Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 65 (1974)

Heft: 16

Artikel: 25 Jahre Forschung an der ETHZ über elektromagnetische Felder

Autor: Sánchez, M. / Villalaz, C.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-915438

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: 11.07.2025

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

25 Jahre Forschung an der ETHZ über elektromagnetische Felder

Von M. Sánchez und C. Villalaz

537.811.016 : 537.811

Nach einer kurzgefassten Einführung in die Gliederung der elektromagnetischen Felder und Verfahren zur Lösung von Feldproblemen wird eine zusammenfassende Beschreibung der am Institut für Höhere Elektrotechnik der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich (ETHZ) in den vergangenen 25 Jahren im Zusammenhang mit Feldproblemen publizierten Arbeiten gegeben.

Angefangen mit Feldproblemen bei Elektronenröhren werden auch Arbeiten über Felder in Ferromagnetika, in elektrischen Leitern und in Halbleitern eingehend besprochen und insbesondere auch theoretische und experimentelle Untersuchungen über Hall- und Gausseffektanwendungen im Nieder- und Hochfrequenzgebiet sowie über Transportvorgänge, Feld- und Raumladungsverteilungen in Halbleiterelementen erläutert.

Après une brève introduction dans la classification des champs électromagnétiques et des procédés de résolution de problèmes de champs, les auteurs présentent un résumé descriptif des travaux au sujet des problèmes de champs publiés par l'Institut d'Electrotechnique Supérieure de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Zurich (EPFZ) au cours de ces dernières 25 années.

Partant de problèmes de champs concernant les tubes électroniques, ils traitent également en détail les travaux au sujet des champs dans les structures ferromagnétiques, dans des conducteurs électriques et dans des semi-conducteurs, en décrivant en particulier les recherches théoriques et expérimentales sur les applications des effets de Hall et de Gauss en basses et en hautes fréquences, ainsi qu'au sujet des phénomènes de transport, des distributions de champs et de charges spatiales dans les éléments semi-conducteurs.

1. Einführung

Die Theorie der elektromagnetischen Felder, Kräftefelder und Wärmefelder ist von grundlegender Bedeutung in allen Zweigen der Elektrotechnik. Ihre Grundgesetze und Rechenverfahren finden Anwendung in der Entwicklung von elektrischen Maschinen, in der Hochspannungstechnik, Fernmeldetechnik, Hochfrequenztechnik, Schaltungstechnik usw.

Am Institut für Höhere Elektrotechnik der ETH-Zürich wurden in den letzten 25 Jahren viele Forschungsarbeiten über elektromagnetische Feldprobleme durchgeführt (vgl. die Literatur am Schluss der Arbeit). Um auch dem weniger auf diese Problemstellungen spezialisierten Leser ein genügendes Verständnis für die Zusammenhänge der in den Hauptabschnitten dieser Veröffentlichung behandelten Forschungsarbeiten und -ergebnisse zu vermitteln, wurden in den folgenden zwei Abschnitten zunächst einige dafür notwendig erscheinende Bemerkungen über die Gliederung elektromagnetischer Felder sowie über Verfahren zur Lösung von Problemstellungen auf diesem Gebiet systematisch zusammengestellt. Auf Grund dieser Erläuterungen wird dann, wo notwendig, in den nach Anwendungsgebieten getrennten Hauptabschnitten eine eingehendere Einführung in die im Rahmen des Anwendungsgebietes auftretenden Spezialkenntnisse gegeben. Diese speziell ausgerichteten Grundlagen sollen ihrerseits das Bindeglied zu den noch mehr in Einzelheiten gehenden Kenntnissen über die eigentlichen Forschungsprojekte, welche am erwähnten Institut durchgeführt wurden, vermitteln.

2. Die Gliederung elektromagnetischer Felder

In der Umgebung von ruhenden elektrischen Ladungen tritt das elektrostatische Feld in Erscheinung. Werden die elektrischen Ladungen gleichförmig bewegt, so werden durch diese Bewegung zusätzliche Wirkungen hervorgerufen, die man unter dem Begriff elektrisches Strömungsfeld zusammenfasst. Gleichzeitig treten aber auch magnetische Wirkungen auf. Zwischen den elektrischen und den magnetischen Wirkungen bestehen bestimmte Beziehungen. Im allgemeinen spricht man deswegen im Falle bewegter Ladungen von elektromagnetischen Feldern und jeweils dann von stationären elektrischen oder statischen magnetischen Feldern allein, wenn man bei gleichförmig bewegten elektrischen Ladungen seine Betrachtungen auf den Rahmen des einen oder anderen Wirkungsbereiches beschränkt.

Zusätzlich zu den obengenannten Beziehungen zwischen den elektrischen und den magnetischen Wirkungen sind auch Analogiebeziehungen zwischen dem elektrostatischen Feld und dem statischen magnetischen Feld sowie zwischen dem elektrostatischen Feld und dem elektrischen Strömungsfeld bekannt. Werden Ladungen nicht mehr gleichförmig bewegt, so spricht man in jedem Fall vom elektromagnetischen Feld, und die Wellenausbreitungsphänomene spielen dann eine zusätzliche Rolle. Man spricht von quasistationären oder langsam veränderlichen Feldern, wenn die Änderungen vorgegebener Feldgrössen langsam im Verhältnis zur Ausbreitungsgeschwindigkeit des Feldes verlaufen. Zu den langsam veränderlichen Feldern zählt man beispielsweise solche, deren Änderungsfrequenzen im Tonfrequenzbereich liegen. In diesem Bereich darf man ohne allzu grosse Fehler annehmen, dass die Abmessungen der verwendeten Schaltelemente klein gegenüber den räumlichen Wellenlängen sind.

Im Gegensatz zu den langsam veränderlichen Feldern spricht man von rasch veränderlichen Feldern, wenn die Änderungsgeschwindigkeit einer Feldgrösse nicht mehr vernachlässigbar klein gegenüber der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Feldes ist. Man kann in diesem Fall die Abmessungen der Schaltelemente nicht mehr als klein gegenüber den räumlichen Wellenlängen betrachten und das Auftreten von Feldgrössenänderungen nicht mehr als gleichzeitig in allen Punkten des Raumes annehmen.

Rasch veränderliche Felder stellen den allgemeinsten Fall dar. Die einfacher zu behandelnden vorher erwähnten Fälle des elektrostatischen und des stationären elektrischen Strömungsfeldes bzw. des statischen Magnetfeldes können als Spezialfälle dieses allgemeinsten Falles behandelt werden.

Durch die Gleichungen von *J. C. Maxwell* können elektromagnetische Felder vollständig beschrieben werden. Vereinfachungen gestatten, aus diesen Gleichungen jeweils die für die Behandlung der erwähnten Spezialfälle benötigten Grundgleichungen zu erhalten.

Bei der Aufstellung der Maxwellschen Gleichungen für eine gegebene Problemstellung muss entsprechend berücksichtigt werden, dass verschiedene Medien – z. B. Vakuum, Isolator, Leiter, Halbleiter – sich in ihren charakteristischen Kenngrössen unterscheiden. Der Aufbau des zu lösenden

Gleichungssystems hängt auch davon ab, ob vektorielle oder skalare Feldgrössen ermittelt werden sollen.

Schliesslich sei noch erwähnt, dass nebst den erwähnten Beziehungen und Analogien weitere, zum Teil ähnliche Beziehungen auch die Lösung von Wärmefluss-, Strömungs- und Schwerefeldproblemen mit entsprechend angewandten gleichartigen Lösungsverfahren gestatten.

3. Verfahren zur Lösung von Feldproblemen

Je nach Problemstellung und Aufbau der entsprechenden aus den Maxwellschen Gleichungen abgeleiteten Grundgleichungen, Anfangs- und Randbedingungen können verschiedene Verfahren für ihre Lösung in Frage kommen. Die optimale Auswahl bezüglich dieser Verfahren zu treffen, ist oft kein einfaches Unternehmen, da einerseits durch die Problemstellung selber eine diesbezügliche Einschränkung gegeben wird, andererseits aber auch durch die Art der zur Verfügung stehenden Mittel. Im weiteren spielen die zu erreichende Genauigkeit der Lösung und die Angabe, ob es sich um einmalige oder wiederholte Berechnungsvorgänge handelt, eine wesentliche Rolle bei der Verfahrensauswahl.

Man unterscheidet in der Regel zwischen analytischen, graphischen, numerischen und modellmässigen Verfahren. Die numerischen Verfahren haben heute wohl die grösste Bedeutung. Sie stellen Näherungsverfahren auch für die Lösung von Problemstellungen dar, die keine geschlossene analytische Lösung gestatten. Man unterscheidet bei den numerischen Verfahren statistische, direkte (Matrizeninversion) und iterative Methoden zur Lösung der betreffenden Gleichungssysteme, wobei vor allem die beiden letzteren oft angewandt werden. Sie sind heute insbesondere wegen des hochentwickelten Standes der digitalen elektronischen Rechengeräte und wegen ihrer allgemeinen und relativ einfachen Einsatzmöglichkeiten beliebt und werden, teilweise in Verbindung mit analytischen Verfahren, dementsprechend oft eingesetzt. Der hier und da benötigte grosse Rechenaufwand, die oft beschränkte Speicherkapazität und das Bedürfnis nach Echtzeitlösungen kann in der Auswahl der Lösungsmethode auch andere Methoden oder -kombinationen bevorteilen.

Früher, als man noch nicht über genügend leistungsfähige digitale elektronische Rechengeräte verfügte, setzte man zur Lösung von Feldproblemen vor allem Analogierechengeräte ein, die unter dem Sammelbegriff der modellmässigen Verfahren einzureihen sind. Geräte dieser Art sind z. B. eine gespannte Gummimembran, der elektrolytische Trog und insbesondere elektrische Analogienetzwerke. Gerade die letztgenannten Geräte haben speziell in den 50er und 60er Jahren bei der Lösung von Feldproblemen eine wesentliche Rolle gespielt. Es ist interessant darauf hinzuweisen, dass von *M. J. O. Strutt* bereits 1926 ein Analogieverfahren mit einer gespannten Gummimembran veröffentlicht wurde [45] [1]).

Die analytischen Verfahren bestehen im Aufstellen geschlossener mathematischer Formulierungen, d. h. Problemlösungen sind bei der Anwendung solcher Verfahren numerisch durch exakt berechenbare Formeln zu erhalten.

Bei graphischen Verfahren, z. B. nach *Th. Lehmann*, wird das zu untersuchende Gebiet in einzelne Flussröhrenabschnitte zerlegt, wobei für deren Konstruktion beispielsweise zwischen ihrer mittleren Breite und den entsprechenden mittleren Querschnitten ein aus der Magnetisierungskurve eines Materials folgender funktioneller Zusammenhang berücksichtigt wird. Es handelt sich jedoch bei dieser Gruppe nur um approximative Verfahren, die bei komplizierteren Konfigurationen weder eine genügend rasche Verarbeitung gestatten noch zu genügend genauen Ergebnissen führen. Auch sie werden in Kombination mit analytischen Verfahren angewandt.

