

## Von der Röhre zum integrierten Schaltkreis

Digitalisierung wird in der Welt der Mathematiker, Informatiker, Naturwissenschaftler und Techniker (die sog. MINT-Fächer) oft auf eine Abtastung zur Umwandlung analoger Werte in digitale Formate zurückgeführt. Diese Vorgänge erfordern eine Hardware-Basis: die Elektronik. Einführend wird dazu ein Grundverständnis elektronischer Vorgänge aufgebaut, das von Ladungsträgertransportprozessen in Elektronen-Röhren über das Funktionsprinzip des Transistors zu integrierten Schaltungen und modernen Schaltungsarchitekturen führt.

Dass es geladene Teilchen gibt, haben die Menschen schon sehr früh gewusst. Schon in der Antike entdeckten die Menschen Phänomene, die von elektrisch geladenen Teilchen hervorgerufen wurden. Thales von Milet, der vor über zweieinhalbtausend Jahren lebte, könnte als Namensgeber des Elektrons bezeichnet werden. Wenn man Bernstein reibt, so stellte der griechische Gelehrte fest, dann kann er kleine leichte Teilchen anziehen. Geladene Teilchen sammeln sich auf der Bernsteinoberfläche und ziehen mit ihrer Kraft andere Teilchen an. Das griechische Wort für Bernstein heißt „elektron“.

Nachdem um 1775 Alessandro Volta die durch chemische Reaktionen einen Stromfluss erzeugende Batterie erfand, erklärte im 19. Jahrhundert André-Marie Ampère den Begriff der elektrischen Spannung und des elektrischen Stromes.

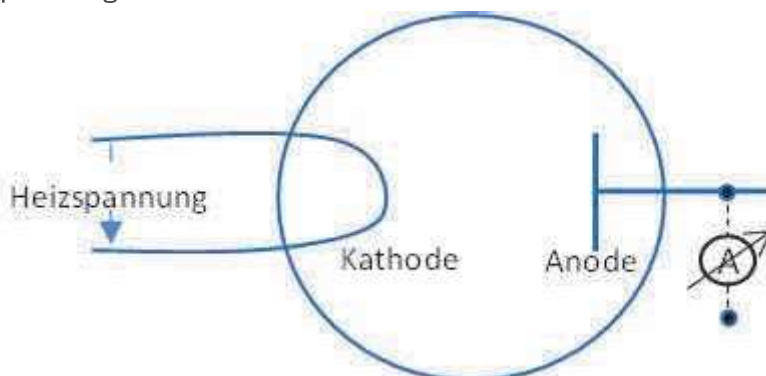


Abb. 2 - Eine Röhren-Diode

Damit war auch das Arbeitsgebiet der Elektronik geboren: Sie ist die Wissenschaft von der Steuerung des elektrischen Stromes durch elektronische Schaltungen, das heißt Schaltungen, in denen mindestens ein Bauelement aufgrund von Vakuum-Leitung (Elektronen-Röhren) oder Halbleiter-Leitung (Transistoren) funktioniert.

