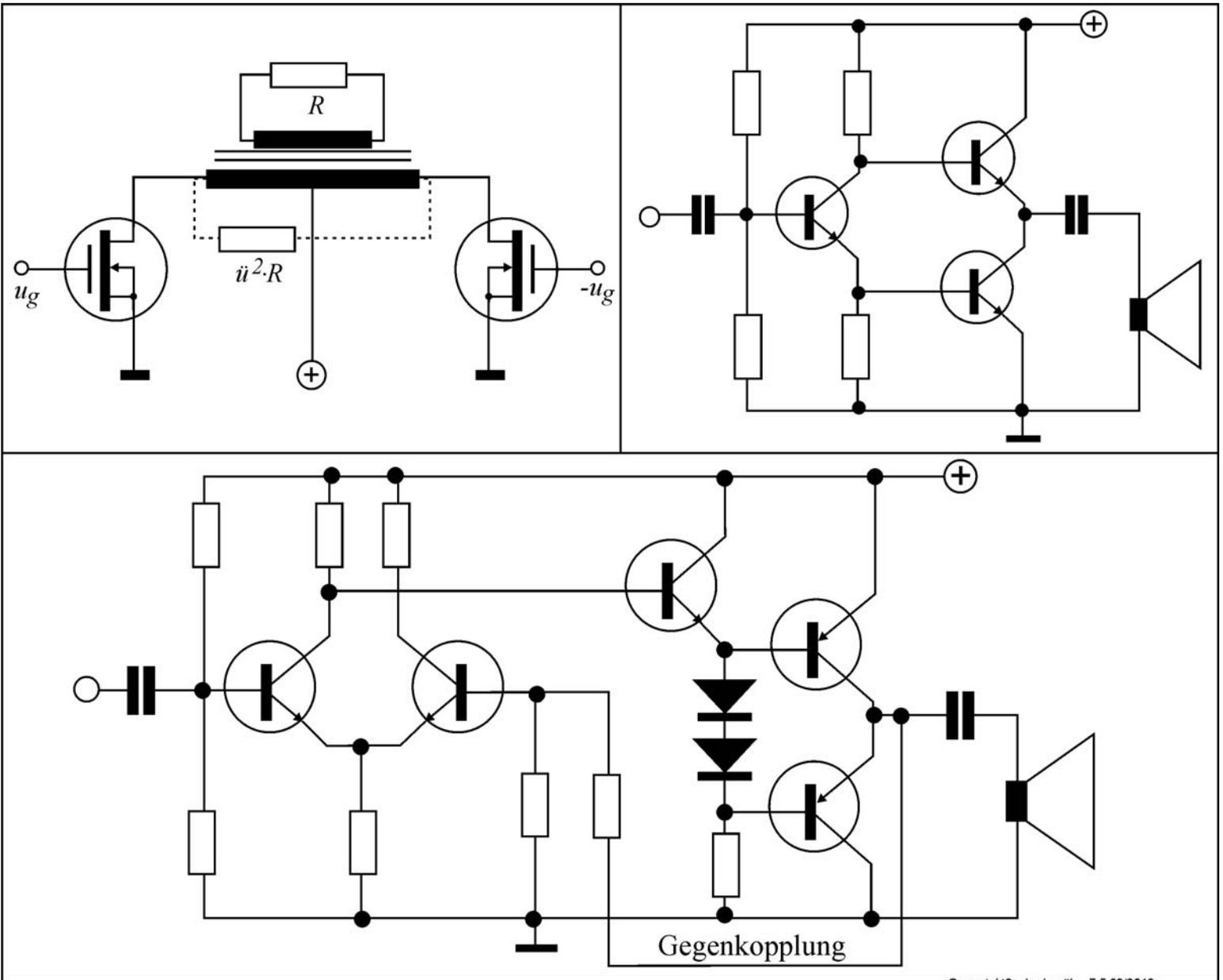
Lage des Arbeitspunktes beim 1-Transistor-A-Betrieb und bei Gegentakt-Endstufen im AB- bzw. B-Betrieb.

