Zeitschrift: Bulletin de l'Association suisse des électriciens
Herausgeber: Association suisse des électriciens
Band: 39 (1948)
Heft: 26

Artikel: Das Elektron in Physik und Technik
Autor: Tank, F.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-1057980

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: 13.12.2025

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

L'expression la plus manifeste de l'activité de notre Association est le Bulletin de l'ASE, qui est devenu une revue d'électrotechnique grandement appréciée non seulement en Suisse, mais aussi à l'étranger. Pour chacun de nos membres, le Bulletin est un organe précieux pour parfaire ses connaissances techniques et constitue certainement la prestation directe la plus importante de l'ASE, malgré la modicité des cotisations annuelles.

La technique ne connaît pas de frontières nationales. L'ASE ne peut tirer profit de son travail qu'en demeurant en contact avec les organisations similaires et les spécialistes d'autres pays. Les organes de notre Association doivent donc consacrer une partie de leur temps et de leurs fonds à entretenir les relations internationales. L'un des messagers les plus importants de l'électrotechnique suisse est sans doute notre Bulletin, qui apporte la preuve de notre travail et fait une utile propagande à l'étranger en faveur de notre industrie.

Nous participons très activement aux travaux de la Commission Electrotechnique Internationale, dont le but est d'établir des spécifications internationales pour le matériel électrotechnique et de créer ainsi des conditions techniques aussi parfaites que possible et approuvées par tous les pays, ce qui est fort important pour notre industrie d'exportation.

Nous collaborons également à d'autres organisations internationales. Je me bornerai à mentionner la CIGRE, qui se réunit tous les deux ans à Paris et à laquelle participent une centaine de spécialistes suisses, présentant de nombreux rapports. Tout en se limitant au strict nécessaire — ces travaux internationaux sont en effet astreignants et coûteux —, l'ASE cherche à tirer le maximum de ces relations internationales, en faveur de ses membres.

Cette activité multiple exige, bien entendu, une organisation relativement coûteuse, car il est nécessaire de disposer d'un personnel éprouvé, capable de répondre à de nombreuses exigences, qui ne sont pas uniquement de nature technique. Il faut des locaux appropriés, convenablement équipés, une bibliothèque bien fournie, etc. Or, dans l'immeuble de notre Association, à Tiefenbrunnen, la place devient de plus en plus insuffisante. Heureusement, comme vous le savez, nous avons pu arrondir notre propriété l'an passé, ce qui permettra de remédier à cet état de choses. Nous étudions actuellement les extensions nécessaires. Dès qu'une solution convenable sera trouvée, il faudra songer à son financement.

L'ASE est une plateforme sur laquelle se rencontrent l'industrie électrique et les entreprises électriques, les autorités gouvernementales et les institutions scientifiques, là il leur est possible de s'entretenir d'une manière positive, dans une atmosphère neutre, des problèmes de l'électrotechnique qui les intéressent tous.

L'ASE, le maillon qui relie ces groupes entre eux, attache une grande importance à ce que les tensions qui résultent inévitablement de la lutte entre entreprises concurrentes, s'équilibrent dans des discussions essentiellement scientifiques ou techniques.

Das Elektron in Physik und Technik

Vortrag, gehalten an der Generalversammlung des SEV vom 4. September 1948 in Chur,

von *F. Tank*, Zürich

537.12

Es wird ein Überblick über die Entwicklung unserer physikalischen Erkenntnisse von den Elektronen innerhalb der letzten 50 Jahre gegeben und gezeigt, wie einerseits die Physik im Laufe der Zeit dem Elektron eine ganze Anzahl besonderer Merkmale zuzuschreiben hatte — Ladung, Masse, Eigen-Drehimpulse, magnetisches Moment, wozu noch der Dualismus Partikel-Welle kommt —, so dass es der ursprünglich vermuteten Einfachheit entkleidet wurde; anderseits wurden aber dadurch ausserordentlich umfangreiche Tatsachengebiete in exakter Beschreibung erfasst. So konnten die technischen Anwendungen sich schrittweise in überaus reichhaltiger Folge aufbauen; es werden erwähnt die verschiedenen Formen der Glühkathodenröhre, Photozellen, Kathodenstrahloszillograph, Elektronenmikroskop, Betatron u. a.

L'auteur présente un aperçu de l'évolution de nos connaissances physiques des électrons durant les 50 dernières années et montre que, d'une part, les physiciens ont successivement attribué à l'électron de nombreux caractères spécifiques, tels que la charge, la masse, le spin, le moment magnétique, de même que le dualisme entre particules et ondes, à tel point que l'électron n'a plus, de nos jours, la simplicité qu'on lui accordait au début. D'autre part, cela a permis de préciser certains domaines d'une grande ampleur. C'est ainsi que les applications techniques ont pu être successivement mises au point à un rythme remarquable. L'auteur passe en revue les tubes à cathode chaude, cellules photoélectriques, oscillographes à rayons cathodiques, microscopes électroniques, bétatrons, etc.

Die moderne Physik stellt fest: Als Elektron wird ein Elementarteilchen bezeichnet von der Masse (Ruhmasse) $m_0 = 9{,}107 \cdot 10^{-28}$ Gramm, von der elektrischen Ladung $e = 1{,}601 \cdot 10^{-19}$ Coulomb, vom Spin (Eigen-Drehimpuls) $\frac{1}{2} \cdot \frac{h}{2\pi}$ (h Plancksches Wirkungsquantum, gleich $6{,}61 \cdot 10^{-34}$ J·s), und vom magnetischen Moment (Dipolmoment) gleich einem Bohrschen Magneton, nämlich $\frac{e\,h}{4\pi\, m_0\, c}$ (e elektrische Elementarladung; h Plancksches Wirkungsquantum; m_0 Elektronenmasse; c Lichtgeschwindigkeit im Vakuum, $2{,}9978 \cdot 10^8$ m/s) [1]). Das Elektron kommt frei oder gebunden vor, im zweiten Falle als wesentlicher Baustein der Atome. Wie alle elementaren Teilchen tritt auch das Elektron, je nach Art des betrachteten Vorganges, entweder als Korpuskel oder als Welle in Erscheinung.