Prinzipiell lassen sich alle möglichen Verfahren zur Lösung von Feldproblemen auch in beliebigen Kombinationen und Reihenfolgen zu einem optimalen Lösungsprozess vereinigen.

4. Feldprobleme bei Elektronenröhren

Bis Ende der 50er Jahre spielten Elektronenröhren noch eine dominierende Rolle. Der Wunsch der Konstrukteure solcher Bauteile nach immer kleineren Kathoden–Gitter-Abständen führte zu immer grösseren Verhältnissen von Gitterdurchmesser zu Kathoden–Gitter-Abstand einerseits und dieses Durchmessers zum Abstand zwischen benachbarten Gitterstäben andererseits. Da keine diesbezüglichen theoretischen Beziehungen eine genügend genaue Berechnung gestatteten, wurden am Institut neue analytische Formeln für den Potentialverlauf auch unter den genannten Bedingungen für ebene Kathoden und Anoden, kreisförmige Gitter sowie Kathodenpotential Null hergeleitet [1].

Potential- und Raumladungsfelder können im allgemeinen durch die Poissonsche Differentialgleichung, oder im Spezialfall eines raumladungsfreien Gebietes durch die Laplacesche Differentialgleichung dargestellt werden. Die Lösung dieser beiden in ihrem Aufbau ähnlichen Gleichungstypen ist mittels der Analogiebeziehungen zwischen elektrostatischem Feld und elektrischem Strömungsfeld möglich. Mit Hilfe eines elektrisch gespeisten Widerstandsnetzwerkes mit verteilten Strom- und Spannungsquellen können so die Raumladungsfelder nachgebildet und gemessen werden. Das Widerstandsnetzwerk kann als Analogie zu der Differenzenform der Poissonschen bzw. Laplaceschen Differentialgleichung aufgefasst werden. Somit wird durch die Messungen am Widerstandsnetzwerk die Differenzengleichung gelöst. Diese Lösung entspricht nicht exakt der Lösung der genannten Differentialgleichungen. Es tritt der sog. Diskretisationsfehler auf, der durch die diskrete Aufteilung des für die Problemlösung verwendeten Netzwerkes in einzelne Netzwerkelemente entsteht. Je feiner man diese Aufteilung durchführt, um so genauere Lösungswerte erhält man [3]. Durch Extrapolation aus Messungen mit verschieden feinen Widerstandsaufteilungen kann man die Genauigkeit noch steigern. Die Bestimmung der Lösung der Poissonschen Differentialgleichung geschieht durch einen iterativen Vorgang. Das Netzwerk wird dabei jeweils für die Berechnung einer Iterationsstufe benutzt. Eine ausführliche Darstellung dieser Methode mit ergänzenden Betrachtungen über die Beseitigung der Randeffekte, die Einflüsse von Widerstandswahl, endlichen Maschenweiten, Zahl der verwendeten Maschen im Modell, der Widerstandstoleranzen und -änderungen wurde 1957 publiziert [2; 3].

In [D 1] und [3...6] sind diese Betrachtungen erweitert dargestellt und Anwendungen eines Netzwerkaufbaues für

[1]) Siehe Literatur am Schluss des Aufsatzes.

Berechnung bzw. Messung verschiedener ebener Hochvakuumsdioden- und -triodenkonfigurationen für ein- und zweidimensionale Fälle eingehend erläutert.

1961 wurde eine Gegenüberstellung des beschriebenen Analogieverfahrens mit dem numerischen iterativen Relaxationsverfahren zur Lösung der Raumladungsgleichung einer Zylinderdiode bei beliebigen Emissionsströmen und -geschwindigkeiten veröffentlicht [7]. Schliesslich wurde 1971 zum Vergleich dieselbe Problemstellung mittels des iterativen numerischen Verfahrens der sukzessiven Überrelaxation (SOR) auf einem digitalen elektronischen Rechengerät gelöst. Eine eingehende Beschreibung dieses Verfahrens und seiner Anwendung auf das lineare und das nichtlineare Dirichlet-Problem sowie eine Gegenüberstellung zur analytischen Lösung von *Langmuir* ist in [8] enthalten.

5. Felder in Ferromagnetika

Die Bedeutung der elektrischen Schalter, insbesondere in Mess-, Steuer- und Regelkreisen und vor allem in den Bereichen höherer elektrischer Spannungen und grösserer Ströme, führte Ende der 40er Jahre am Institut zu ausgedehnten Untersuchungen über die Flussverzögerungen in ferromagnetischen Kreisen.

Schaltgeräte sollten, um kleine Abmessungen zu ermöglichen, den Stromkreis möglichst im zeitlichen Nulldurchgang der Stromfunktion unterbrechen. Die Flussverzögerung ist dabei massgeblich. Sie ist durch zeitliche Verzögerung des magnetischen Flusses gegenüber dem zu schaltenden und erregenden Strom gegeben. Abweichungen von der vorgesehenen Flussverzögerung ergeben zeitliche Unterschiede zwischen den Nulldurchgängen des magnetischen Flusses und denjenigen des zu unterbrechenden Stromes, von Null verschiedene Strommittelwerte, und können so Funkenbildung, Grobwanderung und sogar Lichtbogenbildung und damit Kontaktzerstörung verursachen.

Ziel der Untersuchungen war die bessere theoretische und experimentelle Kenntnis der Gesetzmässigkeiten und Entstehungsursachen der Flussverzögerung, und zwar bei gegebenem Hystereseeinfluss, unter Beschränkung auf denjenigen Teil der Induktion, der sich gleichzeitig mit dem magnetisierenden Feld einstellt, und unter Vernachlässigung der Nachwirkung. Mittel und Wege zur Verringerung der Flussverzögerung wurden betrachtet und auch die Einflüsse mechanischer Spannungen und Wärmebehandlungen auf die Koerzitivkraft sowie der Einfluss von Hysterese und Feldstärke auf den Nacheilwinkel und derjenige der Wirbelstromverluste mit und ohne Berücksichtigung der Hysterese auf die Flussverzögerung und schliesslich auch die Abhängigkeit von der Ummagnetisierungsfrequenz.

Durch ausgedehnte Messungen wurden Theorie und Experiment verglichen. Es ergab sich, dass Streuflüsse einen vernachlässigbar kleinen Einfluss auf den Nacheilwinkel haben. Die Flussverzögerung kann durch Einbauen eines Luftspaltes, Wahl geeigneter Materialien, Vormagnetisierung und durch Anwendung eines elektrodynamischen Schaltelementes herabgesetzt werden. Zusammenfassend wurden die Ergebnisse dieser Untersuchungen in einer Dissertation 1952 publiziert [D 2]. Bei Kurzschlussankermotoren bilden die Zusatzverluste, d. h. die Differenz zwischen den wirklich auftretenden Gesamtverlusten und der Summe der Einzelverluste, störende Nebeneffekte. Diese setzen sich zur Hauptsache aus zusätzlichen Stromwärmeverlust-, Eisenzusatzverlust- und Zusatzverlustanteilen in der Rotorwicklung zusammen. Theoretische Grundlagen für die Berechnung dieser von Statorwicklungsfeldern in der Rotorwicklung verursachten Zusatzverluste waren anfangs der 50er Jahre für Kurzschlussanker mit isolierten Nuten bekannt. Aus Kostengründen baute man jedoch auch Anker mit nicht so gut isolierten Nuten, was eine Erhöhung der Zusatzverluste und sattelförmige Einbuchtungen in der Drehmomentcharakteristik (herrührend von Querströmen zwischen benachbarten Ankerstäben) erzeugte. Die existierenden theoretischen Verfahren für die exakte Berechnung gestatteten zu jener Zeit keine vollständige Behandlung der Problemstellung und waren zum Teil irreführend. Durch direkte Lösung der betreffenden Differentialgleichungen für die elektrischen Ströme und Spannungen und durch die Darstellung der benachbarten Ankerstäbe mit ihren Querwiderständen und induzierten Spannungen als aktive Vierpole wurde die Theorie verfeinert und erweitert, so dass auch eine Behandlung des Kurzschlussankers mit mehrfach verschrägten Stäben – mit Zwischenkurzschlussringen oder ohne – ermöglicht wurde. Ein Vergleich mit direkten Messungen bestätigte die theoretischen Ergebnisse. Das Hauptgewicht der Arbeiten lag auf der Reduktion der Zusatzverluste in unisolierten Ankern durch Aufdecken der sie beeinflussenden Faktoren. Auch diese Ergebnisse wurden, in einer Dissertation zusammengefasst, publiziert [D 3].

Eine genaue Kenntnis der differentiellen Struktur magnetischer Felder war schon Ende der 50er Jahre ein dringliches Problem. Die damals bekannten analytischen Methoden waren nur für Felder mit konstanter Permeabilität anwendbar. Zur Berechnung von Feldern stark gesättigter magnetischer Kreise benützte man daher Analogiemethoden und graphische Verfahren. Eine klare Beschreibung der Netzwerkmethoden für die Berechnung des Skalarpotentiales inhomogener magnetischer Felder mit ortsabhängiger Permeabilität, die auf der Analogie zwischen statischen Magnetfeldern und stationären elektrischen Strömungsfeldern beruht, und des graphischen Verfahrens nach *Th. Lehmann* sowie des nomographischen Verfahrens von *O. Benedikt* ist in [9] enthalten. Auch eine Ergänzung und Erweiterung des Lehmannschen Verfahrens für die Bestimmung des magnetischen Feldes im Inneren eines ferromagnetischen Materials beliebiger Geometrie ist dort beschrieben.

Weiter wurden Verfahren für die Lösung der Poissonschen Differentialgleichung für beliebige geometrische Konfigurationen und Randbedingungen mittels Impedanznetzwerke entwickelt und damit ein Beitrag zur Theorie der Netzwerke geschaffen. Ende der 50er Jahre konnte man offenbar nur sprunghafte Änderungen der Materialbeschaffenheit und eine konstante relative Permeabilität (die gross gegenüber der Permeabilität von Luft war) in die Berechnung der entsprechenden Felder einbeziehen. Nichtlinearitäten, Nichtisotropie und Hysterese konnten in den Betrachtungen nicht berücksichtigt werden [D 4]. Zur Erweiterung der Lösungsverfahren bezüglich dieser Kenngrössen wurden Modelle für die Berücksichtigung der Streuflussbildung, der feldabhängigen magnetischen Permeabilität, der Nichtisotropie und der Hysterese entwickelt und auch eine Ausdehnung des Verfahrens auf elektromagnetische Felder erörtert [10]. Auch der Einfluss der Streuflussbildung auf die Feldstärke-

verteilung wurde am Beispiel eines 90°-Winkelprofiles durch einige ausgemessene Feldbilder gezeigt.

