

TECHNISCHE UNIVERSITÄT BERLIN

AKADEMISCHE REDEN

36

REKTORATSÜBERGABE

19. NOVEMBER 1965

AN DER

TECHNISCHEN UNIVERSITÄT

BERLIN

(1966)

Hochansehnliche Festversammlung!

Es ist alter akademischer Brauch, daß der neue Rektor der scheidenden Magnifizienz den Dank der Universität ausspricht. Für mich ist dies nicht nur eine erste Amtspflicht, sondern wirklich ein tiefes inneres Bedürfnis.

Sehr geehrter Herr Hilbig, Sie haben zwei Jahre lang in unermüdlicher selbstloser Schaffenskraft Ihre Arbeit für die Technische Universität eingesetzt, nachdem Sie zuvor schon ein recht arbeitsreiches Jahr als Prorektor hinter sich hatten. Sie haben darüber hinaus wiederum das Amt des Prorektors auf sich genommen, und Sie haben mir soeben Ihre Unterstützung zugesagt, wofür ich Ihnen ganz besonders dankbar bin. Ich habe es selbst zwei Jahre lang aus nächster Nähe miterleben können, wie Sie mit der gelassenen Ruhe, die Ihre Persönlichkeit ausstrahlt, mit Ihrer warmen Menschlichkeit und Ihrer überragenden Umsicht alle Amtsgeschäfte gemeistert haben während Ihres langen Rektorates. Viele Erfolge konnten wir bereits Ihrem Bericht entnehmen; für weitere Erfolge sind die Wurzeln gelegt. Dafür, sehr geehrter Herr Hilbig, danke ich Ihnen von ganzem Herzen im Namen der gesamten Technischen Universität.

Meine sehr geehrten Damen und Herren, es ist akademischer Brauch, daß der neue Rektor bei seinem Amtsantritt einen Vortrag über sein eigenes Wissenschaftsgebiet hält. Es ergeben sich dabei



Der Rektor Prof. Dr.-Ing. F.-W. Gundlach

zwei Möglichkeiten: entweder ein einzelnes Thema etwas gründlicher darzustellen oder einen Gesamtüberblick über das Arbeitsgebiet zu versuchen. Ich habe die zweite Möglichkeit gewählt und will Ihnen in knappen Worten „Die Entwicklung der Hochfrequenztechnik“ schildern.

Die Hochfrequenztechnik hat schon oft das Interesse einer breiten Öffentlichkeit auf sich gelenkt, so um die Jahrhundertwende bei der Atlantiküberbrückung durch Marconi, in den zwanziger Jahren durch die Einführung des Rundfunks, in der Mitte der dreißiger Jahre durch die ersten Fernsehvorführungen, im letzten Krieg durch den Einsatz der Radartechnik, nach dem Krieg durch die Entwicklung der schnellen digitalen Rechenautomaten und schließlich in den letzten Jahren durch die Entwicklung der Nachrichtensatelliten.

Unser Überblick soll mit einem kurzen historischen Rückblick beginnen. Die Beschäftigung mit den hochfrequenten elektrischen Schwingungen ist über 100 Jahre alt, im Jahre 1851 untersuchte erstmalig Helmholtz die Schwingungen von Funkentladungen an Induktionsapparaten, kurz darauf wiederholte Feddersen ähnliche Versuche an Leydener Flaschen. Beide stellten fest, daß diese Funkenentladungen schnelle elektrische Schwingungen sind. Im Jahre 1887 nahm Heinrich Hertz diese Untersuchungen wieder auf; durch seine große Experimentierkunst gelang es ihm auch, die Frequenz, d. h. die Häufigkeit dieser Schwingungen zu messen; er ermittelte Frequenzen von 80 MHz (nach heutigem Sprachgebrauch), also 80 Millionen Schwingungen in der Sekunde. Besondere Aufmerksamkeit erregte die im Jahre 1889 erschienene Arbeit von Heinrich Hertz „Über die Strahlen elektrischer Kraft“. Hertz stellte fest, daß die elektrischen Hochfrequenzschwingungen elektromagnetische Wellen in den freien Raum ausstrahlen können, die sich nach der Maxwell'schen Theorie genau berechnen lassen und sich genauso verhalten wie die Lichtwellen, lediglich mit dem Unterschied einer wesentlich größeren Wellenlänge. Kurz nach diesen Untersuchungen über die Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen im freien Raum untersuchte man auch die Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen längs Leitungen; Ernst Lecher untersuchte 1890 die Zweidrahtleitungen, 1897 gab Lord Rayleigh bereits die Hohlleitung an, also die Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen in einem hohlen Metallrohr. Bis zu dieser Zeit, also etwa bis zur Jahrhundertwende, ging es den Forschern lediglich um das Gewinnen physikalischer Erkenntnisse. Der ingenieurmäßige Einsatz, also die wirkliche Hochfrequenztechnik, beginnt erst kurz vor der Jahrhundertwende; 1897 stellten Marconi und Popow unabhängig voneinander fest, daß sich elektromagnetische Wellen über große Entfernungen ausbreiten und sich für die Nachrichtenübertragung eignen. Im Jahre 1901 gelang Marconi die erste Atlantiküberbrückung mit elektromagnetischen Wellen; er hatte zu diesem Zweck sehr große Antennen gebaut (der Name Antenne ist übrigens auch von ihm erstmalig angegeben worden). Infolge der durch Funken erregten sehr

großen Antennen kam er jetzt zu wesentlich längeren Wellen als zuvor Heinrich Hertz. Dieser zuerst wohl unbewußt durchgeführte Übergang zu längeren Wellen kam der Ausbreitung über große Strecken sehr zugute und ist die Ursache für die ersten großen Erfolge. Sofort setzte eine systematische Untersuchung der Wellenausbreitung auf internationaler Basis ein, im Jahre 1913 wurde die Union Radio Scientifique Internationale gegründet. – Die anfängliche Entwicklung der Hochfrequenztechnik war dadurch gehemmt, daß man für die schnellen elektrischen Schwingungen keine Verstärker besaß, die erst gegen Ende des ersten Jahrzehnts dieses Jahrhunderts geschaffen wurden; im Jahre 1906 gab de Forest in den Vereinigten Staaten von Amerika erstmalig eine gittergesteuerte Verstärkerröhre an, kurz darauf schuf in Österreich Robert von Lieben ein ganz ähnliches Verstärkerprinzip. Nachdem eine Hochfrequenzverstärkung möglich wurde, gelang es auch durch das von Alexander Meißner hier in Berlin im Jahre 1913 erfundene Prinzip der Rückkopplung, Sender für elektrische Schwingungen bei fast allen gewünschten Frequenzen zu entwickeln. Beinahe fünfzig Jahre lang haben die Elektronenröhren in der Hochfrequenztechnik das Feld beherrscht. In neuester Zeit haben sie durch die Halbleiterbauelemente eine ernsthafte Konkurrenz bekommen. Schon 1874 wies Ferdinand Braun in Straßburg nach, daß Halbleiterflächen gleichrichtende Eigenschaften haben und sich vorzüglich zur Gleichrichtung hochfrequenter Schwingungen eignen. Dieser damals geschaffene sog. Kristalldetektor findet bis heute in der Hochfrequenztechnik Verwendung. Der wesentliche Fortschritt auf dem Gebiet der Halbleiterbauelemente kam aber erst im Jahre 1948, als Bardeen, Brattain und Shockley das Prinzip des Transistors entdeckten und damit ein neues verstärkendes Bauelement für die Hochfrequenztechnik schufen. – Schließlich fand noch ein weiterer physikalischer Effekt seinen Eingang in die Hochfrequenztechnik, der Effekt der induzierten Emission, der bereits im Jahre 1917 von Einstein angegeben wurde; daß sich dieser Effekt für die Erzeugung von Schwingungen allerhöchster Frequenzen eignet, wiesen im Jahre 1955 Townes in den Vereinigten Staaten und Basow und Prokhorow in Rußland nach. Auf diese Weise haben wir jetzt die Möglichkeit, hochfrequente Schwingungen bis hinauf in das Gebiet der optischen Frequenzen zu erzeugen und zu verstärken. – In der historischen Entwicklung der Hochfrequenztechnik schließt sich somit ein Kreis: Heinrich Hertz wollte die Natur der Lichtwellen nachweisen und erzeugte zu diesem Zweck experimentell sehr viel längere elektromagnetische Wellen; Marconi verwendete noch wesentlich größere Wellenlängen. Anschließend hat die Hochfrequenztechnik in einer über ein halbes Jahrhundert dauernden Forschungs- und Entwicklungsarbeit die Wellenlängen immer wieder verkürzt, bis wir heute wieder die Lichtwellen erreicht haben, die wir aber nun in ganz anderer Weise mit hochfrequenztechnischen Prinzipien beherrschen als in der klassischen Optik.

