

Zeitschrift:	Technische Mitteilungen / Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafenbetriebe = Bulletin technique / Entreprise des postes, téléphones et télégraphes suisses = Bollettino tecnico / Azienda delle poste, dei telefoni e dei telegraфи svizzeri
Herausgeber:	Schweizerische Post-, Telefon- und Telegrafenbetriebe
Band:	37 (1959)
Heft:	5
Artikel:	Die Wellen werden kürzer : ein Überblick über den Stand der heutigen Mikrowellentechnik
Autor:	Epprecht, Georg W.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-875440

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 12.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

TECHNISCHE MITTEILUNGEN
BULLETIN TECHNIQUE



BOLLETTINO TECNICO

Herausgegeben von der Schweizerischen Post-, Telegraphen- und Telephonverwaltung. Publié par l'administration des postes, télégraphes et téléphones suisses. Pubblicato dall'amministrazione delle poste, dei telegrafi e dei telefoni svizzeri

GEORG W. EPPRECHT, BERN

Die Wellen werden kürzer*

538.56.029.6
621.37.029.6

Ein Überblick über den Stand der heutigen Mikrowellentechnik

1. Einleitung

Die Mikrowellentechnik ist für die meisten Leute ein Spezialgebiet, mit dem sie im täglichen Leben kaum bewusst in Berührung kommen. Die fortschreitende Spezialisierung ist für den Wissenschaftler wie für den Laien ein Problem unserer Zeit und wird es in Zukunft noch mehr sein. Einerseits ist es doch ein Ziel der Wissenschaften, die allgemeinsten, einfachsten Grundgesetze zu finden, möglichst eine einzige Formel, aus der alles weitere folgt. Diesem Ziel ist vielleicht die Physik schon ziemlich nahe gekommen. Andererseits ist es heute so, dass sich die Wissenschaften dermassen in Teilgebiete zergliedert haben, dass die Vertreter des einen Zweiges oft kaum mehr die Sprache des Kollegen aus dem Nachbargebiet verstehen. Man fragt sich immer wieder, ob dieses Spezialistentum wirklich notwendig sei.

Es sei versucht, diese Sache mit einem Bilde zu erklären: In alten Zeiten hat man für die Gewinnung der Erze nur den Tagbau gekannt, man hat einfach an der Erdoberfläche geschürft, und es war ein leichtes für den einzelnen, die ganze Anlage zu überblicken. Heute ist man tiefer in den Berg eingedrungen, aber dies geht nur mit Schächten und Stollen und vielen technischen Einrichtungen. Um die Gesamtstruktur des Berges zu erkennen, bleibt nichts anderes übrig, als dass jeder einen beschränkten Stollen zugewiesen bekommt und sich darin zum Spezialisten macht. Selbst die technischen Leiter des Betriebes sind Spezialisten, sie haben die Übersicht nur in grossen

Zügen und können nicht in allen Fertigkeiten ausgebildet sein. Sie müssen sich oft blindlings auf ihre Mitarbeiter stützen können. So wird das wissenschaftliche Arbeiten mehr und mehr zu einem Team-Work im grossen und im kleinen, ob wir nun wollen oder nicht.

Zwar stimmt es schon, dass die Grundlagen einfacher oder wenigstens allumfassender geworden sind. Aber parallel dazu haben sich die Anwendungsmöglichkeiten, eben die Techniken vervielfacht. Ich will hier versuchen, aus meiner Stollenperspektive einen Überblick zu geben über den gegenwärtigen Stand der Dinge, und es wird sich zeigen, dass die Technik der Mikrowellen zwar ein kleines Teilgebiet der Elektrotechnik oder der Physik ist, dass sie aber im Grunde auf einer viel breiteren oder tieferen Basis steht als etwa die gute alte Starkstromtechnik. Frequenzmäßig betrachtet, handelt es sich hier um das Gebiet von etwa 1000 MHz bis gegen 1000 GHz (1 GHz = 1 Gigahertz = 1000 MHz = 1 Milliarde Hertz). Betrachtet man hingegen die Begriffswelt dieser Technik, so kann man von der Mikrowellentechnik her sehr wohl alle Phänomene der tieferen Frequenzbereiche als Spezialfälle verstehen, nicht aber umgekehrt. Dass etwa die Starkstromtechnik und die Niederfrequenztechnik als das Generelle und die Mikrowellentechnik als das Spezielle angesehen werden, beruht lediglich auf dem quantitativen Unterschied im Mass der Anwendungen.

2. Das Spektrum der elektromagnetischen Wellen

Diese Technik der Mikrowellen bildet in gewissem Sinne einen Schlussstein in der Brücke, die man von

* Antrittsvorlesung, die der Verfasser am 22. Nov. 1958 als Privatdozent an der Eidgenössischen Technischen Hochschule hielt.

der Niederfrequenztechnik bis zur Optik spannen kann. Das Lehrgerüst zu dieser Brücke stammt von *J. C. Maxwell*, der etwa im Jahre 1865 die gemeinsamen Grundlagen von elektromagnetischen und Lichtwellen postulierte und ableitete, und zwar, ohne dass er die Radiowellen gekannt hätte. Die Gesetze, die er damals mathematisch formulierte, sind für alle praktischen Anwendungen noch heute in Kraft. Bedenken wir immerhin, welche Leistung das war. Hätten wir vor 90 Jahren gelebt, so wäre vielleicht keiner unter uns gewesen, der verstanden und geglaubt hätte, was Maxwell behauptete.

neren Längen zu sprechen. In Figur 1 ist auch die historische Entwicklung angedeutet, und zwar nicht etwa der Entdeckungen, sondern der Stand der praktisch-technischen Anwendungen, insbesondere also die Möglichkeit, die entsprechenden Wellen kohärent zu erzeugen. Die Verwendung von tonfrequenten Wellen in der Telephonie geht in die 80er Jahre des letzten Jahrhunderts zurück. Um die Jahrhundertwende wurden auf Langwellen die ersten drahtlosen Übertragungen möglich. Nach dem Ersten Weltkrieg erfolgte die Entwicklung von den Mittel- bis zu den Ultrakurzwellen. 1940 erzeugte man be-

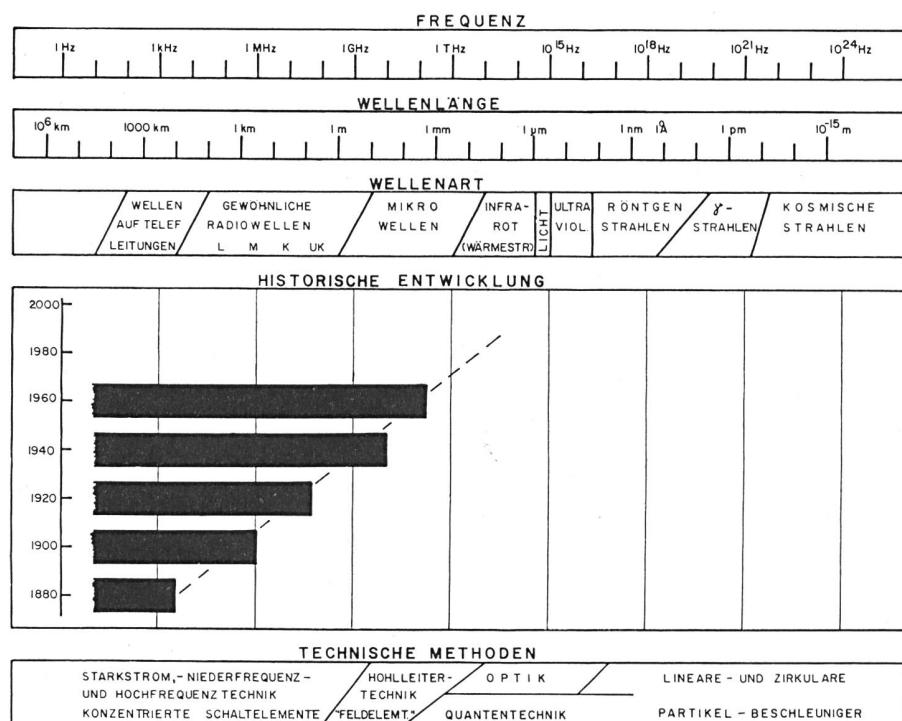


Fig. 1.
Das Spektrum der elektromagnetischen Wellen

Von diesen elektromagnetischen Wellen sei hier zunächst die Rede. Elektrotechnik ist für die meisten die Lehre von Strömen und Spannungen. Das Wesentliche und zugleich das Unbegreifliche sind nun aber eigentlich die Wellen und die Felder. In Figur 1 ist übersichtsweise das gesamte Spektrum der elektromagnetischen Wellen dargestellt. Die Skalen sind logarithmisch, und jeder Schritt bedeutet einen Faktor 10. Zuunterst liegen die Tonfrequenzen, wie sie etwa in den Telefonleitungen vorkommen. Darauf frequenzmäßig anschliessend folgt das Ultraschallgebiet, dann die langen, mittleren und kurzen Radiowellen, bis zu einer Wellenlänge von etwa 30 cm. Hier beginnt das Mikrowellengebiet. Dann folgt das Wärmestrahlens- oder Infrarotgebiet. Bei einer Wellenlänge von etwa $1/_{3000}$ Millimeter liegt das schmale Band der sichtbaren Lichtwellen, darüber das Ultraviolett, die Röntgenstrahlen, die Gammastrahlen und am Ende die kosmischen Strahlen. Ob es noch kürzere Wellenlängen gibt als etwa 10^{-15} m, ist sehr fraglich, vielleicht ist es gar nicht sinnvoll, von klei-

reits Wellen kürzer als 1 m. Am Ende des Zweiten Weltkrieges war man im Gebiet der 3-cm-Wellen schon ganz heimisch, und heute erschliesst man das Millimeterwellengebiet. Es wäre dazu natürlich noch vieles zu sagen, denn die Eroberung jeder Dekade hat viel Kopfzerbrechen und manchen Schweiss-tropfen gekostet. Es ist nun kein so weiter Weg mehr bis zu den Lichtwellen, die man – auf andere Weise – natürlich längst weitgehend beherrscht. Aber wir haben dort noch keine kohärent und kontinuierlich schwingenden Energiequellen. Grob und naiv extrapoliert, würde man noch vor dem Jahre 2000 mit der Elektronik bis dorthin vorgedrungen sein.

Für alle diese Strahlen des ganzen Spektrums gelten grundsätzlich die gleichen Gesetze: Sie breiten sich im leeren Raum mit Lichtgeschwindigkeit aus, sie sind polarisiert, sie werden reflektiert, gebrochen und gestreut. Dass man es scheinbar mit wesensverschiedenen Strahlen zu tun hat, hat folgende Gründe:
1. Das unterschiedliche Verhältnis zu den Dimensionen unserer Umgebung: Lichtwellen breiten

sich erfahrungsgemäss gradlinig aus, Radiowellen gehen um die Ecken. Das ist ein scheinbarer Unterschied, denn Lichtwellen gehen genau so um die Ecken, wenn die Ecken an genügend kleinen Gegenständen sind.