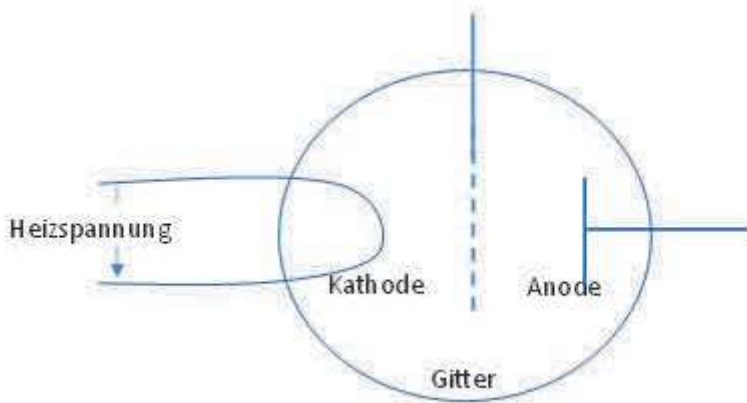


Abb. 3 - Eine Elektronen-Röhren-Triode

### Kurze Geschichte der Elektronenröhre

Eine entscheidende frühe Markierung auf dem Weg zur Entwicklung der Elektronenröhre geht auf die Weiterentwicklung der Glühlampen durch Thomas Alva Edison zurück. Die stromdurchflossenen Kohlefäden der ersten Glühlampen emittierten auch Rußpartikel, die die Innenseite der Glaskolben unerwünschter Weise schwärzte. Edison experimentierte mit einem in den vakuumierten Glaskolben eingebrachten Metallplättchen, da er die Hoffnung hatte, die Rußpartikel werden quasi von dem Metallplättchen aufgesogen. Dazu legte er im Jahr 1884 an das Plättchen einen Pol aus dem Heizkreis an und maß mit einem Amperemeter, ob sich ein Stromfluss zum Plättchen einstellt. Tatsächlich fand er diesen – aber nur wenn er positive Polarität an das Plättchen anlegte. Vertauschte er die Polungen, so stellte sich kein Stromfluss ein. Er hatte den Edison Effekt entdeckt und ein erstes elektronisches Ventil realisiert: Liegt eine genügend hohe Heizspannung an der Kathodenseite an, so werden dort Elektronen emittiert. Wenn nun an der Anode positive Polarität anliegt, so werden die Elektronen dort aufgesaugt und es stellt sich ein Stromfluss ein. Bei umgekehrter Polarität gibt es keinen Stromfluss – die so entstandene Röhren-Diode sperrt. Dieses Bauteil kann somit als Gleichrichter in einer elektronischen Schaltung eingesetzt werden.

Schnell kam der Wunsch auf, die Stärke des Stromflusses „durch die Röhre“ steuern und regeln zu können. So kam u.a. der österreichische Physiker R. von Lieben um 1906 auf die Idee, ein metallisches Gitter in die Röhre einzubauen, um mit einem dort angelegten Potential den Stromfluss zu steuern. Liegt keine Spannung am Gitter an, so können die Elektronen es beinahe ungehindert durchdringen. Der Strom in der Elektronenröhre entspricht in diesem Fall dem einer Röhrendiode ohne Gitter. Liegt eine negative Spannung am Gitter an, so wirkt es auf die von der Kathode kommenden Elektronen abstoßend – es gelangen somit nur weniger Elektronen zur Anode. Der Strom in der Elektronenröhre wird abgeschwächt. Bereits mit einer schwachen Gitterspannung kann somit schnell und präzise der eigentliche Elektronenstrom in der Röhrentriode gesteuert werden. Bald zeigte sich, dass diese Steuerung so schnell ist, dass auch rasch wechselnde

Spannungen wie Antennensignale (einige Millionen Schwingungen pro Sekunde) den eigentlichen Elektronenstrom durch die Röhre steuern können. Da dieser Elektronenstrom viel stärker sein kann, als der in das Gitter führende Steuerstrom, war der erste elektronische Verstärkermechanismus gefunden. Zahlreiche Weiterentwicklungen und Optimierungen der Röhrentechnik (z.B. neue Kathodenmaterialien zur Erhöhung der Elektronenemission, indirekte Heizung durch Trennung von Heizung und Kathode zur Reduzierung von Kathodenstrommodulation durch Temperatureffekte, Mehrgitterröhren zur Verbesserung der Elektronenstrahl-Steuerung) führten zu großserientauglichen Konzepten für einen Durchbruch der Signal verstärkenden Wirkung von Röhrentrioden und damit zur Ausbildung der Grundlage für die Rundfunk- und Fernseh-Technik des 20. Jahrhunderts.

Von etwa 1962 an überflügelten die Transistoren die Röhren zum ersten Mal. Heute werden Vakuum-Verstärkerröhren – abgesehen von Liebhaber-Verstärkern und – Radios - nur noch für Sonderzwecke eingesetzt. Einer dieser wenigen Sonderzwecke – nachdem auch die Bildröhren den Flachbildschirmen gewichen sind – sind Magnetrons zur Mikrowellen-Erzeugung etwa im Mikrowellenherd oder für medizinische Anwendungen.

### **Kurze Geschichte des Transistors**

Entscheidende Nachteile der Elektronenröhren waren und sind der Raum- und Gewichtsbedarf und nicht zuletzt die hohe Wärmeentwicklung. Schon Anfang des 20. Jahrhunderts wurde daher untersucht, ob man nicht die Elektronenröhren durch Halbleiter ersetzen könnte (Metalle oder Isolatoren schieden aus, da deren Leitfähigkeit nicht ausreichend von außen beeinflusst werden konnte). Aufgrund ihrer halbleitenden Eigenschaft wurden natürliche Pyrit-Stücke früher in Detektorempfängern (Detektorradio) als Kristalldetektor zur Demodulation verwendet. [Pyrit, auch Bleiglanz genannt, ist ein Mineral aus der Klasse der Sulfide und Sulfosalze mit der chemischen Formel  $\text{FeS}_2$ ]. Durch Kontaktierung von Hand suchte man mit einer Nadel eine als Diode geeignete Region auf dem Stein. In den 1930er-Jahren konzentrierte sich die Forschung auf die chemischen Elemente Germanium und Silizium. Ein wichtiger Schritt in der Entwicklung auf den Transistor hin war die sogenannte Spitzendiode des deutschen Physikers Walter Schottky (1939). Eine feine Metalldrahtspitze wurde in ein n-leitendes Germaniumplättchen gesteckt. Um den Draht bildete sich eine p-leitende Zone, so dass insgesamt eine p-n-Schicht vorlag. Diese Schottky-Diode ersetzte in den damals üblichen Radioempfängern den unzuverlässigen Detektor, welcher der Gleichrichtung der eingehenden Radiosignale diente.