Für einen C-Betrieb bei Sendern liegt der Arbeitspunkt weit links vom Kennlinienbeginn



Gegentakt.cdr h. vözl 4.6.1980/2012

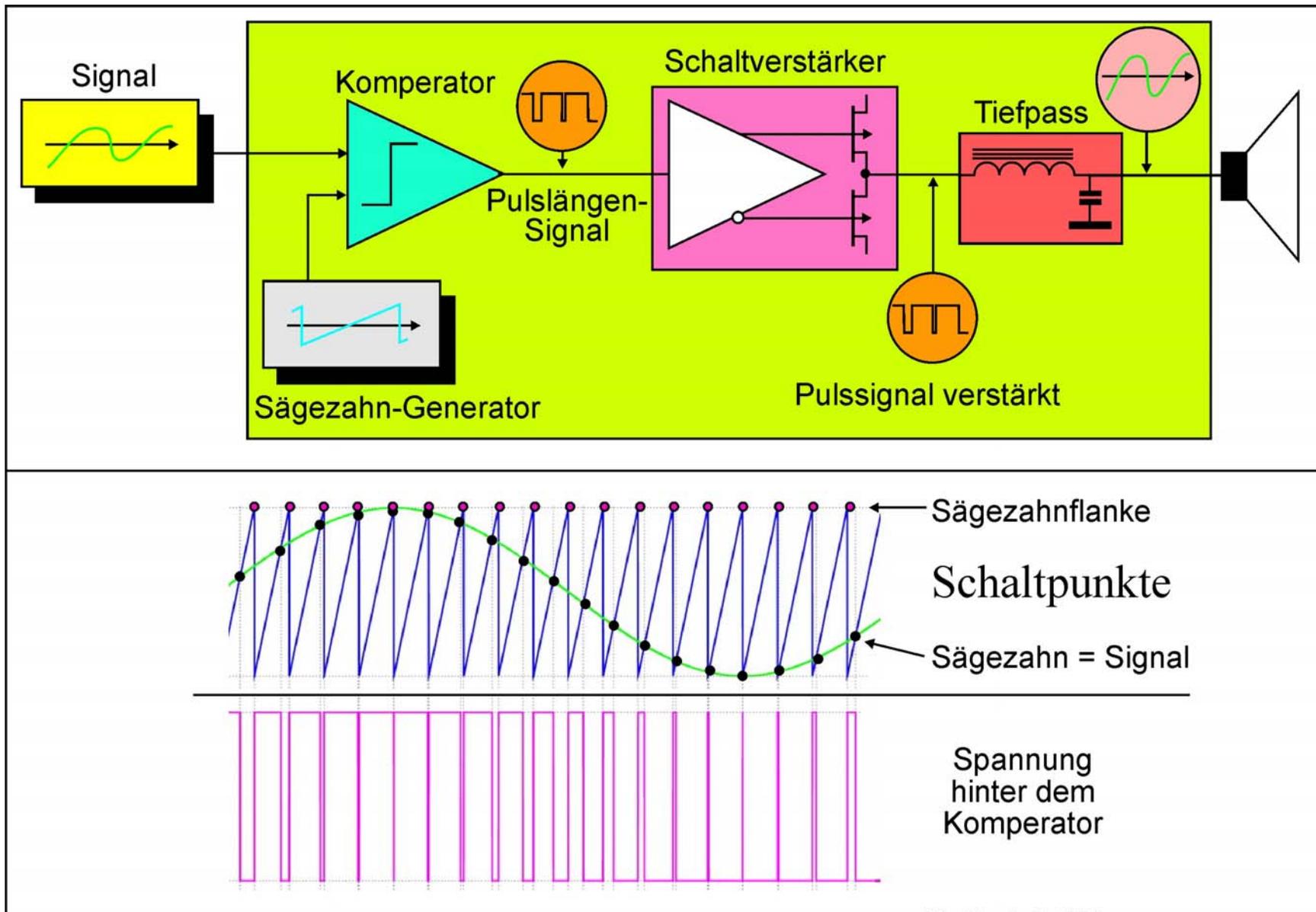
Die klassischen Gegentaktendstufen arbeiten mit einem Transformator, der auch die Lautsprecher-Anpassung bewirkt.