Die soeben mit wenigen Sätzen umrissenen fundamentalen Tatsachen bergen eine Welt von physi-

[1]) vgl. Regeln und Leitsätze für Buchstabensymbole und Zeichen. Publ. Nr. 192 des SEV (Entwurf vom 15. 8. 48); ferner *Birge, R. T.*: Report on Progress in Physics Bd. 8 (1942), S. 90, u. Am. J. Phys". Bd. 13(1945), S. 63.

kalischen Zusammenhängen und technischen Möglichkeiten. Diese Welt, reich an Schönheiten und Merkwürdigkeiten, an nützlichen Dingen und verborgenen Schätzen, nennen wir das Reich der Elektronik. Gross waren die Taten des menschlichen Geistes, welche zu ihrer Erschliessung führten.

Die Entdeckung des Elektrons geht auf Untersuchungen über elektrische Entladungen in verdünnten Gasen zurück. Keine theoretische Voraussage hat den Weg dazu gewiesen. Es blieb als seltsamer Fang in einem Netz experimenteller Forscherarbeit hängen, das in langsam fortschreitender Entwicklung sich mehr und mehr verdichtet hatte. Schon *Faraday* führte 1838 Versuche über die Glimmentladung in verdünnter Luft aus; 1859 entdeckte *Plücker*, dass die Kathode eines Geisslerschen Rohres bei genügender Luftverdünnung zum Ursprungsort einer bis dahin unbekannten, strahlenartigen Erscheinung wurde, die von *Hittorf* 1869 näher beschrieben wurde, und für die *Goldstein* 1880 den Namen Kathodenstrahlen prägte. *William Crookes* gelang es, diese Strahlen mit besonderer Reinheit und Stärke herzustellen. Als er 1879 in der Royal Institution in London einen Vortrag hielt, den er betitelte «Strahlende Materie oder der vierte Aggregatzustand», sprach er die seherischen Worte: «Hier, so scheint mir, liegen letzte Wirklichkeiten». Was Crookes ahnte, ist heute zur Gewissheit geworden: Aus dem Suchen nach dem Wesen des Elektrons ist ein Suchen nach den letzten Wirklichkeiten der Physik geworden, dessen Abschluss auch heute noch nicht erreicht ist.

Ein grosser Fortschritt wurde erzielt, als erstmalig genaue Messungen über die elektrische und magnetische Ablenkbarkeit der Kathodenstrahlen gelangen; der betreffende Vorgang ist uns von den heutigen Kathodenstrahloszillographen her geläufig. Um diese Ablenkbarkeit zu erklären, und um überhaupt die Gesetze der Mechanik und Elektrodynamik auf die Kathodenstrahlen anwenden zu können, war man genötigt, ihnen Masse und elektrische Ladung zuzuschreiben, und sie damit als sehr rasch bewegte, negativ elektrisch geladene Korpuskeln zu betrachten. Diese Vorstellung rechtfertigte sich um so eher, als man in den Ionen der elektrolytischen Vorgänge bereits Materieteilchen kannte, welche ganz bestimmte elektrische Ladungen trugen. *Helmholtz* lehrte schon 1881, dass diese Ionenladungen ganzzahlige Vielfache einer letzten Ladungseinheit, des elektrischen Elementarquantums, von der Grösse von $1{,}602 \cdot 10^{-19}$ Coulomb seien. Er liess dadurch nicht nur Faradays Gesetze der Elektrolyse in einem bisher unbekannten Lichte erscheinen, sondern festigte sehr wesentlich die Grundlagen der atomistischen Auffassung von der Elektrizitätsmenge, die vor ihm schon *Wilhelm Weber* angebahnt hatte. Aus den Messungen über die elektrische oder magnetische Ablenkung der Kathodenstrahlen folgt nun nicht getrennt ein bestimmter Wert für die Masse und ein bestimmter Wert für die Ladung eines Kathodenstrahlteilchens, sondern es ergibt sich lediglich das Verhältnis von Ladung zu Masse, e/m, dieser beiden Grössen, das man als spezifische Ladung zu bezeichnen pflegt, und das $1{,}7592 \cdot 10^{8}$ Coulomb pro Gramm Masse beträgt. Schrieb man mit guten Gründen dem Kathodenstrahlteilchen eine Ladung gleich einem elektrischen Elementarquantum zu, so folgte merkwürdigerweise für die Masse ein Betrag, welcher 1840mal geringer war als die Masse des leichtesten bekannten Atoms, des Wasserstoffatoms. Diesen Schluss von beinahe schicksalhafter Tragweite zog der Altmeister der Atomphysik *J. J. Thomson* in einem Vortrage vom 30. April 1897 mit den einfachen Worten: «Die aus den Messungen folgenden Zahlenwerte scheinen zu Gunsten der Annahme zu sprechen, dass die Ladungsträger der Kathodenstrahlen kleiner sind als die Wasserstoffatome». Damit ist nicht weniger gesagt, als dass die Atome, wie sie die Chemie im periodischen System der Elemente aufführt, nicht die letzten Bausteine der Materie sein können, sondern dass hier ein Elementarteilchen ganz besonderer Art vorliegt. Durch viele Beobachtungen und Erwägungen wurde Thomsons Schlussfolgerung immer wieder gestützt, so z. B. durch die Tatsache, dass bei elektrischen Entladungen in Gasen, im Gegensatz zu den Erscheinungen der Elektrolyse, nie wägbare Abscheidungen von Masse, herrührend von Kathodenstrahlen, gefunden werden konnten. Für das Kathodenstrahlteilchen bürgerte sich nun der Name Elektron ein, eine Bezeichnung, welche 1881 *Stoney* für die Ladung des einwertigen elektrolytischen Ions, also eigentlich für das elektrische Elementarquantum vorgeschlagen hatte. Man war nun überzeugt, das eigentliche Elektrizitätsatom entdeckt zu haben.

Die letzte Auffassung teilte vor allem der deutsche Forscher *Lenard*, der sich um die Schaffung ausgedehnter quantitativer Grundlagen über die Eigenschaften der Elektronen verdient machte. Er hielt die Elektronen für Teilchen des Lichtäthers und wesentlich für die Elektrizität selbst. Die positive elektrische Ladung eines Stückes Materie erklärte er durch Elektronenverlust. Hören wir Lenard selbst in seinem 1906 in Stockholm gehaltenen Nobelvortrag: «Die Kathodenstrahlen sind nicht geschleuderte elektrisch geladene Moleküle, sondern sie sind einfach geschleuderte Elektrizität. Was man nie glaubte gesehen zu haben: Elektrizität ohne Materie, elektrische Ladung ohne geladenen Körper, das haben wir also in den Kathodenstrahlen als bereits unter unseren Händen befindlich gefunden.»