Mit dem wachsenden Bedarf an Kapazität und Realisierungsmöglichkeiten von immer schnelleren elektronischen digitalen Rechengeräten stieg auch das Interesse am Schaltverhalten von Ferritringkernen, die man vor allem in den dem raschen Zugriff zugänglichen zentralen Speichereinheiten solcher Rechner in grossen Stückzahlen verwendet. So wurden anfangs der 60er Jahre am Institut für Höhere Elektrotechnik auch diesbezügliche Untersuchungen durchgeführt. Es wurden einerseits der Geltungsbereich der bekannten Formel für die Berechnung des Schaltverhaltens solcher Ringkerne aus Rechteckferrit untersucht [11], und andererseits der Vergleich mit einer einfacheren Näherungsformel durchgeführt. Auch für die Ummagnetisierungsvorgänge beim Anlegen eines Stromimpulses beliebiger Form wurden näherungsweise gültige Gleichungen unter Annahme von linearisierten Diodenkennlinien für eine Schaltung eines mit einem weiteren Kern und mit Dioden belasteten Magnetkerns, welche für den Aufbau von logischen Schaltungen dient, abgeleitet [12]. Durch Messungen konnten Berechnungen mittels dieser Näherungsformel bestätigt werden.

Anfangs der 70er Jahre wurden Arbeiten über die digitale Berechnung zweidimensionaler statischer Magnetfelder in nichtlinearen, nichtisotropen Medien mit feldabhängigem Grad der Nichtisotropie begonnen. Als Ergebnis entstand ein umfangreiches Fortranprogramm, welches die Ermittlung vektorieller Feldgrössen in verschiedenartig aufgebauten Magnetkreisen auf einem digitalen elektronischen Rechensystem gestattet. Dabei können die erwähnten Materialeigenschaften auch gemischt mit isotropen Verhältnissen berücksichtigt werden. In diesem Sinne wird das zu berechnende Gebiet in Luft-, Eisen- und Strombereiche – in denen die elektrische Stromdichte verschieden von Null ist – aufgeteilt.

Eine ausführliche Beschreibung der mathematischen Ableitung der Grundgleichungen, der Darstellung der magnetischen Materialeigenschaften, des Maschennetzaufbaues, des prinzipiellen Programmaufbaues sowie die Darstellung einiger gerechneter Beispiele ist in [D 5] enthalten.

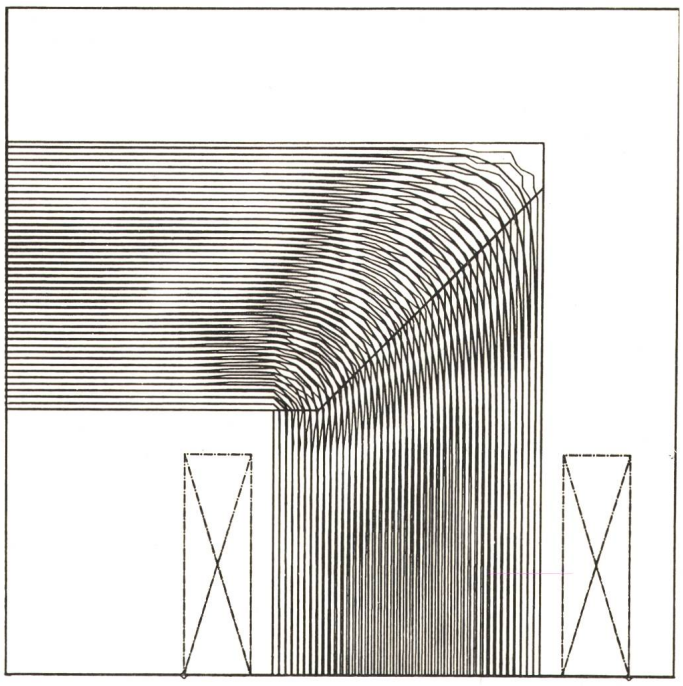

Fig. 1 Computerberechnete magnetische Feldlinien der Umgebung eines Diagonalschnittes zwischen Schenkel und Joch eines Transformators

Für die Berechnungen wird ein effizientes numerisches Iterationsverfahren, das Verfahren der sukzessiven Überrelaxation (S O R) in geeigneter Form angewandt. Für die Bestimmung der Vektorpotentiale wird das diskretisierte Umlaufintegral in jedem Punkt des Maschennetzes berechnet. Je nach Bereich besteht das unregelmässige Maschennetz aus dreieckigen oder rechteckigen Maschen. Die vollständige Berücksichtigung unterschiedlicher magnetischer Eigenschaften innerhalb einer Konfiguration ist durch Permeabilitätsmatrizen ermöglicht. Als Beispiel für Berechnungen sei ein Diagonalschnitt zwischen Schenkel und Joch, bestehend aus Eisen-, Luft- und Strombereichen gewählt, wie er im Transformatorenbau auftreten kann (Fig. 1). Zwecks Vergleich wurden nichtisotrope und isotrope Verhältnisse bei verschiedenen Stromdichten in [D 5] erläutert. Für nichtisotrope und isotrope Verhältnisse erhält man bei vorgegebener Stromdichte je verschiedenartige magnetische Feldlinien, die in Fig. 1 zwecks Verdeutlichung der Unterschiede im selben Maßstab für einen Quadranten in ein und derselben Darstellung gezeigt sind.

6. Felder in Leitern

Die Ähnlichkeit zwischen den aus der Poissonschen Differentialgleichung abgeleiteten Differenzengleichungen und den Kirchhoffschen Gleichungen für die Netzwerkknotenströme wurde Ende der 50er Jahre am Institut auch als Analogieverfahren für die Bestimmung elektromagnetischer Felder in Leitern angewandt [13; D 6]. Es wurden vorerst wechselstromdurchflossene zylindrische Leiter grosser Länge gegenüber den rechteckigen Querschnittsabmessungen theoretisch unter Berücksichtigung des Skineffektes untersucht. Analytische Lösungen waren für die untersuchte Problemstellung mit ausgeprägtem Skineffekt nur in Grenzfällen bekannt. Als Randbedingung wurde die in grossem Abstand von der Leiteroberfläche als konstant annehmbare Feldstärke gewählt.

Mittels der Methode der komplexen Potentiale – die unendliche Ebene ausserhalb eines Kreises wird durch eine einfache Transformation innerhalb des Kreises abgebildet – wurde die Laplacesche Gleichung zur Bestimmung der Feldgrössen in Leitern grosser Längenausdehnung im Verhältnis zu den Querschnittsausdehnungen durch ein Zweilagenwiderstandsnetz mittels Analogiebeziehungen gelöst. Dabei ist eine Lage des Widerstandsnetzes für die Darstellung der unveränderten Verhältnisse innerhalb des obengenannten Kreises und die andere für die ursprünglich ausserhalb des Kreises vorhandenen, nach innen transformierten Verhältnisse vorgesehen. Unter Ausnützung von Symmetrieeigenschaften wurde die Genauigkeit bei gegebenem Netzwerk durch Simulation von nur einem Quadranten der zu untersuchenden geometrischen Anordnung verbessert [14].

Nach *Ch. Snow* kann man die Maxwellschen Gleichungen für das langsam wechselnde stationäre Feld in Integralform lösen. Ende der 60er Jahre wurde am Institut ein Näherungsverfahren nach diesem Prinzip untersucht. Dies geschah mittels analoger Simulation auf einem Kapazitäts-Widerstandsnetzwerk [15] (Fig. 2). Als numerisches Beispiel für eine Anwendung dieses Verfahrens wurde ein 3-Phasen-

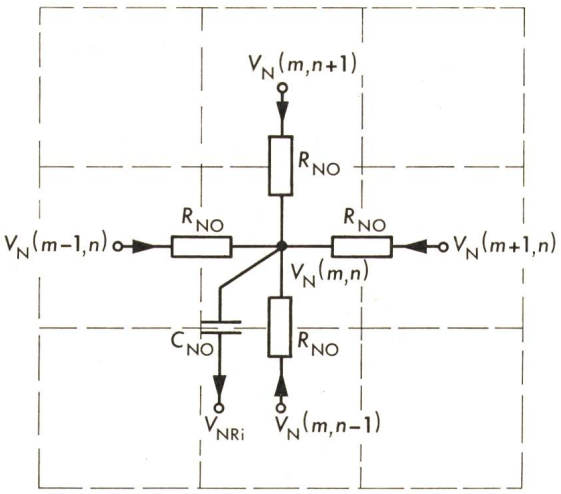

Fig. 2 Darstellung eines Knotens im Analogienetzwerk

$V_N(m, n)$	Spannung im Netzwerk zwischen dem Punkt (m, n) und (∞)
m	x/d
n	y/d
x, y	Koordinaten des entsprechenden Knotenpunktes in der diskretisierten x-y-Ebene
d	Maschenweite
R_{No}	Widerstand eines Netzwerkelementes
C_{No}	Kapazitätselemente des Netzwerks
V_{NRi}	Spannung im Netzwerk zwischen dem Referenzpunkt des Leiters i und dem Punkt (∞)

Starkstrom-Niederspannungsstrom-Leitersystem, welches in grossem Abstand von den Leitern eine vollständige zirkulare Abschirmung aufweist, berechnet.

Mit dem gleichen Analogienetzwerk konnte auch der Einfluss der Stromverdrängung auf die Impedanzbeläge eines mehrphasigen Rechteckleitersystems unter Berücksichtigung des Nachbarschaftseffektes eingehend untersucht werden [D 7]. Man erreichte bei gleichbleibendem Aufwand eine Genauigkeitserhöhung durch Verwendung nur eines Quadranten und dessen konformer Abbildung auf zwei gekoppelten Viertelskreisen mit endlichen Radien, jedoch nur unter Beschränkung auf Netzwerkanordnungen mit symmetrischen Geometrien bezüglich des Koordinatensystems. Berechnungen bzw. Messungen am Analogienetzwerk wurden für verschiedene Frequenzen durchgeführt, um Resultate für verschiedene Eindringtiefen zu erhalten.

Als weitere Ergänzung wurden mit dem erwähnten Kapazitätswiderstandsnetzwerk Hochfrequenzparameter gekoppelter paralleler zylindrischer Leiter berechnet [16]. Im speziellen wurden die Impedanz- und Admittanzbeläge für nahezu transversale Wellen bestimmt, wobei die Frequenz so hoch angenommen wurde, dass die Kapazitäts- und Induktivitätskoeffizienten als von der Frequenz unabhängige Konstanten und die Widerstandskoeffizienten als proportional zur Wurzel aus der Frequenz angenommen werden konnten. Auch hierbei wurde durch Symmetrierung der Geometrien bezüglich Koordinatensystem, wie bereits beschrieben, eine Genauigkeitserhöhung angestrebt. In einem Fall konnte der Wellenwiderstand auf diese Art mit einer Genauigkeit von 1 % und die Dämpfung mit einer solchen von 4 % berechnet werden. Diese Genauigkeiten sind jedoch nicht allgemein repräsentativ. Weitere gerechnete Beispiele und Ergänzungen zu diesen Arbeiten wurden in [17] publiziert. Dort sind Methoden für die Bestimmung der Kapazitätsbeläge, der elektrischen und magnetischen Feldgrössen sowie der magnetischen Kräfte zwischen stromführenden Leitern beschrieben. Das Netzwerk mit den 3300 Knoten gestattet auch die Lösung der Diffusionsgleichung (siehe auch Abschn. 7.2).