Transistoren lassen sich im einfachsten Fall in Reihe schalten. Außerdem besitzt dann meist die „Mitte“ gleich den „richtigen“ Ausgangswiderstand (rechts oben).

Noch vorteilhafter ist die Nutzung von zwei **Komplemetär-Transistoren**. Sie können gleichphasig angesteuert werden. Die einfach auszuführende Gegenkopplung verringert zusätzlich die Vererrungen (Bild unten).

Der D-Verstärker arbeitet mit einer Impulstechnik und ermöglicht einen idealen Wirkungsgrad



D-Verstärker h. vözl 17.2.11

Gliederung

1. Signal-Störungen
2. Verstärkung allgemein
 3. Röhren
 4. Halbleiter
 5. Schaltungen
6. Schwingungserzeuger
7. Leistungsverstärker
- 8. Ergänzungen**

Strom-Versorgungen

Die meisten Schaltungen benötigen sehr konstante Betriebsspannungen.

Die meisten Stromquellen – Batterien, Akkus und Lichtnetz – bieten jedoch erheblich schwankende Spannungen.

Daher sind Schaltungen erforderlich, die aus ihnen eine konstante Spannung ableiten

Die entsprechenden stabilisierten Stromversorgungsgeräte benutzen dazu die Regelungs-Steuerungs-Technik

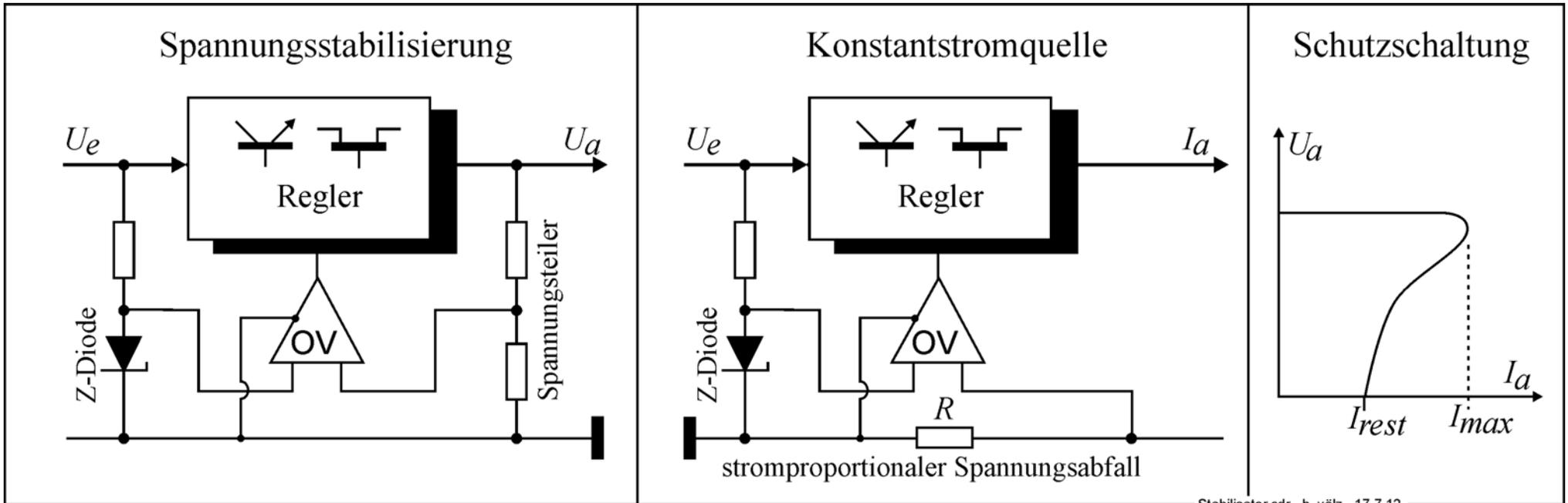
Neben den kontinuierlich arbeitenden Schaltungen existieren auch einige mit Schaltreglern.

