

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins  
**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätswerke  
**Band:** 51 (1960)  
**Heft:** 15  
  
**Rubrik:** Mitteilungen SEV

#### **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:** 20.02.2026

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

# Technische Mitteilungen — Communications de nature technique

## Bericht deutscher Professoren über das englische Ingenieurstudium

378.14 : 378.962(42)

[Nach: Problems of Engineering Education. Report of a Group of German Professors who visited London, Rugby and Cambridge, 29th June—9th July 1958. Proc. IEE, Part A, Bd. 106 (1959), Nr. 30, S. 420...424]

Der grosse Bedarf an mehr und besseren Technikern und Ingenieuren hat zu einer ausserordentlichen Ausdehnung und Erweiterung der traditionellen technischen Universitätsfakultäten, sowie zu neuen Formen der fortgesetzten Ingenieurausbildung an den technischen Ausbildungszentren Englands geführt.

In England muss zwischen der technischen Fakultät an den Universitäten und den «Colleges of Advanced Technology» [Colleges] (welche übrigens im Gegensatz zu den Universitäten dem Erziehungsministerium verantwortlich sind) unterschieden werden.

An den Universitäten ist der Ingenieurlehrgang sehr allgemein gehalten, ohne jegliche Aufteilung in Richtungen für Maschinen-, Elektro- oder Bauwesen. Der Lehrgang selber wird oft auf verschiedenem Niveau abgehalten. So wird an gewissen Universitäten am Ende des ersten Jahres anhand von vorliegenden Prüfungsresultaten eine Auslese der besten Studenten getroffen, um diesen einen speziellen Lehrgang erteilen zu können (honours degree course). Dieser wird im dritten Studienjahr auch eine gewisse berufliche Spezialisierung enthalten (z. B. B. Sc. with honours degree). Universitäten, welche es sich nicht leisten können, die Kurse auf verschiedenen Stufen abzuhalten, erteilen denjenigen Kandidaten diese Auszeichnung, welche leistungsmässig zu den oberen 25 % gehören.

An den Colleges wird mehr Gewicht auf das Praktische gelegt, als an den Universitäten. Das hier zu erhaltende «Diploma in Technology [Engineering]» ist im Gegensatz zu dem deutschen Dipl. Ing. — oder dem britischen B. Sc. — kein akademischer Grad. Der «Dipl. Tech.»-Lehrgang besteht aus 3...4 Jahren Studium und einem Jahr industrieller Praxis, in der jedoch schon die Arbeit eines durchschnittlichen Ingenieurs verrichtet wird. Eine weitere Variante der Ingenieurausbildung ist der neuerdings eingeführte «sandwich course». Dabei wechselt der Student alle 6 Monate zwischen College und Fabrik ab. Diese Art der Ausbildung sollte besonders dort wirksam sein, wo — wie im Fall von Rugby — eine Hochschule sich in der Nähe grosser industrieller Unternehmen befindet.

Die Ingenieurfakultäten an den Universitäten konzentrieren sich auf die allgemeinen und angewandten Naturwissenschaften. Die Colleges hingegen richten ihre Kurse mehr auf die praktischen Seiten des Ingenieurwesens. An den Universitäten wird Ingenieurwissenschaft, an den Colleges Ingenieurkunst oder -fertigkeit gelernt. Da sich heute die technischen Gebiete derart ausgedehnt haben und derart komplex geworden sind, kann ein Student gar nicht während seiner 4 oder 5 Studienjahre gleichviel Aufmerksamkeit für die Wissenschaften und das Handwerk aufbringen. Das britische System scheint also darin besonders zeitgemäss, wenn es an der einen Lehrstätte das Hauptgewicht auf ein tiefes Wissen der mathematischen und naturwissenschaftlichen Fächer, an der anderen auf technologischen Prinzipien mittels Kursen in Werkstattpraxis und Konstruktion legt. Eine zu strenge Teilung in dieser Hinsicht könnte u. U. schädlich sein.

In Deutschland ist der akademische Grad des Dipl. Ing. gleichzeitig ein berufliches Fähigkeitszeugnis. In England ist die akademische Befähigung durch den akademischen Grad scharf getrennt von der beruflichen Befähigung. Die Universitäten treffen die Vorbereitungen für den Ingenieurberuf, jedoch liegt die Anerkennung als volles Mitglied des Berufs in den Händen der beruflichen Vereine. Um ihnen beitreten zu können, muss eine zusätzliche Prüfung absolviert werden, und zwar nach einer bestimmten praktischen Erfahrungszeit in der Industrie. Diese Prüfungen setzen das erforderliche berufliche Niveau fest, welches von den Berufsvereinen auch am besten beurteilt werden kann. Dadurch, dass es den Vereinen frei steht, die Prüfungen mancher Universitäten allein als hinreichend zu betrachten, üben sie auch einen gewissen Einfluss auf das Niveau der Universitätsprüfungen. Der Universitätsgraduierte, der erst ein 3jähriges Studium der allge-

meinen Naturwissenschaften hinter sich hat, die stofflich etwa den ersten beiden Studienjahren in Deutschland entsprechen, hat nach dieser Promotion noch nicht den Rang des Ingenieurs, wie sein diplomierter Kollege in Deutschland. Er muss erst als «akademischer Lehrling» in einer Firma arbeiten und kann sich dann nach einigen Jahren Tätigkeit zum Beitritt des Berufsvereins anmelden. Wie schon erwähnt, kann diese zeitliche Aufteilung zwischen Universität und Praxis verschieden sein. Erst nach dieser «akademischen Lehrzeit» und mit dem Beitritt in den Berufsverein ist die Berufsausbildung beendet. Es scheint, dass die deutschen Universitäten durch die doppelte Aufgabe der beruflichen und der akademischen Ausbildung oft überlastet sind.