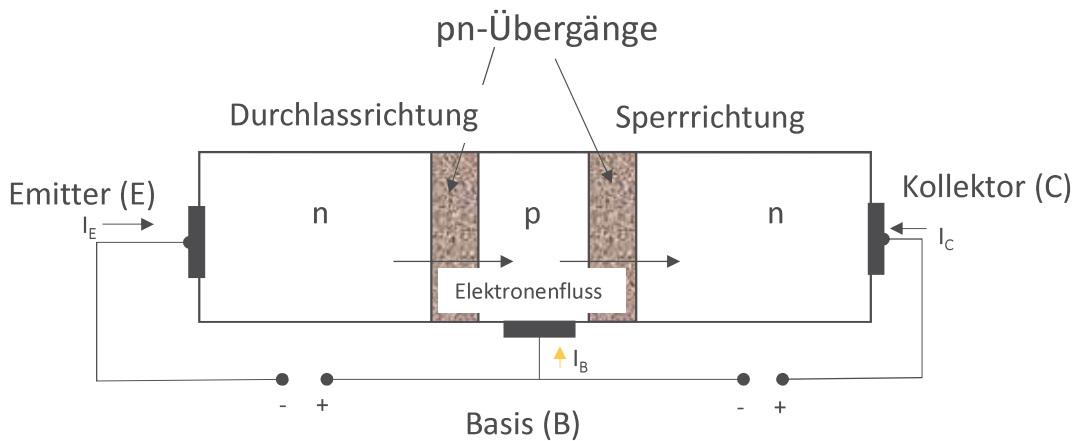
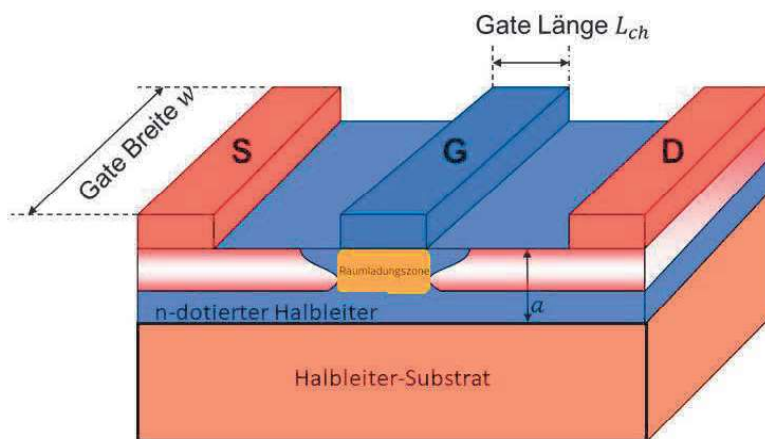


Abb. 4 - Prinzip eines npn-Transistors

Nach dem Krieg wurde in den Bell Laboratories in USA ein ganzes Team zur Entwicklung eines halbleiterbasierten Verstärkers eingesetzt. Die Führung übernahmen der Physiker William Shockley, der theoretische Physiker John Bardeen und der Experimentalphysiker Walter Brattain. Im Jahre 1947 gelang ihnen der entscheidende Durchbruch mit der Entwicklung des sogenannten Spitzentransistors. Zwei metallische Spitzen mit dem minimalen Abstand 5/100 mm sollten auf eine n-leitende Germaniumplatte aufgesetzt werden. Ähnlich wie bei der Spitzendiode entsteht um die Drahtspitzen eine p-Zone, so dass insgesamt ein pnp-Transistor entstanden ist. Das n-leitende Germanium stellt die Basis des Transistors dar<sup>1</sup>.



<sup>1</sup> Im Jahr 1956 bekamen Shockley, Bardeen und Brattain den Nobelpreis für Physik „für ihre Untersuchungen über Halbleiter und ihre Entdeckung des Transistoreffekts“.