Die meisten Strom-Versorgungen sind heute als integrierte Schaltkreise verfügbar.

Zuweilen sind auch Konstant-Stromquellen erforderlich.

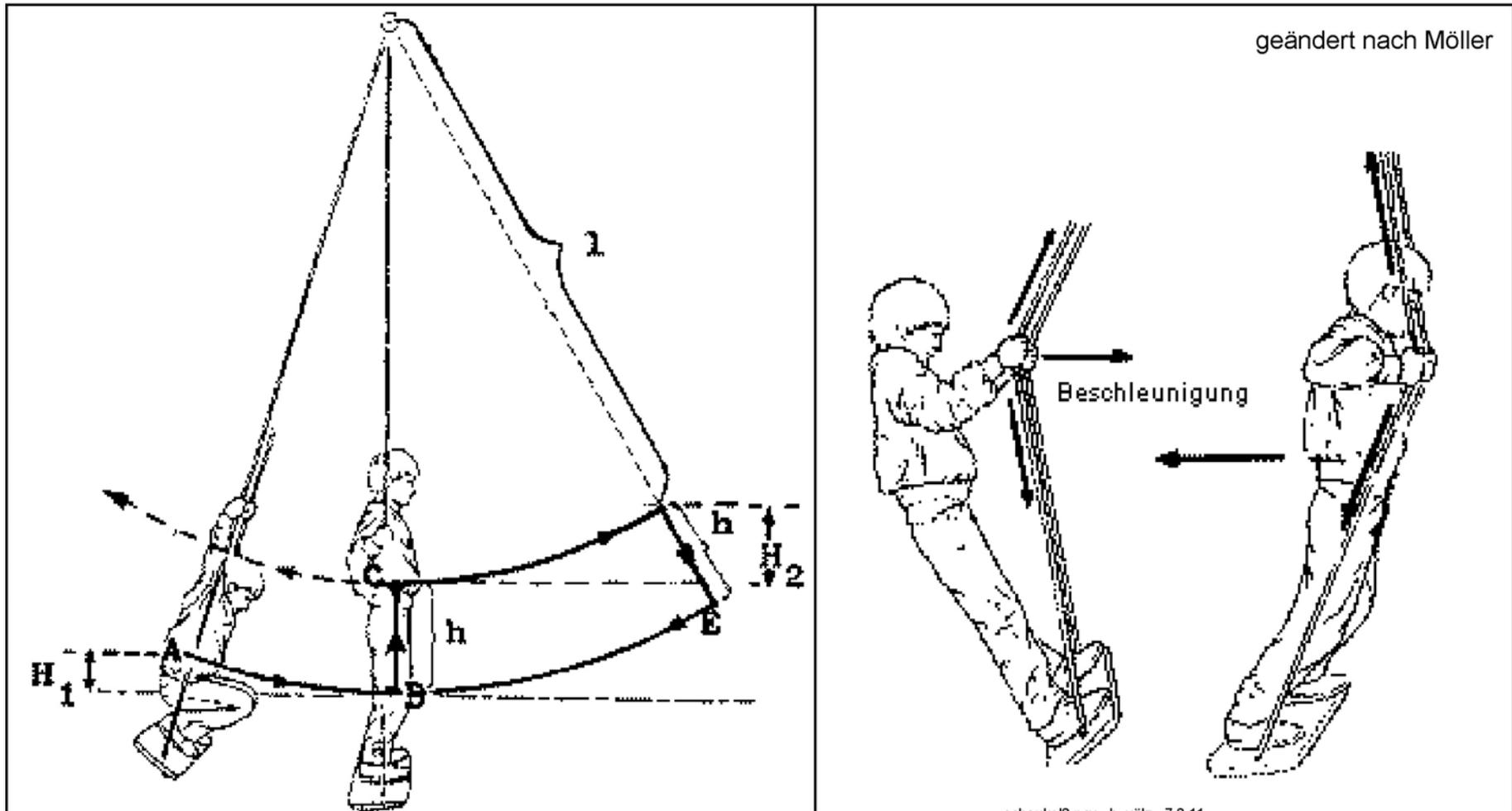
Im Laborbetrieb sind ähnliche, einstellbare Strom-Spannungs-Quellen notwendig.