7. Feldprobleme in Halbleitern

7.1 Galvanomagnetische Effekte in Halbleitern

7.1.1 Hall- und Gausseffekt im Niederfrequenzgebiet

Anfangs der 50er Jahre stellte man sich am Institut die Frage, ob mit synthetischen Halbleitern Leistungsmessvorrichtungen für Ein- und Mehrphasennetze gebaut werden können, die bei ähnlicher Genauigkeit wie herkömmliche elektrodynamische Leistungsmesser die Anzeige der gesamten Wirk-, Blind- und Scheinleistung eines Wechselstromnetzes mittels nur eines einzigen Anzeigegerätes gestatten und darüber hinaus noch genügend elektrische Leistung für eine Fernübertragung zur Verfügung stellen. Die Untersuchungen im Rahmen dieser Problemstellung waren eher grundsätzlicher Art [D 8; 18]. Sie konzentrierten sich vorerst auf den sog. Hall-Effekt. Eine Hallspannung kann man messen, wenn man senkrecht zu den möglichst in einer Ebene am Rande einer Halbleiterplatte angebrachten kreuzweise zueinander angeordneten Stromzuführungen bzw. Hallspannungsmesskontakten ein Magnetfeld wirken lässt. Der Hall-Effekt entsteht in dieser Anordnung durch die mittels Magnetfeldwirkung verursachte Ablenkung der bewegten Elektronen oder Löcher.

In den erwähnten Veröffentlichungen wird gezeigt, wie die Messungen der wichtigsten Eigenschaften der für die Wattmeterschaltungen zu verwendenden Halbleiterplättchen im Bereich langsam wechselnder magnetischer Felder durchgeführt werden, wie Temperatureinflüsse auf die Hallspannung und den Widerstand zwischen den Hallkontakten wirken, und wie mittels Änderung der geometrischen Anordnung und Abmessungen Verbesserungen erreicht werden können. Beispiele verschiedener neuartiger Wattmeterschaltungen wurden für verschiedenartige Netzkonfigurationen entwickelt und beschrieben. Es konnte gezeigt werden, dass einerseits Leistungsmeßschaltungen der gewünschten Art gebaut werden können und auch die rechteckigen Halbleiterbauelemente die durch diese Schaltungen gestellten Anforderungen, insbesondere bezüglich Linearität, erfüllen. Für den Aufbau solcher Schaltungen benötigt man eine geeignete Eigentemperaturkompensation und eine genügende Verstärkung der Nutzsignale, beispielsweise mittels eines magnetischen Verstärkers. Bei etwa gleicher Genauigkeit im Vergleich zu herkömmlichen elektrodynamischen Messanordnungen gleichen Typus konnten verschiedene vorteilhafte Aspekte der neuen Schaltungen nachgewiesen werden [18].

Ein weiterer galvanomagnetischer Effekt, der als Folge des Hall-Effektes gegebenenfalls in Erscheinung tritt, ist der Gauss-Effekt. Er offenbart sich in einer proportional zur magnetischen Induktion auftretenden Widerstandsänderung zwischen den stromzuführenden Anschlüssen eines leitenden oder halbleitenden Materials, wenn man die beschriebene galvanomagnetische Anordnung betrachtet.

Auch der Gauss-Effekt kann für die elektrische Leistungsmessung, ähnlich, wie erwähnt, in verschiedenen Netzkonfigurationen, sinnvoll angewandt werden [19; 20]. Ein wesentlicher Vorteil besteht in diesem Fall vor allem im Bereich höherer Frequenzen, da nur die zwei stromführenden Elektrodenanschlüsse benötigt werden, und eine Reduk-

tion der Wirbelstromverluste durch geeignete Elektrodenanordnungen erreicht werden kann.

Weitere theoretische und experimentelle Untersuchungsergebnisse über Anwendung der erwähnten Halbleiterbauelemente, insbesondere auch in Oszillatorschaltungen [21], Flussdichtemeßschaltungen und Mischstufen von Rundfunkempfängern wurden 1958 anlässlich des internationalen Halbleiterkongresses in Brüssel vorgetragen [22; 23].

Ein weiterer Beitrag über die Untersuchung von stromdurchflossenen Halbleiterplatten, in einem transversalen Magnetfeld wurde in [D 9; 24] veröffentlicht. Es wurde dort gezeigt, wie magnetische Widerstandsänderungen, Hallspannung und Feldverteilungen in quadratischen Halbleiterplatten und Hallelementen mit verbreiterten Elektroden mittels Widerstandsanalogienetzwerk und Stromspeisungen im Bereich des vernachlässigbaren Eigenfeldeffektes ermittelt werden können.

7.1.2 Gauss-Effekt im Hochfrequenzgebiet

Da Messungen elektrischer Leistungen auch bei höheren Frequenzen und unter Berücksichtigung von Oberwellen von Interesse sein können, hat man darüber am Institut in der Literatur Auskünfte gesucht. Diese waren jedoch seinerzeit nur spärlich und in wenig aussagender Form zu finden. So erschien es vorteilhaft, diesbezügliche Messungen selber durchzuführen. Dies geschah bei 10, 300 und 600 MHz [25]. Man führte die Messungen an bezüglich Gauss-Effekt günstig geformten Halbleiterscheiben, z. B. an sog. Corbino-Scheiben, durch (Fig. 3). Es konnte für verschiedene Materialien in einer speziell für diesen Zweck weiter entwickelten Messanordnung nachgewiesen werden, dass in dem betrachteten Frequenzbereich der Skineffekt noch keinen nennenswerten Einfluss ausübt, und die galvanomagnetischen Eigenschaften auch bei diesen verhältnismässig hohen Frequenzen quantitativ noch gut messbar sind. Ähnliche Messungen anderen Orts erstreckten sich damals offenbar nur bis einige kHz.

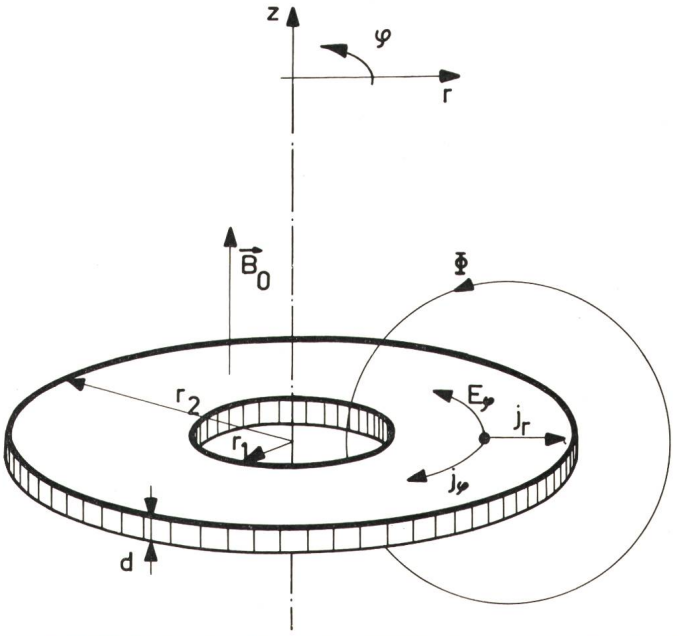

Fig. 3 Corbino-Scheibe. Eine kreisringförmige Scheibe mit einer äussern und einer innern Ringelektrode

Die Scheibe befindet sich in einem transversalen, statischen Magnetfeld der Flussdichte $\vec{B}_0$. Die Stromdichte, welche in eine Radialkomponente j_r und eine Tangentialkomponente j_φ zerlegt ist, fliesst spiralförmig von Elektrode zu Elektrode

Φ von der Tangentialkomponente der Stromdichte verursachter Fluss

E_φ tangentiale Feldstärke, welche nach dem Induktionsgesetz mit Φ verknüpft ist

r, φ, z Zylinderkoordinaten

Die zunehmende Verwendung von halbleitenden III-V-Verbindungen in der Mikrowellentechnik erforderte Ende der 50er Jahre eine Erweiterung der Untersuchungen über die Frequenzabhängigkeit der Widerstandsänderungen von Halbleitern hoher Trägerbeweglichkeit unter Einwirkung transversaler statischer Magnetfelder. So wurde für die erwähnte gemessene Abnahme der magnetischen Widerstandsänderungen in Proben endlicher Geometrien eine theoretische Begründung gesucht, und zwar wieder ausgehend vom Beispiel der Corbino-Scheibe. Es zeigte sich, dass man bereits im Dezimeterwellengebiet schon unter Umständen mit einer beträchtlichen Abnahme der Widerstandsänderungen rechnen muss, auch, wenn das Produkt aus Kreisfrequenz und freier Relaxationszeit sehr viel kleiner als eins ist. Es konnte nachgewiesen werden, dass diese Abnahme nicht durch den Skineffekt bewirkt wird, sondern von der Trägerbeweglichkeit im Halbleiter abhängt, die als Flächenstromverdrängung interpretiert und durch das Überwiegen des Zusatzgliedes im Ohmschen Gesetz unter Wirkung des Magnetfeldes erklärt werden kann. Bis zu diesem Zeitpunkt hatten sich theoretische Arbeiten auf die Untersuchung von Oberflächeneffekten zweidimensional unbegrenzter Proben beschränkt. Im Gegensatz dazu wurde am Institut versucht, die Impedanz endlicher Halbleiterproben unter Berücksichtigung der Probenabmessungen und unter Voraussetzung kleiner Probenabmessungen in Richtung des transversalen Magnetfeldes gegenüber der Eindringtiefe des elektrischen Feldes zu berechnen. Diesbezügliche numerische Berechnungen wurden auf der digitalen elektronischen Rechenmaschine der ETH (ERMETH) ausgeführt [D 10; 26].

Eine weitere Vertiefung der Kenntnisse über die Frequenzabhängigkeit konnte durch Messungen bis 2000 MHz erhalten werden [27]. Mittels der etwas modifizierten klassischen Reflexionsmethode – der Minimumbreitenmessung – konnten Messungen für den Vergleich mit numerischen Berechnungen durchgeführt werden. Als Vergleichsergebnis erhielt man eine qualitative Übereinstimmung nach Grössenordnung und Vorzeichen. Da diese Resultate dem Kenntnisbedarf noch nicht genügten, wurden die theoretischen Betrachtungen über die Corbino-Scheibe unter Berücksichtigung der auftretenden Raumladungen erweitert [28; 29; 30].

Im Jahre 1972 wurde schliesslich die Ableitung der Berechnungsformel des Hallwinkels für eine Kugel unter vollständiger Berücksichtigung der Randbedingungen publiziert [46].

7.2 Lösung der Diffusionsgleichung

Bei örtlich verschiedenen Trägerkonzentrationen in Halbleitern treten Diffusionsströme auf, die einen Ausgleichvorgang der Konzentrationsunterschiede bewirken.