Die grossen englischen Unternehmen widmen sehr viel Geld und Zeit für diese Weiterbildung der jungen Universitätsgraduierten. Es wird von ihnen nicht erwartet, dass sie eine Stelle im Unternehmen einnehmen können, vielmehr sollen sie ein tief fundiertes Wissen der Mathematik, Mechanik, Metallurgie oder Elektrotechnik mit sich bringen, denn eine Mangelhaftigkeit in diesen Fächern kann später im Berufsleben kaum noch behoben werden. Sie sollen mit fundamentalen Forschungsarbeiten beauftragt werden können, für welche sie aus allen Wissensgebieten das Elementare herbeiziehen können. Für solche Anforderungen ist der englische Universitätsgraduierte besser geeignet als der deutsche Dipl. Ing. Der englische Student verbringt seine Studienjahre auch durchgehend in einer rein akademischen Atmosphäre. Erst am Anfang seiner Lehre in der Industrie trifft er die empirischen Methoden der Technik an. Hier werden ihm die praktischen Tatsachen von denjenigen beigebracht, welche in direkter Berührung mit ihnen stehen.

Alle 4 besuchten Lehrstätten veranstalten Weiterbildungskurse für in der Industrie stehende Ingenieure. Sie behandeln Themen wie z. B. Kernenergie oder Gasturbinenwesen. Diese Kurse dauern 1 Jahr und werden mit einer Prüfung abgeschlossen, deren Bestehen mit einem besonderen Zeugnis gekennzeichnet wird. Diese Kurse stellen hohe Ansprüche an ihre Dozenten, da das Neueste des jeweiligen Gebietes behandelt wird. Sie sind bestimmt an der Universität ebenso nützlich wie in der Industrie. Es kann nur bedauert werden, dass man solche Kurse an deutschen Universitäten nicht finden kann.

Allgemein kann man sagen, dass das englische System, das Ingenieurstudium in einen eher praktischen und einen eher theoretischen Teil aufzuteilen, den Anforderungen der verschiedenen Industrien und Unternehmen besonders gut angepasst ist. Die uneinheitliche Durchführung der Ingenieurausbildung entspricht anderseits den verschiedenen Anlagen und Fähigkeiten der jungen Studenten und berücksichtigt daneben die notwendigen Einschränkungen in der Dauer des Universitätsstudiums.

Die englische Auffassung des Begriffes «Lehre und Forschung» an einer Universität reicht weiter als in Deutschland. Das Lehren hört nicht mit Vorlesungen, Übungen und Kolloquien auf. Man betrachtet es noch als Aufgabe der Universitäten, den Studenten für das Leben in der Gesellschaft vorzubereiten. Man baut deshalb für sie und ihre Lehrer grosszügige Wohngelegenheiten und Aufenthaltsräume, z. T. auf besonders moderne Weise. Diese Wohnhäuser sind ein fester Teil der Universität, genau wie Auditorium, Laboratorium oder Bibliothek, für welche die Universität für deutsche Verhältnisse sehr viel Geld ausgibt.

Alle Prüfungen werden an den englischen Universitäten schriftlich ausgeführt, wobei Name und Identität des Kandidaten dem Prüfenden unbekannt sind. Die Fragen sind von einem Universitätsausschuss zusammengestellt, an welchem auch Repräsentanten von auswärts beteiligt sind, als Garantie dafür, dass das geforderte Leistungsniveau gleich bleibt. Dadurch kann das Niveau der Prüfungen jederzeit kontrolliert oder verändert werden. Anderseits ist wahrscheinlich durch die Begrenztheit der möglichen Fragenkombinationen ihre Wiederholung unumgänglich. Im deutschen System der mündlichen Prüfungen ist die Fragenvariation natürlich auch eingeschränkt, doch kann der Prüfende sofort nach der Art der Antworten merken, ob der Kandidat wirklich den Stoff versteht oder nicht.

Obwohl die Hörerzahl manchmal zwischen 100...150 liegt, versucht man die Zahl auf 40...50 zu reduzieren. Das Verhäl-

nis zwischen Lehrkräften und Studierenden liegt zwischen 1 : 8 bis 1 : 10. Dieses Verhältnis bestimmt die Zahl der aufgenommenen Studenten an einer Abteilung.

Allgemein gewinnt man den Eindruck, dass die Wichtigkeit der Rolle des Ingenieurstudiums für das Leben der Nation in England viel mehr geschätzt wird als in Deutschland. Die vielen neuen Gebäude und deren grosszügige Planung und Ausrüstung zeigen deutlich darauf hin, dass nicht nur die bestehenden Lücken ausgefüllt werden, sondern dass man gleichzeitig an den zukünftigen Nutzen der Industrie denkt.

G. Moschitz

### Kosten der Energieerzeugung mit Reaktoren vom Calder-Hall-Typ

338.5 : 621.311.25

[Nach: Stromerzeugungskosten bei Calder-Hall-Typ-Atomkraftreaktoren. Atomwirtschaft Bd. 5(1960), Nr. 5, S. 238]

Über die Energiekosten von mit Calder-Hall-Reaktortypen erzeugter elektrischer Energie gehen die Meinungen stark auseinander. Im folgenden seien in zwei Tabellen Kosten der Energieerzeugung zusammengestellt, die auf den neuesten Brennstoffpreisen des Weltmarktes basieren.