*Abb. 5 - Prinzipieller Aufbau eines n-Kanal MESFET (Metal Semiconductor Field Effect Transistor) mit Source (S), dem Kanaleingang, dem Gate (G), der Steuerelektrode, und dem Drain (D), dem Kanalausgang*

Die Funktionsweise dieses Bipolartransistors basiert wesentlich darauf, dass die beiden p-leitenden Bereiche (der Emitter und der Kollektor in einem pnp-Transistor) nahe beieinander sind, so dass der Transport durch die Basis durch Diffusion erfolgt. Ein kleiner Basisstrom steuert einen großen Emitter-Kollektor-Strom. Das Bild verdeutlicht die Funktion für einen npn-Transistor, bei dem die Elektronen in der p-dotierten Basis, die dann dort Majoritätsträger sind, den Mechanismus dominieren. Der pn-Übergang zwischen Emitter und Basis ist in der üblichen („aktiv-normalen“) Betriebsart in Durchlassrichtung, der zwischen Kollektor und Basis in Sperrrichtung vorgespannt. Über den linken pn-Übergang werden Elektronen vom Emitter in die Basis geschickt. In einer Halbleiterdiode würden die Elektronen, aus dem linken Bereich kommend (hier ist es das n-Gebiet), im mittleren p-Bereich rekombinieren. In einem Transistor ist jedoch die Basiszone sehr viel kleiner als die Diffusionslänge. Die Elektronen gelangen deshalb nahezu vollständig bis zum Basis-Kollektor-Übergang. Dort herrscht wegen der Sperrpolung ein sehr starkes elektrisches Feld, in dem die ankommenden Elektronen vom positiven Potential am Kollektorkontakt abgesaugt werden und so einen großen Strom in Sperrrichtung ergeben. Die Zahl der am Basis-Kollektor Übergang ankommenden Elektronen ist also entscheidend für die Höhe des Kollektorstroms. Und diese kann über den Basisstrom gesteuert werden! In die Basis wird vom Basiskontakt her ein Löcherstrom (beim npn Transistor) injiziert. Wenn der Löcherstrom an der Basis geringfügig verändert wird, so muss sich der vom Emitter kommende Elektronenstrom um ein Vielfaches  $\beta$  verändern, da das Verhältnis der rekombinierenden zu den durch die Basis diffundierenden Elektronen immer etwa konstant ist. Verstärkt eingespeiste Löcher fordern einen höheren Strom an Elektronen an.

Eine sehr bedeutende Alternative zum Bipolartransistor stellt der Feldeffekttransistor (FET) dar, dessen Prinzip eigentlich sehr einfach ist: Leitet man Strom durch einen halbleitenden Kanal (er muss halbleitend sein, damit seine Eigenschaften durch das Einbringen von Ladungsträgern gezielt verändert werden können), so kann die Stärke des Stroms am Ausgang des Kanals durch eine senkrecht zum Kanal angebrachte Elektrode verändert werden, mit der der Flußquerschnitt verändert werden kann! An dieser Steuerelektrode („Gate“) liegt idealerweise nur eine kleine Spannung an und es fließt durch das Gate nur ein zu vernachlässigender Strom um die Raumladungszone, die unter dem Gate im Kanal entsteht, zu steuern. Ein großer Strom kann also mit einer kleinen Spannung gesteuert oder ggf. auch geschaltet werden.

Derartige FETs können sehr schnell sein, da die höchste Arbeitsfrequenz, die Stromverstärkungsgrenzfrequenz, umgekehrt proportional dem Quadrat der Gate Länge ist. Durch die ständige Verkürzung der Gate Länge in den vergangenen Jahren mit der sich

weiterentwickelnden Halbleitertechnologie (insbesondere den lithographischen Verfahren) konnten die Grenzfrequenzen dieser Transistoren enorm gesteigert werden.

Diese Grundprinzipien der Transistoren haben die Elektronik des 20. Jahrhunderts revolutioniert. Auf die Erfindung des Transistors folgend wurden zahlreiche weitere Transistortypen entwickelt. Man löste sich vom Germanium als Grundsubstanz und ging zum Silizium über, das gegenüber dem Germanium mehrere Vorteile bot (z.B. leichte Oxidierbarkeit, kostengünstige Verfügbarkeit großflächiger Siliziumsubstrate). Die Verwendung sogenannter Verbindungshalbleiter, deren wichtigster Vertreter Galliumarsenid ist, ermöglicht die Steigerung der Ladungsträgerbeweglichkeit im Kanal und damit eine weitere Geschwindigkeitssteigerung. Die Ausnützung von Quanteneffekten und die Verwendung von Halbleitern mit unterschiedlichen Materialeigenschaften in einem Bauteil, sog. Heterostrukturen, schließlich ermöglicht heute rauscharme Verstärker wie sie z.B. in Satelliten-Empfangsanlagen unentbehrlich sind (gemeint sind sogenannte HEMTs, High Electron Mobility Transistoren) und die Realisierung von Sendern und Empfängern z.B. für Automobil-Radare (gemeint sind HBTs, Hetero Bipolar Transistoren).