Am Beispiel des n-Halbleiters wird in [5] unter anderem beschrieben, wie die Diffusionsgleichung, der diese Ausgleichvorgänge genügen, mittels eines Widerstands-Kapazitäts-Analogienetzwerkes auch für den mehrdimensionalen

Fall gelöst werden kann (Fig. 4). Dabei wird die in der Diffusionsgleichung auftretende erste zeitliche Ableitung analog durch in jedem Maschenpunkt des Netzwerkes angeschlossene Kapazitäten dargestellt.

Nach diesem ersten Ansatz für die Lösung der Diffusionsgleichung mittels Analogienetzwerke wurden mit den Zielen, einerseits einen Beitrag zur allgemeinen Theorie der Widerstands-Kapazitäts-Netzwerke zu liefern und andererseits eine Erforschung der Diffusionseffekte in Halbleitermaterialien zu ermöglichen, Ende der 50er Jahre weitere Untersuchungen über dieses Thema durchgeführt. Sie führten 1958 zu einer Dissertation [D 11]. Insbesondere wurde dort der Diskretisationsfehler als Funktion der Maschenweite des Analogienetzwerkes betrachtet und im rotationssymmetrischen Fall mittels räumlichem Netzwerk unter Berücksichtigung der Oberflächenrekombination der Transportfaktor für p-n-p-Transistoren berechnet [6].

Ein Vergleich solcher Berechnungen mit speziell für diesen Zweck angefertigten Dioden lieferte befriedigende Übereinstimmung zwischen Rechen- und Messergebnissen [31]. Auch Vorschläge für vorteilhafte geometrische Abmessungsverhältnisse der Kollektor- und Emitterflächen eines p-n-p-Transistors in bezug auf den Transportfaktor ergaben sich aus den Rechnungen [32].

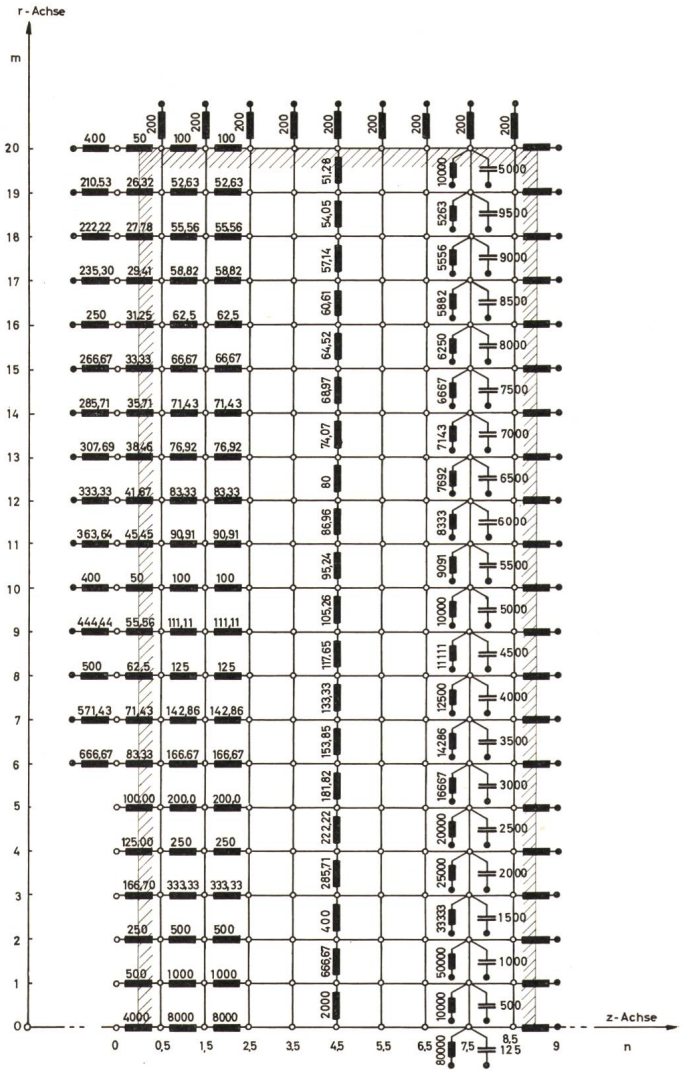

Fig. 4 Aufbau des Analogienetzwerkes im rotationssymmetrischen Fall
Die Widerstände und Kapazitäten wurden zur Vereinfachung nur für einzelne Reihen eingezeichnet.
Die Einheiten sind für die Widerstände: Ω, und für die Kapazitäten: pF. Die weissen Punkte sind Maschenpunkte mit Potentialen, welche proportional zur Löcherdichte sind; die schwarzen liegen an der gemeinsamen Erde. Der schraffierte Bereich stellt den n-Halbleiter dar.

7.3 Rasch wechselnde Felder in Halbleitern

Aus der Verwandtschaft der Beziehungen im Plasma und im Halbleiter lassen sich Bedingungen ableiten, unter welchen die Ladungsträger in Halbleitern zum Schwingen angeregt werden können. Man kann so das System der Ladungsträger auch als schwingungsfähiges Gebilde darstellen. Plasmaschwingungen sind beeinflussbar durch Materialeigenschaften, Geometrie der Probenform und durch Einwirkung von elektrischen und magnetischen Feldern. In [D 12] werden diese Vorgänge in makroskopisch-phänomenologischer Weise eingehend beschrieben. Die theoretischen Ableitungen werden anhand einer eindimensionalen Anordnung eines vereinfachten Halbleitermodelles mit nur einer Art von Ladungsträgern – Elektronen –, welches als Ganzes unter dem Einfluss eines homogenen periodisch schwankenden E-Feldes oszilliert, unter Voraussetzung einer räumlich und zeitlich konstanten Teilchenkonzentration, Abwesenheit der Wirkung eines Magnetfeldes und unter Vernachlässigung der Rekombination durchgeführt.

Durch Feldwirkungen hervorgerufene Materialkonstantenänderungen können für Anwendungen der Halbleiter in der Mikrowellentechnik von grosser Bedeutung sein. Aus diesem Grund wurde die Dispersion der Leitfähigkeit von Germanium-Einkristallen bei Raumtemperatur untersucht. Dabei figurierten Dotierung, geometrische Probenabmessungen und Oberflächenbeschaffenheit als Paramter. Geeignete Messmethoden wurden entwickelt und aufgebaut. Aus Messungen ergab sich eine qualitative Übereinstimmung mit den theoretisch ermittelten Werten.

In vielen Anwendungen werden Halbleiterelemente elektrischen Wechselfeldern ausgesetzt. Dabei kann im Halbleiter Stromverdrängung auftreten. Um die bekannten Formeln für die Berechnung der Stromverdrängung in Leitern auch für die Ermittlung von Feldverteilung, Impedanz- und Wirbelstromberechnungen im Falle von symmetrischen elektrischen und magnetischen Feldern unter Berücksichtigung einer der Hysterese entsprechenden komplexen Permeabilität anwenden zu können, wurden entsprechende Anpassungen dieser Formeln für flache Halbleiterplatten vorgenommen. Dabei spielt insbesondere das Verhältnis von Verschiebungs- zu Leitungsstrom eine wichtige Rolle. Durch entsprechende Experimente für den Verlauf der Impedanz im Mikrowellengebiet konnte gute Übereinstimmung mit der Theorie nachgewiesen werden [33; 34].

Für ein homogenes, isotropes halbleitendes Material, ohne freie elektrische Raumladungsdichte, mit gegebener Leitfähigkeit, Dielektrizitätskonstante und Permeabilität, angeregt durch ein sinusförmiges elektromagnetisches Feld, lassen sich lineare partielle Differentialgleichungen zweiter Ordnung für die Wellenpotentiale in allgemeiner Form aufstellen. Weiter können Analogiebeziehungen für den Aufbau von Analogienetzwerken hergeleitet werden [13; D 6]. Wie in diesen Arbeiten beschrieben, wurden Modellmessungen von Wechselfeldern in halbleitenden Platten sowie Voll- und Hohlzylindern durchgeführt.

Schliesslich wurde anfangs der 60er Jahre im Lorentzschen Sinn und unter stark vereinfachenden Voraussetzungen der Beitrag der inneren Felder zur Leitfähigkeit von halbleitenden Materialien untersucht [D 13; 35]. Dabei zeigte sich, dass sie keinen Beitrag zur Dispersion der elektrischen Leitfähigkeit und der Dielektrizitätskonstante liefern und dass der Depolarisationseffekt als reiner Geometrieeffekt durch geeignete experimentelle Massnahmen vermieden werden kann.

In Übereinstimmung mit der Theorie wird durch Experimente nachgewiesen, dass im Mikrowellenbereich von 3,8 bis 11 GHz bei Raumtemperatur keine Frequenzabhängigkeit der genannten Materialgrössen existiert, und dass insbesondere deren gemittelte Wechselstromwerte mit den Gleichstromwerten übereinstimmen. Die Berechnungen zur Auswertung der Mikrowellenmessungen wurden mittels eines Algolprogrammes auf der ERMETH ausgeführt.

7.4 Transportvorgänge, Feld- und Raumladungsverteilung in Halbleiterelementen

Das Anlegen eines einheitlich gerichteten elektrostatischen Feldes bewirkt in einem homogenen Halbleiter eine stationäre Driftgeschwindigkeit der Ladungsträger und damit ein Anwachsen ihrer mittleren kinetischen Energie. Dieser Vorgang kann als Aufheizen der Ladungsträger bezeichnet werden. Er führt bei genügend hoher Feldstärke zu einer Feldabhängigkeit der Trägerbeweglichkeit. In nicht einheitlichen Feldern, wie sie z. B. bei Halbleitermetallkontakten oder p-n-Übergängen auftreten, hängt die Änderung der kinetischen Energie vom lokalen Produkt aus Strom- und elektrischer Feldstärke ab und kann gegebenenfalls auch negativ werden, d. h. Ladungsträgerabkühlung erzeugen.

Anfangs der 60er Jahre beschäftigte man sich im Institut eingehend mit der Theorie des Ladungs- und Energietransportes von heissen und kalten Ladungsträgern [36]. Es wurden Beziehungen für Stromdichte und Energiefluss unter den seinerzeit üblichen Vereinfachungen für die genannten Ladungsträger in inhomogenen Halbleitern hergeleitet. Unter Annahme einer Maxwell-Boltzmann-Verteilung wird gezeigt, dass die Einsteinsche Beziehung nicht nur für die Koeffizienten der elektrischen Stromdichte, sondern auch für die in dieser Arbeit neu eingeführten Koeffizienten der Wärmestromdichte gültig ist.

In einer weiteren Arbeit wurde die Beweglichkeit von heissen Ladungsträgern in Germanium bei einer Gittertemperatur von 300 K als Funktion der Temperatur der Ladungsträger und der elektrischen Feldstärke mit Berücksichtigung der Streuung an akustischen und optischen Gitterschwingungen sowie der Streuung an ionisierten Störstellen unter Verwendung der Conwellschen Theorie der Gitterbeweglichkeit von heissen Ladungsträgern und der Conwell-Weisskopfschen Theorie der Streuung an ionisierten Störstellen formelmässig dargestellt [37]. Für verschiedene Störstellendichten wurden Computer-Auswertungen auf der ERMETH durchgeführt. Sie ergaben bessere Übereinstimmung mit Conwells gemessenen Werten als Conwells eigene numerische Berechnungsergebnisse.