Nach diesem kurzen historischen Überblick gestatten Sie mir, den heutigen Entwicklungsstand der Hochfrequenztechnik genauer aufzuzeichnen. Das Gebiet der Hochfrequenztechnik ist außerordentlich gegensätzlich, weil es einen sehr großen Frequenzbereich überstreicht. Noch heute haben wir Lang- und Längstwellensender, die Frequenzen von 15 000 Hz (entsprechend einer Wellenlänge von 20 km) erzeugen; andererseits kommen wir durch die auf dem Prinzip der induzierten Emission beruhenden Molekularverstärker bis in den optischen Bereich mit Wellenlängen von Bruchteilen eines millionstel Meters. Wir überstreichen also in der Hochfrequenztechnik einen Frequenzbereich oder Wellenlängenbereich von etwa $1 : 10^{11}$. Noch größere Gegensätze bestehen in der Hochfrequenztechnik bei den zu verarbeitenden elektrischen Leistungen. Moderne Senderöhren können Impulsleistungen bis zu 50 MW (50 Millionen Watt) erzeugen; die geringsten Leistungen, die nach dem heutigen Stand der Technik die empfindlichsten Empfänger noch nachweisen können (etwa die Signale der Marssonde), liegen bei $5 \cdot 10^{-19}$ W. Dies bedeutet, daß wir heute in der Hochfrequenztechnik einen Leistungsbereich von etwa $1 : 10^{26}$ verarbeiten. – Gegensätzlich ist außerdem die Anwendung der Hochfrequenztechnik. Für die Energietechnik hat die Hochfrequenztechnik heute noch geringe Bedeutung; Hochfrequenzwärme wird in vielen Zweigen der industriellen Fertigung und in der Medizin ausgenutzt; man hat auch in neuerer Zeit Überlegungen angestellt, mit sehr kurzen elektromagnetischen Wellen die elektrische Energie durch Strahlung zu übertragen, was für die Weltraumtechnik einmal von Bedeutung sein kann. Die wesentliche Anwendung, die die Hochfrequenztechnik heute findet, liegt in der Nachrichtentechnik, und zwar der Nachrichtentechnik im allgemeinsten Sinne, d. h. sowohl in der Nachrichtenübertragung wie in der Nachrichtenverarbeitung, Meß- und Regelungstechnik eingeschlossen. Die Menschheit hat heute einen unerhört großen und ständig wachsenden Bedarf an Nachrichtenübertragung wie Nachrichtenverarbeitung. Man kann diesen dauernd steigenden Bedarf nur dadurch lösen, daß man zu immer höheren Betriebsfrequenzen übergeht.

An einer kleinen Bilderserie soll der heutige Stand der Hochfrequenztechnik näher erläutert werden.

Ein wesentliches Problem ist auch heute noch die Abstrahlung oder die Aufnahme elektromagnetischer Wellen durch Antennen. Bei Langwellen (Kilometerwellen) ist der Antennenaufbau fast der gleiche wie zur Zeit von Marconi (Bild 1 a); bei Mittelwellen (Hekto-meterwellen) sind die Antennen in ihrer geometrischen Ausbreitung etwa von der gleichen Größenordnung wie die Wellenlänge; es läßt sich dann bei geeigneter Konstruktion eine gewisse Richtwirkung erzielen (Bild 1 b). Bei kürzeren Wellen (Dekameterwellen und Meterwellen) kann man durch eine Vielzahl von strahlenden Elementen

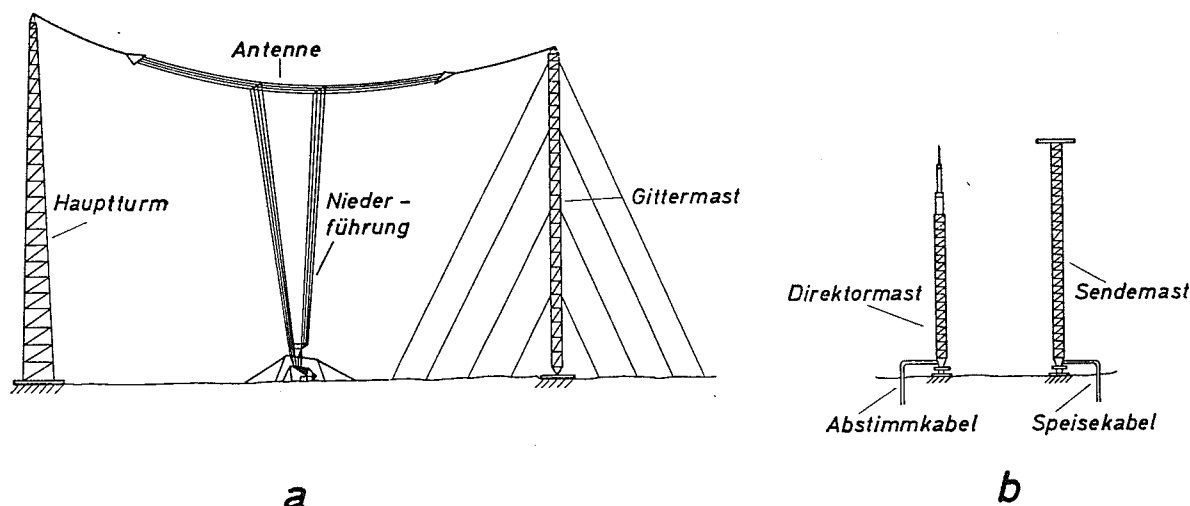


Bild 1. Lang- und Mittelwellenantennen.

- a) *Langwellenantenne nach Marconi, bestehend aus einer horizontal gespannten Antennenreuse mit Niederführung zum Sendehaus; trotz beträchtlicher Höhe der Türme bis zu 200 m ist die Antenne bei Kilometerwellen noch sehr klein gegen die Wellenlänge, der Abstrahlungswirkungsgrad ist schlecht, die Strahlung ist in horizontaler Richtung ungebündelt.*
- b) *Mittelwellenantenne mit Richtwirkung, bestehend aus einem Sendemast und einem sog. Direktormast; der Sendemast ist ein auf einem Isolator stehender Metallgittermast, der über ein Speisekabel an den Sender angeschlossen wird und infolge seiner geometrischen Länge von etwa einer Viertel-Wellenlänge mit gutem Wirkungsgrad strahlt; der Direktormast ist ebenfalls ein auf einem Isolator stehender Metallgittermast, der jedoch nicht an den Sender angeschlossen wird, sondern bei geeigneter Abstimmung durch ein Abstimmkabel von der Strahlung des Sendermastes zu Schwingungen angeregt wird; ist die Schwingungsphase des Direktormastes richtig abgestimmt, so heben sich die von den beiden Masten abgestrahlten Wellen in der Ferne nach rechts hin gegenseitig auf, während sie sich nach links hin addieren; diese Richtstrahlung ist bei der Versorgung gewisser Gebiete mit Rundfunk erwünscht.*

eine starke Bündelung erzielen (Bild 2 a). Im Gebiet der Dezimeter- und Millimeterwellen kann man schließlich Antennen nach den Prinzipien der geometrischen Optik konstruieren (Bild 2 b und c).