### **Integrierte Schaltkreise**

Der Weg zum integrierten Schaltkreis, der Integration mehrerer Transistoren auf einem Substrat, war naheliegend. Im Jahr 1958 wurde der erste „Integrated Circuit“ (IC) von Jack Kilby<sup>2</sup>, Texas Instruments, vorgestellt. Seit 1960 wird etwa alle 1,5 Jahre die Zahl der Transistoren pro Flächeneinheit verdoppelt. Gordon Moore, der Mitbegründer der Firma Intel, äußerte die Vermutung, dass sich die Komplexität integrierter Schaltkreise mit minimalen Komponentenkosten regelmäßig verdoppelt; je nach Quelle werden 12, 18 oder 24 Monate als Zeitraum genannt. Bis in die jüngste Zeit hat sich diese Prognose bestätigt (Moore'sches Gesetz). Inzwischen können mehrere Millionen Transistoren auf einer Fläche von 10mm x 10mm untergebracht werden.

Von besonderem Vorteil erweist sich in integrierten Schaltungen die Möglichkeit, sowohl n-leitende als auch p-leitende Kanäle auf einem Substrat herzustellen. Im ersten Fall werden Elektronen (n) für den Ladungsträgertransport genutzt und im zweiten Fall Defektelektronen (p, auch Löcher genannt). Das Grundprinzip der Complementary metal-oxide-semiconductor (CMOS) Technik in der Digitaltechnik ist die Kombination von p-Kanal- und n-Kanal-Feldeffekttransistoren. Durch die gleiche Steuerspannung jeweils zweier komplementärer Transistoren (einmal n-Kanal, einmal p-Kanal) sperrt immer genau einer, und der andere ist leitend. Es entstehen also zwei Schaltungszustände: Schaltungszustände „0“ – das könnte z.B. kein Strom am Drain sein, und „1“ – das könnte also voller Strom am Ausgang sein. Zwischen diesen Zuständen kann mit nur einer

---

<sup>2</sup> Physik-Nobelpreis im Jahr 2000



kleinen Spannungsänderung am Gate (ohne nennenswerten Stromfluss und damit Leistungsverbrauch) hin- und her geschaltet werden. Diese beiden Zustände bilden die Grundlage der Digitaltechnik. Denn jede beliebige Zahl kann auf der Grundlage des Zahlensystems mit der Basis 2 dargestellt werden!

Mit Hilfe der CMOS Technik können binäre Gatter dargestellt werden, mit denen wiederum boolesche Funktion abgebildet werden, die binäre Eingangssignale zu einem binären Ausgangssignal verarbeiten. Diese elektronischen Gatter sind die Kerne heutiger Mikroprozessoren. Die Leistung des ersten in Serie hergestellten Prozessors (Intel 4004, 1971) mit 2300 Transistoren reichte für den Betrieb eines Taschenrechners mit den vier Grundrechenarten. Der Pentium Prozessor von Intel, der 1993 auf den Markt kam, hatte bereits 3,1 Millionen Transistoren – im Jahr 2021 haben die AMD EPYC Server Prozessoren der Serie Milan bis zu 40 Milliarden Transistoren. Zur Verdeutlichung des riesigen technologischen Sprungs innerhalb der letzten 50 Jahre sei die Rechenleistungen eines iPhones mit der des Apollo Guidance Computers (AGC) verglichen. Der AGC steuerte die erste bemannte Mondlandung aus dem Jahr 1969 mit der Apollo 11 und hatte einen Arbeitsspeicher von 32.768 Bits beziehungsweise 4.096 Byte. Bei aktuellen iPhones sind derzeit 34.359.738.368 Bits üblich und damit etwas mehr als das millionenfache des Apollo-Computers. Auch beim Festspeicher sind die Unterschiede riesig. Der AGC konnte auf 589.824 Bits ROM (Read Only Memory) zugreifen. Im Vergleich dazu weisen aktuelle Smartphones mit mittlerweile 512 Gigabyte rund sieben Millionen Mal mehr Speicher auf als der AGC. Auch die Taktfrequenzen sind gestiegen: Im Apollo Guidance Computer lief ein Prozessor mit 0,043 MHz, wohingegen das aktuelle iPhone mit 2.490 MHz arbeitet.

Ein halbes Jahrhundert schien die Beobachtung Gordon Moores, dass sich die Integrationsdichte, also die Anzahl von Transistoren pro Flächeneinheit, ungefähr alle zwei Jahre verdoppelt, ziemlich gut zuzutreffen. Nun geht man davon aus, dass das Mooresche Gesetz seine Gültigkeit verliert, weil man den Transistor nach 2029 nicht weiter verkleinern kann und weil die Verbindungsleitungen in den integrierten Schaltungen nicht mehr weiter verkleinert werden können. Mit aktuell 5 nm lateral ist die Lithografie an ihrer technischen Grenze und die Strukturen im atomaren Maßstab angelangt. Es wird erwartet, dass die Dimensionen innerhalb eines Jahrzehnts noch auf 1 nm verkleinert werden können. (1 nm entspricht etwa der Breite von fünf Siliziumatomen).