Es war mehr erreicht, als man je hoffen konnte. Nun war die Bahn frei zu einer grossartigen Synthese der atomistischen Vorstellungen über die Struktur der Elektrizität und der Materie mit der Faraday-Maxwellschen Lehre des elektromagnetischen Feldes. Diese Synthese, am Ende des 19. Jahrhunderts beginnend, führte zu einer allgemeinen umfassenden Elektronentheorie der Materie. Unter ihren bedeutendsten Schöpfern dürfen wir den hochbegabten holländischen Physiker *H. A. Lorentz* nennen. Diese Theorie beansprucht, die elektrischen, magnetischen und optischen Eigenschaften der Materie in ihrer Gesamtheit darzustellen, ausgehend von bestimmten Vorstellungen über die

Wechselwirkung zwischen den im Äther bestehenden elektromagnetischen Feldern und den in den Äther eingebetteten Elektronen bzw. elektrisch geladenen elementaren Bestandteilen der Materie. Die bekannten Materialkonstanten der Stoffe, wie Dielektrizitätskonstante, magnetische Permeabilität, elektrische Leitfähigkeit usw. erfahren eine molekulartheoretische Deutung. Ihre makroskopisch ermittelten Messwerte ergeben sich durch Mittelwertbildung über viele atomare Bereiche.

Aus der Überfülle der Erscheinungen sei hier nur eine zu näherer Betrachtung herausgegriffen, nämlich die elektrische Leitfähigkeit der Metalle. Vergessen wir vorgängig daher nicht, was schon *Faraday* in seinen «Experimental Researches on Electricity» über den elektrischen Strom sagte: «Das Wort Strom ist in der gewöhnlichen Sprache so bezeichnend, dass wir es, bei Anwendung auf die Betrachtung elektrischer Erscheinungen, schwerlich genugsam von seiner Bedeutung entkleiden oder uns vor dessen Einfluss auf unser Urteil hüten können.» Wir erhalten ein rohes Bild eines metallischen Leiters, wenn wir in seinem Innern frei bewegliche Elektronen annehmen, deren Zahl ungefähr ebenso gross ist, wie die Zahl der das lockere materielle Gerüst des Leiters bildenden positiv geladenen Metallatome. Beim Vorhandensein eines elektrischen Feldes im Leiter werden die Elektronen vorwärtsgetrieben, wobei sie aber häufig auf die Metallatome treffen und mit ihnen in energetischen Austausch treten. Dadurch wird die mittlere, fortschreitende Bewegung der Elektronen aufgehalten, was in der Wirkung einem starken Reibungseffekte gleichkommt, durch welchen Bewegungsenergie der Elektronen in Wärme umgewandelt wird. Auf diese Weise entsteht die bekannte Joulesche Stromwärme; der Leitungsstrom selbst entspricht einem Konvektionsstrom bewegter Elektronen. Es ist nun von Interesse, festzustellen, dass in diesem Konvektionsstrom die mittlere fortschreitende Geschwindigkeit der Elektronen recht gering ist. Aus der bekannten Zahl von $6{,}02 \cdot 10^{23}$ Atomen in einem Grammatom berechnet sich die Zahl der Atome in einem cm^3 Kupfer (Atomgewicht 63,5, Dichte 8,9 g/cm^3) zu $8{,}44 \cdot 10^{22}$. Von gleicher Grössenordnung ist die Zahl der freien Elektronen anzunehmen. Fliesst nun in einem Kupferdraht von 50 mm^2 Querschnitt ein Strom von 100 Ampère, so entspricht dies einem Ladungstransport von 100 Coulomb in der Sekunde, oder bei einer Elektronenladung von $1{,}60 \cdot 10^{-19}$ Coulomb, von $6{,}25 \cdot 10^{20}$ Elektronen pro Sekunde durch einen Leiterquerschnitt. Bei der angenommenen Elektronendichte von rund $8 \cdot 10^{22}$ Elektronen pro cm^3 und bei einem Leiterquerschnitt von einem halben cm^2 führt dies auf eine mittlere, durch das Feld verursachte Elektronengeschwindigkeit von nur 0,015 cm/s.

Von dieser Geschwindigkeit gänzlich verschieden ist die Geschwindigkeit des Energietransportes, welcher durch die elektromagnetische Welle im Dielektrikum längs der Leitung vermittelt wird und welcher mit Lichtgeschwindigkeit vor sich geht. Elektronenstrom und Joulesche Wärme sind nur Folge des Eindringens dieser Welle in den Leiter und verzehren lediglich Energie.

Nach der Elektronentheorie greift die Kraft, welche ein stromdurchflossener Leiter in einem Magnetfelde erfährt, an den Elektronen selbst an und überträgt sich dann von diesen vermöge der sehr starken Reibung auf das Gerüst der Metallatome des Leiters. Die Drehung des Rotors in einem Elektromotor geht auf ein elektronisches Phänomen zurück, das der Ablenkung von Kathodenstrahlen in einem Magnetfelde durchaus verwandt ist.

Der namentlich von *Lorentz* und *Drude* entwickelten klassischen Elektronentheorie der Metalle gelang die quantitative Deutung der von *Wiedemann* und *Franz* aufgestellten Regel, wonach für reine Metalle zwischen Wärmeleitfähigkeit und elektrischer Leitfähigkeit Proportionalität besteht. Doch war ein von der Theorie geforderter Anteil der Elektronen an der spezifischen Wärme der Metalle nie nachweisbar. Diese Schwierigkeit behob sich erst, als *Sommerfeld* 1928 zeigte, dass bei grosser Elektronendichte, wie sie in Metallen vorliegt, sich die Elektronen wie ein sogenanntes entartetes Gas verhalten und eine besondere, sich auf die moderne Quantentheorie gründende Art der statistischen Betrachtung anzuwenden ist. Das höchst eigenartige Problem der Supraleitfähigkeit, welche in einem Verschwinden jeglichen elektrischen Widerstandes gewisser Materialien bei ganz tiefen Temperaturen besteht, ist auch heute noch nicht restlos geklärt.