2. Das unterschiedliche Größenverhältnis zu den Materiepartikeln, den Atomen und Molekülen. Für die Lichtwellen ist die Materie körniger als für die Radiowellen.
3. Der unterschiedliche Energieinhalt der Wellenquanten oder Photonen. Die Energie eines Wellenquantes beträgt nach Planck:

$$E = h \cdot f \quad (1)$$

wobei E die Energie, f die Frequenz und h das Plancksche Wirkungsquant darstellen. Deshalb sind die kürzesten Wellen die durchdringendsten.

Die Wellenlänge steht in enger Beziehung zur Technik, mit der der Mensch die elektromagnetischen Erscheinungen beherrscht. Die Technik ist eine menschliche Sache, und unsere Körpergrösse spielt dabei eine wesentliche Rolle. Hätten wir etwa die Grösse von Ameisen oder Blattläusen, so müssten wir bei den gleichen Wellenlängen ganz andere Techniken verwenden. Die Technik sieht je nach Frequenzgebiet grundverschieden aus. Die Lichtinstallation oder das Telephon sind Vertreter der Niederfrequenztechnik. Bekannte Beispiele der konventionellen Hochfrequenztechnik sind die Rundspruchempfänger. Dabei sind die Wellen noch wesentlich länger als die Dimensionen der Apparaturen. Charakteristisch für die Mikrowellentechnik ist, dass die von Menschenhand gebauten Geräte meist grösser sind als die Wellenlänge. Besser bekannt ist wieder die Technik der Lichtwellen, etwa die Optik und die Beleuchtungstechnik. Bei noch höheren Frequenzen gelangt man über die Röntgenapparaturen schliesslich zu den Techniken der Atomphysiker mit den verschiedenen Arten von Partikelbeschleunigern.

3. Die Technik der Mikrowellen

Betrachten wir nun das Mikrowellengebiet etwas näher. Es hat seine Anregungen von beiden Seiten erhalten: von der Optik etwa die Ausbreitungstechnik. Wir sagen, die Mikrowellen verhalten sich quasioptisch. Wir haben aus der Optik die Linsen und die Spiegel abgeschaut; im Verhältnis zu den Oberflächenunebenheiten unserer Erde, breiten sich die Mikrowellen gradlinig aus. Aus dem Repertoire der Hochfrequenztechnik stammen etwa die Grundlagen der Schaltungstechnik und der Messtechnik. Aber die Mikrowellentechnik musste doch weitgehend eigene Wege gehen.

Man stelle sich eine gewöhnliche Radioröhre vor, sie ist heute etwa daumengross. Für die Mikrowellentechnik müsste sie entsprechend kleiner sein, kleiner als ein Stecknadelkopf. Wenn wir sie noch herstellen könnten, so würde es nicht viel nützen, denn es kommt hier noch ein anderer Gesichtspunkt dazu: die Leistungskapazität. Eines der wichtigsten Anwendungs-

gebiete der elektromagnetischen Wellen ist die Nachrichtenübermittlung im weitesten Sinne, vom Telefon bis zum Radar. Selbst die Lichtwellen dienen uns, informationstheoretisch betrachtet, zum gleichen Zwecke. Um die Distanzen zu überbrücken, die für uns Bedeutung haben, braucht man einfach gewisse minimale Leistungen, sie liegen meistens etwa zwischen 1 Watt und einigen Kilowatt. Ein Element von der Grösse eines Stecknadelkopfes kann solche Leistungen aus thermischen Gründen nicht bewältigen. Dies ist zum Beispiel ein Grund, warum die Mikrowellentechnik nicht einfach eine miniaturisierte Hochfrequenztechnik sein kann. Die untere Energiegrenze, die man benutzen kann, hängt zusammen mit der Erscheinung des Rauschens.

Das äusserlich auffälligste an der Mikrowellentechnik ist vielleicht der Hohlleiter oder der Wellenleiter (siehe Fig. 2). Diese Rohre benutzt man zur Fortleitung der Mikrowellen, so wie man Wasserleitungen benutzt. Auch die Schalter und Abzweigungen sehen ganz ähnlich aus wie dort. Nicht umsonst bezeichnet man die Mikrowellentechniker als Spangler. Der Grund, warum man Hohlleiter benutzt, ist die zu hohe Dämpfung der gewöhnlichen Leitungen. Umgekehrt benutzt man bei tiefen Frequenzen keine Hohlleiter, weil deren Dimensionen zu gross wären. Es macht vielen Leuten, auch den Elektroingenieuren, zunächst Mühe, sich vorzustellen, dass elektrische Energie in Rohren laufen soll. Aber im Grunde genommen ist das nur eine Sache der Gewohnheit, und es ist vielleicht sogar leichter verständlich und jedenfalls leichter zu übersehen, wenn die Energie schön in den Röhren bleibt, als wenn sie, was eine ebenso merkwürdige Vorstellung ist, in vollen Kupferdrähten fliessen soll. Rohre wie die beiden äussersten rechts in Figur 2 können eine Leistung von etwa 7 Megawatt transportieren, das ist etwa so viel, wie eine 50-kV-Überlandleitung, die eine Ortschaft von ungefähr 10 000 Einwohnern speist, bewältigen kann. Eine solche Überlandleitung, etwa auf Betonmasten: das ist Niederfrequenztechnik. Der Hohlleiter ist die Leitung der Mikrowellentechnik, und in der Optik müsste man als Analogon etwa ein Fernrohr zur Hand nehmen. Hier drängt sich noch ein weiterer Vergleich auf: Am Ende der Überlandleitung steht meist ein Transformator. In Figur 3 sind Elemente der Mikrowellentechnik abgebildet, die funktionsmäßig und leistungsmässig das genaue Ebenbild eines etwa mannshohen Transformators aus der Starkstromtechnik darstellen. In der Optik reduziert sich das analoge Element auf die violette Schicht, die man etwa auf einer vergüteten Optik erkennen kann. Diese Beispiele sollten genügend illustrieren, wie ein Element, das denselben Zweck erfüllt, je nach Wellenbereich verschieden aussieht.

Noch etwas wäre zum Hohlleiter zu sagen. Er ist Anlass dazu geworden, dass man die allgemeinsten Theorien der Wellenausbreitung für die Elektrotechnik wieder ausgegraben hat, so etwa die Phänomene von Phasen- und Gruppengeschwindigkeit, der

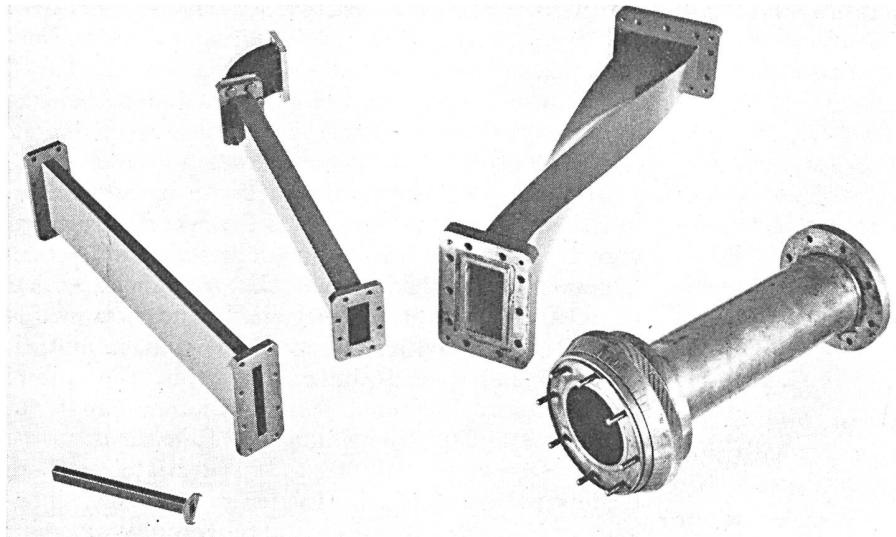


Fig. 2.

Einige Hohlleiterarten, wie sie in der Mikrowellentechnik als Leitungen verwendet werden
Die längeren der abgebildeten Rohre sind etwa 30 cm lang

Dispersion und der räumlichen Oberwellen, oder der verschiedenen Wellenmodi. In der Niederfrequenztechnik benötigte man diese Begriffe kaum und der Elektroingenieur durfte sie vergessen, heute muss er sich wieder damit beschäftigen. Mehr Raum sei dem Problem der Hohlleiter hier nicht gewidmet, um einen noch wichtigeren Punkt aufgreifen zu können.

4. Die Erzeugung von Mikrowellen

Das Kernproblem beim Erschliessen des Spektrums der elektromagnetischen Wellen ist die künstliche Erzeugung und Verstärkung der Wellen. Es sei hier gezeigt, welchen Weg die Entwicklung bis in die jüngsten Tage gemacht hat. Man kann theoretisch alle Wellen thermisch erzeugen, wie man dies bei den Lichtwellen hauptsächlich macht. Diese Strahlung entsteht infolge der Temperaturbewegungen der Materiepartikel. Sie ist aber im Mikrowellengebiet äusserst gering, sie ist zudem inkohärent und überdeckt ein zu breites Band. In unserer Fachsprache nennen wir eine solche Strahlung Rauschen. Diese möchten wir aber nicht, sondern unsere Energie soll auf ein schmales Band begrenzt und nach Phase und Polarisation wohldefiniert sein. Dazu brauchen wir Oszillatoren oder Generatoren.

Der grösste Fortschritt der frühesten Radiotechnik war wohl die Erfindung der Vakuumröhre, die gegenüber rotierenden Maschinen höhere Frequenzen und gegenüber den Funkensendern eine kontinuierliche Arbeitsweise erlaubte. Auf das Prinzip der Röhren, wie sie heute zu Hunderten von Millionen im Betrieb stehen, braucht hier nicht eingegangen zu werden. Ihr Erfolg beruhte zum grossen Teil auf der geringen Trägheit der Elektronen und auf der Möglichkeit einer praktisch leistungslosen Steuerung des Elektronenstromes. Während etwa 40 Jahren blieb man im wesentlichen beim Prinzip der Triode und ihren Abkömmlingen, und erst als man in der Entwicklung bei einigen hundert Millionen Schwingungen je Sekunde angelangt war, begann die Triode zu

versagen, weil die Elektronen hier eben doch nicht mehr trägeitslos arbeiten. Zwar ist es später noch gelungen, Trioden mit allem Raffinement für Frequenzen bis zu 4000 MHz zu züchten, aber die Mikrowellentechnik hätte seit den 40er Jahren kaum den stattgefundenen Aufschwung erleben können, wenn man nicht etwas Besseres gefunden hätte.