Hier existieren sogar Schutzschaltungen gegenüber einem zu hohen Strom.



Parametrischer Verstärker

Bei einem Resonanzgebilde werden Parameter – z. B. der Kondensator – mit der doppelten Frequenz geändert. Das führt zum Aufschaukeln der Schwingungen. Besonderheiten sind beim Beginn einzuhalten. Schaukel mit Kind.



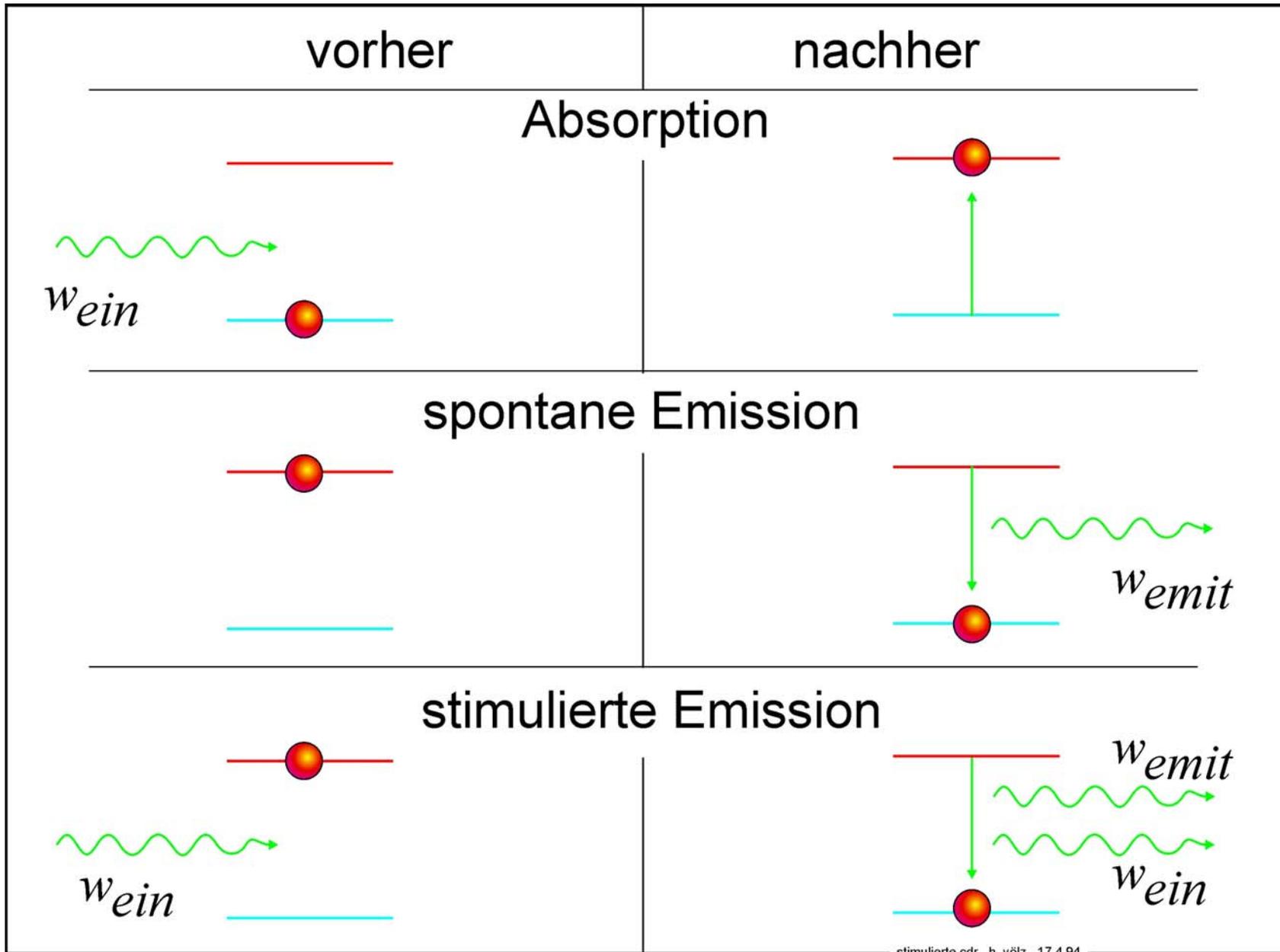
schaukel2.pcx h. völz 7.2.11

Laser als Verstärker

light amplification by stimulated emission of radiation

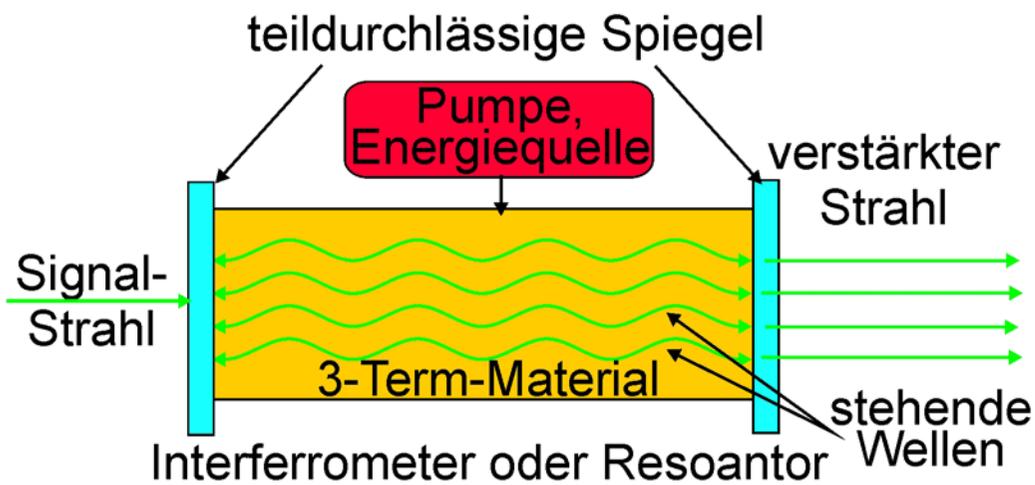
Trotz seiner Bezeichnung als Verstärker ist der Laser fast nur als Schwingungserzeuger bekannt. Insbesondere bei Mikrowellen ist der entsprechende *Maser* zumindest ursprünglich ein Verstärker. Das zugrunde liegende Prinzip der *stimulierten Emission* wurde 1917 von ALBERT EINSTEIN (1879 - 1955) postuliert. 1928 wurde es dann von RUDOLF LADENBURG (*1882) und HANS KOPPERMANN (*1895) nachgewiesen. 1951 schuf hiermit CHARLES HARD TOWNES (*1915) den ersten Maser.

Damit existierte erstmalig ein Verstärker für sehr hohe Frequenzen vor. Hiefür muss ein 3-Terme-Spektrum von Atomen oder Molekülen vorliegen. Der mittlere muss dabei langlebig metastabil sein. Über den obersten Term können dann hier viele Elektronen recht lange gespeichert werden. Durch Resonanz mit einem passenden Lichtquant können sie schlagartig diesen Term verlassen. Der Lichtquant ist so vervielfacht.