Die hochfrequente Nachrichtenübertragung vollzieht sich meist dicht über der Erdoberfläche; Satelliten und Raumsonden haben wir erst seit kürzerer Zeit. Die Ausbreitung wird durch die Erdatmosphäre entscheidend beeinflusst; in höheren Schichten wird die atmosphärische Luft durch die Sonneneinstrahlung ionisiert, die ionisierten Schichten sind für längere Wellen (bis etwa in das Gebiet der Dekameterwellen) fast undurchlässig, die Ausbreitung ist bei diesen Wellen an den Raum zwischen der Erdoberfläche und der kugelförmigen ionisierten Schicht gebunden (Bild 3 a und b). Bei kürzeren Wellenlängen sind die ionisierten Schichten unwirksam, die unterschiedliche Dichte und der unterschiedliche Wasserdampfgehalt der

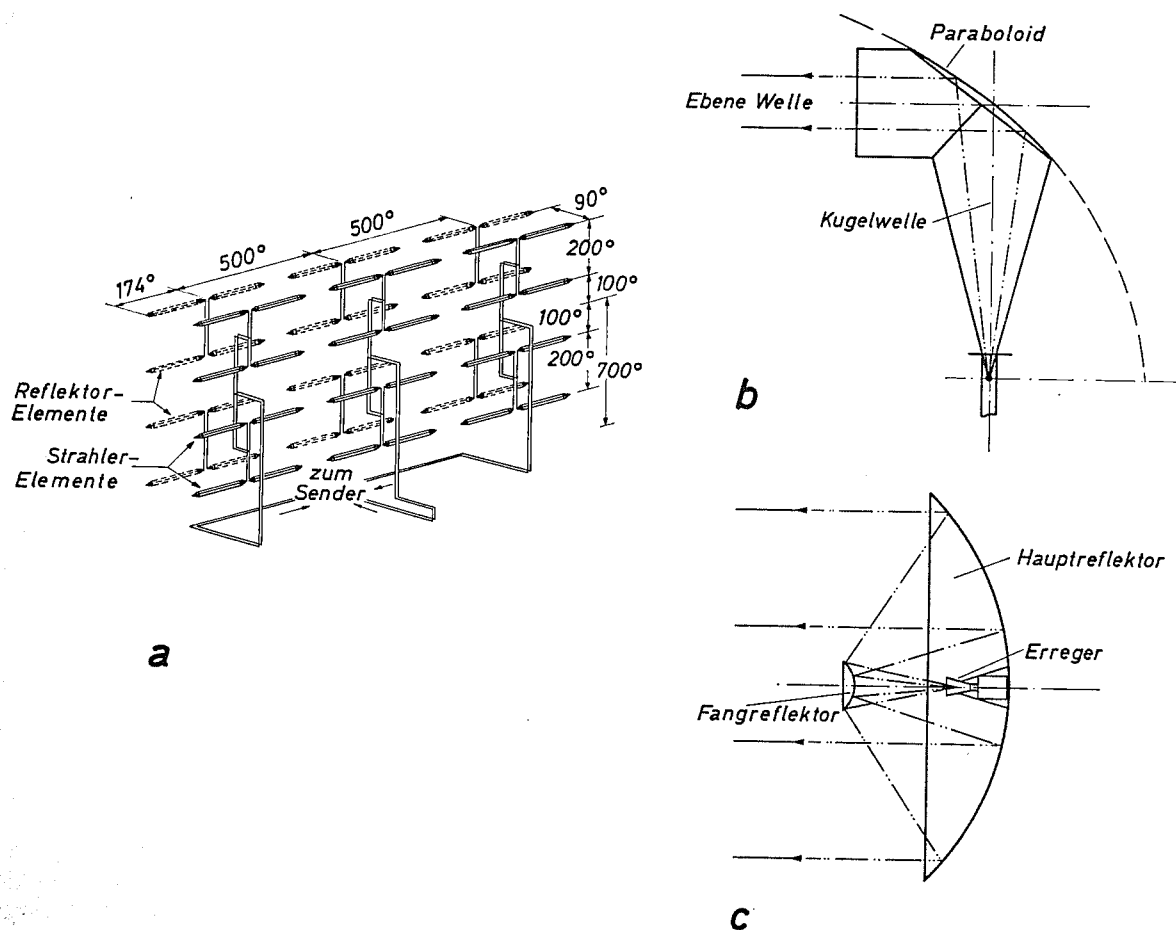


Bild 2. Antennen für kurze Wellen.

- Gruppenstrahler für Meterwellen, bestehend aus Strahlerelementen in Form von Dipolen, die über Verbindungsleitungen an den Sender parallel angeschaltet sind; hinter den Strahlerelementen befinden sich Reflektorelemente, die die Strahlung nach hinten unterdrücken; die Strahlung aller Dipole summiert sich nach vorn (senkrecht zur Dipolebene), zu den Seiten und nach hinten hebt sich die Strahlung wegen der Laufzeitunterschiede mehr oder weniger auf; Antennen mit sehr viel Elementen ermöglichen eine sehr scharfe Bündelung (die geometrische Länge der Elemente ist in der Zeichnung in Winkelgraden angegeben, 360° entsprechen einer Wellenlänge).
- Hornparabol-Antenne für Dezimeter- und Zentimeterwellen, bestehend aus einem Trichter, der am oberen Ende mit einem Parabolspiegel schräg abgedeckt ist; der Parabolspiegel ist ein Ausschnitt aus einem großen Rotationsparaboloid, dessen Brennpunkt mit der Spitze des Trichters zusammenfällt; durch den an einen Sender angeschlossenen Trichter läuft von unten nach oben eine elektromagnetische Kugelwelle, die durch den Parabolspiegel nach links umgelenkt und zugleich in eine ebene Welle verwandelt wird.
- Sog. Cassegrain-Antenne für Zentimeterwellen, nach dem Prinzip der optischen Teleskope, bestehend aus einem großen parabolisch gekrümmten Hauptreflektor und einem eingebauten kleinen hyperbolisch gekrümmten Fangreflektor; die Strahlung kommt in Form einer Kugelwelle aus einem hornförmigen Erreger, wird vom Fangreflektor als Kugelwelle in den Hauptreflektor zurückgestrahlt und

von diesem nach links in Form einer ebenen Welle in die Ferne abgestrahlt; Antennen dieser Art sind bis zu Durchmessern von 100 m gebaut worden und ermöglichen Bündelungsschärfen von Bruchteilen eines Winkelgrads; derartige Bündelungen werden für den Satellitenfunk und die Radioastronomie benötigt.

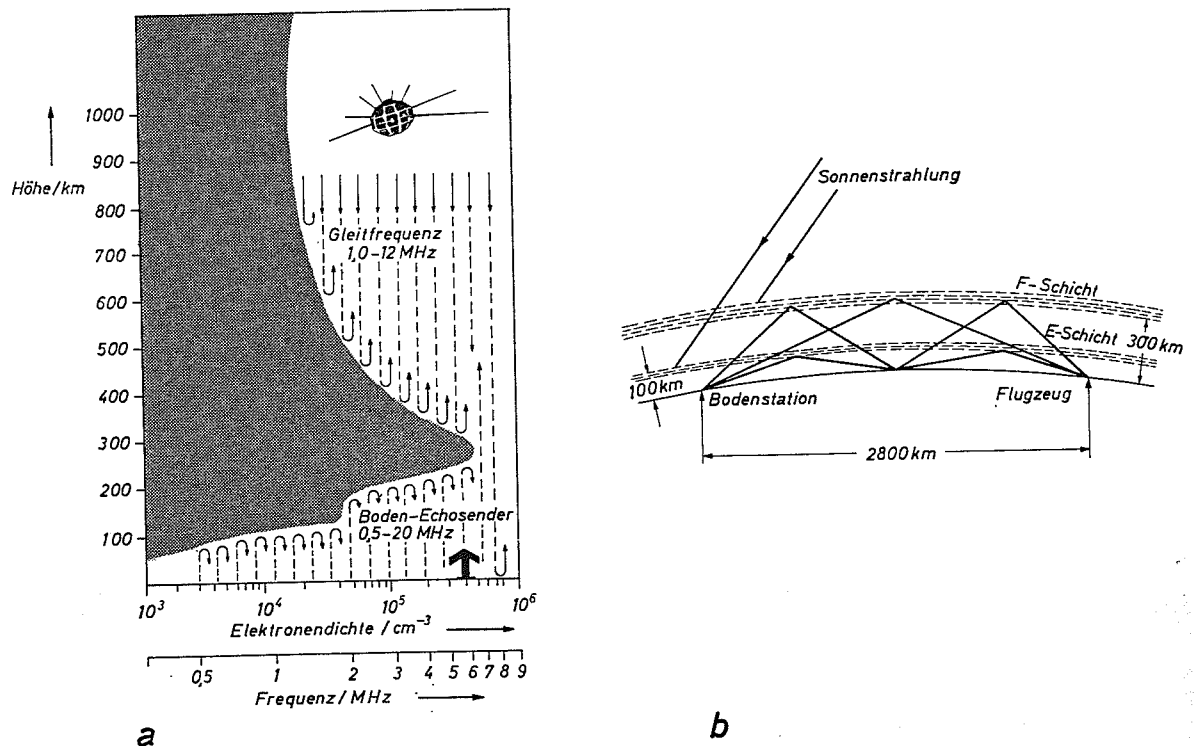
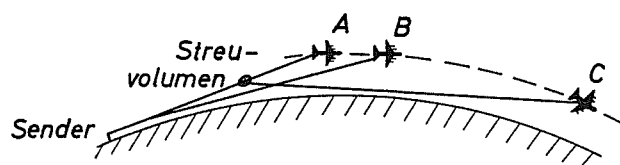