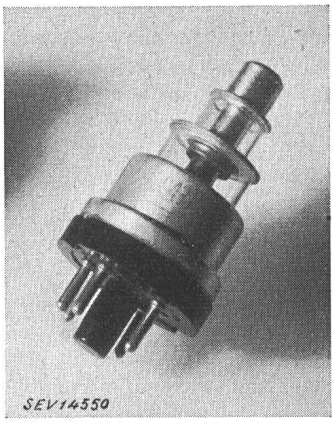

Fig. 1
Sendetriode
RCA 2C43 (Lighthouse-Tube) zur Erzeugung von *Dezimeter*wellen

Fig. 2
Klystron
elektronische Laufzeitröhre zur Erzeugung von *Zentimeter*wellen

Wenn sich die Elektronen in einem metallischen Leiter einem Gase vergleichbar verhalten, so muss die mittlere Geschwindigkeit ihrer thermischen Bewegung mit steigender Temperatur wachsen und da-

durch eine immer grössere Zahl von Elektronen befähigt werden, vermöge ihrer kinetischen Energie die Potentialschwelle zwischen Metall und Aussenraum zu durchbrechen und das Metall zu verlassen. Diese als thermische Elektronenemission an Glühkathoden bekannte Erscheinung wurde schon früh von *Edison* in Glühlampen nachgewiesen und fügt sich heute restlos in die Theorie. Ihre technische Anwendung hat sie in der Glühkathodenröhre oder Elektronenröhre gefunden, deren Vielseitigkeit und überragende Bedeutung auch den Fachmann immer wieder in Staunen versetzt.

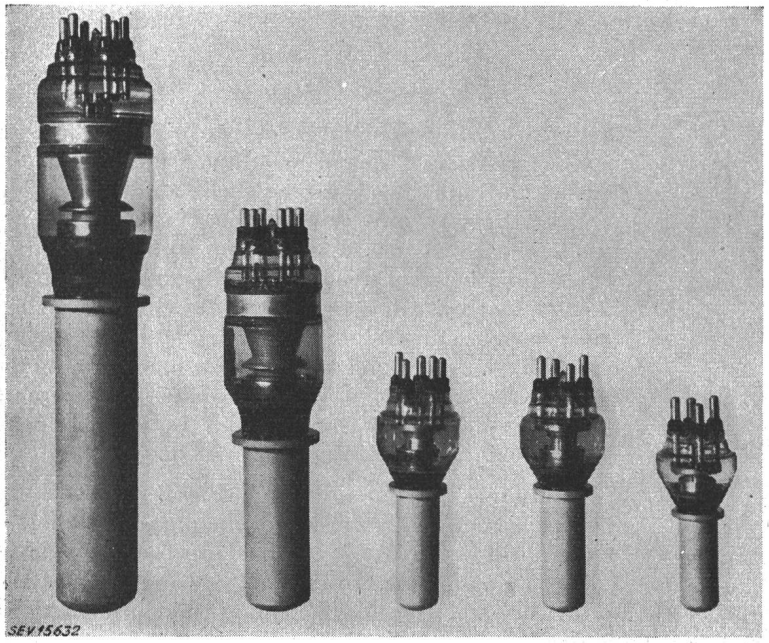

Fig. 3
Wassergekühlte Senderöhren
Brown Boveri, Typ ATW; 50, 20, 10, 10, 5 kW Anodenverlustleistung

Die Elektronenröhre ist ein höchst eigenartiges Schaltelement, das als Verstärker, Gleichrichter, Schwingungserzeuger, Amplitudenbegrenzer, Kippschalter, Schnellschalter, Frequenzumsetzer, Synchronisierelement, Zählorgan usw. dienen kann. Alle ihre Funktionen vollzieht sie mit grösster Geschwindigkeit und Präzision. Die ganze Radiotechnik, Radartechnik und Fernsehtechnik, sowie zahlreiche weitere Zweige der Fernmeldetechnik im allgemeinen, der Bau verschiedenartigster Mess-, Kontroll- und Anzeigegeräte und so manches andere mehr wird von ihr beherrscht.

Neben der Elektronenröhre ist es die photoelektrische Zelle in ihren vielfachen Formen, welche in der Licht- und Bildtechnik ein wachsendes Feld der Anwendung gewinnt. Auch der unentbehrliche Kathodenstrahloszillograph soll hier nicht vergessen werden.

Etwa ein Zehntel der in den Vereinigten Staaten von Amerika erzeugten elektrischen Energie soll in elektronischen Geräten umgesetzt werden.

Mit Hilfe von Elektronenröhren werden heute Schnell-Rechenmaschinen gebaut von bisher unbekannter Leistungsfähigkeit. Der an der Moore School of Electrical Engineering in Philadelphia gebaute «Electronic Numerical Integrator and Computer» ENIAC) enthält etwa 18 000 Elektronenröhren und bedarf im Betriebe 150 Kilowatt Leistung. Dafür vollzieht er jede wünschbare numerische Rechenoperation, er differenziert, integriert und löst komplizierte Gleichungssysteme. Weitere derartige Maschinen sind vor allem in den Vereinigten Staaten und in England im Bau.

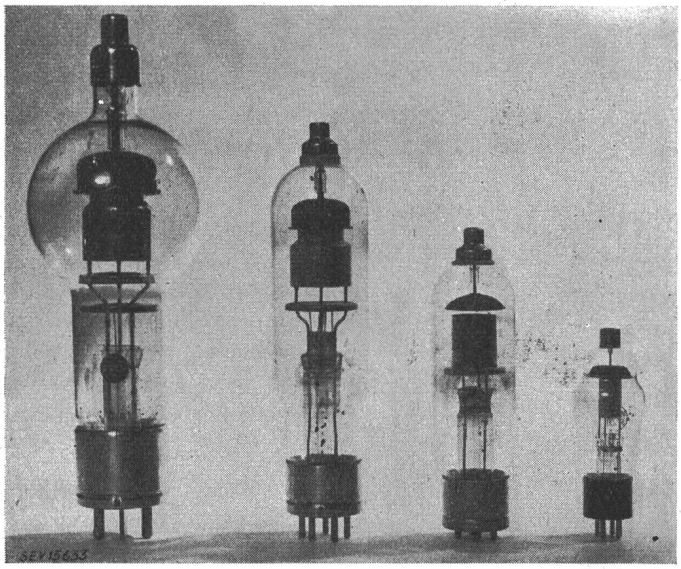

Fig. 4
Glühkathoden-Quecksilberdampf-Gleichrichterröhren
Brown Boveri

Die unvermeidlichen statistischen Unregelmässigkeiten der Elektronenemission einer Glühkathode verursachen feine Schwankungen des Stromes in Elektronenröhren. Diese Schwankungen rufen einen Störpegel hervor, der ein Frequenzspektrum von den tiefsten bis zu den höchsten Frequenzen überdeckt. In der Verstärkertechnik kennt man diesen elektronischen Störpegel als ein akustisch hörbares Rauschen; dasselbe bildet eine Schranke für die kleinsten Signale, welche durch den Verstärkervorgang noch nachweisbar sind. Auch parallel zum Eingang eines elektronischen Verstärkers geschaltete Widerstände erzeugen vermöge ihrer inneren atomistisch-elektrischen Struktur ein analoges Rauschen. Diese Tatsachen sind insofern von grundsätzlicher Bedeutung, als die Möglichkeit des Empfanges beliebig kleiner elektrischer Signale bestimmte Grenzen findet, welche durch die Vorgänge im Reiche des atomaren Geschehens gezogen werden.