Laufzeitröhren

Bei den Laufzeitröhren hat man aus der Not eine Tugend gemacht und die endliche Laufzeit der Elektronen zur Schwingungserzeugung ausgenutzt. Der erste Ansatz dieses neuen Prinzips ist wohl beim Barkhausen-Oszillator zu suchen, der jedoch nie grosse Bedeutung erlangte. Viel wichtiger wurde das Klystron, das während des Zweiten Weltkrieges erfunden wurde. Es arbeitet folgendermassen:

Mit einer Elektronenkanone erzeugt man einen Strahl von Elektronen gleicher Geschwindigkeit (siehe Fig. 4). Dieser Strahl durchquert nun ein Gitterpaar, an dem eine hochfrequente Wechsel-

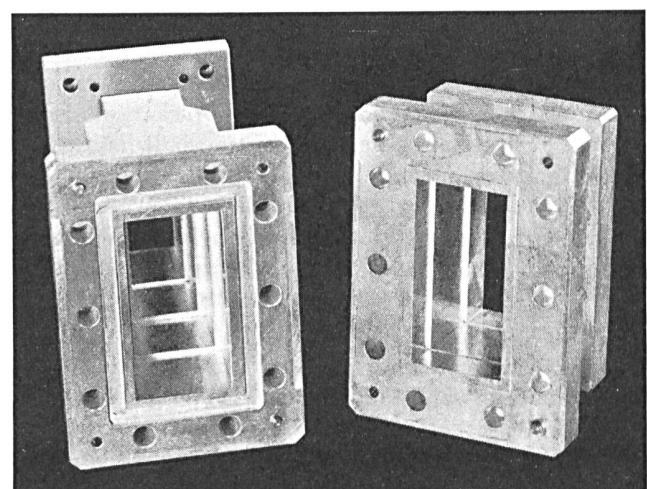


Fig. 3. Hohlleiter-Impedanztransformatoren
(29 x 58 mm, für den GHz-Bereich)

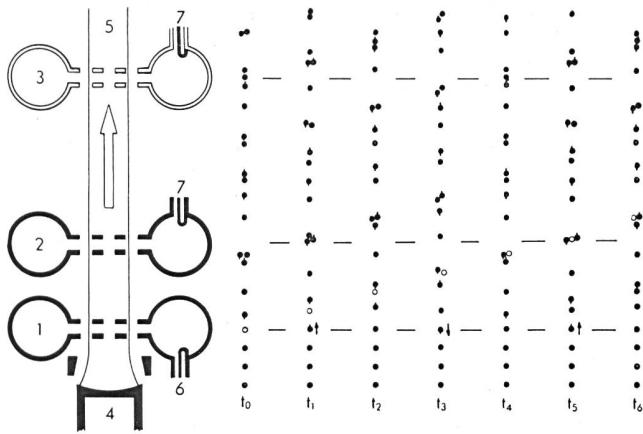


Fig. 4. Vereinfachte schematische Darstellung der Wirkungsweise eines Klystronverstärkers. Die Bildung von Elektronenpaketen (Phasenfokussierung) im Laufzeitraum ist aus den «Momentaufnahmen» des Elektronenstrahls in aufeinanderfolgenden Zeitpunkten ersichtlich

Legende:

- 1 Eingangresonator mit erstem Gitterpaar
- 2 Ausgangsresonator mit zweitem Gitterpaar an der Stelle, wo die Fokussierung der Elektronen (bunching) das erste Maximum erreicht
- 3 Mögliche weitere Lage des Ausgangsresonators beim zweiten Maximum der Phasenfokussierung
- 4 Kathode
- 5 Elektronenstrahl
- 6 Einkopplung
- 7 Auskopplung

spannung liegt. Zwischen den Gittern ist also ein elektrisches Feld vorhanden, das seine Richtung im Takte der Hochfrequenz ändert. Je nachdem, in welchem Zeitpunkt die Elektronen in diesen Raum eintreten, werden sie nun ein wenig verzögert oder beschleunigt. Der Elektronenstrahl wird dann im sogenannten Laufzeitraum sich selbst überlassen. Hier holen nun die beschleunigten Elektronen die langsameren auf, und es bilden sich längs des Strahles Zusammenballungen von Elektronen aus, wie das in Figur 4 schematisch dargestellt ist. Man legt nun an die Stelle, wo sich diese Elektronenwolken gebildet haben, ein zweites Gitterpaar, durch das die Elektronen paketweise hindurchtreten und an dem sie eine Schwingung erzeugen, die stärker ist als jene, die diesen Effekt verursacht hat. Damit hat man einen Verstärker oder mit geringen Änderungen einen Oszillator.

Weil die Wechselwirkungszeiten zwischen elektrischem Feld und Elektronen, das heißt die Zeit, während der ein Elektron zwischen den Gittern verweilt, sehr kurz ist, braucht man hohe Feldstärken. Man erreicht sie, indem man die Gitter zu Resonatoren vervollständigt. Der Nachteil, den man damit in Kauf nimmt, ist die geringe Bandbreite dieser Röhrenart. Man baut heute Klystrons im Frequenzgebiet zwischen 100 MHz und 100 GHz, und die meisten arbeiten mit Leistungen von Bruchteilen eines Watt. Anderseits wurde kürzlich ein Klystron gebaut, das bei einer Eingangsleistung von 80 Megawatt eine Hochfrequenz-Spitzenleistung von 30 MW abgibt.

Eine zweite Röhrenart, das *Magnetron*, hat eine im Prinzip ähnliche Wirkungsweise, nur haben die Elektronen hier eine zykloidenförmige Bahn, die in einem ringförmigen Laufzeitraume liegt. Hier bilden sich Elektronenwolken, die wie die Speichen eines Rades umlaufen und dabei in den auf dem Umfange angeordneten Resonatoren eine Schwingung anfangen. Auch diese Röhren wurden hauptsächlich in den 40er Jahren auf ihre jetzige Form entwickelt. Das Magnetron wird normalerweise als Leistungsoszillator verwendet. Moderne Ausführungen geben intermittierend Leistungen bis zu einigen Megawatt ab und im Dauerbetrieb viele Kilowatt.

Es ist interessant, sich bei dieser Gelegenheit zu vergegenwärtigen, wie gross solche Leistungen im Vergleich zu anderen Leistungsformen sind. Eine moderne Radaranlage sendet in der Sekunde zum Beispiel tausendmal einen Impuls von bis zu fünf Megawatt aus. Anderseits kennt man heute die besonders bei Photoreportern beliebten Elektronenblitzröhren. Die stärksten Blitzlampen erzeugen einen Lichtblitz, der einen ganzen Konzertsaal so

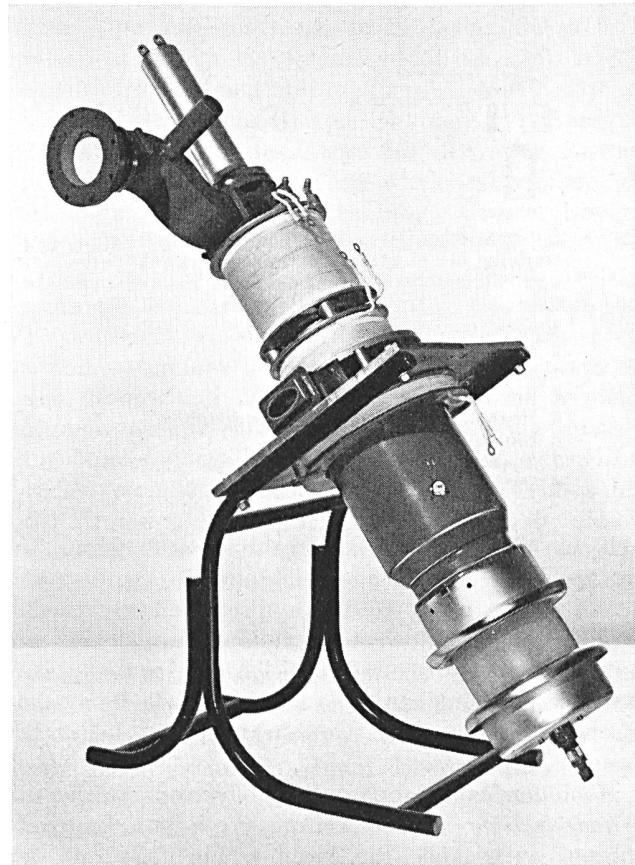


Fig. 5. Hochleistungs-Klystron, hergestellt an der Stanford University

Das Klystron ist etwa 1,2 m lang. Es gibt bei einer Frequenz von 3 GHz eine HF-Impulseistung von etwa 30 Megawatt ab (Eingangsleistung 80 MW, Elektronenstrahl: 215 A, 360 kV). 22 dieser Röhren werden zur Speisung des 1000-MV-Linearbeschleunigers in Stanford benutzt (Das Bild wurde freundlicherweise von der Stanford University zur Verfügung gestellt)

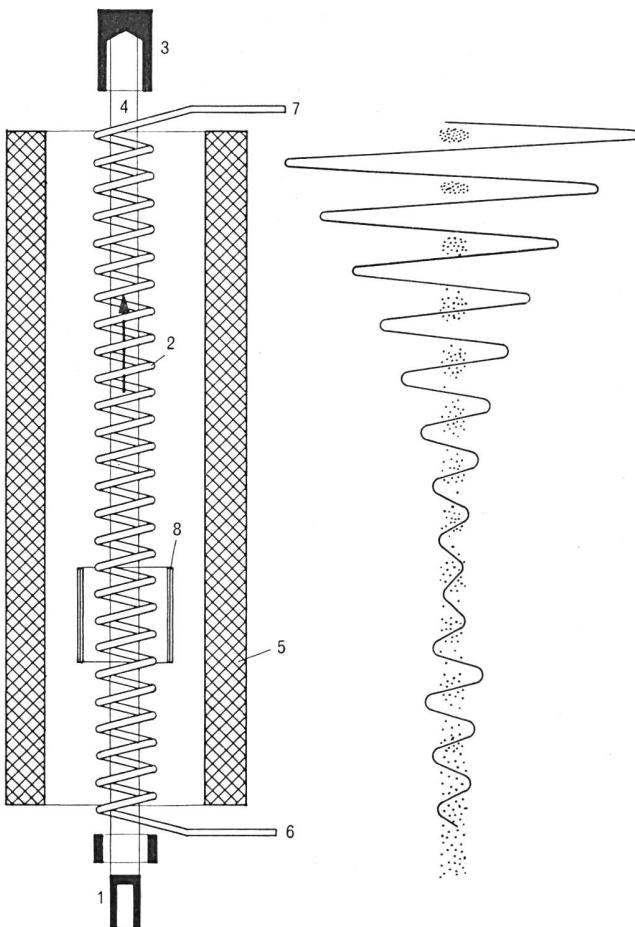


Fig. 6. Schematische Darstellung einer Wanderfeldröhre. Verstärkung der elektromagnetischen Welle längs des Helix und Bildung des dichtemodulierten Elektronenstrahls
Legende:

- 1 Elektronenkanone
- 2 Helix
- 3 Kollektor
- 4 Elektronenstrahl
- 5 Magnet zur Fokussierung des Strahles
- 6 Einkopplung
- 7 Auskopplung
- 8 Dämpfung

hell wie direkte Sonnenbestrahlung erleuchtet. Ein solcher Blitz enthält eine Lichtenergie, die ziemlich genau jener eines Radarimpulses entspricht, das heißt, einigen Kilowatt-Sekunden. Vergleichen wir mit einer mechanischen Impulsleistung, so finden wir, dass die Spitzenleistung so hoch liegt wie die mechanische Leistung einer Gewehrkugel, das heißt bei einigen Megawatt.