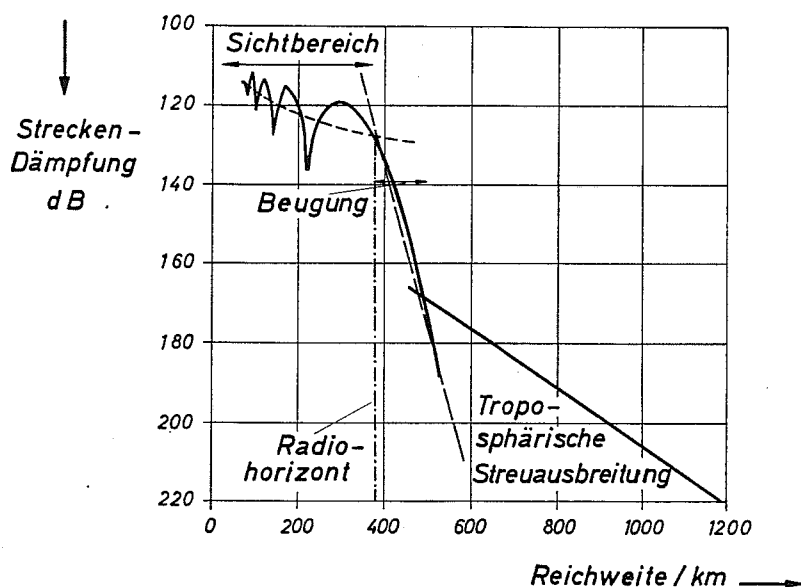
Bild 3. Einfluß der Ionosphäre auf die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen.

- a) Abhängigkeit der durch die ionisierende Sonneneinstrahlung in der Atmosphäre erzeugte Elektronendichte (Abszisse) in Abhängigkeit von der Höhe über dem Erdboden (Ordinate); im Normalfall prägen sich deutlich 2 Schichten aus, die E-Schicht und F-Schicht heißen; ionisierte Schichten haben die Eigenschaft, für elektromagnetische Wellen bis zu einer bestimmten, von der Elektronendichte abhängigen Frequenz (zweiter Abszissenmaßstab) undurchlässig zu sein; die Strahlung von am Boden befindlichen Sendern wird bis zu Frequenzen von etwa 2 MHz von der E-Schicht, bis zu Frequenzen von etwa 6 MHz von der F-Schicht reflektiert; ebenso wird die Strahlung eines über der Ionosphäre fliegenden Satellitensenders von der oberen Kante der F-Schicht zurückgeworfen; erst bei Betriebsfrequenzen über 6 MHz ist eine Funkverbindung zwischen Boden und Satelliten möglich.
- b) Funkverkehr zwischen einer Bodenstation und einem in geringerer Höhe über dem Erdboden fliegenden Flugzeug; die Strahlen können durch Reflexion an der F-Schicht oder durch Zickzackreflexion am Erdboden und an der F-Schicht oder E-Schicht den Funkverkehr weit über den optischen Horizont hinaus, bei günstigen Bedingungen sogar bis zu den Antipoden, ermöglichen.

Luft sind jedoch auch hier von erheblichem Einfluß auf die Ausbreitung (Bild 4 a und b). – Die Lufthülle und alle Himmelskörper senden infolge ihrer Eigentemperatur eine thermische Störstrahlung aus, die



a.



b.

Bild 4. Einfluß der Troposphäre auf die Ausbreitung von kurzen Wellen.

- a) Funkverkehr mit einem in bestimmter Höhe über dem Erdboden fliegenden Flugzeug; ohne die Wirkung der Troposphäre würde ein am Boden befindlicher Sender das Flugzeug nur bis zu einer Entfernung entsprechend Stellung A erreichen können (der Punkt A ist durch den Schnitt der am Ort des Senders an die Erdkugel gelegten Tangente mit der Flugzeugbahn bestimmt); infolge der nach oben hin abnehmenden Dichte der atmosphärischen Luft und infolge des Wasserdampfgehalts wird der Strahl gebrochen und etwas zur Erde hin gekrümmt, so daß das Flugzeug noch bei Entfernungen entsprechend der Lage B erreicht wird; da die Luft in Wirklichkeit nicht ganz homogen geschichtet ist, sondern Störungen – Schlieren in der Bezeichnungsweise der Optik – aufweist, werden die Strahlen an den immer vorhandenen Streuvolumina gestreut, so daß sich erhebliche Reichweiten über den „Radiohorizont“ hinaus, etwa bis zur Stellung C, erreichen lassen.
- b) Quantitative Darstellung der Streckendämpfung in Abhängigkeit von der Reichweite: Für den in Skizze a gezeichneten Betriebsfall innerhalb des Sichtbereiches bis zum Radiohorizont ist die Dämpfung verhältnismäßig niedrig, sie nimmt dann im Gebiet der Beugung um die Erdkugel erheblich zu, bei größeren Entfernungen wird diese Zunahme durch die troposphärische Streuenausbreitung wieder gemildert, so daß ein Funkverkehr bei Meterwellen weit über den Radiohorizont hinaus möglich ist.

sich in den empfindlichen Empfängern als „Rauschen“ bemerkbar macht. Besonders gering sind die Rauschstörungen im unteren Dezimeterwellen- und oberen Zentimeterwellengebiet (Frequenzen zwischen 1 und 10 GHz, vgl. Bild 5). Dieser Wellenlängenbereich eignet sich deshalb besonders zum Empfang ferner Raumsonden. Der Funkverkehr mit der Marssonde in einer Entfernung von etwa 260 Millionen Kilometern hat die bisher größte überbrückte Entfernung in der Hochfrequenztechnik gefordert.