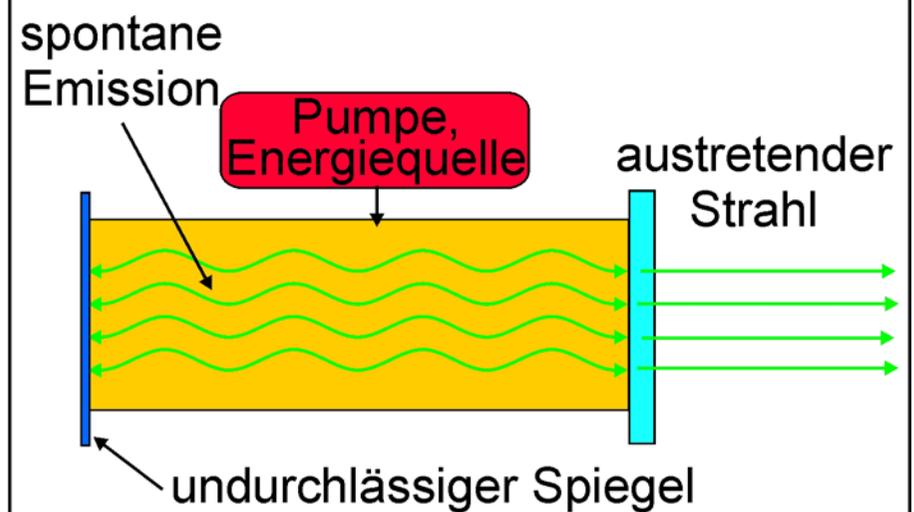


stimulierte.cdr h. vözl 17.4.94

als Verstärker



als Oszillator, Laser



maser.cdr h. vözl 25.12.97/2011

Zusammenfassung

Im Zentrum steht die Notwendigkeit von Verstärkern und Selektion. Begrenzend wirken sowohl unvermeidbare Störungen, wie thermisches und Quanten-Rauschen als auch reduzierbare Störungen, wie Fremdsignale, Netz- und Gewitterstörungen. Wichtig ist die selektive Filterung durch Resonanz. Sie kann mit dem Superheterodyn-Prinzip wesentlich verbessert werden. Außerdem sind auch Abschirmungen, Symmetrierungen und richtige Erdpunkte wichtig. Es folgt eine allgemeine Einführung in das Verstärker-Prinzip. Dann müssen vor allem Klein- und Großsignal-Verstärker unterschieden werden. Hierfür kommen heute hauptsächlich Halbleiterbauelemente zum Einsatz. Bei den Schaltungen ist die Gegen-, Rückkopplung besonders wichtig. Spezielle Eigenschaften besitzen die Differenz- und Operationsverstärker. Aus den Verstärkern leiten sich die Oszillatoren ab. Als Besonderheiten werden noch behandelt: Spannungs- und Stromstabilisation, sowie parametrischer Verstärker und Laser als Verstärker.

Literatur

Flik, Th.: Mikroprozessortechnik und Rechnerstrukturen. 7. Aufl. Springer-Verlag, Berlin – Heidelberg 2005

Pitsch, H.: Hilfsbuch für die Funktechnik. 2. Aufl. Geest & Portig K.-G. Leipzig 1953

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

PDF-Datei downloadbar: <https://dl.dropbox.com/u/67035524/Horst%20V%C3%B6lz%20-%20Elektronik.pdf.zip>

Völz, H.: Elektronische Spannungsstabilisation. VEB Verlag Technik Berlin 1966, 2. Aufl. 1969

Völz, H.: Handbuch der Speicherung von Information Bd. 3. Shaker Verlag Aachen 2007

Vertiefende Download-Folien: r-h-voelz.de/PDF TU/Elekt_r_Arbeit.pdf

Andere Downloads vom 22.7.12:

Frequenzband - Wikipedia.mht

Gegentaktendstufe - Wikipedia.mht

Kurzwelle - Wikipedia.mht

Oszillatorschaltung - Wikipedia.mht

Satellitenfernsehempfänger - Wikipedia.mht

Superregenerativempfänger – Wikipedia.mht

Überlagerungsempfänger - Wikipedia.mht

Zwischenfrequenz - Wikipedia.mht

Vertiefende Geschichte

Relais-Technik

- 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* (Röhre) eingeführt
- 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* (Halbleiter) entsteht