### Kosten der Energieerzeugung in Grossbritannien<sup>1)</sup>

Tabelle I

Leistung des Reaktors		150 MW	500 MW
Anlagekosten	£/kW Fr./kW	135 <b>1 636</b>	95 <b>1 151</b>
Bauzinsen	£/kW Fr./kW	18 <b>218</b>	13 <b>158</b>
Diverse Kosten für Landerwerb usw.	£/kW Fr./kW	5 <b>61</b>	5 <b>61</b>
Gesamtkosten ohne Brennstoff	£/kW Fr./kW	158 <b>1 915</b>	113 <b>1 370</b>
Brennstoffkosten	£/kW Fr./kW	16,5 <b>200</b>	16,5 <b>200</b>
Kapitalanteil	d/kWh Rp./kWh	0.48 <b>2.42</b>	0.35 <b>1.77</b>
Brennstoffanteil <sup>2)</sup>	d/kWh Rp./kWh	0.04 <b>0.20</b>	0.04 <b>0.20</b>
Brennstoffverbrauch	d/kWh Rp./kWh	0.10 <b>0.51</b>	0.10 <b>0.51</b>
Betrieb und Instandhaltung	d/kWh Rp./kWh	0.06 <b>0.30</b>	0.06 <b>0.30</b>
Energieerzeugungskosten	d/kWh Rp./kWh	0.68 <b>3.43</b>	0.55 <b>2.78</b>

#### 1) Berechnungsgrundlagen:

- Zinsfuss . . . . . 5,5 %
- Amortisationszeit . . . . . 20 Jahre
- Kapitaldienst . . . . . 8,37 %
- Ausnützungsfaktor . . . . . 75 %
- Brennstoffeinsatz . . . . . 1,1 t/MW
- Brennelementpreis . . . . . 15 000 £/t
- Thermischer Wirkungsgrad . . . . . 30 %
- Plutonium-Rückvergütung (nach Aufbereitung) . . . . . 6000 £/t
- 1 £ = 12.12 sFr.

- 2) berechnet mit 5,5 % der Investitionen + 2,87 % der Differenz zwischen neuem Brennstoff und Plutoniumrückgewinnung.

### Kosten der Energieerzeugung in Gegenden mit hohen Zinsen

Tabelle II

Brennelementpreis	£/t Fr./t <sup>1)</sup>	Leistung des Reaktors		150 MW		500 MW	
		20 000 <b>242 400</b>	15 000 <b>181 800</b>	20 000 <b>242 400</b>	15 000 <b>181 800</b>	20 000 <b>242 400</b>	15 000 <b>181 800</b>
Anlagekosten	£/kW Fr./kW	140 <b>1 697</b>	140 <b>1 697</b>	100 <b>1 212</b>	100 <b>1 212</b>	100 <b>1 212</b>	100 <b>1 212</b>
Bauzinsen	£/kW Fr./kW	20 <b>242</b>	20 <b>242</b>	14 <b>170</b>	14 <b>170</b>	14 <b>170</b>	14 <b>170</b>
Erste Charge	£/kW Fr./kW	22 <b>267</b>	17 <b>206</b>	20 <b>242</b>	20 <b>242</b>	15 <b>182</b>	15 <b>182</b>
Gesamtkosten	£/kW Fr./kW	182 <b>2 206</b>	177 <b>2 145</b>	134 <b>1 624</b>	134 <b>1 624</b>	129 <b>1 563</b>	129 <b>1 563</b>
Gesamtkapitalanteil	d/kWh Rp./kWh	0.80 <b>4.04</b>	0.78 <b>3.94</b>	0.59 <b>2.98</b>	0.59 <b>2.98</b>	0.57 <b>2.88</b>	0.57 <b>2.88</b>
Brennstoffwechsel	d/kWh Rp./kWh	0.17 <b>0.86</b>	0.11 <b>0.56</b>	0.17 <b>0.86</b>	0.17 <b>0.56</b>	0.11 <b>0.56</b>	0.11 <b>0.56</b>
Betriebskosten	d/kWh Rp./kWh	0.07 <b>0.35</b>	0.07 <b>0.35</b>	0.05 <b>0.25</b>	0.05 <b>0.25</b>	0.05 <b>0.25</b>	0.05 <b>0.25</b>
Energieerzeugungskosten	d/kWh Rp./kWh	1.04 <b>5.25</b>	0.96 <b>4.85</b>	0.81 <b>4.09</b>	0.81 <b>4.09</b>	0.73 <b>3.69</b>	0.73 <b>3.69</b>

1) Bei der Umrechnung wurde 1 £ = 12.12 sFr. angenommen.

Schi.

### Kurznachrichten über die Atomenergie

[Nach Atomwirtschaft Bd. 5(1960), Nr. 5]

621.039.4

Das nächste britische Atomkraftwerk in Dungeness wird schätzungsweise Investitionskosten von 100 £ pro installiertes kW benötigen.

In Norwegen steht im Atomforschungszentrum JENER seit 1951 ein Forschungsreaktor in Betrieb, welcher für die Produktion von Radioisotopen eingesetzt ist. Kürzlich wurde im Tank des Schwerwassermoderators eine Leckstelle entdeckt, die die Entnahme der Brennelemente nötig macht. Die Betriebsunterbrechung hatte eine Einfuhr von Radioisotopen aus Grossbritannien zur Folge.

In einer Versuchsanlage des Moskauer Institutes für Biochemie sollen in diesem Jahre 12 t Kartoffeln bestrahlt werden. Damit soll der Beweis für die Anwendbarkeit der Bestrahlungsmethode in Grossanlagen erbracht werden.

Der Berliner Reaktor BER ist zur Zeit ausser Betrieb, da sich beim 50-kW-Betrieb die Sprühschutzkappe der Rekombinatorpumpe löste. Diese Pumpe wälzte das Spülgas um. Die Reparatur soll voraussichtlich im Laufe des Monates Juni 1960 beendet sein.