Neben der Ausbreitung im freien Raum oberhalb der Erdoberfläche ist die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen auf Leitungen für die Hochfrequenztechnik von besonderer Bedeutung. Die Leitungstechnik wird in den künftigen Jahren noch eine ganz entschei-

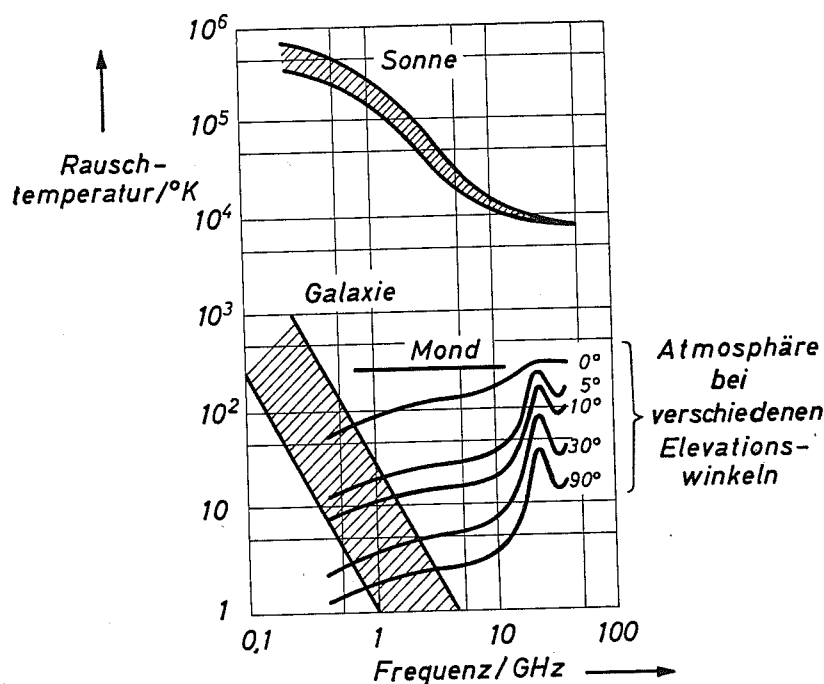


Bild 5. Thermische Störstrahlung (gekennzeichnet durch die Rauschtemperatur) von Sonne, Galaxie, Mond und Atmosphäre in Abhängigkeit von der Frequenz; die Störstrahlung von Sonne und Mond wird nur wirksam, wenn Empfangsantennen unmittelbar auf diese Himmelskörper gerichtet sind; die thermische Störstrahlung der Milchstraße, die innerhalb eines weiten Richtungsbereiches in die Empfangsantennen einfällt, nimmt mit zunehmender Frequenz stark ab, die thermische Störstrahlung der atmosphärischen Luft nimmt dagegen mit zunehmender Frequenz stark zu; in einem Frequenzbereich zwischen 1 und 10 GHz ist die Störstrahlung besonders gering; dieser Frequenzbereich (sog. Mikrowellenfenster) ist für einen Empfang von elektromagnetischen Wellen aus dem Weltraum besonders geeignet.

dende Rolle spielen müssen. Der Nachrichtenbedarf steigt ständig, wir können aber nicht laufend immer mehr drahtlose Strecken einsetzen, weil diese sich schließlich gegenseitig stören würden. Man wird also notgedrungen beim Verkehr zwischen festen Stationen Leitungen verwenden und die freie Strahlung ausschließlich dem Verkehr mit Fahrzeugen vorbehalten, ob dies nun Landfahrzeuge, Wasserfahrzeuge, Luftfahrzeuge oder Raumfahrzeuge sind. Leitun-

gen haben einen Nachteil: Infolge der Verluste im leitenden Metall nimmt die Hochfrequenzleistung, die man längs einer Leitung fort-leitet, mit der Entfernung exponentiell ab, also stärker als im freien Raum, wo die Leistungsdichte umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstandes sinkt. Üblicherweise muß man deshalb in Hochfrequenzleitungen Verstärker einschalten, etwa in Abständen von je 10 km. Einen Überblick über die heute üblichen Hochfrequenzleitungen zeigt Bild 6. Besonderes Interesse für die Zukunft verdient

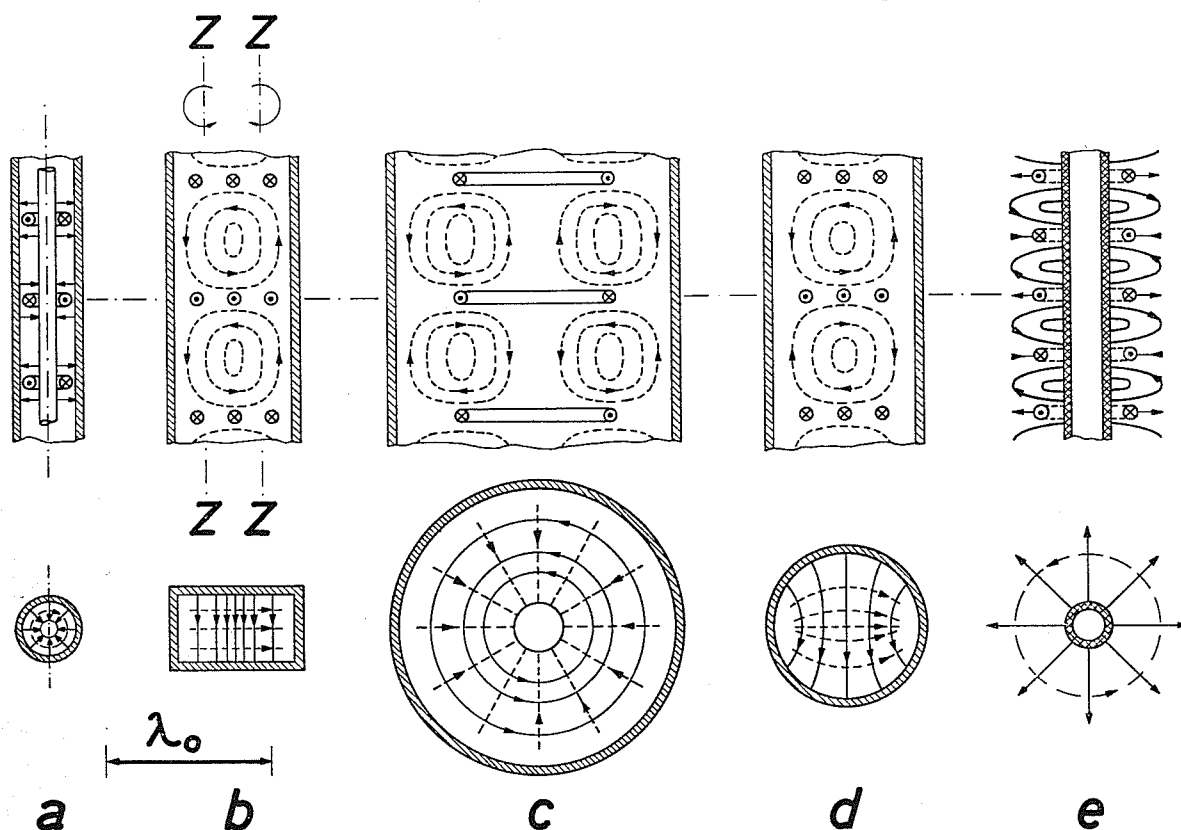


Bild 6. Verschiedene Typen von Wellenleitern.

- Koaxialkabel, bestehend aus einem metallischen Mittelleiter und einem rohrförmigen metallischen Außenleiter; das Kabel ist auch für niedrigste Frequenzen geeignet, hat aber bei Mikrowellen eine zu hohe Dämpfung.
- Rechteck-Hohlleiter, bestehend aus einem Rohr von rechteckigem Querschnitt, innerhalb dessen die elektromagnetischen Wellen geführt werden; dieser Typ ist für die Mikrowellen-Gerätetechnik besonders geeignet.
- Kreiszyklindrische Hohlleitung, mit dem sog. H_{01} -Wellentyp, der durch kreisförmig in sich geschlossene elektrische Feldlinien gekennzeichnet ist. Dieser Wellentyp hat bei höchsten Frequenzen die geringste Dämpfung.
- Kreiszyklindrische Hohlleitung mit einem anderen, meist störenden Wellentyp von erheblich höherer Dämpfung.
- Oberflächenwellenleiter, bestehend aus einem metallischen Mittelleiter und einer umgebenden Isolierschicht; die elektromagnetischen Wellen (gekennzeichnet durch das Feldlinienbild) laufen an der äußeren Oberfläche des Wellenleiters entlang und klingen in größerer Entfernung von der Leiterachse schnell ab.

die Wellenausbreitung in der Hohlleitung nach Bild 6 c. Man könnte in einer derartigen Leitung von einem Durchmesser von 70 mm insgesamt 150 000 Ferngespräche übertragen oder gleichzeitig 160 Fernsehprogramme. Ein solcher Nachrichtenbedarf besteht heute noch nirgends zwischen den großen Städten der Welt, könnte aber einmal kommen. Würden beispielsweise alle Telephoneteilnehmer gleichzeitig ein Fernsehbild ihres Partners wünschen, so würden auch diese Hohlleitungen nicht mehr ausreichen. – Für solche Fälle zeichnen sich bereits Möglichkeiten ab, eine Übertragung durch Lichtstrahlen zu planen mit eingebauten Molekularverstärkern nach dem Prinzip der induzierten Emission. Dazu müssen andere Hohlkabel entwickelt werden (einige Lösungen sind bereits bekannt), die in ihrem Innern die Lichtstrahlen genügend gebündelt fortleiten. Mit einem solchen „optischen Hohlleiter“ könnte man die Übertragungsmöglichkeit gegenüber dem obengenannten Beispiel nochmal auf etwa das Zehntausendfache erhöhen.