Eine besonders schwierige Aufgabe der Elektronentheorie der Materie bestand in der Deutung der Erscheinungen des Magnetismus. Als *André Marie*

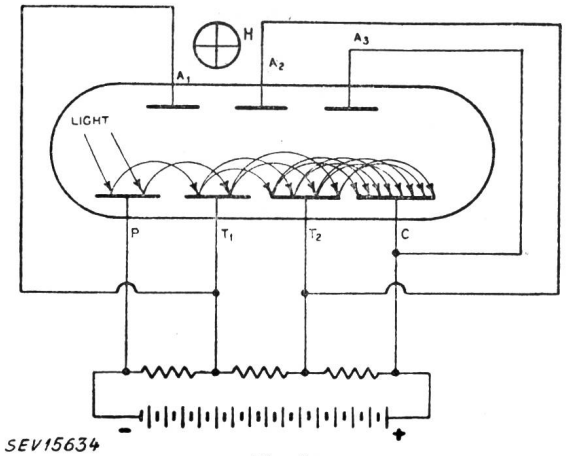

Fig. 5
Schema des Elektronenvervielfachers mit Photokathode und Prallanoden

Ampère im Jahre 1820 seine ersten scharfsinnigen Untersuchungen über die magnetischen Eigenschaften elektrischer Ströme ausführte, stellte er bereits seine berühmte Hypothese der Molekularströme auf. Danach sollte der Magnetismus nicht eine selbständige Erscheinung sein, sondern sich auf Kreisströme zurückführen lassen, welche im Innern der kleinsten Teilchen der Materie zirkulieren. Was lag näher, als diese Molekularströme ein Jahrhundert später in den kreisenden Elektronen zu erblicken, welche sich innerhalb der Atome und Moleküle bewegten? War dem so, so mussten sich in einem Stück Eisen beim Anlegen eines magnetisierenden Feldes die Elektronenbahnen mehr oder weniger richten, und es musste neben der Magnetisierung ein resultierender mechanischer Drehimpuls auf-

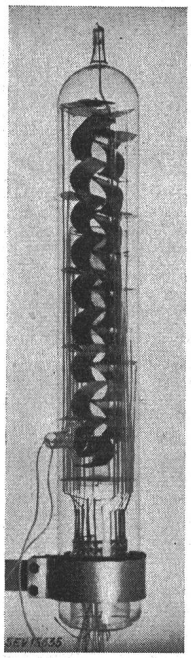

Fig. 6
Hochstufiger, elektrostatischer Elektronenvervielfacher
(Dr. *Schätti*, Institut für Technische Physik der ETH, Abteilung für industrielle Forschung)

treten. Nach einem solchen Drehimpuls suchte schon *Maxwell* vergeblich; er wurde dann 1915 von *Einstein* und *de Haas, Barnett, Beck* und anderen nachgewiesen. Doch ergab das Experiment nur den halben nach der Theorie zu erwartenden Betrag. Diese Unstimmigkeit liess sich erst beheben, als 1925 *Uhlenbeck* und *Goudsmith* dem Elektron selbst einen bestimmten mechanischen Eigen-Drehimpuls, sowie ausserdem ein festes magnetisches Moment zuschrieben, indem sie das Elektron als eine Art rotierender Kugel negativer Elektrizität betrachteten. Der Eigen-Drehimpuls war gleich einer halben «Spin»-Einheit zu wählen (eine Spin-Einheit entspricht der Drehimpulsgrösse $h/2\pi$; h Plancksches Wirkungsquantum, gleich $6{,}61 \cdot 10^{-34}$ J·s), woraus dann das magnetische Moment gleich einem Bohrschen Magneton folgte, nämlich

$$M = \frac{e\,h}{4\,\pi\,m_0\,c}$$

So hatte schliesslich das Elektron eine Reihe von charakteristischen Zügen erhalten, welche ihm ein reiches individuelles Gepräge verliehen, es aber der ursprünglich vermuteten letzten Einfachheit entkleideten. Doch die Erfolge der Spin-Hypothese waren überzeugend. Nicht nur hatte man eine tragbare Grundlage zur Erklärung der schwer entwirrbaren Erscheinungen des Ferromagnetismus gewonnen, sondern es gelang auch, neben manchem anderen, die komplizierten Zeemann-Effekte, wie man die vielfachen Aufspaltungen der optischen Spektrallinien im Magnetfeld nennt, zu deuten.

Doch nun musste auch die Partikelvorstellung des Elektrons teilweise aufgegeben und durch das Wellenbild ersetzt werden. Seit längerer Zeit wusste man, dass das Licht, trotz seiner erwiesenen Wellennatur, bei gewissen Vorgängen ein korpuskelartiges Verhalten zeigt, so z. B. bei der Auslösung von Elektronen aus metallischen Oberflächen infolge Bestrahlung. Man war gezwungen, den Begriff der Lichtquanten oder Photonen einzuführen. Der erste, der auf diese Notwendigkeit hinwies, war *Albert Einstein* in seiner 1905 erschienenen Arbeit «Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt». *Louis de Broglie* kommt das Verdienst zu, fast zwanzig Jahre später, 1924, in seiner berühmten «Thèse», den problemreichen, aber sehr tiefen Gedanken von der Doppelnatur von Lichtwelle und Korpuskel in geistreicher Weise