In Saclay (Frankreich) wurde ein Reaktor erstellt mit dem Hauptzweck, das Verhalten der Brennelemente zu studieren. Nach den ersten Ergebnissen gaben leicht angereicherte Uranelemente, die bei einer maximalen Oberflächentemperatur von 1200 °C und einer Höchstleistung von 40 MW/t betrieben wurden, eine Leistung von mehr als 7000 MW/t ohne Deformationen ab. Dieses Ergebnis übertrifft erheblich die erwartete Leistung von 3000 MW/t.

Schi.

# Nachrichten- und Hochfrequenztechnik — Télécommunications et haute fréquence

## Opto-elektronische Festkörpersysteme

621.383.4 : 535.376

[Nach E. E. Loebner: Solid-State Optoelectronics, RCA Rev. Bd. 20(1959), Nr. 4, S. 715...743]

Dringt ein Photon in einen Festkörper ein, so kann sein Energiezustand unverändert bleiben (klassische Optik), oder es kann seine Energie teilweise oder ganz verlieren, evtl. unter Erzeugung von Ladungsträgern (Photolumineszenz, Absorption, Compton-Effekt). Der umgekehrte Prozess, die Lichterzeugung in Festkörpern, ist ebenfalls auf verschiedene Arten möglich: Temperaturstrahler, Umwandlung eines energiereicheren Photons (Photolumineszenz), Aufprall eines Elektrons (Kathodenlumineszenz) und durch Anlegen eines elektrischen Feldes (Elektrolumineszenz). Ein Verstärker oder Modulator hat mindestens drei Pole, deren Zugänge elektrisch oder optisch sein können. Eine Klassifikation der Festkörpervstärker bezüglich der Art der Zugänge zu den einzelnen Polen ist möglich, beispielsweise verstärkt eine Photoelektrolumineszenz-Zelle ein optisches Signal, die Leistungsversorgung ist elektrisch und das Ausgangssignal wiederum optisch.

Im folgenden sollen nur Anwendungen diskutiert werden, welche aus elektrisch und optisch gekoppelten Photowiderständen und Elektrolumineszenz-Zellen aufgebaut sind. Die üblichste Schaltung besteht aus einem Photowiderstand und einer Elektrolumineszenz-Zelle in Serie, wie sie in Fig. 1 dargestellt ist. Werden solche Kreise oder Zellen auf einer Platte angeordnet, so erhält man einen Bildverstärker, der baldige Anwendung verspricht bei der Sichtbarmachung von Röntgen-, Gamma- und Infrarotstrahlen. Solche Bildverstärker sind jedoch noch relativ langsam. Werden in den einzelnen Zellen optische Rückkopplungen angebracht, so speichert die Platte ein einmal eingegebenes Bild. Eine vieldiskutierte Anwendungsmöglichkeit ist ein Bildschirm, der Bilder sichtbar macht, die als Folge von Pulsen eingegeben werden (Fernsehbild). Eine erste experimentelle Lösung wurde in den Laboratorien der RCA verwirklicht. Immerhin ist der Aufwand und der Leistungsbedarf noch so, dass solche Festkörpervideoschirme in nächster Zeit nur für grossflächige Projektionen in Frage kommen dürften.

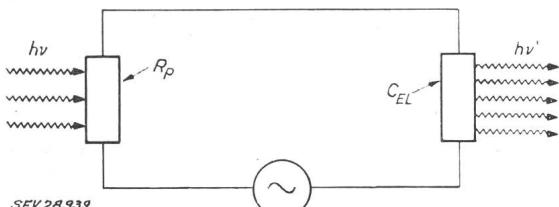


Fig. 1  
Grundzelle

$R_P$  Photowiderstand;  $C_{EL}$  Elektrolumineszenz-Zelle;  $h\nu$  einfallendes Photon;  $h'\nu$  ausgesandtes Photon

Mit der Grundzelle (Fig. 1) können auch logische Schaltungen für Digitalrechner aufgebaut werden. Eine Anwendungsmöglichkeit davon ist die binäre Kodierung von geschriebenen Buchstaben und Zahlen. Ein solches «Cognitron» verwandelt stilisierte Buchstaben und Zahlen in einen binären elektrischen Ausgang, wobei die gesamte logische Schaltung opto-elektronisch ausgeführt ist. Das Schieberegister ist ein wichtiger Bestandteil von modernen Digitalrechnern. In neuester Zeit sind verschiedene Schaltungen bekannt geworden, welche die Zuverlässigkeit von opto-elektronischen Schieberegistern erhöhen.

Ein weiterer Schritt führt zu den Bildverarbeitungstafeln, deren ganze logische Schaltung zweidimensional angeordnet ist. Dabei können mehrere solcher Platten hintereinander geschaltet werden. Man gelangt so zu einem neuartigen, im wesentlichen räumlich aufgebauten Digitalrechner, der im Unterschied zu konventionellen Rechnern sehr viele Parallelverbindungen zwischen Datenverarbeitung und Gedächtnis hat. Sein Aufbau zeigt grosse Ähnlichkeit mit den Netzwerken in den Reflexzentren von Lebewesen. Mit einem solchen Rechner dürften weitere Fortschritte in der Automation von Denkprozessen gemacht werden.

C. Burckhardt

## Das Frequenzband zwischen Mikrowellen und Infrarot

621.3.02966 : 535.61-14

[Nach I. Kaufman: The Band Between Microwave and Infrared Regions. Proc. IRE Bd. 47(1959), Nr. 3, S. 381...396]

### 1. Einleitung

Die Mikrowellentechnik ist bis ins Millimetergebiet vorgetrieben worden. Anderseits erfuhr der Infrarotbereich ausgedehnte praktische Anwendung. Dazwischen erstreckt sich der Abschnitt von 0,3 GHz (Wellenlänge  $\lambda = 1$  mm) bis 3 GHz (Wellenlänge  $\lambda = 0,1$  mm). Dieser ist noch weitgehend unerforscht, was auf das Fehlen passender Mikrowellen-Generatoren zurückzuführen ist. Im folgenden werden zahlreiche Vorschläge zur Mikrowellenerzeugung im genannten Bereich behandelt, der nachstehend mit «Ultramikrowellen» (UMW) bezeichnet wird.