Von entscheidender Wichtigkeit für die hochfrequente Nachrichtenübertragung sind die aktiven Bauelemente, d. h. Anordnungen, die eine Verstärkung der schnellen Hochfrequenzschwingungen ermöglichen. Etwa 50 Jahre lang hat die gittergesteuerte Elektronenröhre (Bild 7 a) allein das Feld beherrscht. Sie ist brauchbar für die Verstärkung von hohen Frequenzen bis in den Gigahertz-Bereich hinein; dann macht sich allerdings die Laufzeit der Elektronen unangenehm bemerkbar. Ein Elektron braucht, um von der Kathode zur Anode zu fliegen, fast eine Nanosekunde (10^{-9} Sekunden), für menschliche Begriffe gewiß eine sehr kurze Zeit. Wenn man aber Hochfrequenzschwingungen von mehreren GHz (d. h. mehrere Milliarden Schwingungen in der Sekunde) verstärken will, fliegt das Elektron zu langsam. Abhilfe läßt sich schaffen durch das Prinzip der Wanderfeldröhre (Bild 7 b); nach diesem und ähnlichen Prinzipien ist eine Schwingungserzeugung und Verstärkung bis etwa 100 GHz, also bis zu Wellenlängen ins Millimetergebiet hinein möglich. – Bei den Halbleiterbauelementen, die heute den Röhren ernste Konkurrenz machen, ist der Mechanismus der Bewegung von Ladungsträgern wesentlich komplizierter als bei den Elektronen, die durch das Vakuum fliegen (Bild 8 a). Mit Hilfe des Bewegungsmechanismus von Ladungsträgern in entsprechend dotierten Halbleiter-Einkristallen läßt sich das aktive Halbleiter-Bauelement, der Transistor, konstruieren (Bild 8 b). In seinen elektrischen Daten ist der Transistor im allgemeinen der gittergesteuerten Elektronenröhre unterlegen, er hat aber den Vorteil eines außerordentlich geringen Leistungsverbrauchs im Betrieb und den Vorteil der außerordentlich geringen Abmessungen; Transistoren sind meist nur Bruchteile von Millimetern groß. Die Transistoren eignen sich daher besser zur Massenherstellung und zur Anwendung in großen Stückzahlen. Die Prinzipien der großen elektronischen Rechenautomaten sind überhaupt erst durch die Schaffung des Transistors sinnvoll geworden. Man hat zu Beginn der Entwicklung auch Automaten mit Röhren konstruiert, aber es hat wenig

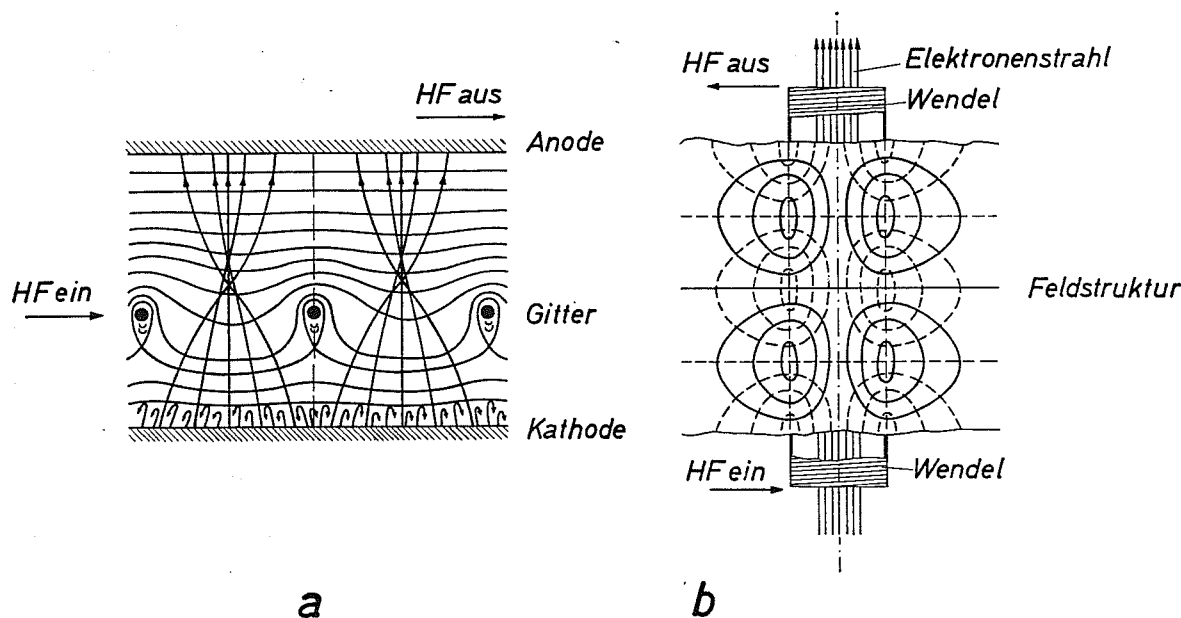


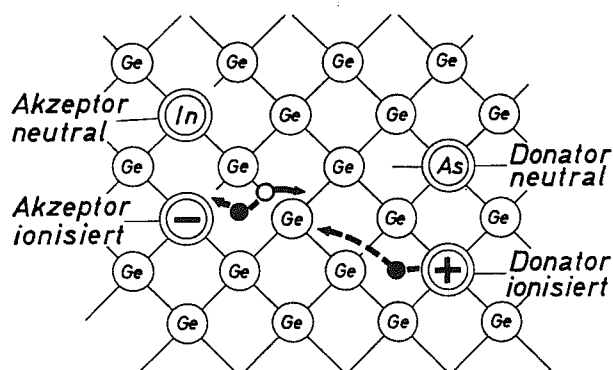
Bild 7. Grundprinzipien der wichtigsten Elektronenröhren.

- a) Verstärkertriode, bestehend aus einer glühenden Kathode, einem aus parallelen Drähten bestehenden Gitter und einer plattenförmigen Anode; durch Anlegen von Gleichspannungen an diese 3 Elektroden wird ein durch die (vorzugsweise horizontal verlaufenden) Potentiallinien gekennzeichnetes elektrisches Feld erzeugt; von den die Kathode verlassenden Elektronen fallen die meisten infolge der großen Raumladung auf die Kathode zurück, nur ein kleinerer Bruchteil fliegt zur Anode hindurch, wie die mit Pfeilen gekennzeichneten Elektronenbahnen zeigen; ändert man durch eine an das Gitter gelegte Hochfrequenzspannung die Potentialverteilung, so ändert sich der Anteil zwischen den durchtretenden und den umkehrenden Elektronen, d. h. der Anodenstrom wird durch die Spannung am Gitter beeinflusst.
- b) Wanderfeldröhre, bestehend aus einer Drahtwendel und einem in der Mitte hindurchfliegenden Elektronenstrahl; in der Skizze ist die Wendel in der Mitte abgebrochen, um die Feldstruktur des elektrischen und magnetischen Feldes zu zeigen; diese Feldstruktur läuft mit einer gegenüber der Lichtgeschwindigkeit verhältnismäßig geringen Geschwindigkeit an der Wendel entlang und folgt somit den im Strahl fliegenden Elektronen; bei der Wechselwirkung zwischen dem Elektronenstrahl und der Feldstruktur kann Hochfrequenzenergie gewonnen werden.