Nach den Magnetrons und den Klystrons wurden die *Wanderfeldröhren*, eine weitere Form von Laufzeitröhren, entwickelt. Sie beruhen ebenfalls auf der Wechselwirkung zwischen einem elektrischen Feld und einem Elektronenstrahl. Um die Zeit zu vergrößern, während der das Feld auf die Elektronen einwirken kann, verwendet man nicht ein örtlich stationäres Feld wie bei den besprochenen Röhren, sondern man lässt das Feld in Form einer Welle mit dem Elektronenstrahl mitlaufen. Es genügen dann relativ schwache Felder, man braucht keine Resona-

toren, und der grosse Vorteil, der sich ergibt, ist eine viel grössere Bandbreite. Die Schwierigkeit besteht zunächst darin, dass elektrische Wellen eine sehr grosse Geschwindigkeit – Lichtgeschwindigkeit – haben, den Elektronenstrahl kann man aber nicht gut auf diese Geschwindigkeit beschleunigen. Man hilft sich so, dass man die Welle auf einer Verzögerungsleitung laufen lässt. Diese kann etwa die Form einer Schraubenlinie (Helix) haben. Man muss sich vorstellen, dass die Welle längs des Drahtes läuft (Fig. 6, 7). In axialer Richtung hat sie dann eine viel geringere Geschwindigkeit. Für die Elektronen, die man etwa mit der gleichen axialen Geschwindigkeit laufen lässt, wirkt die Welle nun wie ein statisches Feld.

Wie beim Klystron entsteht eine paketweise Anhäufung von Elektronen, die während der Laufzeit immer ausgeprägter wird. Und wie beim Klystron beginnen diese fortschreitenden Elektronenwolken ihrerseits eine Welle zu erzeugen, so dass die ursprüngliche Welle verstärkt wird. Dies erreicht man dadurch, dass man den Elektronen eine etwas zu grosse Geschwindigkeit erteilt; es ergibt sich dann, dass im Mittel mehr Elektronen verzögert als beschleunigt werden, die Elektronen geben also Energie an die Welle ab. Praktisch würde sich ein solches System selbstständig zu Schwingungen anregen, weil auf der Verzögerungsleitung durch eine rückwärts-

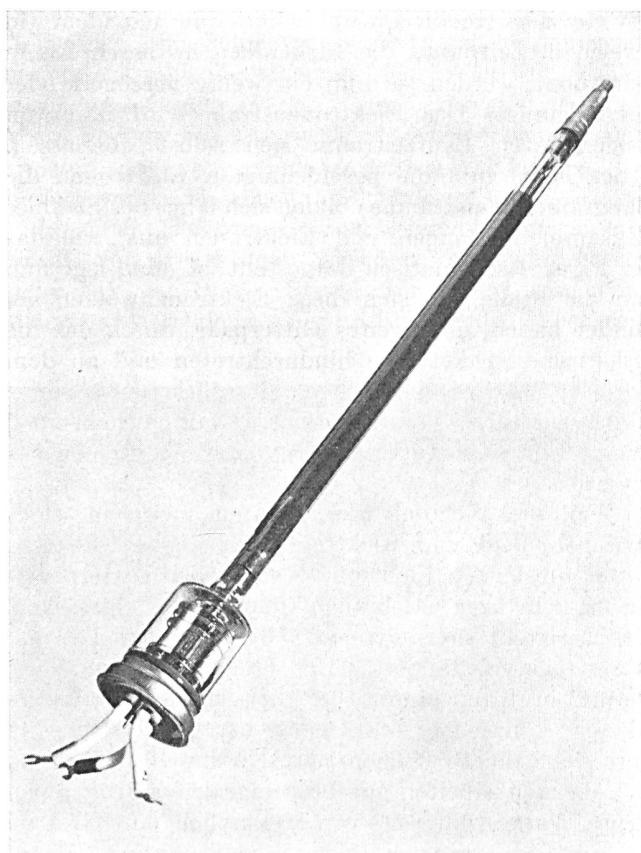


Fig. 7. Wanderfeldröhre (Standard Telephone and Cables) für 4 GHz

laufende Welle der Ausgang mit dem Eingang gekoppelt wird. Man unterdrückt diese Schwingungsneigung, indem man mit einer geeigneten Dämpfung die elektromagnetischen Wellen dämpft, während man den Elektronenstrahl unbeeinflusst lässt. Wandefeldröhren liefern normalerweise eine Leistungsverstärkung von 100 bis 10 000 und Bandbreiten von etwa einer Oktave.

In den letzten fünf Jahren ist zu dieser Ausführungsform eine Reihe weiterer hinzugekommen, beispielsweise die *Rückwärtswellenröhren* (Carzinton). Dort laufen Strahl und Welle in entgegengesetzter Richtung. Die Arbeitsweise dieser Röhren kann man sich zunächst schwer vorstellen. Es sei hier nur soviel gesagt: Es ist ein ähnlicher Effekt, wie jeder schon im Kino beobachtet hat, wenn ein Wagen mit Speichenrädern vorbeifährt. Dann gibt es immer Augenblicke, in denen die Räder rückwärts zu drehen scheinen. Man sieht, mathematisch ausgedrückt, die negative Phasengeschwindigkeit einer räumlichen Oberwelle. Anstatt mit einem Krebs, sollte man die Rückwärtswellenröhre eher mit einem Tausendfüssler vergleichen: Wenn er läuft, so beginnt er mit dem vordersten Bein, zieht jedes weitere nach und lässt so die «Welle» der Beinbewegungen nach hinten laufen und bewegt damit seine Masse nach vorn. Die Rückwärtswellenröhren haben eine längst gesuchte Eigenschaft: Ihre Frequenz lässt sich in weiten Grenzen einzig durch Veränderung von Spannungen beeinflussen, man benutzt sie daher als elektronisch durchstimmbare Oszillatoren.

Neben diesen Röhren mit gerade Strahl gibt es neuerdings eine ganze Anzahl anderer Typen, die sich hauptsächlich durch die Geometrie des Strahles und durch die Art der Fokussierung unterscheiden. Darauf sei hier nicht eingegangen, da ihnen allen ein ähnliches Verfahren zugrunde liegt. Statt dessen sei von einem anderen Prinzip die Rede, das in dieser Technik etwas vom Neuesten darstellt und das noch ungeheure Entwicklungsmöglichkeiten in sich schliesst. Heute steht die Mikrowellentechnik an der Schwelle des Zeitalters der Quantentechnik.

Mikrowellen und Quantentechnik

Es sind zwar mehr als 50 Jahre verflossen, seit Planck die Ideen der Quantenmechanik aufgestellt hat, und den Atomphysikern sind sie tägliches Brot. Heute aber muss der praktisch tätige Elektroingenieur beginnen, sich mit diesen Theorien vertraut zu machen, wenn er die Geräte noch verstehen will, die jetzt entwickelt werden.

Im Mikrowellengebiet befindet man sich im Bereich der molekularen Resonanzfrequenzen. Diese Resonanzen nützt man nun neuerdings zur Erzeugung und Verstärkung von Mikrowellen aus. Vor etwa drei Jahren nahm etwa gleichzeitig in Amerika [1], [3] und Russland [2] diese Idee, die offenbar in der Luft lag, konkrete Formen an. Hier zeigt es sich deutlich, wie die Technik der Mikrowellen zwischen der Radiotechnik und der Lichttechnik steht. Die Erzeugung elektro-

magnetischer Strahlung durch Anregung von Atomen und Molekülen ist bis vor kurzem ausschliesslich auf Frequenzen im Lichtgebiet und höher beschränkt gewesen.

Man weiss, dass Moleküle und Atome sich in verschiedenen Energiezuständen befinden können, etwa wie mehr oder weniger gespannte Federn. Jede Molekül- und Atomart hat eine ihr eigene, charakteristische Serie von möglichen Energieniveaus. Es gibt dabei von den grössten bis zu den kleinsten sehr verschiedene grosse Stufen. Ein Atom kann seinen Energieinhalt stufenweise durch Aufnahme oder Abgabe von elektromagnetischen Wellen ändern. Die Wellen ihrerseits sind ja gequantelt, man kann die Energie einer Welle nicht beliebig fein unterteilen, das Wellenquant oder Photon ist die geringste Energiemenge, die man bei einer bestimmten Frequenz haben kann.

Nach der *Planckschen Beziehung* [1] ist der Energieinhalt eines Wellenquantes proportional zu seiner Frequenz. Wenn nun also ein Atom oder Molekül seinen Zustand um eine oder mehrere Stufen ändert, so wird dabei ein Wellenquant ganz bestimmter Frequenz aufgenommen oder abgegeben. Strahlt man eine Welle mit der richtigen Frequenz ein, so kann man das Atom oder Molekül veranlassen, ein Wellenquant aufzunehmen und in einen höheren Energiezustand überzugehen. Hier spricht man von Anregung des Atoms. Fällt das Atom auf den alten Zustand zurück, so wird das Quant wieder abgegeben, das Atom emittiert eine Strahlung. Grosse Energiesprünge liefern die Wellenquanten höchster Frequenz, zum Beispiel die Röntgenstrahlen. In sogenannten ionisierten Gasen gibt es mittelgrosse Energiesprünge, denen die Emission von Lichtwellen entspricht. Dieses Phänomen ist bekannt von den Neon- und Fluoreszenzlamppen. Die kleinsten Energiesprünge entsprechen nun den Wellenquanten im Mikrowellengebiet. Deshalb eignen sich Mikrowellen so gut zur Untersuchung der Feinstruktur der Atome und Moleküle. Die Wissenschaft, die sich damit befasst, ist die Mikrowellenspektroskopie. Mikrowellenspektrographen sind gewissermassen Energieniveaumskopie.

Die Atome eines Körpers sind nie alle im gleichen Energiezustand, in einem genügend grossen Atomverband sind praktisch alle Stufen vorhanden. Aber im thermischen Gleichgewicht ist die mittlere Anzahl der Partikel in jedem Energiezustand nach einem genau bekannten Gesetze verteilt (*Boltzmannsche Beziehung*):

$$N_2/N_1 = e^{-(E_2 - E_1)/kT} \quad (2)$$

N = Besetzungszahl

E = Energieinhalt

T = absolute Temperatur

k = *Boltzmannsche Konstante*

Die energiereichsten Zustände sind also die seltensten, die energieärmsten die häufigsten (Fig. 9a). Dabei finden aber immer spontane Übergänge von

einem zum andern Zustande statt, die Sache ist in ständiger Bewegung, nur bleibt dabei die mittlere Besetzungszahl in jeder Energiestufe konstant. Zwischen zwei Energiestufen finden also im Gleichgewicht pro Zeiteinheit immer gleich viele spontane Übergänge nach oben wie nach unten statt. Es wird also im Mittel nach aussen keine Strahlung abgegeben. Die Strahlungsenergie, die ein Körper mit seiner Umgebung austauscht, ist das thermische Rauschen. Gelingt es nun aber durch irgendeine Massnahme, dieses natürliche Gleichgewicht zu stören, so dass zum Beispiel zu viele Partikel in einem höheren Energiezustand sind, so wird die Anzahl jener, die Energie abgeben, grösser als jener, die Energie aufnehmen. Ein solcher Stoff strahlt also.