Einen Ausweg bietet der Weg in die dritte Dimension: das Stapeln von Silizium-Transistoren. Auch könnten Transistoren aus Schichten von Kohlenstoff-Nanoröhrchen in 3D umgesetzt werden. Entwicklungen in der Halbleitertechnik werden künftig durch 3D, neue Werkstoffe und neue Formen der Integration wie die Zusammenführung unterschiedlicher Fähigkeiten auf einem einzigen Chip und die Integration von Nicht-Standard-Komponenten definiert werden.

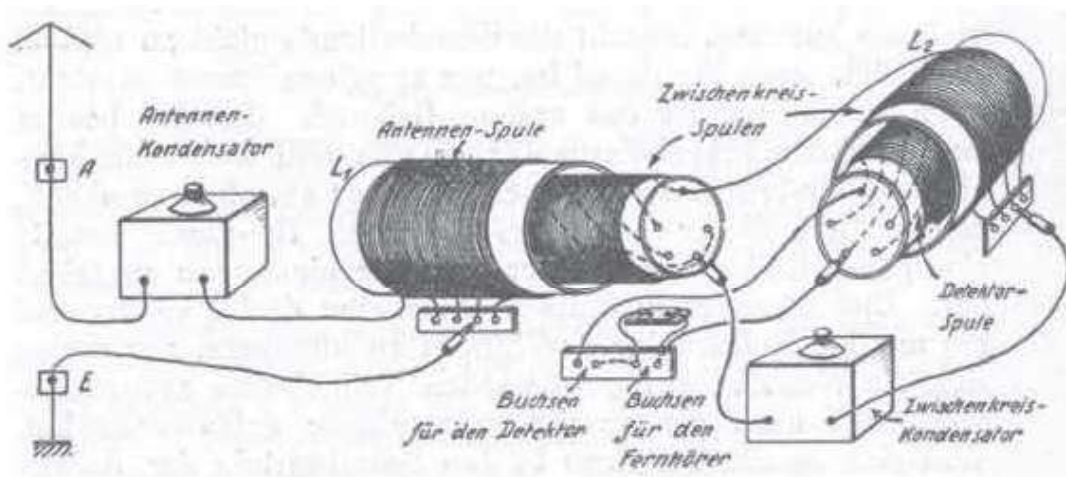


Abb. 6 - Zweikreis-Detektor aus Zeitschrift 'Funk-Bastler, 1926, Ausgabe 9, Seite 109'. Man beachte, dass keine Stromversorgung notwendig ist.

Die Fortschreibung eines möglicherweise modifizierten Mooreschen Gesetzes wird entscheidend sein für die Umsetzung von Rechenaufgaben künstlicher Intelligenz – das maschinelle Lernen (intensive Rechenoperationen, große Datenmengen, hoher Energieverbrauch).

### Schaltungstechnik

Damit die für das menschliche Wesen wahrnehmbaren Schallwellen (im Frequenzbereich von einigen Hertz bis 20000 Hertz [bei jungen Menschen]) drahtlos transportiert werden können, müssen sie auf einen Träger gebracht werden, der sich als elektromagnetische Welle ausbreiten kann. Dieser Vorgang wird als Modulation bezeichnet. Im einfachsten Fall wird die Amplitude, das ist die Stärke der elektromagnetischen Welle, durch das hörbare Audiosignal auf der Senderseite verändert. Diese Amplitudenmodulation kann durch eine einfache Gleichrichtung wieder rückgängig gemacht werden. Dadurch wird also auf der Empfängerseite das elektromagnetische Trägersignal wieder entfernt und man kann das Audiosignal direkt in einen Kopfhörer geben und dort wieder hören. Da in der Realität sehr viele Quellen ein elektromagnetisches Signal ausstrahlen, muss vor dem Gleichrichter dafür gesorgt werden, dass nur das oder ein gewünschtes Signal an den Detektor gelangt. Dafür benötigt man einen Schwingkreis, der aus einer Spule (eine Induktivität) und einem Kondensator (einer Kapazität) gebildet werden kann. Im Falle der Parallelschaltung der beiden Elemente kann man sich vorstellen, dass die Spule bei sehr niedrigen Frequenzen einen Kurzschluss darstellt (der Gleichstrom sieht ja nur den Draht) und bei sehr hohen Frequenzen der Kondensator einen Kurzschluss darstellt. Irgendwo dazwischen – abhängig von Induktivität und Kapazität – hat der Parallelschwingkreis hohe Impedanz – er lässt also das Signal mit einer bestimmten Frequenz durch, es ist sozusagen selektiert. Mit mehreren solchen Schwingkreisen kann die Selektivität gesteigert werden. Und dann gelangt das Signal zum Gleichrichter, und alle anderen Signale aus dem „Wellensalat“ sind kurzgeschlossen. Genauso funktionierten die ersten Detektorradios.