Zweck, der Leistungsumsatz und der Raumbedarf sind zu groß. Von gleicher Bedeutung sind die Transistoren für den Einsatz in Satelliten; wenn man an einem Satelliten beim heutigen Stand der Technik ein Gramm an Gewicht spart, so spart man bereits 50 Dollar, so daß jede kleinste Gewichtsersparnis von entscheidender Wichtigkeit ist. – Die hochentwickelte Technologie der Transistoren läßt sich noch weiter fortführen zu der Technik der sog. integrierten Schaltkreise, bei denen in einem einzigen Halbleiterkristall durch unterschiedliche Dotierungen komplette Schaltungen aus Widerständen,

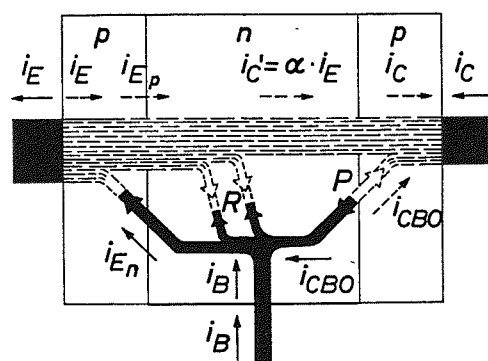
Loch- oder
P-Leitung:

Elektronen- oder
N-Leitung:



Feldstärke

a



b

Bild 8. Zur Wirkungsweise des Transistors.

- a) Schema eines Germanium-Einkristalls, in den wenige Arsen- und Indium-Atome eingebaut sind; das im Gegensatz zum vierwertigen Germanium fünfwertige Indium-Atom ist in der Lage, ein Elektron abzugeben, das als freies Elektron durch das Gitter wandert, das Arsen-Atom wirkt als „Donator“; das dreiwertige Indium-Atom kann aus der Umgebung ein Elektron aufnehmen (Wirkung als Akzeptor), die Fehlstelle (Loch) pflanzt sich durch das Kristallgitter fort und wirkt wie ein beweglicher positiver Ladungsträger.
- b) Schema eines Transistors, bestehend aus einem zonenweise unterschiedlich dotierten Einkristall; die linke Zone (sog. Emitterzone) ist mit Akzeptoren dotiert, ist also p-leitend; die mittlere Zone (Basiszone) ist mit Donatoren dotiert und daher n-leitend, während die rechte Zone (Kollektorzone) wieder p-dotiert ist. Bei Anlegen von Gleichspannungen geeigneter Größe treten die Löcher von der Emitterzone in die Basiszone ein und diffundieren zum größten Teil durch sie hindurch in die Kollektorzone. Dabei entsteht ein Verlust, weil in der Basiszone die Löcher mit den dort reichlich vorhandenen Elektronen rekombinieren können (R); durch Verändern der Spannung zwischen Basiszone und Emitterzone läßt sich die Größe des Kollektorstromes verändern.

Kondensatoren, Dioden und Transistoren hergestellt werden können (Bild 9). Es entfällt dann überhaupt das Zusammenlöten einzelner Schaltelemente, das bisher für den Aufbau von Hochfrequenzschaltungen typisch war.

Nicht nur auf dem Gebiet der Halbleiter hat die moderne Werkstofftechnik außerordentliche Fortschritte für die Hochfrequenztechnik gebracht; zu erwähnen ist die Vielzahl moderner dielektrischer und magnetischer Werkstoffe. Bei den magnetischen Werkstoffen ist es durch Schaffung der Ferrite gelungen, neue magnetische Speicher zu entwickeln, die für die Rechenautomaten von besonderer Bedeutung sind (Bild 10). Die Kernspeicher gestatten, auf kleinstem Volumen außerordentlich viel Information zu speichern und schnell zu

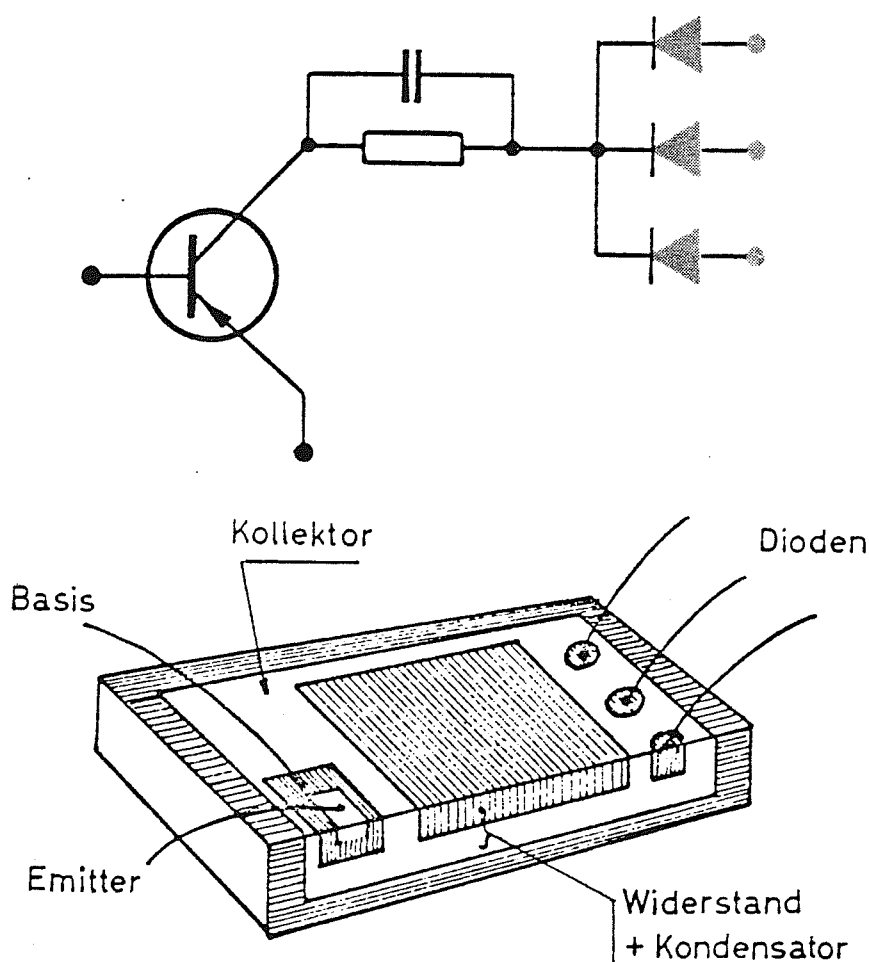


Bild 9. Schaltschema und Aufbauskeizze eines integrierten Schaltkreises; in einem Halbleiter-Einkristall werden durch abwechselnde Dotierung Widerstände, Kapazitäten, Dioden und Transistoren hergestellt.

verarbeiten. Etwa eine Million Binärzeichen lassen sich in einer Sekunde in einen solchen Kernspeicher einspeichern.