Maser

Die neuen Molekularverstärker oder Maser (MASER = Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) beruhen nun alle irgendwie auf diesem Prinzip. Die ersten Maser, die gebaut wurden, sind die sogenannten Ammoniakstrahlmaser, die an Hand von Figur 8 erläutert seien. Das Ammoniakmolekül hat unter anderen zwei Energiezustände, die sich

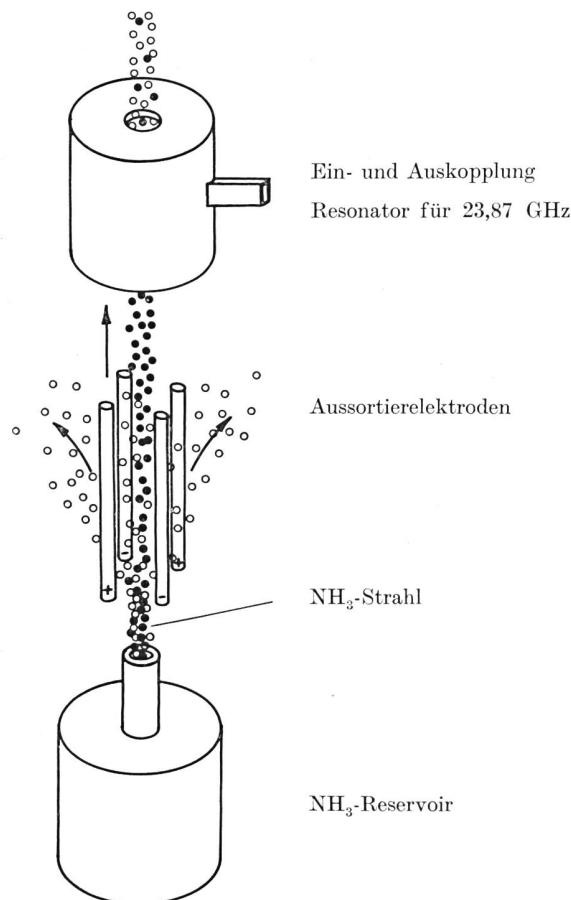


Fig. 8. Schema des Ammoniakstrahlmasers. Von den Molekülen werden jene mit dem niedrigen Energieniveau nach aussen abgelenkt. Der Strahl mit den Molekülen im höheren Zustand gibt seine Überschussenergie im Resonator ab
Legende:

- Moleküle im höheren Energiezustand
- Moleküle im niedrigeren Energiezustand

um ein Quant von 24 GHz unterscheiden. Man lässt nun einen Ammoniakstrahl in ein evakuiertes Gefäß einströmen. Die Energiezustände befinden sich noch im Gleichgewicht, und praktisch befinden sich gleich viele Moleküle im oberen wie im unteren Zustand, weil die Energiedifferenz sehr klein ist. Es gelingt nun, durch elektrische Felder die Moleküle nach Energiezuständen zu sortieren, ähnlich wie bei einem Masspektographen. Die Felder wirken hier so, dass die Moleküle des höheren Energiezustandes fokussiert werden, während jene des niedrigeren Zustandes nach aussen abgelenkt werden. Am Ende haben wir einen Strahl, der fast nur noch die eine Sorte von Molekülen enthält und der sich daher nicht im Gleichgewicht befindet. Würden wir den Strahl seinem Schicksal überlassen, so würde allmählich das Gleichgewicht wieder hergestellt, indem bald das eine, bald das andere Molekül spontan umkippen würde. Dabei entstünde eine inkohärente Strahlung, ein starkes Rauschen, das wir aber hier nicht gut gebrauchen können.

Und hier liegt nun das Entscheidende: Man kann die Moleküle veranlassen, ihre Strahlung synchron abzugeben, das heißt phasenrichtig, falls man sie in ein Wechselfeld der richtigen Frequenz bringt. Und dies geschieht in einem Resonator. Wenn im Resonator einmal eine Schwingung vorhanden ist, so geben alle Moleküle ihre Quanten so ab, dass diese Schwingung verstärkt wird. Dieses Resultat lag quantentheoretisch wahrscheinlich schon lange auf der Hand, nur hatte niemand daran gedacht, es in dieser Art auszunützen. Es ist nun sofort ersichtlich, dass man damit einen aktiven Generator hat, dessen Frequenz einzig durch die Struktur des Moleküles gegeben ist, unabhängig von Temperatur und ähnlichen äusseren Einflüssen. Es ist dies die ideale Atomuhr, wesentlich besser als die etwa schon länger bekannten Atomuhren, die auf dem Absorptionsprinzip arbeiten. Heute spricht man bei diesen Atomuhren von Genauigkeiten von Bruchteilen von 10^{-10} , das bedeutet einen Fehler von einer Sekunde in mehreren hundert Jahren. Es ist wohl möglich, dass die inhärente Genauigkeit solcher Geräte vielleicht noch etwa vier Zehnerpotenzen höher liegt. Solche Genauigkeiten gehören aber heute noch fast in das Gebiet der Metaphysik. Es darf zur Ehre des Laboratoire Suisse de Recherches Horlogères in Neuenburg gesagt werden, dass dieses Institut den ersten und bis heute wahrscheinlich einzigen Ammoniakmaser in Europa hergestellt hat, der befriedigend läuft, denn so einfach das Prinzip erscheinen mag, so kompliziert ist in der Praxis eine solche Neuentwicklung [4] [5].

Beim Maser haben wir also im Grunde eine Methode aus dem Gebiete der Lichttechnik nutzbar gemacht: Strahlung von angeregten Atomen. Aber es ist etwas Wesentliches dazu gekommen, die synchrone oder induzierte Abgabe der einzelnen Quanten. Neben diesem Ammoniakmaser ist die Zahl der Möglichkeiten zur Ausnutzung eines ähnlichen Effektes beinahe unbegrenzt. Eines Tages wird man vielleicht

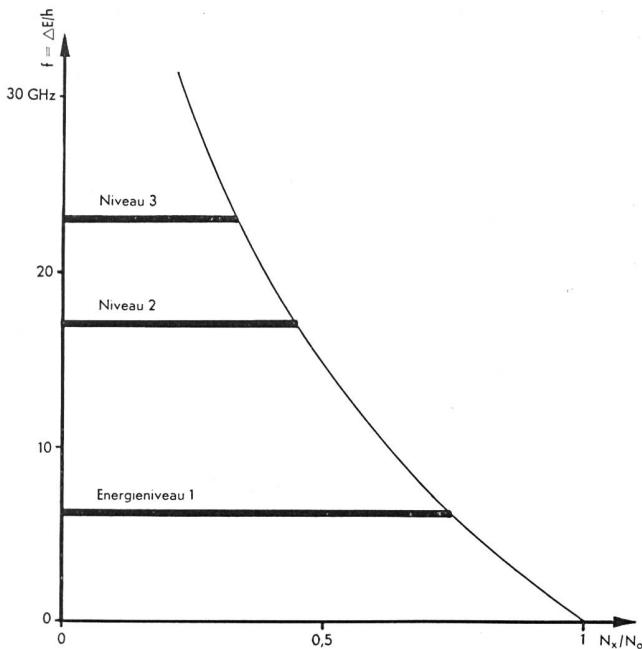


Fig. 9a. Boltzmannsche Verteilung der Besetzungszahlen für verschiedene Energiezustände (Thermodynamisches Gleichgewicht)

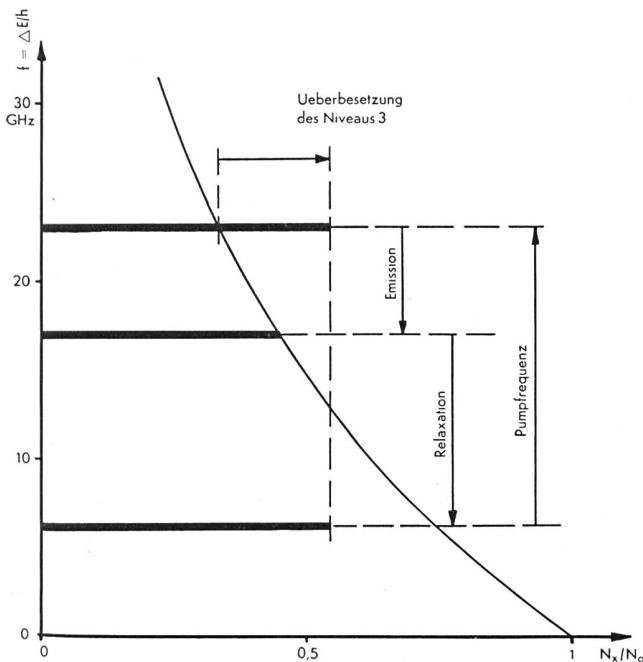


Fig. 9b. Bei Anregung des Überganges 1-3 wird das thermodynamische Gleichgewicht gestört, und es entsteht eine Überbesetzung der dritten Energiestufe. Beim Zurückfallen der Atome auf die unteren Stufen wird Strahlung abgegeben

Stoffe finden, die sich technisch besser eignen als Ammoniak, und man wird einfache Apparaturen ersinnen. Heute schon ist eine grosse Zahl von Varianten des Prinzips vorgeschlagen worden, darunter solche, die kein Vakuum benötigen, weil sie mit festen Stoffen arbeiten.

Man kennt zum Beispiel den dreistufigen Festkörpermaser, bei dem drei Energieniveaux beteiligt

sind. Man bringt dabei durch eine Strahlung höherer Frequenz, die sogenannte Pumpfrequenz f_p , die Atome vom ersten in den dritten Zustand, und lässt sie dann auf das zweite und das erste Niveau zurückfallen, wobei die gewünschte Strahlung abgegeben wird. Wenn man nämlich den Körper in ein elektromagnetisches Wechselfeld der richtigen Frequenz bringt, ihn also gewissermassen mit Photonen der Energie $(E_3 - E_2) = h \cdot f_p$ durchsetzt, so aktiviert man die Übergänge zwischen den beiden Energieniveaus E_3 und E_1 , bis sich bei Sättigung in beiden Zuständen etwa gleich viele Partikel befinden. Man hat dann die Situation nach Figur 9b, und es ist evident, dass das natürliche thermische Gleichgewicht hier gestört ist. Es sind zu viele Atome im Zustand E_3 . Ein Teil davon fällt nun auf die Stufe E_2 und dann auf E_1 zurück, wobei die Quanten $(E_3 - E_2)$ und $(E_2 - E_1)$ abgegeben werden. Befindet sich ein Stoff in einem Resonanzsystem für die eine der entsprechenden Frequenzen, so werden auch hier die Quanten synchron abgegeben. Diese Art Maser werden bei sehr tiefen Temperaturen (flüssiges Helium) betrieben. Dies hängt damit zusammen, dass die Energie der Mikrowellenquanten sehr klein ist und daher nach der Boltzmannschen Beziehung nur bei sehr tiefen Temperaturen grosse Unterschiede in den Besetzungszahlen der betreffenden Energiestufen möglich sind. Erst bei Frequenzen in der Größenordnung von 10 000 GHz (Infrarot) ist zu erwarten, dass mehrstufige Festkörpermaser auch bei Raumtemperatur arbeiten könnten (Fig. 10). Abgesehen davon ist die niedrige Temperatur natürlich auch des Rauschens wegen von Bedeutung.