Die erfolgreich entwickelten Hochleistungsgeneratoren für Mikro- und Millimeter-Wellen möchten die Hoffnung erweckt haben, dass sich deren Technik auf das UMW-Gebiet extrapolieren lasse, doch stehen diesbezügliche Erfolge noch aus. Auch mangelt es an passenden Detektoren (um so mehr auch an Verstärkern) für dieses Gebiet, dem man besonders für die Raumforschung Bedeutung beimisst, da sich Antennen und Reflektoren mit «vernünftigen» Abmessungen herstellen lassen.

### 2. Erzeugung von Ultramikrowellen

Der weitaus schwierigste Aspekt des UMW-Problems bildet die Schaffung von Einfrequenzquellen annehmbarer Leistung. Es sind in Betracht zu ziehen:

#### 2.1 Konventionelle Mikrowellen-Röhrentechnik

Laufzeitröhren wie Klystrons, Magnetrons und Wanderfeldröhren werden immer schwieriger zu bauen, je näher man an 0,3 GHz herankommen will. Beispielsweise weist ein Hohlraum eines Reflexklystrons für 5,5 mm Wellenlänge mit Kopplung durch einen 1,6-kV-Elektronenstrahl 2,1 mm  $\phi$  und 0,18 mm Topfflächendistanz auf. Bei Reduktion der Abmessungen um den Faktor 10 (für  $\lambda = 0,5$  mm) gelangt man zu Abmessungen, die nicht mehr realisiert werden können; auch ist die Leistung nur noch sehr klein. Trotzdem ist ein Reflexklystron für  $\lambda = 4$  mm hergestellt worden. Da die Herstellung eines Hohlraums bei der Wanderfeldröhre entfällt, liegen die Verhältnisse hier etwas günstiger; die Toleranzen in der Periodizität des Aufbaus werden allerdings kritisch. Der von Karp publizierte Rückwärtswellenoszillator, eine Variante der Wanderfeldröhre, erreicht 0,2 GHz (Fig. 1). Es wird ein Elektronenstrahl von 2,5 kV benutzt; die Nutzleistung beträgt 1 mW. Eine Frequenzerhöhung scheitert an der erforderlichen Strahldichte.

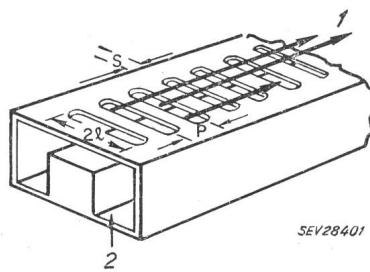


Fig. 1  
Schematische Struktur eines Rückwärtswellen-Oszillators nach Karp

Für 0,2 GHz ist  $l = 0,61$  mm,  $p = 0,127$  mm,  $s = 0,051$  mm  
1 Elektronenströmung; 2 Furchen-Wellenleiter

Man wird bei der Weiterentwicklung der Mikrowellenröhren die nachstehenden Punkte beachten müssen:

1. Elektronenstrahlen von Megavolt-Energien (geringere Abstossung der Ladungen).
2. Monotrons mit Resonatoren höheren Ordnungs-Modus.
3. Wanderfeld mit Zusammenspiel des Feldes eines ungeladenen Systems mit dem raumharmonischen Typ der Raumladungswelle. (Der Elektronenstrahl beeinflusst intermittie-

rend, jedoch synchron das Feld, welches sich gegen den Strahl bewegt.)

4. Hohe gepulste Magnetfelder zwecks Zusammenhaltens der Elektronenstrahlen.

5. Neue Methoden der Strahlkonzentration.

### 2.2 Schwarzkörperstrahlung

Im Bereich von 0,3...3 GHz ist die Rayleigh-Jeans-Annäherung an das Plancksche Gesetz anwendbar. Es zeigt sich aber, dass selbst bei einer strahlenden Oberfläche von  $10^4$  °K nur minimale UMW-Effekte auftreten ( $10^{-8}$  W).

### 2.3 Funkenoszillatoren und Massenstrahler

Der Hertzsche Oszillator ist schon vor 50 Jahren für cm- und mm-Wellen abgewandelt worden; Nichols und Tear erzeugten 1923 Schwingungen von  $\lambda = 0,22$  mm (Funken in Metallpulver); die Leistung ist jedoch minim. Eine Suspension von Al-Pulver in einem Ölstrom ergab Schwingungen von  $\lambda = 0,2...2,2$  mm. Ein anderer Massensender von Clarendon (1952) lieferte 30 mW bei  $\lambda = 3...9$  mm. Das Spektrum der erzeugten gedämpften Wellen ist breit.

### 2.4 Oberwellen-Generatoren

Mittels einer nichtlinearen Reaktanz lassen sich Oberwellen erzeugen, aus denen man Harmonische der Speisefrequenz aussieben kann, doch sinkt der Nutzeffekt rapid mit steigender Ordnung. Einige Methoden bieten gewisse Aussichten.

#### a) Direkte Entnahme der Harmonischen bei MW-Röhren

Ein Magnetron Typ 3J31 liefert z. B. auf der Grundwelle  $\lambda = 12,5$  mm 20 kW, auf der 3. Harmonischen noch 0,24 W, auf der 8. Harmonischen 0,18 mW und auf der 10. Harmonischen ( $\lambda = 1,25$  mm) nur noch 0,12 mW; wie man sieht, ist die Ausbeute im UMW-Gebiet äusserst mager.