Auf einer CDC 1604-A wurden Mitte der 60er Jahre die Löcher- und Elektronen-Konzentrationsverteilungen, die Verteilungen des elektrischen Feldes, die Stromdichte- und die Potentialverteilungen in einer eindimensionalen abrupten p^+-n-Diode numerisch berechnet und graphisch dargestellt [38; 39; 40]. Dazu benötigte man die entsprechenden Lösungen der Strom-, der Kontinuitätsgleichungen und der Poissonschen Differentialgleichung für das stationäre Verhalten der in Durchlassrichtung betriebenen Diode für verschiedene Strominjektionsniveaus. Die numerische Integration wurde innerhalb und ausserhalb der Raumladungsschicht mit Berücksichtigung des Hall-Shockley-Readschen und des Augerschen Rekombinationsprozesses und durch Elimination der Boltzmannschen Näherungen für das Gleichgewicht in der Raumladungszone und die Raumladungsneutralität in den «quasineutralen» p- und n-Regionen durchgeführt.

In einer Dissertation wurde 1967 das theoretische Wissen über die Ladungs- und Energietransportvorgänge in inhomogenen Halbleitern zusammengestellt [D 14]. Die Elektronen und Löcher werden darin als Teilchen des Gasgemisches im Kristall unter Berücksichtigung der Streuung an akustischen und optischen Gitterschwingungen und an ionisierten Störstellen sowie der Rekombinationsprozesse, der Periodizität und der Energieverhältnisse des Gitters, der Ortsabhängigkeit der verschiedenen physikalischen Grössen und der Aufheizung des Elektronen- und Löchergases betrachtet. Durchbruchserscheinungen, Tunneleffekt und photoelektrische Effekte sind dabei nicht in die Betrachtungen eingeschlossen und eine Beschränkung auf eindimensionale Gebilde unter Ausschluss von Oberflächen- und galvano-magnetischen Effekten erwies sich als notwendig.

In der erwähnten Dissertation [D 14] und ergänzend in [41] wurde ein neuer Lösungsweg für die genaue Berechnung der Raumladungsdichte für im Verhältnis zur Debye-

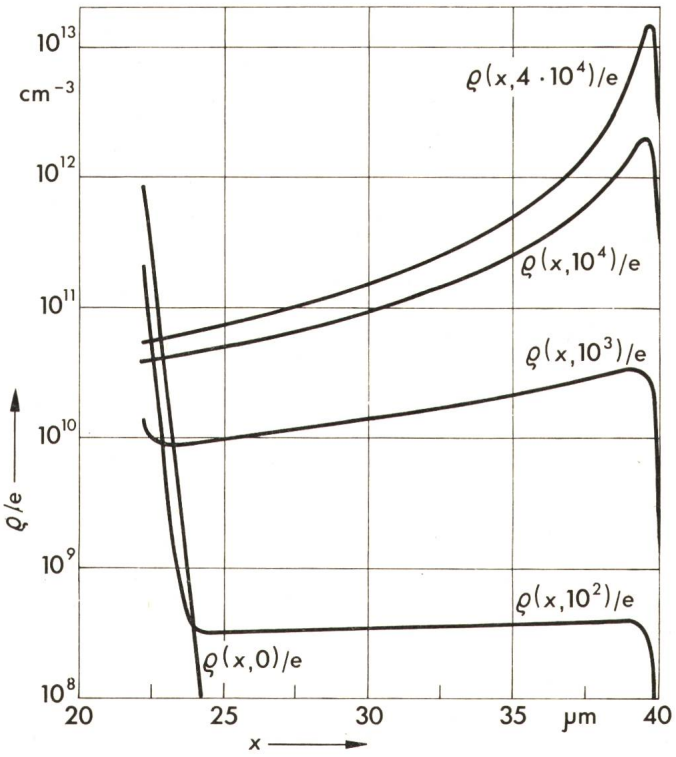

Fig. 5 Computerberechneter Verlauf der Raumladungsdichte ϱ im Verhältnis zum Betrag der Elektronenladung e als Funktion von x (Längsrichtung) im «quasineutralen» n-Gebiet einer p^+-n-Diode aus Germanium mit der Stromdichte in mA/cm² als Parameter

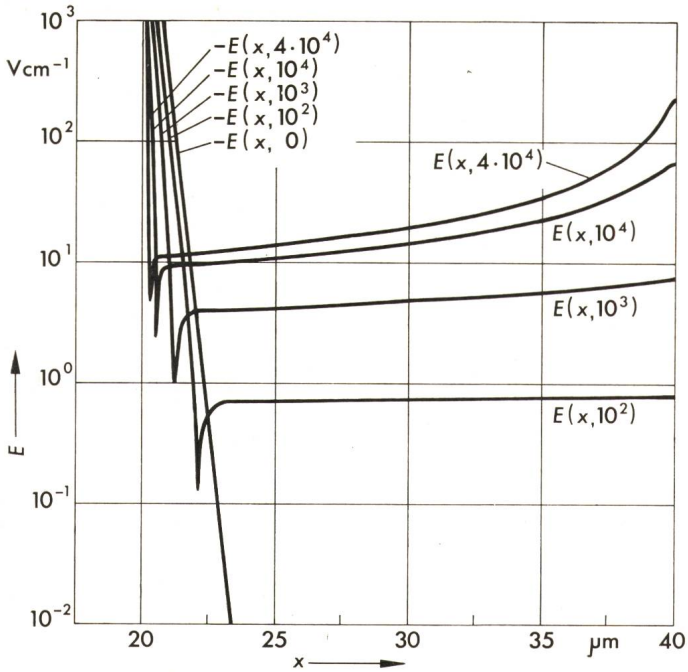

Fig. 6 Computerberechneter Verlauf der elektrischen Feldstärke E als Funktion von x (Längsrichtung) im «quasineutralen» n-Gebiet derselben p^+-n-Diode wie in Fig. 5 mit der Stromdichte in mA/cm² als Parameter

Länge stark ausgedehnte «quasineutrale» p- und n-Bereiche einer stationär in Durchlassrichtung betriebenen abrupten p^+-n-Diode beschrieben. Es werden dort die Ergebnisse von numerischen Berechnungen der Löcher- und Elektronenkonzentrations-, der elektrischen Feldstärke-, der Elektronenstromdichte-, der elektrostatischen Potential- und der Raumladungsdichteverteilungen für verschiedene Werte der totalen Stromdichte der Diode gezeigt. Die Auswertungen der numerischen Berechnungsergebnisse – die Rechnungen wurden auf der ERMETH und der CDC 1604-A durchgeführt – einerseits zwecks Vergleich mit analytischen geschlossenen Lösungen für den stromlosen Fall, und andererseits mit experimentell ermittelten Werten und bisherigen theoretischen Ergebnissen brachten befriedigende Übereinstimmungen. Als Beispiel wesentlicher Ergebnisse ist in Fig. 5 und 6 der Verlauf der Raumladungsdichte im Verhältnis zum Betrag der Elektronenladung sowie der Verlauf der elektrischen Feldstärke im «quasineutralen» n-Gebiet der Diode dargestellt.

In einer theoretischen Arbeit befasste man sich im Institut Ende der 60er Jahre mit der Berechnung der Beweglichkeiten von Elektronen und Löchern bei einer Gittertemperatur von 300 K als Funktion der Ladungsträgertemperatur und der elektrischen Feldstärke, unter Einbeziehung der Streuung an akustischen und optischen Gitterschwingungen sowie der Streuung an ionisierten Störstellen [42]. Die Beweglichkeit wurde numerisch auf der CDC 1604-A als Funktion der Trägertemperatur und der elektrischen Feldstärke für verschiedene Störstellenkonzentrationen berechnet. Es konnte wiederum gute Übereinstimmung mit andernorts gemessenen Werten festgestellt werden.

1969 wurde ein Vergleich mit einem anderen in der Literatur erwähnten Lösungsweg für die numerische Bestimmung des stationären Verhaltens eines eindimensionalen p-n-Überganges vorgenommen [43]. Die Anwendungsgrenzen der beiden Rechenmethoden werden dargelegt und die wesentlichen Vorteile des exakteren Lösungsweges des Autors klargestellt.

Schliesslich wurde Anfang der 70er Jahre die Theorie der Aufheizung und Abkühlung von Ladungsträgern in Halbleiterelementen unter Voraussetzung eines einfachen parabolischen Energiebandmodelles, von elastischen Streuprozessen und von Streuprozessen mit erzwungenen zufälligen Geschwindigkeiten für eindimensionale Gebilde mit stationärem Ladungs- und Energiefluss ergänzt [44]. Die Behandlung der Problemstellung geschah auf Grund der Ableitung einer Beziehung zwischen den ersten zwei Termen der Legendreschen Entwicklung der Verteilungsfunktion und der Definition der Relaxationszeiten für die zwei genannten Arten von Streuprozessen. Ausdrücke für die Stromdichte und den Energiefluss werden für einen beliebigen isotropen Anteil der Verteilungsfunktion aufgestellt, so dass sich ihre Gültigkeit auf heisse wie auf kalte Ladungsträger erstreckt. In diesen Ausdrücken erscheinen vier Transportkoeffizienten, je für thermische und elektrische Beweglichkeiten und Diffusionskoeffizienten. Darüber hinaus werden die genannten Ausdrücke auch unter Voraussetzung der Maxwellschen Form des isotropen Anteils der Verteilungsfunktion vereinfacht dargestellt. Die verallgemeinerten Einsteinschen Beziehungen zwischen den Transportkoeffizienten werden hergeleitet, und das Randwertproblem, welches entsprechend für die quantitative Bestimmung der Verhaltensweise eines Bauelementes bei Anwesenheit von heissen und kalten Ladungsträgern zu lösen ist, formuliert. Schliesslich wird eine ähnliche Theorie von *Stratton* bezüglich Gültigkeitsgrenzen, Vorteilen und Anwendungsmöglichkeiten mit der in der hier erwähnten Veröffentlichung dargestellten Theorie verglichen.

8. Abschliessende Bemerkungen

Eine nach Projekten aufgeteilte Übersicht über die in den Abschnitten 4 bis und mit 7 erläuterten Arbeiten ist in Tabelle I aufgeführt. Man kann dieser Tabelle entnehmen, dass der Hauptteil der Projekte sich mit den verschiedenen feldtheoretischen Problemen in Halbleitern, insbesondere in Halbleiterbauelementen, befasst. Die in der Tabelle zusammengefassten Forschungsprojekte stellen die Auslese dar, die im Rahmen der beschränkten Mittel des Instituts getroffen worden war. Sie ist offensichtlich in Richtung direkter industrieller Anwendung orientiert.

In der Regel waren die in der Tabelle aufgeführten Projekte eher theoretischer Art, in den meisten Fällen wurden jedoch die theoretischen Ergebnisse durch experimentellen Nachweis erhärtet. Auch durch Vergleich mit numerischen Auswertungen analytischer Lösungen konnten oft die mittels elektronischer Rechengeräte erhaltenen Resultate überprüft werden.