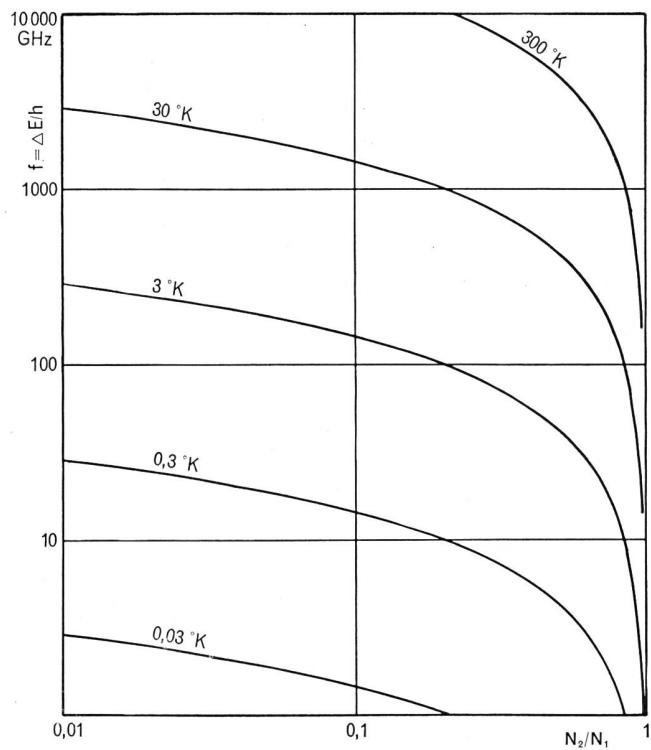


Fig. 10. Boltzmannsches Verteilungsgesetz für verschiedene Temperaturen

Parametrische Verstärker

Kaum hatte man Zeit, die Entdeckung des Maserprinzips zur Kenntnis zu nehmen, als schon ein weiterer neuer Verstärkertyp von sich reden machte, der Reaktanzverstärker, parametrische Verstärker oder MAVAR (Modulator Amplification by Variable Reactance). Allerdings ist das Prinzip nicht eigentlich neu, aber es wurde vor kurzem erstmals für Mikrowellenfrequenzen realisiert. Es ist eine jener Erfundenen, bei denen man sich, wenn sie da sind, fragt, weshalb man eigentlich nicht früher daran gedacht hatte. Man verwendet bei diesem Verstärker Schwingungskreise, deren Reaktanzen (Kapazität oder Induktivität) verändert werden können. Die einzige Schwierigkeit liegt eigentlich darin, Reaktanzen zu realisieren, die genügend rasch variiert werden können. Die Steuerung erfolgt mit einer Pumpfrequenz, die oft der doppelten Signalfrequenz entspricht. Die Arbeitsweise ist kurz folgende: Man denke sich einen Schwingkreis aus einer Induktivität und einer Kapazität, die verändert werden kann (Fig. 11), oder als mechanisches Beispiel ein Pendel mit einer vertikal beweglichen Aufhängung. Eine geringe vorhandene Schwingung wird nun verstärkt, indem jedesmal, wenn die Ladung der Kapazität Null ist, diese vergrössert wird, was keine Leistung verbraucht, und jedesmal, wenn die Ladung ihr positives oder negatives Maximum erreicht hat (also zweimal pro

Periode der Schwingung), C verringert wird unter Überwindung der elektrostatischen Kräfte. Dabei wird Arbeit gebraucht, die von der Pumpfrequenz abgegeben und von der Signalfrequenz aufgenommen wird. Dadurch wird die Schwingung entdämpft und, wenn genügend «gepumpt» wird, sogar angefacht. Beim Pendel müsste jedesmal, wenn das Pendel die tiefste Lage hat, der Schwerpunkt nach oben und bei den Endlagen nach unten bewegt werden, etwa so, wie ein Kind eine Schaukel zum Schwingen bringt. Als variable Reaktanzen verwendet man verschiedene Arten von Festkörpern, zum Beispiel Halbleiter und Ferrite. Die einfachste Ausführung eines solchen Verstärkers wurde bis jetzt von *Hines* [7] und *Uhlir* [8] angegeben, wobei als variable Kapazität eine besondere Halbleiterdiode verwendet wird. Ausser dieser Diode enthält die ganze Anordnung nur noch einen Hohlraum, resonant auf der Signal- und der Pumpfrequenz, und eine Quelle für die Pumpfrequenz. Der Vorteil des parametrischen Verstärkers gegenüber dem Maser liegt darin, dass er grundsätzlich bei jeder Frequenz- und Temperaturkombination arbeiten kann, insbesondere also bei Raumtemperatur. Weil es sich um Manipulationen der Reaktanzen allein handelt, die nichts zum Rauschen beitragen, müssen sich geringe Rauschfaktoren erreichen lassen. *Suhl* und *Tien* [5] haben durch eine Kombination der Prinzipien von Wanderfeld- und Reaktanzverstärker eine vielversprechende neue Verstärkerform gefunden.

Sowohl Maser wie auch parametrische Verstärker befinden sich noch in einem experimentellen Stadium, und man beachte, dass man bei beiden beim kristallinen Festkörper angelangt ist. Diese Entwicklung hat einen interessanten Weg gemacht. Man erinnere sich der Kristalldetektoren, die noch vor drei Jahrzehnten an Stelle der Radioröhren verwendet wurden. Es waren geheimnisvolle Kristalle, von denen man nie recht wusste, warum und ob sie funktionieren. Man hat sie dann verlassen, weil sie zu unzuverlässig waren und weil man sie nicht beherrschte. Als die Mikrowellen aufkamen, hat man sie wieder hervorgeholt, weil die Röhren als Detektoren versagten und die Kristalle trotz ihrer Nachteile immer noch besser waren. Dann ging man mit ganz anderem Aufwand an die Abklärung der offenen Probleme. Man hat die Technologie ungeheuer verfeinert und die Theorie verbessert und schliesslich gefunden, worauf es ankommt, und wie man es machen muss. Und dabei ist eine neue Wissenschaft gewaltig gewachsen: die Physik der festen Körper, die natürlich auch aus anderen Quellen angeregt wurde. In der Folge hat man dann bekanntlich die aus Halbleiterkristallen bestehenden Transistoren gefunden, die man vorerst noch hauptsächlich bei den niedrigeren Frequenzen benutzt. Sie beginnen jedoch bereits gegen die Mikrowellen vorzurücken. Es sei hier nur im Vorbeigehen noch an die Ferrite und Garnetmaterialien erinnert, die ebenfalls seit ein paar Jahren in der Mikrowellentechnik eine grosse Bedeutung erlangen.

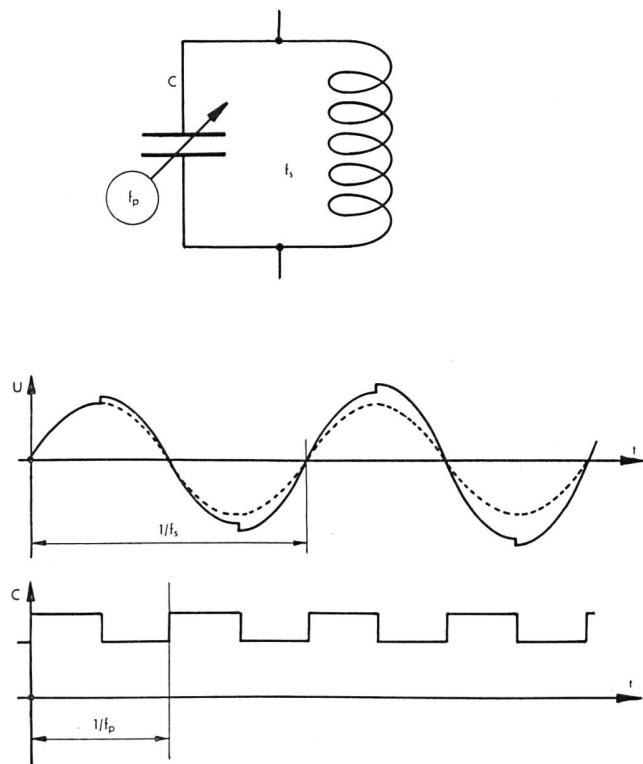


Fig. 11. Prinzip eines einfachen parametrischen Verstärkers. Die Kapazität C wird im Takt der Pumpfrequenz verändert
Legende: f_p = Pumpfrequenz
 f_s = Signalfrequenz

Überall in der Radiotechnik und allgemein in der Elektrotechnik beginnen die kristallinen Festkörper eine grosse Rolle zu spielen. Ich glaube, dass kein Zweifel besteht, dass wir am Beginn einer Umwälzung stehen, bei der viele der alten Vakuumröhren auf allen Anwendungsgebieten durch kristalline Körper ersetzt werden. Und man verspürt deutlich, dass eine neue Richtung von Ingenieuren gefragt sein wird, die imstande ist, die Resultate der physikalischen Festkörperforschung in die industrielle praktische Auswertung hineinzutragen. Man muss also dem Studenten der Mikrowellentechnik – und überhaupt den Elektroingenieuren – den Rat geben, sich bei Zeiten mit Festkörperphysik und Quantenmechanik abzugeben, wenn sie den Entwicklungen der Zukunft folgen wollen.

5. Anwendungen der Mikrowellentechnik

Nach diesen Darlegungen über einige Aspekte aus dem Mikrowellengebiet sei noch etwas auf die Anwendungen eingegangen, denn wenn nicht von dieser Seite her immer neue Forderungen kommen würden, so wäre die Forschung kaum so intensiv gewesen. Dass dieser Drang nach immer höheren Frequenzen besteht, hängt ganz allgemein damit zusammen, dass ein ständiger Mangel an Frequenzbändern vorhanden ist. Jeder weiß aus eigener Erfahrung, dass beispielsweise das Mittelwellenband durch die Überzahl an Sendern einfach verstopft ist. Und so ist es in fast allen Frequenzgebieten. Die jüngsten Kinder der Radiotechnik, etwa die frequenzmodulierten Übertragungen und das Fernsehen, verschlingen die Wellenbänder mit dem grossen Löffel. Sie wären gar nicht möglich, wenn man nicht nach immer höheren Frequenzen ausweichen könnte. Glücklicherweise weitet sich der Frequenzraum nach oben gewissermassen aus, weil die gleiche absolute Bandbreite ein immer geringeres relatives Band bedingt. Dieser Vorteil ist allerdings nur teilweise ausnutzbar, da man bei den höchsten Frequenzen meistens Modulationssysteme grösserer relativer Breite anwendet und so Leistung gegen Bandbreite eintauscht.

Der stärkste Impuls für die Entwicklung der Mikrowellentechnik ging während der Kriegsjahre aus vom Bedürfnis nach Radaranlagen. Wohl war das Radar ursprünglich eine rein militärisch bedingte Sache, und zwar eine derart wichtige, dass praktisch kein Aufwand zur Förderung dieser Entwicklungen gescheut wurde. Heute aber stehen für zivile Zwecke wohl mehr Radaranlagen in Betrieb als je während des Zweiten Weltkrieges. Der moderne Flugverkehr ist ohne Radar nicht mehr denkbar und wird immer mehr davon abhängig. Nicht nur die Flugplätze, sondern auch die grösseren Flugzeuge verfügen heute über Radaranlagen. Die Schifffahrt benutzt das Radar in grossem Masse. Dass diese Radaranlagen manchmal mangelhaft bedient werden, sagt nichts gegen das Radar. Die Figuren 12 und 13 zeigen zwei moderne Vertreter von Radaranlagen. Radar ist nur mit Mikrowellen möglich.