#### b) Mikrowellenröhren, entwickelt für grosse Oberwellenanteile

Vom Columbia Radiation Laboratory wurde 1957 ein Magnetron entwickelt, das auf der Grundwelle von  $\lambda = 33,9$  mm 12 kW leistete, jedoch auf der 2. Harmonischen bis 34 kW. Ähnliche Röhren haben bis 1,2 kW auf der 3. Harmonischen geliefert.

Ein Klystron mit je einem Hohlraum für die Grundfrequenz und eine höhere Harmonische lieferte gleichzeitig Leistung bei  $\lambda = 40,8$  mm und auf der 24. Harmonischen mit  $\lambda = 1,7$  mm (Leboute 1954).

#### c) Eng gebündelte relativistische Elektronenstrahlen

Im Rebatron, einem gepulsten 1 MeV Linearbeschleuniger, gelang es Coleman 1957, die Elektronen mittels elektrischer HF-Felder hoher Dichte in enggebündelte hochverdichtete Pakete zu formen. Der resultierende Ausgangstrom enthält einen hohen Anteil an Oberwellen, so dass mit dem Elektronenstrom ein «Harmodotron»-Hohlraum stosseregt werden kann, welcher Leistung auf einer hohen Harmonischen der Treiberfrequenz abgibt (Fig. 2). Die 34. Harmonische mit  $\lambda = 3,18$  mm konnte noch sicher nachgewiesen werden. Man hofft, bis zur 1000. Harmonischen zu gelangen (extrem eng

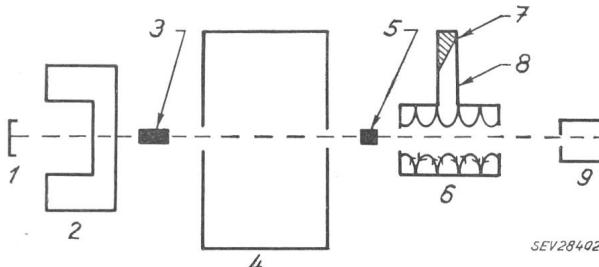


Fig. 2  
«Rebatron-Harmodotron»-Aufbau  
nach Sirkis und Coleman

Grundfrequenz  $2,72 \cdot 10^3$  MHz, 13. Harmonische  $36,1 \cdot 10^3$  MHz  
1 20-kV-Elektronenpistole; 2 Hohlraum zur Vorpaketierung; 3 teilweise vorpaketerter Strahl; 4 Hohlraumbeschleuniger für  $\lambda = 10,80$  cm TM010-Modus; 5 paketerter 1,0-MeV-Strahl; 6 E-Feld-Gestaltung im Harmodotron-Hohlraum; 7 abgestimmte Belastung; 8 RG-96/U-Wellenleiter; 9 Faradayscher Käfig

gepackte Elektronenpakete bei 1 MeV). Nachteilig ist der Umstand (für manche Zwecke), dass nur mit Impulsen gearbeitet werden kann.

#### d) Feldemission

Die Strom-Spannungs-Beziehung für die Feldemission enthält grosse nichtlineare Anteile, so dass dieses Phänomen zur Frequenzvervielfachung dienen kann. Da die Feldemissionskathoden mikroskopisch dünn sind, eignen sie sich speziell für UMW-Röhren. Derartige Röhren besitzen dünne Kathoden und regen einen Hohlraumresonator entweder auf der Grund- oder in der Frequenz z. B. der 4. Harmonischen an. Es werden kurze Elektronenimpulse erzeugt.

### 2.5 Die Erzeugung von Harmonischen mittels anderer nichtlinearer Effekte

#### a) Metall-Halbleiter-Übergänge

Die Strom-Spannungs-Kennlinie einer Halbleiter-Junction (Diode) weist Nichtlinearitäten auf, welche sie als Frequenzwandler geeignet macht. Mittels derartiger Dioden konnte man in einem Hohlleiter, gespiesen durch einen Klystron-Sender, «Energie» bis zu 0,511 GHz ( $\lambda = 0,587$  mm) nachweisen. Bei einem 1954 von Cowan und Gordy gebauten Gerät (Fig. 3) tritt die HF-Energie der Grundfrequenz durch einen Hohlleiter ein und trifft auf den Kontaktdraht («Antenne») des

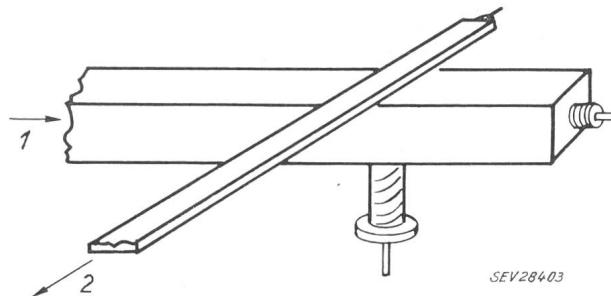


Fig. 3  
Harmonischer Vervielfacher mit gekreuzten Wellenleitern

Spitzenkontakt-Diode als Wandler

1 Leistungseintritt (Frequenz  $\omega$ )

2 Leistungsausgang (Frequenz  $n\omega$ )

Halbleiterdetektors. Die zufolge der Nichtlinearität der Kennlinie auftretenden Harmonischen strahlen in einen zweiten Wellenleiter entsprechend kleinerer Abmessungen. Es wurde so die 5. Harmonische von 0,024 GHz, d. h. 0,12 GHz, erzeugt ( $\lambda = 2,5$  mm); mit einer Eingangsleistung von  $3,5 \cdot 10^{-2}$  W wurde eine Ausgangsleistung von  $3,5 \cdot 10^{-8}$  W erhalten.