Sowohl die klassischen Lösungsverfahren zur Bestimmung von Feldern als auch die neuesten Computermethoden wurden bei der Durchführung der Projekte eingesetzt, so z. B. die Matrizenrechnung, die konforme Abbildung, die Spiegelungsverfahren, die graphischen Verfahren, die Analogienetzwerke und die analytischen und numerischen Lösungsmethoden unter Anwendung von Digitalrechnern.

Während bis Ende der 50er Jahre vor allem Analogierechengeräte für die Lösung von Feldproblemen entwickelt wurden und zur Anwendung gelangten, gewann in den 60er

Projektzusammenstellung Tabelle I

0	1	2																3					4					5		6		7
1	Projektthema	Objekte																Vorgehen					Mittel					Art		Literaturstellen	Publikations-Zeitabschnitt	Abschnitt
2		Elektronenröhren	Ferromagnetische Kreise	Kurzschlussankermotoren	Mehrphasennetze	Oszillatoren	Halbleiter	Mehrphasenwattmeter	Halbleiterbauelemente	GE-Einkristalle	Leitersysteme	Nichtlineare, -isotrope Medien	GE (verschiedener Dotierung)	Halbleiterplatten	Magnetkerne	Kugel	Aufstellen der Gleichungen	Numerische Berechnung	Messung	Lösung	Bau	Analogienetzwerk	Elektronischer Digitalrechner	Hochfrequenz	Niederfrequenz	Graphisches Verfahren	Theoretisch	Experimentell			
3	Elektrostatisches Feld	x																	x									x		1	(1949)	4
4	Potential- und Raumladungsfeld	x																	x	x			x					x	x	D 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7	(1957–1961)	4
5	Laplace- und Poissongleichung	x																	x		x			x				x		8	(1971)	4
6	Flussverzögerung		x															x	x									x	x	D 2	(1952)	5
7	Zusatzverluste und -momente			x														x	x	x			x					x	x	D 3	(1955)	5
8	Magnetfeld											x						x	x	x			x	x			x	x	x	D 4, 9, 10, D 5	(1961–1973)	5
9	Umklappvorgänge														x			x	x	x								x	x	11, 12	(1962–1963)	5
10	Elektromagnetische Wechselfelder						x				x							x	x	x			x					x	x	D 6, 13	(1961)	6
11	Stromverdrängung										x							x	x	x			x					x	x	D 7, 14, 15, 16, 17	(1968–1970)	6
12	Leistungsmessung und -regulierung				x		x		x									x	x	x		x				x			x	D 8, 18, 22, 23	(1955–1959)	7.1.1
13	Halleffekt					x	x		x								x	x	x	x		x				x		x	x	21, 22, 23, 46	(1957–1972)	7.1.1
14	Magnetische Widerstandsänderung						x	x	x									x	x	x		x				x		x	x	19	(1959)	7.1.1
15	Elektromagnetische Felder						x		x					x				x	x	x			x	x				x	x	D 9, 24, 28, 29, 30	(1963–1964)	7.1.1
16	Gausseffekt						x													x					x			x	x	25, 22, 23	(1957–1959)	7.1.2
17	Magnetische Widerstandsänderung						x											x	x	x				x	x			x	x	D 10, 27, 26	(1960–1961)	7.1.2
18	Diffusionsgleichung						x		x									x	x	x	x		x					x	x	D 11, 5, 6, 31, 32	(1958–1959)	7.2
19	Skineffekt						x											x	x	x					x			x	x	33, 34	(1959–1960)	7.3
20	Dispersion der Leitfähigkeit und Dielektrizitätskonstanten						x			x			x					x	x	x			x	x				x	x	D 12, D 13, 35	(1959–1962)	7.3
21	Transportvorgänge, Feld- und Raumladungsverteilung						x		x									x	x	x				x				x		D 14, 36, 37, 38, 39, 40 41, 42, 43, 44	(1963–1973)	7.4

Jahren der Einsatz von elektronischen Digitalrechnern in diesem Sinne zunehmende und wesentliche Bedeutung, und es ist wohl zu erwarten, dass die immer noch in Fluss befindliche rasche Evolution der technischen Vollkommenheit der digitalen Rechensysteme sowie auch ihre Kombination mit Analogierechnern als Hybridanordnung, noch weitere interessante Beiträge für die Lösung von elektromagnetischen Feldproblemen und insbesondere für die numerische Berechnung von Feldgrössen ermöglichen wird.

Einige der in Tabelle I zusammengestellten Projekte neueren Datums können als richtungsweisend für künftige Projekte betrachtet werden, so dass die in ihrem Rahmen zusammengetragenen Grundlagen- und Spezialkenntnisse auch in diesem Sinne weiter verwertet werden können.

Schliesslich bleibt noch zu bemerken, dass ein nicht unwesentlicher Teil der heutigen Vorlesung über Feldtheorie aus den Ergebnissen der in dieser Veröffentlichung beschriebenen Forschungen entstanden ist, was de facto auf die notwendige enge Verbundenheit zwischen Forschung und Lehre hinweist.

—

Dem ehemaligen Vorstand des Instituts für Höhere Elektrotechnik der ETHZ, Prof. Dr. *M. J. O. Strutt,* danken die Autoren für Anregungen und die Durchsicht des Manuskriptes.

Literatur

[1] *M. J. O. Strutt:* Über die Berechnung des elektrostatischen Feldes moderner Elektronenröhren. SBZ 67(1949)3, S. 36...37.

[2] *G. Čremošnik* und *M. J. O. Strutt:* Bestimmung des Raumladungsfeldes, der Raumladungskapazitäten und der Kennlinie einer ebenen Triode mit Hilfe eines Widerstandsnetzmodells mit Stromquellen. AEÜ 11(1957)2, S. 63...75.

[3] *G. Čremošnik* und *M. J. O. Strutt:* Praktische Anwendungen eines Widerstandsnetzes zur Bestimmung eines ebenen Potential- oder Raumladungsfeldes. Arch. Elektrotechn. 43(1957)3, S. 177...186.

[4] *G. Čremošnik* und *M. J. O. Strutt:* Bestimmung von ebenen sowie von kreis- und kugelsymmetrischen Raumladungsfeldern mit Hilfe einfacher Widerstandsketten mit zusätzlichen Stromquellen. Zeitschr. Angew. Mathematik und Physik 8(1957)5, S. 329...360.

[5] *G. Čremošnik, A. Frei* und *M. J. O. Strutt:* Neue Anwendungen von Impedanznetzwerken als Analogierechengeräte. Scientia Electrica 3(1957)2, S. 37...53.

[6] *G. Čremošnik, A. Frei* und *M. J. O. Strutt:* New applications of impedance networks as analog computers for electronic space charge and for semiconductor diffusion problems. Proc. IRE 46(1958)5, p. 868...877.

[7] *P. A. Tschopp:* Die Kreiszylinderdiode im Raumladungsgebiet bei beliebigen Emissionsströmen und Austrittsgeschwindigkeiten. Scientia Electrica 7(1961)1, S. 27...40.

[8] *M. Sánchez* and *M. J. O. Strutt:* On the solution of Laplace's and Poisson's equations with rotational symmetry using SOR. AEÜ 25(1971)7, p. 337...343.

[9] *P. A. Tschopp* und *A. H. Frei:* Analogienetzwerkmethode und graphisches Verfahren zur Bestimmung von magnetischen Feldern mit örtlich variabler Permeabilität. Arch. Elektrotechn. 44(1959)7, S. 441...454.

[10] *P. A. Tschopp:* Analogieverfahren zur Behandlung magnetischer Felder in nichtlinearen nichtisotropen Medien. Bull. SEV 52(1961)6, S. 185...192.

[11] *H. B. Liem, H. Menzi* und *M. J. O. Strutt:* Das Schaltverhalten eines Toroids aus Rechteckferrit. Scientia Electrica 8(1962)2, S. 53...64.

[12] *H. B. Liem, H. Melchior* und *M. J. O. Strutt:* Umklappvorgänge von Magnetkernen, belastet durch Magnetkerne und Dioden. Scientia Electrica 9(1963)1, S. 26...38.

[13] *M. J. O. Strutt* und *R. Vuilleumier:* Analogieverfahren für die Bestimmung elektromagnetischer Wechselfelder in Leitern und Halbleitern. Arch. Elektrotechn. 46(1961)4, S. 259...276.

[14] *H.-J. Sigg* and *M. J. O. Strutt:* Solutions of the Laplace equation in an infinite plane by means of a double-layer resistance network. Electronics Letters 2(1966)12, p. 454...455.

[15] *H.-J. Sigg* and *M. J. O. Strutt:* Clarke components for a system of busbars with pronounced proximity effect. Electronics Letters 4(1968)10, p. 188...190.

[16] *H.-J. Sigg* und *M. J. O. Strutt:* Die Berechnung der Hochfrequenzparameter gekoppelter paralleler Leitungen mit Hilfe eines Analogienetzwerkes. AEÜ 23(1969)11, S. 543...552.

[17] *H.-J. Sigg* and *M. J. O. Strutt:* Skin effect and proximity effect in polyphase systems of rectangular conductors calculated on an RC network. Trans. IEEE PAS 89(1970)3, p. 470...477.

[18] *M. J. O. Strutt* und *S.-F. Sun:* Leistungsmessung und Leistungsregulierung in Mehrphasennetzen mittels Halbleitern. Arch. Elektrotechn. 42(1955)3, S. 155...164.

[19] *M. J. O. Strutt* und *S.-F. Sun:* Mehrphasenwattmeter, beruhend auf der magnetischen Widerstandsänderung von Halbleitern. Bull SEV 50(1959)10, S. 452...458.

[20] *M. J. O. Strutt* and *S.-F. Sun:* Multiphase wattmeters based on the magnetoresistance effect of semiconductors. IRE Trans. Instrumentation 10(1961)1, p. 44...49.

[21] *M. J. O. Strutt* und *S.-F. Sun:* Experimentelle und theoretische Untersuchung von Halbleiter-Halleffektoszillatoren. AEÜ 11(1957)6, S. 261...265.

[22] *M. J. O. Strutt:* Neuere Anwendungen des Halleffektes in halbleitenden binären Verbindungen. Scientia Electrica 4(1958)3, S. 92...107.

[23] *M. J. O. Strutt:* Hall effect in semiconductor compounds. Modern applications using indium arsenide and indium antimonide. Electronic and Radio Engineer 36(1959)1, p. 2...10.

[24] *C. B. Burckhardt* und *M. J. O. Strutt:* Ermittlung der magnetischen Widerstandsänderung und der Hall-Spannung mittels eines Widerstandsnetzwerkes. Zeitschrift für Naturforschung 18a(1963)1, S. 44...51.

[25] *P. Ramer, M. J. O. Strutt* und *F. K. von Willisen:* Messungen des Gausseffektes verschiedener Halbleiter bei 10, 300 und 600 MHz. AEÜ 11(1957)1, S. 1...7.