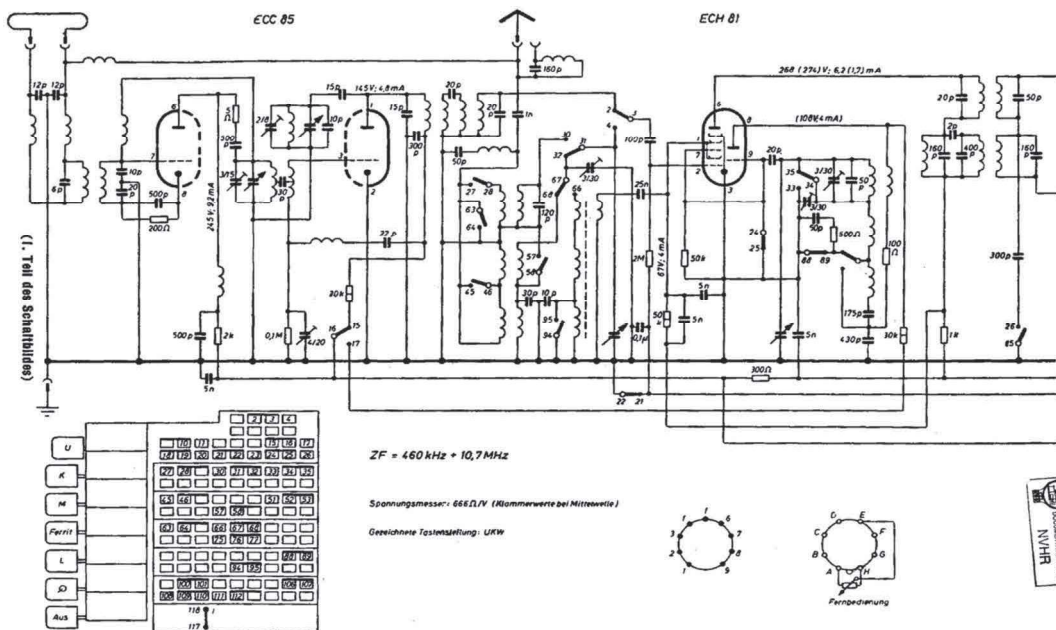


Abb. 7 - Schaltbild (Hochfrequenzteil) des Imperial J506 W aus dem Jahr 1958. Doppel Superhet mit zwei Zwischenfrequenzen und drehbarer Ferritantenne

Natürlich wollte man das schwache Kopfhörer-Signal gerne verstärken, um es über Lautsprecher hörbar zu machen. Dazu setzte man Verstärkerröhren ein.

Neben der lautsprechertauglichen Verstärkung des Radiosignals wurden zahlreiche andere Verbesserungen in die Schaltungstechnik eingeführt:

- Umsetzung („Mischung“) auf eine (oder mehrere) Zwischenfrequenz(en) (ZF) im Überlagerungsempfänger (auch Superhet genannt) mit den Vorteilen der Verringerung der Bandbreite bei der Umsetzung auf eine feste ZF; dort hohe Verstärkung möglich bei reduzierter Rückkopplungsgefahr und reduzierten Anforderungen an die Filter
- Automatische Frequenzregelung (AFC) für vereinfachte Senderabstimmung und Automatische Verstärkungsregelung (AGC) für einen großen Dynamikbereich

Die Transistortechnik übernahm zunächst – zumindest für den Rundfunk-Empfang bis zu Frequenzen von 100 MHz (UKW Bereich) – die auf der Basis der Röhrentechnik entwickelten Schaltungskonzepte. Obwohl also die Architekturen sich kaum veränderten brachte die Transistortechnik viele praktische Vorteile für die Anwender:

- Nach dem Einschalten ist das Radio sofort betriebsbereit. Es müssen ja keine Glühfäden aufgeheizt werden
- Durch die vermiedene Heizung sind die Betriebseigenschaften viel stabiler, da die Empfindlichkeit des Geräts auf Temperaturschwankungen geringer ist