Harmonische können mit grossem Nutzeffekt auch mittels nichtlinearer Kapazitäten erzeugt werden, wie solche in Form von *pn*-Junctions aufgebaut (und z. B. in parametrischen Verstärkern benutzt) werden. Bis jetzt gelang es aber nur, Frequenzen im UHF- und tieferen Mikrowellenbereich zu erzeugen; die Grenzen sind durch den verteilten Widerstand («spreading resistance») der Diodenstrecke und deren Parallelkapazität gegeben. Auch sind die verarbeitbaren Energien gering (< 1 W).

#### b) Volumen-Nichtlinearitäten

Es fallen nichtlineare Dielektrika, ferromagnetisches Material, Plasmen in Betracht, doch sind keine Anwendungen für UMW bekannt geworden.

Bei HF-Gasentladungen zeigt die Stromdichte einen Gehalt an Harmonischen. Mittels eines derartigen Entladungsgefäßes konnten im «S»-Band (ca. 2,5 GHz) bei einer Entladungsenergie von 12,4 W noch 60 mW der 2. Harmonischen, 21 mW der dritten und 0,6 mW der 4. Harmonischen festgestellt werden.

Auch mittels Ferriten können Frequenzvervielfacher gebaut werden; ein 32-kW-Sender im 0,07-GHz-Bereich ergab noch 9 W bei  $\lambda = 2$  mm.

### 2.6 Plasma-Schwingungen

Im Plasma eines ionisierten Gases können die Elektronen um ihre Mittelstellung pendeln, wobei eine Resonanz der «Plasma-Frequenz» feststellbar ist. Man glaubt, dass ein Plasma als «verteilter Resonator» wirkt, so dass hier die Regel «je kleiner  $\lambda$ , desto kleiner die Abmessungen des Oszillators» und eine hieraus zu folgernde Leistungsgrenze einer Anordnung

nicht gültig wäre. Drei Probleme stellen sich: Erzeugung der nötigen Plasma-Dichte; Erregung der Plasma-Schwingungen; Umwandlung der kinetischen Energie der Plasmaschwingungen in elektromagnetische Schwingungen. Fig. 4 und 5 geben Anhaltspunkte dafür, wie man sich derartige Oszillatoren zu denken hat.

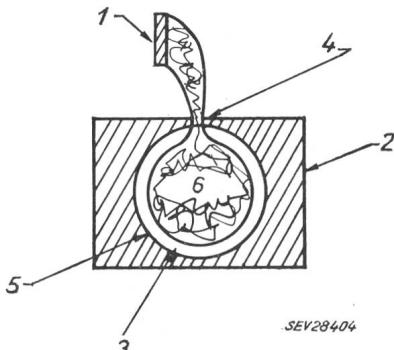


Fig. 4

Schnitt durch grundsätzlichen Aufbau eines Hohlkathoden-Glimmladungs-Rohrs nach Hernquist  
1 Anode; 2 Kathode; 3 Ionen-Raumladungs-Mantel; 4 Austrittsöffnung; 5 Kugelhohlraum; 6 Plasma

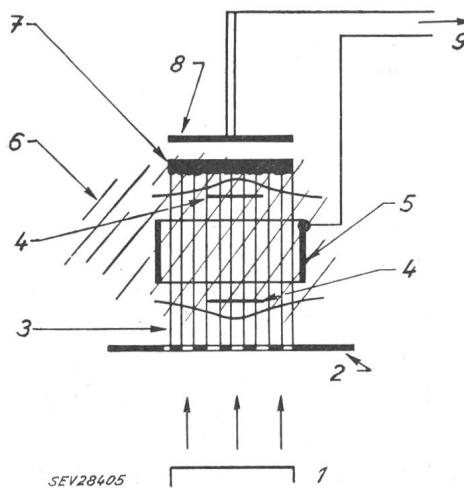


Fig. 5  
Elektronenplasma-Oszillator  
nach Wehner

1 Kathode; 2 Gitter; 3 Ionenmantel; 4 Schwingschicht; 5 Anode; 6 Anodenplasma; 7 Elektronenbündel; 8 Rückstossr (Reflektor); 9 HF-Austritt

### 2.7 Doppler-Schub-Strahlung

Die Frequenz einer Welle, betrachtet durch einen Beobachter, erleidet einen Doppler-Schub zufolge der relativen Bewegung zwischen Beobachter und Strahlungsquelle (Primärstrahler oder Reflektor).

#### a) Bewegter Strahler

Um eine wirksame Wellenlängenkompession  $\lambda_p$  zu erhalten, müsste man in der Formel

$$\lambda_p = \frac{\lambda_e}{\beta} (1 - \beta \cos \Phi)$$

worin  $\beta = v/c$ , d. h. das Verhältnis der Elektronengeschwindigkeit  $v$  zur Lichtgeschwindigkeit  $c$  darstellt

folgende Werte einsetzen:  $v = 0,989c$ ;  $\lambda_e = 5 \text{ cm}$ ;  $\lambda_p = 0,5 \text{ mm}$  und  $\Phi = 0$ . Die Elektronenergie bei  $\beta = 0,989$  beträgt 3 MeV, welcher Wert mittels eines kleinen Linearbeschleunigers leicht erreichbar scheint. Derartige Anordnungen wurden verschiedentlich berechnet. Motz hat 1956 Experimente durchgeführt, wobei Impulse von mm-Wellen und UMW von schätzungsweise 1 W auftraten.

#### b) Bewegter Spiegel

Die Frequenz  $f_r$  eines mittels bewegten Spiegels reflektierten Strahles  $f_i$  ist

$$f_r = f_i \frac{(1 + \beta)}{(1 - \beta)}$$

worin  $\beta = v/c$  Verhältnis der Geschwindigkeit des bewegten Spiegels zur Lichtgeschwindigkeit.