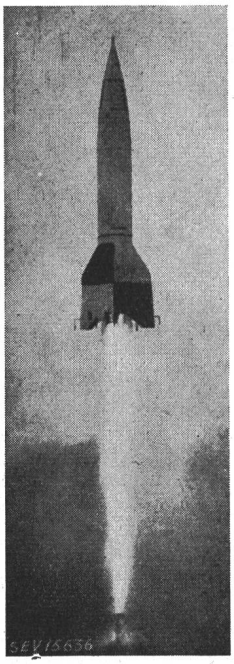

Fig. 7
V2-Rakete mit eingebautem elektronischem Fernlenkgerät

auf die Materie selbst angewendet zu haben. Er ist der Begründer der Wellenmechanik der Materie, welche nach ihm *Schrödinger, Heisenberg, Bohr* und andere in so erfolgreicher Weise weitergeführt haben. Nach de Broglie ist einem Teilchen von der Masse m, welches sich mit der Geschwindigkeit v bewegt, ein dem Lichte wesensgleicher Wellenzug zuzuordnen von der Wellenlänge

$$\lambda = \frac{h}{m\,v}$$

Wellenbild und Partikelbild sind komplementäre

Darstellungen desselben Dings. Sie bedeuten ein «Entweder – Oder» der Beschreibung in dem Sinne, dass entweder nur das Wellenbild oder nur das Partikelbild zur Beschreibung des Vorganges heranzuziehen ist, jedoch niemals beide zugleich. Sie sind Teildarstellungen eines in einfacher Weise nicht zu beschreibenden Ganzen. Sie schliessen sich zwar von Fall zu Fall aus, aber ergänzen sich gegenseitig ohne sich je zu widersprechen. Damit schwindet mehr und mehr der grundsätzliche Unterschied zwischen Strahlung und Materie in der Physik.

Die experimentellen Bestätigungen blieben nicht aus. Es ist bekannt, dass *v. Laue, Friedrich* und *Knipping* 1912 die Wellennatur der Röntgenstrahlen nachwiesen, indem sie ein feines Bündel von Röntgenstrahlen auf einen dünnen Kristall fallen liessen und hinter diesem auf einer photographischen Platte ein reichhaltiges, die Symmetrieeigenschaften des Kristalles aufweisendes Punktmuster erhielten; diese Aufspaltung des Hauptstrahles in zahlreiche, regelmässig angeordnete Nebenstrahlen ist eine Folge der Beugungserscheinungen, welche der einfallende Röntgenstrahl am atomaren Raumgitter des Kristalles erleidet; sie kann nur aus der Wellennatur der Strahlung erklärt werden. Derselbe Versuch kann mit demselben Ergebnis auch

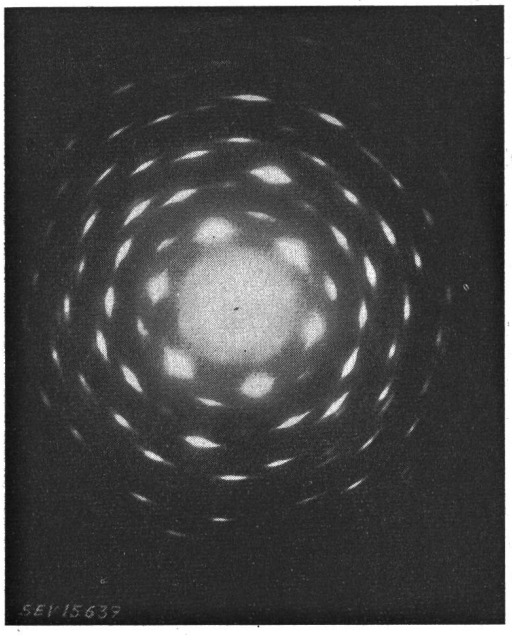

Fig. 8
Elektronenbeugung an Antimon-Einkristall (Laue-Diagramm)
Aufnahme: Trüb, Täuber

mit Elektronen ausgeführt werden; zu dieser auffallenden Übereinstimmung trägt der glückliche Umstand bei, dass die Wellenlängen von Elektronen, welche im Felde von einigen zehntausend Volt beschleunigt wurden, von gleicher Grössenordnung sind wie die Wellenlängen von Röntgenstrahlen. Ähnlich wie mit Röntgenstrahlen lassen sich auch mit Hilfe von Elektronen bei Durchstrahlung von Kristallpulvern, ja sogar von amorphen Körpern, Beugungsringe erzielen. Die ersten Versuche über Elektronenbeugung glückten 1927 *Davisson* und *Germer*.

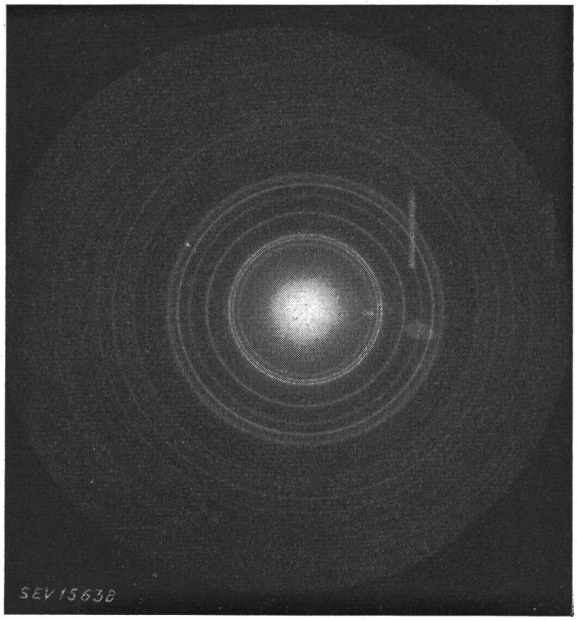

Fig. 9
Elektronenbeugung an Zinkoxyd (Ringe)
Aufnahme: Trüb, Täuber

Die Kenntnis von der Wellennatur des Elektrons ist von besonderem Interesse für die Theorie des Elektronenmikroskopes. Bekanntlich ist das Auflösungsvermögen des optischen Mikroskopes durch die Wellenlänge des Lichtes gegeben. Gegenstände, deren Abmessungen wesentlich kleiner sind als diese Wellenlänge, lassen sich nicht mehr geometrisch richtig abbilden; es entstehen Unschärfen und Fehler. Man war daher noch vor wenigen Dezennien der Meinung, es werde nie möglich sein, die weite Welt der Dinge, die kleiner sind als einige zehntausendstel Millimeter, im Abbild zu erfassen. Das Elektronenmikroskop hat diese Sachlage geändert. Beim Elektronenmikroskop wird das abzubildende Objekt statt mit Licht mit einem Bündel von Elektronenstrahlen durchstrahlt. Durch bestimmt gestaltete elektrische oder magnetische Felder, sogenannte Elektronenlinsen, gelingt es, in der Bildebene Punkt für Punkt diejenigen Elektronenbahnen wieder zu vereinigen, welche von den einzelnen Objektpunkten ihren Ausgang nahmen. Es entsteht so ein elektronenoptisches Bild, welches auf einem Leuchtschirm oder einer photographischen Platte festgehalten werden kann. Dabei lässt sich die Vergrösserung ausserordentlich weit treiben, mit Hilfe optischer Nachvergrösserung bis zum 100 000fachen und mehr, bei Objektabmessungen bis gegen den Millionstel-Zentimeter herunter, ohne dass ein Versagen der Abbildungsmöglichkeit eintritt. Die theoretische Grenze des Auflösungsvermögens liegt sogar erst bei Objektabmessungen von etwa einem Milliardstel-Zentimeter, denn von dieser Grössenordnung sind die Wellenlängen, welche den verwendeten Elektronen zuzuordnen sind.