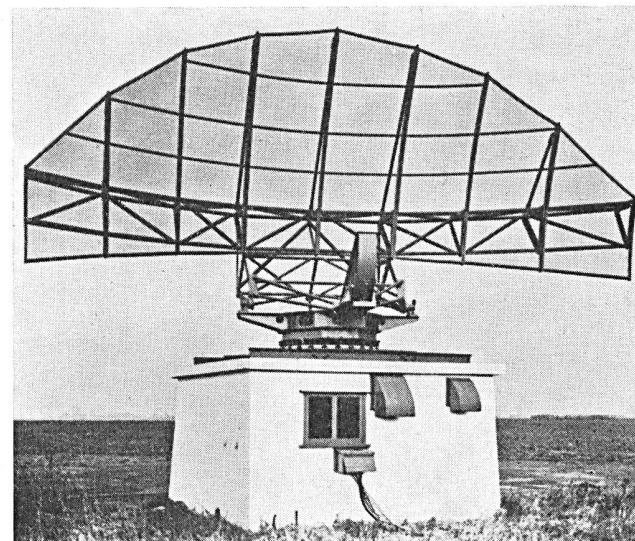


Fig. 12. Überwachungs-Radar anlage eines Flugplatzes

Eine weitere Anwendung ist die Richtstrahltechnik für Telephonie, Rundspruch und Fernsehen (Fig. 14, 15, 16). Der Telephonverkehr nimmt zu, der Fernschreiberverkehr nimmt zu, der Austausch von Radio-programmen nimmt zu und die PTT braucht Hunderte von neuen Übertragungskanälen. Sie deckt diesen Bedarf zum Teil mit Richtstrahlanlagen. Über eine einzelne Antenne werden bis mehrere Hundert Telephongespräche gleichzeitig übermittelt. In gewisser Hinsicht bieten gerade die topographischen Verhältnisse der Schweiz einem Richtstrahlnetz sehr günstige

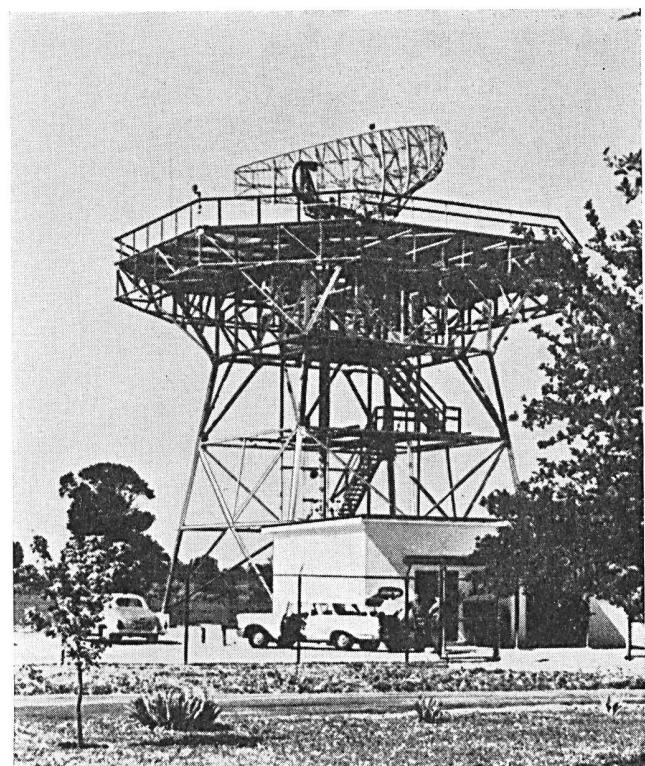


Fig. 13. Amerikanische Radaranlage für sehr grosse Distanzen

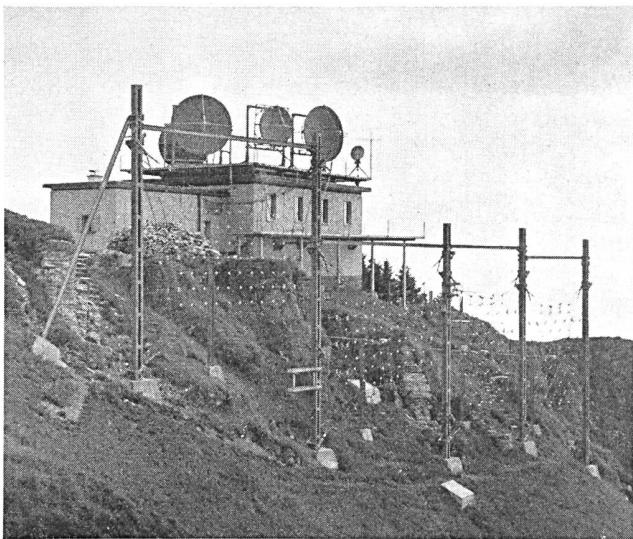


Fig. 14. Richtstrahlstation Monte Generoso
Im Vordergrund Chireix-Antennen im 160-MHz-Band;
auf dem Dache Parabolspiegel für 2000 MHz und eine
mobile Station für 7000 MHz

Bedingungen für einen stabilen Betrieb. Vorläufig benützt man Richtstrahlverbindungen hauptsächlich für lange Strecken. Aber auch auf kurzen Strecken, so zum Beispiel von einem Stadtzentrum zur Peripherie oder zwischen nahen Verkehrsschwerpunkten, bieten sich für die Zukunft noch viele Möglichkeiten; denn es wird ein immer schwierigeres Problem, in verkehrsreichen Städten neue Kabel zu verlegen, erstens aus Platzgründen und zweitens wegen der dadurch bedingten grossen Störung des Straßenverkehrs.

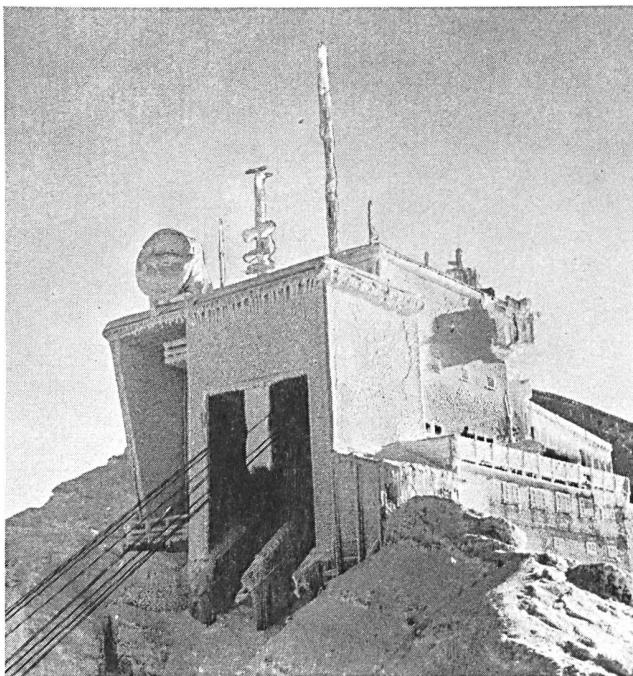


Fig. 15. Schwebebahnstation und Richtstrahlknotenpunkt
Säntis
Parabolspiegel und Winkelreflektoren für 2000 MHz
Der hohe Mast ist die Autorufantenne

Neben den drahtlosen Verbindungen beschäftigt man sich in der Mikrowellentechnik aber auch mit den Möglichkeiten einer Fernübertragung über Hohlleiter, und mehrere ausländische Forschungsstellen haben in dieses Projekt schon viel investiert [10]. Dazu kommen die mehr wissenschaftlichen Anwendungen. Da ist einmal die Mikrowellenspektroskopie. Sie untersucht die Struktur und besonders die Feinstruktur der Atome, indem sie die Möglichkeit bietet, kleine Energiesprünge zu analysieren. Davon war schon im Abschnitt über die Quantentechnik die Rede.

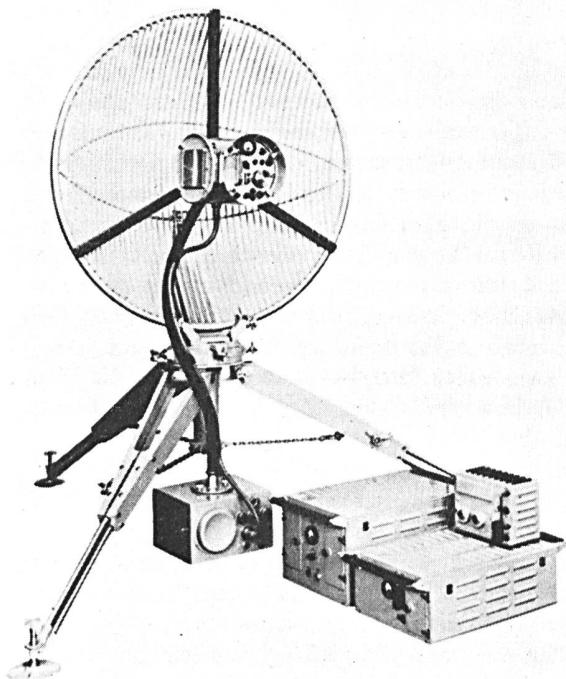


Fig. 16. Mobile Richtstrahlstation für 4000 MHz

Ein neues Anwendungsgebiet ist auch die Radioastronomie [11]. Während Jahrtausenden hat man aus dem gewaltigen Spektrum der elektromagnetischen Wellen nur das verschwindend enge Band der Lichtwellen zur Erforschung des Weltalls benutzt. Wahrscheinlich ist dieses Band das aufschlussreichste, weil das Strahlungsmaximum der meisten Himmelskörper an dieser Stelle liegt. Aber heute baut man Teleskope (Fig. 17, 18, 19), die auch andere, für unser Auge unsichtbare Strahlen empfangen. Und man hat auch schon etliche sogenannte Radiosterne gefunden, von denen man früher nichts wusste. Und auch die altbekannten Sterne haben sicher auf anderen Wellenlängen noch vieles zu erzählen. Es eröffnet sich hier noch ein weites, unerforschtes Tätigkeitsgebiet für manche Generation von Astronomen.

Ich schliesse diese Anwendungsbeispiele bewusst mit der Radioastronomie, denn die Astronomie ist, wenigstens heute noch, in diesem Sinne eine reine

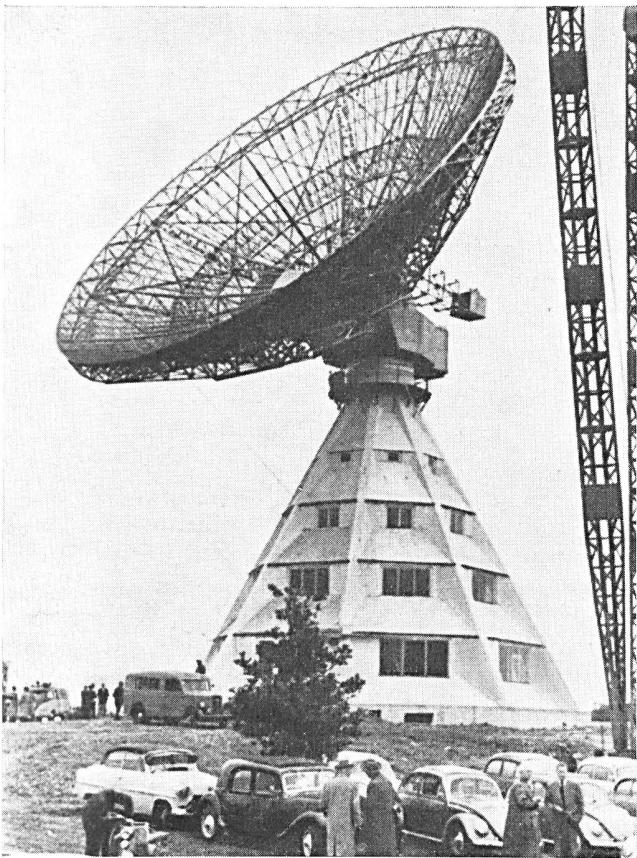


Fig. 17. Radioteleskop der Universität Bonn mit einem 25-m-Spiegel

Wissenschaft, da sie ihre Resultate nicht direkt in Geld verwandeln kann; niemand kauft Radiosterne und kosmische Nebel. Sie betreibt noch Wissenschaft, in der, wie mir scheint, vornehmsten Art, rein um der Erkenntnis Willen.