Um also aus der Frequenz 0,075 GHz (z. Zt. höchste durch handelsübliche Oszillatoren mit brauchbarer Leistung erzeugbare Frequenz) in 0,3 GHz ( $\lambda = 1 \text{ mm}$ ) zu erhalten, muss  $\beta = 0,60$  sein. Eine solch hohe Geschwindigkeit kann aber nur mittels eines «bewegten Spiegels», bestehend aus einer (dichten!) Elektronenwolke erzeugt werden (128 keV). Leider ist der Nutzeffekt gering.

### 2.8 Cerenkov-Strahlung

Die 1934 von Cerenkov entdeckte Strahlung tritt auf, wenn Elektronen in ein Dielektrikum mit einer höheren Geschwindigkeit eintreten, als die Phasengeschwindigkeit des Lichts in ihm beträgt. Mittels eines Laboratoriums-Aufbaues konnte (1954) eine «Leistung» von  $10^{-7} \text{ W}$  auf  $\lambda = 12,5 \text{ mm}$  erzeugt werden, wobei ein  $400 \mu\text{A}$  Elektronenstrahl von 10 kV Energie benutzt wurde.

### 2.9 Quantenübergänge

Seit dem Bekanntwerden des Molekular-Verstärker-Oszillators (1954) unter Benutzung des  $\text{NH}_3$ -Moleküls [«Maser-Verstärker<sup>1)</sup>] ist das Interesse für ähnliche Molekül-, Atom- oder Ionen-Oszillatoren für UMW wach. Es sind insbesondere die Energiebänder von Halbleitern (z. B.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  mit  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  dotiert) untersucht worden. Der Ammoniakstrahl-Maser ist bekannt als hochstabil Oszillatator; daneben wandelt er direkt thermische Energie in monochromatische MW-Energie (ohne das Hilfsmittel der Gleichstromspeisung, wie bei Elektronenröhren nötig). Das Prinzip erscheint aussichtsreich zur Erzeugung von UMW.

Um Quantenübergangs-Oszillatoren zu bauen, ist es u. a. nötig, dass von den möglichen Energiezuständen mindestens ein Band im Bereich von  $0,001 \dots 0,01 \text{ eV}$  eine Energie aufweist, die im UMW-Bereich liegt.

Ein Maser im Infrarotfrequenzbereich ist nicht bekannt, wohl aber wurde mit Halbleitern experimentiert, die passende Rekombinationszeiten aufweisen; ein Oszillatator auf  $\lambda = 8 \mu\text{m}$  wurde realisiert.

### 3. Übertragung und Messung von UMW

Mangels passender UMW-Quellen wurde relativ wenig in Bezug auf Nachweis und Übertragung gearbeitet. Auch bietet die Herstellung von Halbleitern mit steigender Frequenz Schwierigkeiten; beispielsweise weist ein Wellenleiter von rechteckigem Querschnitt mit Seitenverhältnis  $1:2$  bei  $600 \text{ MHz}$  ( $\lambda = 0,5 \text{ mm}$ ) eine lichte Weite von nur noch  $0,18 \times 0,36 \text{ mm}$  auf, was bereits an der Grenze feinmechanischen Könnens liegt.

Zum Nachweis von UMW dienen in erster Linie Bolometer (Widerstandsänderung von Feindrähten bei Erwärmung) im Vakuum. Bei Verwendung eines Wollaston-Fadens mit Seele von  $0,15 \mu\text{m} \phi$  ( $6 \cdot 10^{-6} \text{ Zoll}$ ) gelang der Nachweis von  $7 \cdot 10^{-10} \text{ W}$  auf  $\lambda = 1,4 \text{ mm}$ ; Zeitkonstante  $100 \mu\text{s}$ . Mittels eines MW-Radiometers mit  $2,5 \text{ s}$  Zeitkonstante kann noch  $10^{-16} \text{ W}$  nachgewiesen werden, doch können die dafür benötigten Verstärker für den UMW-Bereich nicht mehr gebaut werden. Halbleiterkristalldetektor-Empfänger kommen in Betracht, d. h. man glaubt, dass Spitzkontakt-Dioden für Frequenzen von  $0,1 \dots 1 \text{ GHz}$  erzeugbar sein werden, indem man die «Kontaktgeometrie» ausbaut, neue Halbleitermaterialien mit höherer Majoritätsträgerbeweglichkeit erforscht und evtl. Kühlung einführt. — Superhet-Mixer sind für UMW nicht realisierbar, da keine Oszillatoren für  $0,2 \dots 0,3 \text{ GHz}$  existieren. Mixer mit  $0,1 \dots 0,15 \text{ GHz}$  mit  $0,025\text{-GHz}$ -Oberwellen-Oszillatoren ergeben eine Empfindlichkeit von  $2,5 \cdot 10^{-12} \text{ W}$ . Der Rauschabstand beträgt  $35 \dots 40 \text{ dB}$ ; die ZF-Bandbreite ist  $4 \text{ MHz}$ . Hinsichtlich UMW-Verstärkern bestehen (vorerst noch vage) Vorstellungen über die Verwendungsmöglichkeit von Plasmaschwingungen, des Maser-Prinzips und des parametrischen Verstärkers (wobei dieser allerdings bisher eine Pumpfrequenz aufweisen muss, die höher liegt als die zu verstärkende Signalfrequenz; es wurde aber von Chang und Bloon 1958 gezeigt, dass man Pumpfrequenzen anwenden kann, welche tiefer als das Signal liegen).

G. Lohrmann

<sup>1)</sup> Der «Maser» ist ein Mikrowellen-Verstärker, welcher die in einem molekularen oder atomaren System gespeicherte Energie benutzt. Die Energieabgabe wird durch das Eingangssignal angeregt. Maser arbeiten bei der Temperatur flüssigen Heliums; ihr Rauschpegel ist sehr gering.