Nach diesem Überblick über den heutigen Stand der Hochfrequenztechnik möge ein flüchtiger Blick in die Zukunft folgen. Die Technik der integrierten Schaltungen wird sich erfolgreich weiterentwickeln, was noch sehr viel technologische Arbeit erfordern wird. Insbesondere wird in der zukünftigen Hochfrequenztechnik die Trennung zwischen dem sog. Bauteile-Ingenieur, der die Bauteile fertigt, und dem System-Ingenieur, der die Bauteile in geeigneter Weise zu funktionsfähigen Schaltungen kombiniert, verschwinden; die integrierten Schaltungen, die Bauteile und Schaltungsaufbau zugleich sind, verlangen einen Ingenieur, der beide Gebiete beherrscht. – Die Entwicklung immer größerer elektronischer Schaltungen, die Entwicklung von Hochfrequenzschaltungen mit immer steigender Anzahl von Bauelementen, hat schließlich eine obere Grenze; zwar kann man auf kleinstem Raum sehr viele Elemente aneinandergliedern, schließlich wird jedoch das gesamte Gerät wieder zu groß, und die Laufzeiten der elektrischen Wellen zwischen den einzelnen Bauteilen verhindern ein schnelles Arbeiten. – Der beispiellos schnelle Fortschritt

hat es mit sich gebracht, daß die Hochfrequenztechnik vollkommen neue Elemente geschaffen hat, die mit ihrer klassischen Domäne, der drahtlosen Nachrichtenübertragung (Funktechnik, Radio), gar nichts mehr zu tun haben. Man hat deshalb für das Gesamtgebiet, das sich mit der Anwendung von Elektronenröhren und Halbleiterbauelementen befaßt, den Namen „Elektronik“ eingeführt; es soll hier darauf verzichtet werden, Bemerkungen zu dieser Bezeichnung zu machen. – Die Hochfrequenztechnik hat während ihrer gesamten, fast hundertjährigen Entwicklung immer sehr engen Kontakt mit der

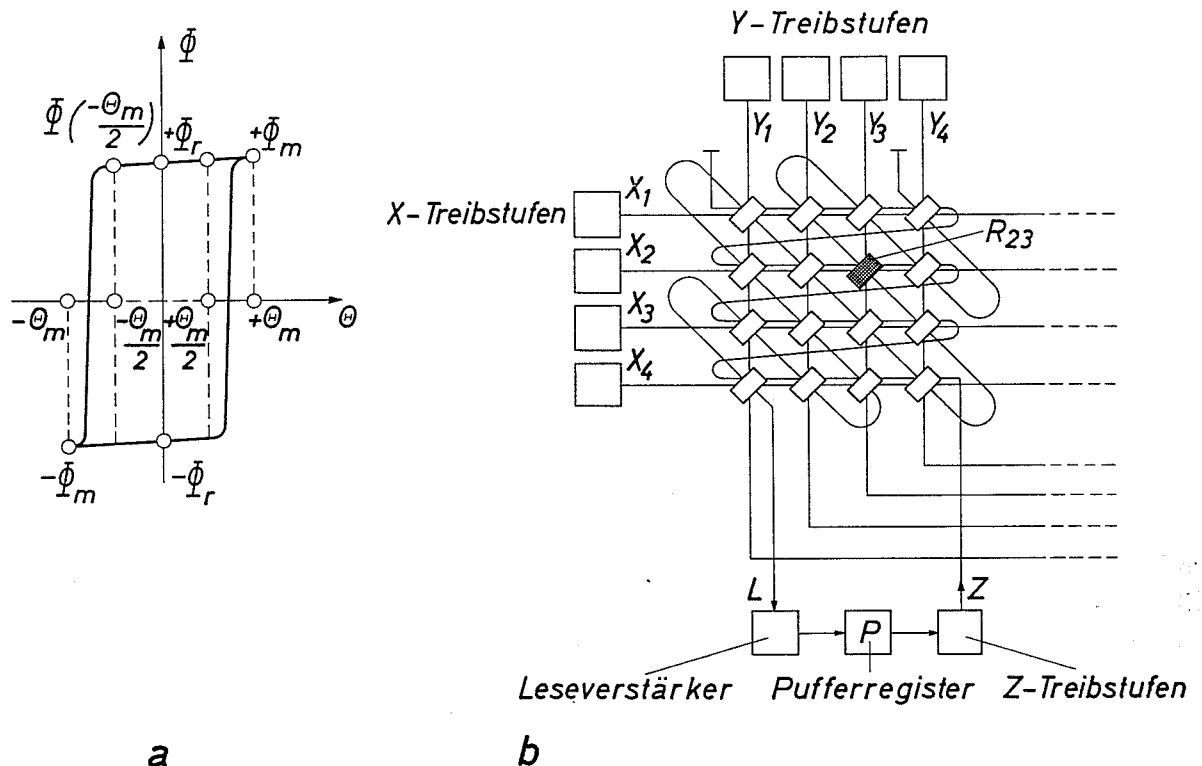


Bild 10. Magnetischer Kernspeicher eines Rechenautomaten.

- a) Magnetisierungsschleife (Abhängigkeit des Magnetflusses Φ von der Durchflutung Θ) eines einzelnen Ferritkernes.
- b) Anordnung der Ferritkerne in einer Speichermatrix, in der die einzelnen Kerne in positiver oder negativer Richtung magnetisiert sind, was die Speicherung von Werten 0 oder 1 bedeutet; wird beispielsweise durch die Treibstufe X_2 und Y_3 ein positiver Stromimpuls geschickt, so wird der Kern R_{23} in positiver Richtung aufmagnetisiert, da sich nur in diesem Kern die beiden Impulse in ihrer Wirkung addieren und eine Ummagnetisierung ermöglichen.

Physik gehalten. Zur Zeit von Heinrich Hertz ist sie aus der physikalischen Forschung unmittelbar entsprungen, zur Zeit von Marconi dann etwas neben der Physik hergelaufen. Die Elektronenröhren brachten mit ihren zugehörigen Problemen der Vakuumphysik wieder eine enge Zusammenarbeit, und ein besonders enger Kontakt zwischen Hochfrequenztechnik und Physik bestand bei der Schaffung des Transistors; eigentlich hatte die Hochfrequenztechnik auf dieses Halbleiterbauelement schon Jahrzehnte lang gewartet; auf eine Realisierung folgte dann eine beispiellos schnelle Einführung in die

technische Praxis. Heute sieht es nun so aus, als ob sich die Hochfrequenztechnik wieder etwas von der Physik entfernt; physikalische Effekte, wie die induzierte Emission oder die Supraleitfähigkeit, haben nicht die Anwendung gefunden, die man sich ursprünglich für die Hochfrequenztechnik versprochen hat. In den großen Entwicklungszentren der Industrien aller Welt macht sich ein gewisser Pessimismus breit. Man glaubt, daß sich jetzt in der Hochfrequenztechnik Abschlüßerscheinungen zeigen, daß zwar noch ein unerhörtes Reservoir von unerschöpften Kombinationsmöglichkeiten besteht, daß aber von der Physik her nicht mehr viel Neues kommt. Der holländische Physiker Casimir hat in diesem Zusammenhang über die Hochfrequenztechnik gesagt: Die Flitterwochen sind vorbei, es gilt jetzt, eine solide Ehe zu führen.

In den letzten Jahrzehnten ist die Entwicklung der Hochfrequenztechnik mit hektischer Unruhe vor sich gegangen. Wie überall in der Naturwissenschaft denkt man hier ja nicht nur an die physikalischen Erkenntnisse, sondern an die Beherrschung und Kontrolle der physikalischen Welt. In den hochentwickelten Ländern betrachtet man heute das Forschungspotential als eines der wesentlichen nationalen Besitztümer. Nicht nur in der Hochfrequenztechnik, sondern in allen Wissensgebieten wird es für den Wissenschaftler immer schwieriger, dem dauernden Fortschritt zu folgen. Wenn ein gründlicher Wissenschaftler eine zusammenfassende Darstellung schreibt, ist sie meist schon vor der Drucklegung veraltet. Dissertationen sind überholt, bevor das Promotionsverfahren abgeschlossen ist, und die einzelnen Wissenschaftsgebiete veralten zum Teil schneller als die Professoren, die die Aufgabe haben, diese Gebiete zu pflegen.

Bei dieser Situation ist es natürlich außerordentlich schwierig, einen Nachwuchs heranzubilden, der den zukünftigen Entwicklungen gewachsen ist. Die Studenten, die wir heute heranbilden, müssen sich in ihrem Berufsleben mit physikalischen Effekten und mit Problemstellungen beschäftigen, die wir als Lehrer heute zum Teil noch gar nicht kennen. Die Studenten müssen also eine Grundlagenausbildung auf großer Breite erhalten und an Einzelbeispielen lernen, wie man gründlich wissenschaftlich arbeitet und wie man sich allein in neue wissenschaftliche Problemstellungen hineinfindet. Es ist deswegen eine schwierige, aber lohnende Aufgabe, gute Hochfrequenztechniker heranzubilden! Deutschland braucht sie sehr nötig, denn es steht auf diesem Gebiet nicht mehr an erster Stelle. Unsere Chance für die Zukunft und unsere Hoffnung liegt bei unserem Nachwuchs.