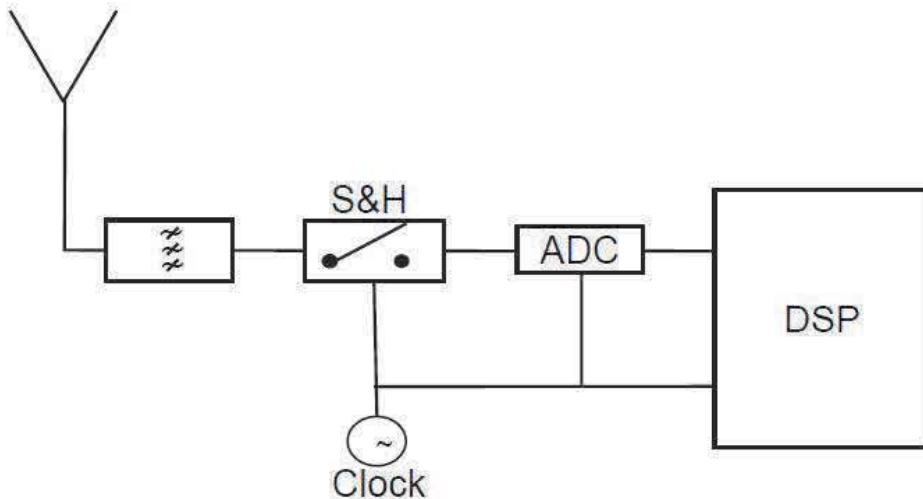


Abb. 8 - Blockschaltbild eines direkt digitalisierenden Empfängers mit Unterabtastung durch eine sample&old (S&H) Einheit und anschließende Digitalisierung in einem ADC (Analog Digital Converter). Die Auswahl der Signale erfolgt dann softwaregesteuert in einem Prozessor

- Transistoren können mit Batterie-Spannungen betrieben werden – das Radio wird portabel (zwar gab es auch portable Röhrenradios, die jedoch aufgrund der notwendigen Erzeugung einer hohen Anodenspannung einen Spannungswandler in Form eines „Zerhackers“ benötigten, die das ganze voluminös und schwer machten. Gab es aber z.B. im Mercedes 190 SL)
- Die Zuverlässigkeit und Haltbarkeit von transistorisierten Geräten sind viel höher

Nachdem die Grenzfrequenzen der in den 60er Jahren entwickelten Transistoren auf der Basis von Germanium zunächst nicht über 100 MHz ( $100 \cdot 10^6 \text{ Hz}$ ) hinaus kamen, setzte in den 70er Jahren mit der Siliziumtechnologie und in den 80er Jahren mit den Heterostrukturen und Verbindungshalbleitern (z.B. Gallium-Arsenid) ein Wachstum der Grenzfrequenzen ein, das heute bei 1 THz ( $1 \cdot 10^{12} \text{ Hz}$ ) noch kein Ende gefunden hat. Zusammen mit der Entwicklung von integrierten Schaltungen, d.h. der Möglichkeit viele Millionen (!) Transistoren auf einem chip der Fläche von wenigen  $\text{mm}^2$  zu integrieren, eröffneten sich jetzt neue Möglichkeiten für Schaltungskonzepte. Eine Schlüsselrolle spielt dabei die Digitalisierung. In der Elektrotechnik wird darunter im Wesentlichen „Abtastung“ verstanden. Ein analoges zeitkontinuierliches Signal wird nur zu diskreten Zeitpunkten abgetastet. Und diese Messwerte werden in einer Zahlenwelt auf der Basis „2“ verarbeitet, dem Dualsystem. Es gibt also nur die Zustände „0“, d.h. keine Spannung, oder „1“, d.h. Spannung ist an oder eingeschaltet. Dies hat den großen Vorteil, dass Schwankungen der Pegel, wo auch immer sie herrühren, gar keinen Einfluss auf die verarbeiteten Werte haben, solange nur der Zustand „0“ vom Zustand „1“ unterschieden werden kann.

Diese schnellen Abtaster werden auch Analog-Digitalwandler (A/D) genannt und haben heute Grenzfrequenzen, die die direkte Abtastung der UKW-Signale ermöglichen<sup>3</sup>. Heute sind analoge Komponenten in Rundfunkempfängern im Wesentlichen nur noch in Form von Vorverstärkern direkt vor Analog-Digitalwandlern zu finden. Nach einer möglichst sparsamen analogen Verarbeitung durch Filter und Vorverstärker oder Dämpfungsglieder wird das Eingangssignal direkt digitalisiert. Nach dem Nyquist-Theorem muss das Eingangssignal zum Digitalisieren mit mindestens der doppelten maximalen Nutzfrequenz abgetastet werden, um das Signal rekonstruieren zu können. Mittlerweile gibt es A/D-Umsetzer mit Abtastfrequenzen bis zu 3,6 GSPS (Giga-Samples Per Second) bei 12 bit-Auflösung<sup>4</sup>. Alle Sender liegen sozusagen gleichzeitig im Digitalteil des Radios vor und werden software-gesteuert ausgewählt und dem Nutzer zu Gehör gebracht – das Software Defined Radio (SDR).

---

<sup>3</sup> J.-F.Luy et al., Configurable RF Receiver Architectures, IEEE Microwave Magazine, March 2004

<sup>4</sup> z.B. Texas Instruments, <https://www.ti.com/cn/cn/lit/wp/snua099/snua099.pdf?ts=1615938906290>