[26] *M. J. O. Strutt* und *F. K. von Willisen:* Berechnung der «Frequenzabhängigkeit der magnetischen Widerstandsänderung». Scientia Electrica 6(1960)4, S. 153...172.

[27] *M. J. O. Strutt* und *F. K. von Willisen:* Messungen über die Frequenzabhängigkeit des Gausseffektes bei verschiedenen Halbleitern bis 2000 MHz. AEÜ 15(1961)1, S. 25...32.

[28] *C. B. Burckhardt* und *M. J. O. Strutt:* Die Frequenzabhängigkeit der magnetischen Widerstandsänderung einer Corbinoscheibe. Scientia Electrica 9(1963)1, S. 38...48.

[29] *C. B. Burckhardt, M. J. O. Strutt* and *F. K. von Willisen:* Magnetoresistance of the Corbino disk at microwave frequencies. Proc. IEEE 52(1964)3, p. 277...283.

[30] *C. B. Burckhardt, M. J. O. Strutt* and *F. K. von Willisen:* Magnetoresistance of the Corbino disk at microwave frequencies. Solid-State Electronics 7(1964)5, p. 343...355.

[31] *A. H. Frei* und *M. J. O. Strutt:* Lösung der Diffusionsgleichung einer rotationssymmetrischen Halbleiterdiode unter Berücksichtigung von Raum- und Oberflächenrekombination mit Hilfe eines Analogienetzwerkes und Vergleich mit Diodenmessungen. AEÜ 13(1959)5, S. 199...210.

[32] *A. H. Frei* and *M. J. O. Strutt:* Analog computer measurements on saturation currents, admittances and transfer efficiencies of semiconductor junction diodes and transistors. Proc. IRE 47(1959)7, p. 1245...1252.

[33] *A. H. Frei* und *M. J. O. Strutt:* Skin effekt in Halbleitern. Scientia Electrica 5(1959)2, S. 51...60.

[34] *A. H. Frei* and *M. J. O. Strutt:* Skin effect in semiconductors. Proc. IRE 48(1960)7, p. 1272...1277.

[35] *F. K. Reinhart* und *M. J. O. Strutt:* Die Frequenzabhängigkeit der Leitfähigkeit und der Dielektrizitätskonstante von Germanium im Mikrowellengebiet. Scientia Electrica 8(1962)3, S. 87...106.

[36] *M. Sánchez:* Theorie des Ladungs- und Energietransportes von heissen und kalten Ladungsträgern in inhomogenen Halbleitern. Helv. Physica Acta 36(1963)1, S. 1...6.

[37] *M. Sánchez:* Beweglichkeit von heissen Ladungsträgern in Germanium bei einer Gittertemperatur von 300 °K. Solid-State Electronics 6(1963)2, S. 183...191.

[38] *M. Sánchez:* Hole and electron concentrations in a p-n-abrupt-junction diode as obtained by exact computer solution of the differential equations. Electronics Letters 3(1967)3, p. 117...119.

[39] *M. Sánchez:* Electric field in a p-n-abrupt-junction diode as obtained by exact computer solution of the differential equations. Electronics Letters 3(1967)4, p. 160...162.

[40] *M. Sánchez:* Electron current density and electrostatic potential in a p-n-abrupt-junction diode as obtained by exact computer solution of the differential equations. Electronics Letters 3(1967)5, p. 223...224.

[41] *M. Sánchez:* Numerical solution for the forward steady-state behaviour of an abrupt p*-n junction. Zeitschrift für Naturforschung 23a(1968)8, p. 1135...1146.

[42] *M. Sánchez:* Mobility of hot carriers in germanium at 300 °K. Zeitschrift für Naturforschung 23a(1968)12, p. 2035...2039.

[43] *M. Sánchez:* Comparison of recent computer solutions of the p-n junction in steady-state. Scientia Electrica 15(1969)2, p. 57...60.

[44] *M. Sánchez:* Carrier heating or cooling in semiconductor devices. Solid-State Electronics 16(1973)5, p. 549...557.

[45] *M. J. O. Strutt:* De overeenkomst tusschen de stromverdeeling bij het skineffect en e gedaante van een hydrostatisch belaste membraan. Physica Ned. Tijdschr. voor Natuurkunde 6(1926)10, blz. 366...371.

[46] *K. Stadler* and *B. Volken:* Hall-effect in a sphere. Scientia Electrica 18(1972)4, p. 139...140.

Dissertationen

[D 1] *G. Čremošnik:* Ermittlung von Raumladungsfeldern und Kapazitäten mit Hilfe eines Widerstandsnetzes mit Stromquellen. Dissertation der ETH Zürich Nr. 2667, 1957.

[D 2] *G. Weissenberger:* Über die Flussverzögerung in ferromagnetischen Kreisen. Dissertation der ETH Zürich Nr. 2088, 1952.

[D 3] *A. Odok:* Zusatzverluste und Zusatzmomente in Kurzschlussankermotoren mit unisolierten Stäben. Dissertation der ETH Zürich Nr. 2437, 1955.

[D 4] *P. Tschopp:* Analogieverfahren zur Bestimmung von magnetischen Feldern in nichtlinearen, nichtisotropen Medien. Dissertation der ETH Zürich Nr. 3180, 1961.

[D 5] *P. Weggler:* Computerberechnung magnetischer Felder in nichtlinearen, nichtisotropen Medien mit feldabhängigem Grad der Nichtisotropie. Dissertation der ETH Zürich Nr. 5119, 1973.

[D 6] *R. Vuilleumier:* Analogieverfahren für die Bestimmung elektromagnetischer Wechselfelder in Leitern und Halbleitern. Dissertation der ETH Zürich Nr. 3131, 1961.

[D 7] *H.-J. Sigg:* Berechnung der Stromverdrängung in mehrphasigen Rechteckleiter-Systemen mit Hilfe eines Analogieverfahrens. Dissertation der ETH Zürich Nr. 4219, 1969.

[D 8] *S.-F. Sun:* Power measurement and power regulation in multi-phase networks by means of semiconductors. Thesis of the Swiss Federal Institute of Technology Zürich No. 2518, 1955.

[D 9] *C. B. Burckhardt:* Beiträge zur Ermittlung der Felder in stromdurchflossenen Halbleiterplatten unter dem Einfluss eines transversalen, statischen Magnetfeldes. Dissertation der ETH Zürich Nr. 3374, 1963.

[D 10] *F. K. von Willisen:* Über den Einfluss statischer, transversaler Magnetfelder auf die Stromverdrängung in Halbleitern hoher Trägerbeweglichkeit. Dissertation der ETH Zürich Nr. 3073, 1960.

[D 11] *A. Frei:* Lösung der Diffusionsgleichung einer rotationssymmetrischen Halbleiterdiode unter Berücksichtigung von Raum- und Oberflächenrekombination mit Hilfe eines Analogienetzwerkes. Dissertation der ETH Zürich Nr. 2858, 1958.

[D 12] *P. Ramer:* Experimentelle Untersuchung der Dispersion der Leitfähigkeit von Germanium-Einkristallen bei Zentimeterwellen, verursacht durch Plasmaschwingungen. Dissertation der ETH Zürich Nr. 2875, 1959.

[D 13] *F.-K. Reinhart:* Experimentelle Beiträge zur Dispersion der elektrischen Leitfähigkeit und der Dielektrizitätskonstante von Germanium mit verschiedenen Dotierungen im Frequenzgebiet von 3,8...11 GHz. Dissertation der ETH Zürich Nr. 3309, 1962.

[D 14] *M. Sánchez:* Stationäre Transportvorgänge in inhomogenen Halbleitern. Dissertation der ETH Zürich Nr. 4030, 1967.

Adresse der Autoren:

Dr. *M. Sánchez* und Dr. *C. Villalaz*, Institut für Höhere Elektrotechnik der ETHZ, Gloriastrasse 35, 8006 Zürich.

Johann Wilhelm Ritter 1776–1810

Verlag «Freies Geistesleben» Stuttgart

Als Pfarrerssohn am 16. Dezember 1776 in Samitz (Schlesien) geboren, absolvierte Ritter nach dem Gymnasium eine Apothekerlehre in Liegnitz. Im Frühling 1796 gab er den Beruf auf und immatrikulierte sich an der Universität Jena. Einem Professor war bald die gute Experimentierkunst Ritters aufgefallen, und er empfahl ihn *Alexander von Humboldt*.

Der damals noch rätselhafte Galvanismus interessierte Ritter sehr, er stellte darüber Untersuchungen an, wobei er auch am eigenen Körper rücksichtslose Versuche durchführte. Hatte man früher vorwiegend die Nervenreizungen und Muskelzuckungen beim Ein- und Ausschalten verfolgt, entdeckte er, dass während der Einschaltzeit elektrische Vorgänge ablaufen, die mit chemischen Veränderungen einhergehen. Man nennt ihn daher den Begründer der Elektrochemie. Er beobachtete die Polarisation, ersann die «Ladungssäule» (Vorläufer der Akkumulatoren), stellte unabhängig von *Volta* eine Spannungsreihe der Metalle auf. Er fand den thermoelektrischen Effekt, und bei der Wasserzersetzung fing er Wasserstoff und Sauerstoff in getrennten Gläsern auf.

Ritter versuchte, das ganze Wissen in ein einziges System einzuordnen. Darin räumte er dem Galvanismus, den er als das «Lebensprinzip» ansah, eine zentrale Stellung ein.

Als *Davy* in England auf elektrolytischem Weg aus Erden Metalle gewinnen konnte, wiederholte Ritter die Versuche. Nun konnte er auch die Erden in sein System einfügen. Nachdem *Herschel* die Infrarotstrahlung entdeckt hatte, sagte sich Ritter, der Gedanken über Dualitäten nachhing, dass auch am andern Ende des Spektrums ein «unsichtbares Licht» vorhanden sein müsse. Am 22. Februar 1801 entdeckte er nach mühsamem Suchen die ultraviolette Strahlung dank ihrer Wirkung auf Silberchlorid. In seiner letzten wissenschaftlichen Arbeit untersuchte er den Einfluss galvanischer Ströme auf Mimosen.

1804 kam er in den Kreis deutscher Romantiker, und von da an konnte er seinen Hang für Phantastereien nicht mehr bändigen. Schliesslich befasste er sich mit Pendel und Wünschelrute.

Obwohl Ritter seine Studien nie abschloss, hielt er dank der Fürsprache des Herzogs *Ernst von Gotha* in Jena eine Vorlesung über Galvanismus. Er lebte in armseligen Verhältnissen, arbeitete oft pausenlos mehrere Tage und Nächte. Im Jahr 1804 heiratete er ein 16jähriges Mädchen. Weder er noch seine Frau verstanden aber mit Geld umzugehen, und so kam er in Schulden.

In dieser schlimmen Zeit wurde er an die neugegründete Münchner Akademie berufen. Ein Schuldentilgungsplan wurde aufgestellt. Um billiger leben zu können, musste er schweren Herzens die Frau und seine 4 Kinder zu Verwandten schicken. Nach einer Reise erkrankte er. Einsam und verlassen starb er am 23. Januar 1810 in München.

H. Wüger