Noch bleibt uns eine Frage von ganz besonderem Interesse. Sie lautet: Ist das Elektron ein Urteilchen in einem wirklich absoluten Sinne, oder besitzt es,

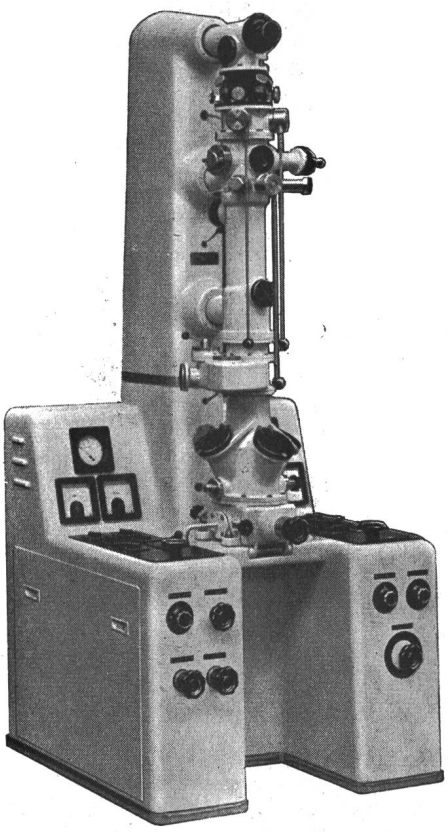

Fig. 10
Elektronen-Mikroskop
Trüb, Täuber

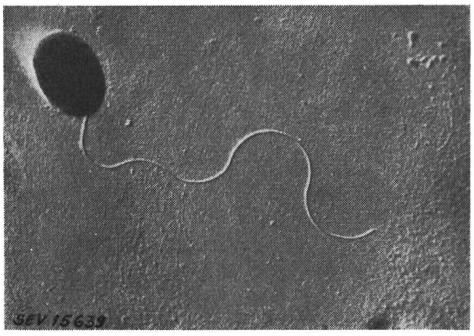

Fig. 11
Elektronenmikroskopische Aufnahme eines Bakteriums mit Geissel
Original-Vergrösserung 10 000fach, nachvergrössert auf das 20 000fache
Aufnahme: Laboratorium für Elektronenmikroskopie der Universität Bern

wie alles Zeitliche, die Stunde seines Entstehens und Vergehens? Auf diese Frage warf 1928 die geistvolle und umfassende Theorie des Elektrons von *P. A. M. Dirac* erstmalig ein sehr bemerkenswertes Licht. Aus der Diracschen Theorie, welche die Sphären höchster Abstraktion berührt, ergab sich nämlich nicht nur das Bestehen von Eigenrotation und Eigenmagnetismus des Elektrons, sondern darüber hinaus noch die Forderung nach Elektronen mit positiver Ladung. Weiter liess sich voraussehen, dass unter bestimmten Voraussetzungen die Möglichkeit der Erschaffung eines Elektronenpaares, nämlich eines negativen Elektrons und eines positiven, eines sogenannten Positrons, bestehe. Dies kann dann eintreten, wenn sehr kurzwelliges Licht, wie solches als harte γ-Strahlung beim radioaktiven Zerfall oder in der kosmischen Höhenstrahlung vorkommt, auf ein einzelnes Atom trifft. Im Laufe der intensiven Wechselwirkung, die nun eintritt, wird Energie des γ-Strahles vernichtet, und es entsteht aus ihr ein negatives Elektron und ein Positron. Die Positronen sind instabil und neigen dazu, bei Berührung mit Materie zu verschwinden. Dieser Paarerzeugung steht auch eine Paarvernichtung gegenüber. Beide Effekte wurden durch das Experiment bestätigt. Strahlung und Masse sind nur verschiedene Formen der Energie, welche sich ineinander verwandeln können. Das Positron und damit der Vorgang der Paarerzeugung wurde 1932 von *C. D. Anderson* in der Wilsonschen Nebelkammer nachgewiesen, eine glänzende Bestätigung einer scharfsinnigen theoretischen Voraussage.

Die technische Bedeutung der Elektronen haben wir mehrfach berührt. In stetem Wachstumsprozess hat jede neue Entwicklungsstufe der physikalischen Erkenntnis ansehnliche Gebietserweiterungen der technischen Anwendungen gebracht.

Als bemerkenswerte Schöpfung der jüngeren Elektronentechnik sei abschliessend das Betatron erwähnt. Das Betatron ist ein Apparat zur Herstel-

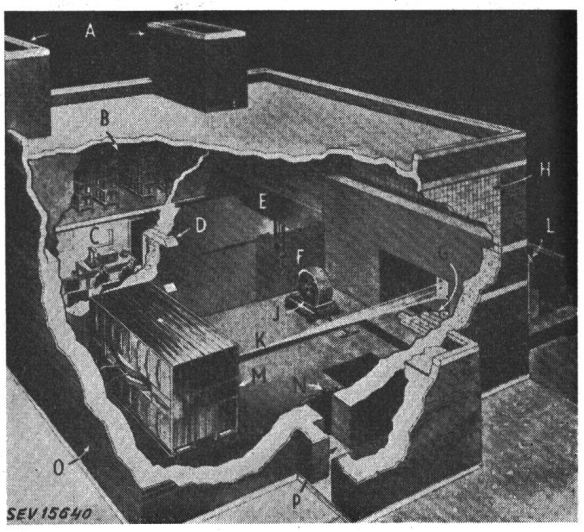

Fig. 12
Gebäude für das 100-Millionen-Volt-Betatron der General Electric Company

lung äusserst schneller Elektronen, durch welche wiederum die Erzeugung sehr harter Röntgen- bzw. γ-Strahlung gelingt. An solcher Strahlung besitzt sowohl die Atomphysik wie die Medizin ein hohes Interesse. Das Betatron besteht aus einem grossen Elektromagneten, welcher mit niederperiodigem Wechselstrom erregt wird. In das Magnetfeld wird ein Elektronenstrahl, in der Regel nur pulsweise, so hineingeschossen, dass die Elektronen eine kreis-