Wenn man von neuen Frequenzbändern spricht, so denkt man zunächst an Rundspruch, Fernsehen und drahtlose Telephonie. Und man mag manchmal zweifeln, ob sich der ganze Aufwand letztlich lohnt für alles, was an Nützlichem und Überflüssigem in den Äther gepumpt wird. Man muss jedoch bedenken, wie die gesamte Organisation des menschlichen Lebens heute stärker an den Verbindungen hängt, als man sich normalerweise bewusst wird. Man erinnere sich nur etwa der kleineren Unglücksfälle, wenn einem Dorf oder einer Talschaft die Telephonverbindungen abgeschnitten sind. Dabei geschieht dies meist in Gegenden, die noch verhältnismässig autonom sind. Und neben diesen Anwendungen der elektromagnetischen Wellen gibt es noch viele andere – einige davon haben wir hier erwähnt –, die der Menschheit auf diese oder jene Weise unentbehrlich wurden oder die, wie die Astronomie, vorläufig auch «nur» der Erkenntnis dienen.

6. Schlusswort

Diese Übersicht dürfte gezeigt haben, dass die Wissenschaft und die Technik der Mikrowellen noch viele Möglichkeiten in sich birgt, und dass sie durch-

aus kein engstirniges Spezialgebiet ist. Ihr Bereich ist heute schon so weit, dass niemand von sich behaupten kann, dass er sie voll beherrsche, und dabei hat man den Eindruck, dass erst ein Anfang gemacht ist.

In der Praxis gesehen bietet die Mikrowellentechnik vom reinen Theoretiker und Physiker bis zum guten Konstrukteur und Präzisionsmechaniker einem weiten Bereich von Talenten eine interessante Be-tätigung. Diese Technik ist zudem höchst arbeits-intensiv und rohstoffarm und sie ist eine Präzisions-technik, also wie geschaffen für die Schweiz. Wir könnten hier sicher, sowohl theoretisch als auch industriell, Beachtliches leisten. Ehrlich gesagt, kommen aber die meisten Erzeugnisse auf diesem Gebiet aus dem Ausland zu uns, und der schweizerische Bei-trag ist spärlich. Von den Ingenieuren, die sich in der Ausbildung diesem Zweig gewidmet haben, sind die meisten ins Ausland gezogen, dort in gute Positionen gekommen und – geblieben.

Das wird sich nun vielleicht etwas ändern, denn seit ein paar Jahren beginnen ausländische Gross-firmen da und dort in der Schweiz moderne For-schungsorganisationen aufzuziehen, weil sie hier eine Menge guter Vorbedingungen, zum Beispiel In-genieure und Mechaniker, für solche Arbeit finden. Die Mikrowellentechnik ist in charakteristischer Weise eine der modernen, forschungsintensiven Tech-niken, vielleicht hat sie deshalb in der schweizerischen Wirtschaft bis dahin einen noch etwas steinigen Boden

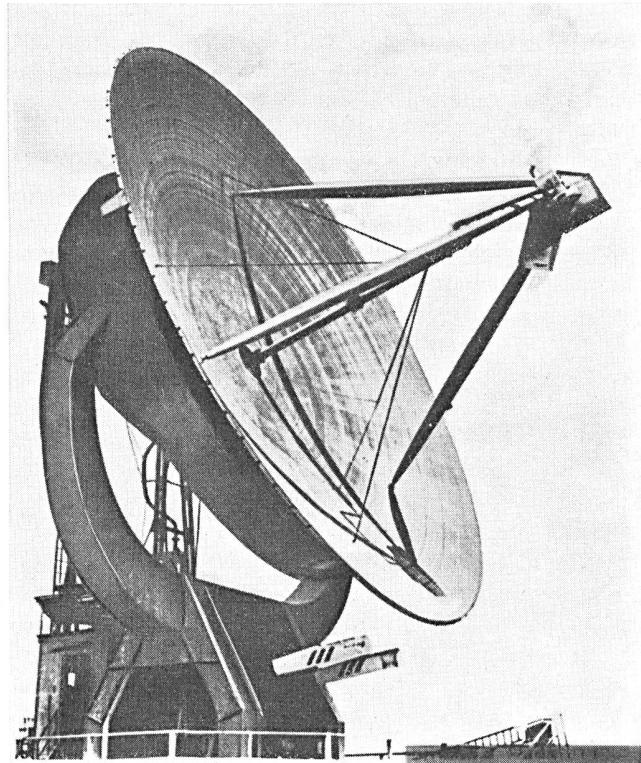


Fig. 18. Radioteleskop der US-Marine 13-m-Antennenspiegel mit einem Maserverstärker im Fokus

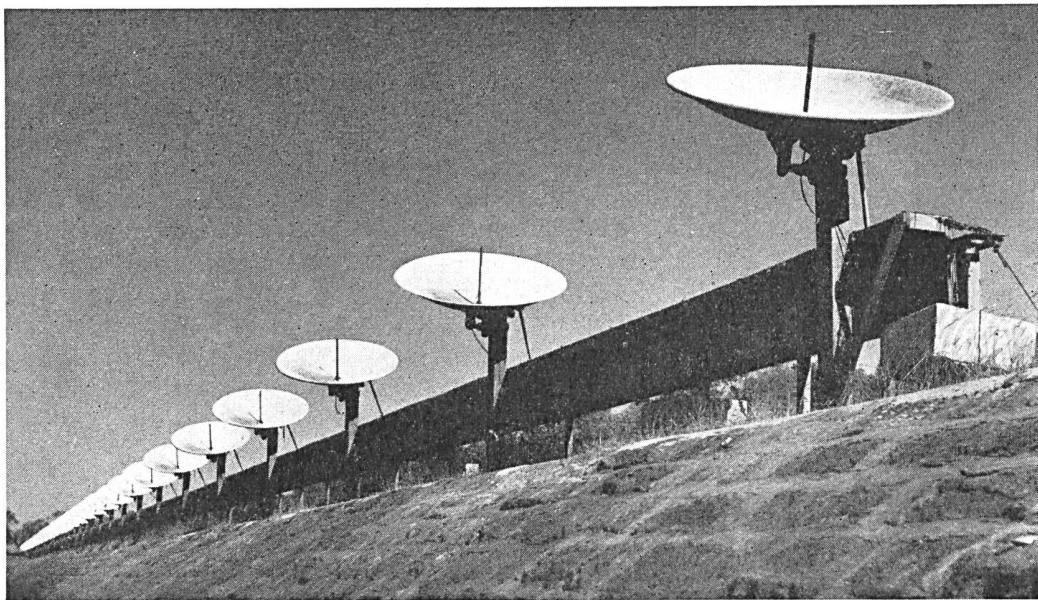


Fig. 19.
Vielfach-Interferometer
mit hohem Auflösungs-
vermögen für Beobach-
tungen von 21-cm-
Strahlungsquellen auf
der Sonne
(Sidney, Australien)

gefunden. Man zähle die elektronischen Laboratorien unseres Landes, von denen man sagen kann, dass sie mit Personal und Krediten grosszügig versehen sind, und dass sie in einer förderlichen Atmosphäre Forschung betreiben, die etwas weiter zielt, als auf die Erledigung der nächstliegenden Aufträge. Forschung auf lange Sicht, Grundlagenforschung, ist natürlich immer ein Wagnis, denn auch in der Wissenschaft gibt es viele Sackgassen. Aber es ist klar, dass wir in der Schweiz über kurz oder lang mehr werden dafür aufwenden müssen, auch wenn wir wegen der Kleinheit unseres Landes vielleicht andere Organisationsformen suchen müssen, als die Riesenkonzerne des Auslandes.

Kein geringerer als *Vannevar Bush*, der mit Weitblick die Politik der amerikanischen Forschung und Wissenschaft massgeblich mitbestimmte, sagte in seinem «Bericht an den Präsidenten» [12], den er in seiner Eigenschaft als Direktor des Office of Scientific Research and Development verfasste: «Den Wissenschaftler, der reine Forschung betreibt, mögen die praktischen Anwendungen seiner Arbeit nicht interessieren; aber Fortschritt und Entwicklung in der Industrie würden zum Stillstand kommen, wenn man die Grundlagenforschung längere Zeit vernachlässigte. Neue Produkte und neue Verfahren fallen nicht fertig vom Himmel, sondern sie wachsen aus neuen Prinzipien und neuen Begriffen, die ihrerseits auf dem Boden der reinen Wissenschaften erarbeitet werden. Die industrielle Entwicklung einer Nation, die das grundlegend neue Wissen von Aussen bezieht, wird

träge sein, und die Stellung eines solchen Landes im internationalen Handel wird schwächer, und seien seine produktionstechnischen Fertigkeiten noch so hoch entwickelt.»

Literaturverzeichnis

- [1] Weber, J. Amplification of Microwave Radiation by Substances not in Thermal Equilibrium, Trans. IRE, PGED Juni (1953).
- [2] Bassov, N. und Prokhorov, A. J.exp.theor.Phys. **28** (1955), 249.
- [3] Bloembergen, N. Proposal for a new type of solid state MASER Phys.Rev. **104** (1956), 324.
- [4] Bonanomi, J. De Prins, J. Herrmann, J. Maser oscillant avec des cavités à modes dépendant de la longueur Helv.Phys.Acta **31** (1958), 282, 285.
- [5] Kartaschoff, P. Das Ammoniak-Frequenznormal, Herz der Atomuhr an der Brüsseler Weltausstellung. Techn. Rundschau Nr. 25/1958.
- [6] Wittke, J.P. Molecular Amplification and Generation of Microwaves Proc.IRE **45** (1957), 291.
- [7] Hines, M.E. Amplification in Nonlinear Reactance Modulators. 15th Annual Conference on Electron Tube Research. Berkeley, Cal., June 1957.
- [8] Uhlir, A. Diffused Silicon and Germanium Nonlinear Capacitors. IRE-AIEE-Semiconductor Device Research Conference, Boulder, Colo., July 1957.
- [9] Tien, P.K. and Suhl, H. A Traveling-Wave Ferromagnetic Amplifier Proc.IRE **46** (1958), 700.
- [10] Epprecht, G. Die Nachrichtenübermittlung auf Wellenleitern. Techn.Mitt. PTT (1957), Nr. 2, S. 59...67. La transmission d'informations au moyen de guides d'ondes. Bull. techn. PTT 1957, No 2, p. 59...67.
- [11] Klinger, H.H. Radio-Astronomie. Techn.Mitt. PTT, 1956, Nr. 8, S. 321...341.
- [12] Bush, V. Science, the endless frontier; A Report to the President, Washington G.P.O., 1945.