Röhren-Technik

- 1858 JULIUS PLÜCKER und HEINRICH GEIßLER gasgefüllte leuchtende *Geißler-Röhre* mit 2 Elektroden.
- 1869 WILHELM HITTORF entdeckt, dass ein Gegenstand in Geißler-Röhren Schatten auf die Wände wirft
- 1878 SIR WILLIAM CROOKES entwickelt *Kathodenstrahlröhre*
- 1897 KARL FERDINAND BRAUN verhilft der *Kathodenstrahlröhre* zum Durchbruch (Oszilloskop)
- 1904 A. WEHNELT Patent: Kathodenröhre als *Gleichrichter*
- 1904 JOHN AMBROSE FLEMING Patent Röhre (Diode) für GLEICHRICHTUNG hochfrequenter Wechselströme
- 1906 ROBERT VON LIEBEN erhält Patent auf ein "Katodenstrahlenrelais" als *Verstärkeröhre*
- 1907 LEE DE FOREST erfindet die *Triode*
- 1910 GEORGE CLAUDE erfindet elektrische *Leuchtstoffröhre* ohne Glühdraht
- 1913 IRVING LANGMUIR entwickelt eine *Mehrgitterelektronenröhre*
- 1913 *Röntgenröhre* mit Wolframglühkathode
- 1914 *Senderöhre* für drahtlose Telephonie
- 1915 BARKHAUSEN entwickelt die *Doppelgitterröhre* für niedrige Spannungen

- 1919 W. H. ECCLES und E W. JORDAN entwickeln eine *Flip-Flop*-Schaltung mit 2 Röhren
- 1922 *Loewe-Mehrfachröhre* von MANFRED VON ARDENNE
- 1923 WLADIMIR KOSMA ZWORYKIN baut die *Ikonoskop* zur Bildabtastung
- 1924 *Fernsehröhre* schwarzweiß
- 1925 MANFRED VON ARDENNE entwickelt die *Hochfrequenz-Zweifachröhre*
- 1925 Mit mehreren Röhren wird eine *Verstärkung von 100 000* erreicht
- 1926 HENRY JOSEPH ROUND erfindet die Schirmgitterröhre = *Tetrode*
- 1934 erste *Leuchtstoffröhren*
- 1946 RUDOLF KOMFNER publiziert *Wanderfeldröhre*, erfunden schon etwa 42
- 1949 Bei RCA beginnt mit Entwicklung der *Lochmaskenröhre*
- 1957 *Vidicon*-Fernsehröhre
- 1964 RCA stellt *Farbfernseh-Bildröhre* mit 58-cm-Diagonale her
- 1973 Sony stellt *Trinitron*-Farbbild-Röhre vor

Transistor-Technik

- 1925 JULIUS EDGAR LILIENFELD entdeckt *Prinzip des Transistors*, jedoch keine technische Lösung erreicht
- 1934 OSKAR HEIL entwickelt einen *Feldeffekt-Transistor*.
- 1947 J. BARDEEN / W. H. BRATTAIN / W. B. SHOCKLEY stellen *Spitzentransistor* vor
- 1949 W. B. SHOCKLEY entwickelt den *Flächentransistor* (Ziehverfahren)
- 1952 Germanium-*Legierungs-Transistor*
- 1954 GORDON TEAL stellt *Silizium-Flächentransistor* vor
- 1958 JACK KILBY entwickelt Grundlagen der *integrierten Technik*
- 1959 MARTIN ATELLA und DAWON KAHNG entwickeln **MOSFET** mit isoliertem Gate
- 1960 Erster *Planartransistor*
- 1961 WEIMER entwickelt *Dünnschicht-Transistor*
- 1962 Signetics entwickelt *DTL* Diode-Transistor-Logik
- 1964 *C-MOS*-Technik entsteht
- 1964 Metal-Gate-P-Kanal-MOS-Transistor
- 1965 *Produktion* von Transistoren übertrifft die von Röhren
- 1968 CMOS-*Schaltkreise*
- 1971 *Mikroprozessor* Intel 4004 mit 2300 Transistoren