förmige Bahn beschreiben, deren Radius durch die Stärke des Magnetfeldes einerseits und durch die Geschwindigkeit der Elektronen anderseits bedingt ist. In einer Halbperiode, während welcher z. B. die magnetische Feldstärke vergrössert wird, entsteht durch den vermehrten magnetischen Fluss gemäss dem Faradayschen Induktionsgesetz längs der Elektronenbahn eine elektrische Umlaufspannung, welche die Elektronen beschleunigt. Feldstärkezuwachs und Zuwachs der Elektronengeschwindigkeit können nun so abgeglichen werden, dass die Elektronen eine sehr langsam sich öffnende Spirale durchlaufen, um dann im Zustande höchster Geschwindigkeit auf eine Antikathode zu prallen, wo sie durch ihren Aufstoss Röntgenstrahlen erzeugen.

Das durch die General Electric Company in Schenectady gebaute Betatron besitzt einen 130 Tonnen schweren Magneten, durch dessen Wicklungen Wechselstrom von 60 Hz und einer Stromstärke von 1000 Ampère fliesst. Die durch die periodische Ummagnetisierung hervorgerufenen Eisenverluste betragen 100 Kilowatt und machen eine besondere Kühlvorrichtung nötig. Die Elektronen führen im ganzen etwa 250 000 Umläufe aus auf einer Bahn von angenähert 170 cm Durchmesser; dabei gewinnen sie eine Bewegungsenergie, die dem Falle durch eine Potentialdifferenz von 100 Millionen Volt gleichkommt.

Unser Streifzug durch das Reich der Elektronen ist zu Ende. Es war nur eine kurze Wanderung mit einzelnen Ausblicken. Der Reichtum dieses Gebietes ist nicht auszuschöpfen. Die Nutzbarmachung der technischen Möglichkeiten, im besonderen für Vorgänge schnellsten Ablaufes und kürzester Dauer, ist noch in anhaltendem Flusse. Durch die Elektronik des vergangenen halben Jahrhunderts wurde eine Präzisionstechnik der Millionstel-, ja der Milliardstel-Sekunde geschaffen. Und wir dürfen erwarten, dass die Zukunft noch manches Neue enthüllen wird. Wissenschaft, Forschung und Technik werden nicht mehr als getrennt empfunden, sondern als verschiedene Stufen eines einheitlichen, gewaltigen Aufbaues. Und dieser Aufbau, an welchem Generationen gearbeitet haben, bedeutet ein Denkmal menschlichen Fleisses und menschlichen Scharfsinnes, zugleich aber auch ein Zeugnis für die Wunder der Schöpfung.

Adresse des Autors:
Prof. Dr. *F. Tank*, Vorstand des Institutes für Hochfrequenztechnik der ETH, Gloriastrasse 35, Zürich 7/6.

Statistik des Verkaufes elektrischer Wärmeapparate für Haushalt und Gewerbe im Jahre 1947

Vom Sekretariat des *Schweizerischen Wasserwirtschaftsverbandes*, Zürich *(A. Härry)*

An den Erhebungen im Jahre 1947 beteiligten sich 64 Firmen gegenüber 69 Firmen im Jahre 1946 [1]). Am Rückgang sind ausschliesslich kleinere Unternehmen beteiligt.

Die Gesamtzahl der im Jahre 1947 verkauften elektrischen Wärmeapparate für Haushalt und Gewerbe (ohne Export) betrug nach Tabelle I 345 712 Stück mit einem Anschlusswert von 630 205 kW.

[1]) vgl. Bull. SEV Bd. 38(1947), Nr. 21, S. 666.

Tabelle I

Verkaufte Apparate	Zahl	Anschlusswert kW
1. Bratofenherde für den Haushalt	44 948	301 600
2. Tischherde und Rechauds (keine Ersatzplatten)	10 174	19 606
3. Tischbacköfen	425	738
4. Kocher, Kaffee- und Teekocher	40 303	20 273
5. Brotröster	8 790	4 105
6. Heizkissen	15 578	1 886
7. Tauchsieder für den Haushalt	11 048	5 460
8. Warmwasserspeicher für den Haushalt	33 358	38 454
9. Heizöfen, Schnellheizer	11 734	17 118
10. Strahler	18 233	13 289
11. Wasser- und Ölradiatoren	988	1 524
12. Halbwärmespeicheröfen	83	117
13. Vollwärmespeicheröfen	62	221
14. Bügeleisen	90 222	35 870
15. Waschkessel, Waschherde und -maschinen	2 168	10 281
Übertrag	288 114	470 542
Übertrag	288 114	470 542
16. Futterkocher	402	1 047
17. Dörrapparate	1 141	564
18. Verschiedene kleinere Wärmeapparate für den Haushalt	17 162	18 117
19. Grossküchenapparate:		
a) Herde	510	14 248
b) Backöfen	104	1 411
c) Bratpfannen	272	1 934
d) Kippkessel	464	3 473
e) Verschiedene Wärmeapparate	3 662	3 137
20. Metzgereiapparate:		
a) Kochkessel	96	1 157
b) Bratpfannen	4	37
c) Raucheinsätze	13	131
d) Verschiedene Wärmeapparate	58	161
21. Bäckereiöfen, Patisserie - Konditoreiöfen	226	5 058
22. Warmwasserspeicher für das Gewerbe	1 072	20 804
23. Durchlauferhitzer	95	2 630
24. Heizkessel und Speicher für Heizanlagen	98	2 011
25. Elektrodampfkessel	21	25 687
26. Trocken- und Wärmeschränke für gewerbliche Zwecke (inklusive Grastrockner)	714	2 886
27. Laboratoriumsapparate, medizinische Apparate	1 816	1 576
28. Hochfrequenz-Generatoren		
a) dielektrische Heizung	14	47
b) induktive Heizung	2	8
29. Verschiedene Spezialapparate für das Gewerbe	29 652	53 539
Total	345 712	630 205