

50X1-HUM

Page Denied

Next 1 Page(s) In Document Denied

STAATSBÜRGERLICHE BILDUNGSSTELLE DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN

STAATSEKRETÄR Prof. Dr. h. c. Dr. E. h.

LEO BRANDT

**DIE FORSCHUNG,
DAS TOR ZUR ZUKUNFT**

STAT

STAT

Staatssekretär Prof. Dr. h. c. Dr. E. h.

Leo Brandt

DIE FORSCHUNG
das Tor zur Zukunft



STAT

Staatssekretär Prof. Dr. Leo Brandt

gegeben von der
elle des Landes Nordrhein-Westfalen
4/1958
resse-Druck GmbH, Bielefeld

*H*at nicht das Wirtschaftswunder die Zukunft schon in die Gegenwart hereingeholt? Sind nicht unsere Autos und Mopeds und die gleißenden Auslagen in den Prachtstraßen unserer Städte der Beweis dafür, daß bei uns die Zukunft schon begonnen hat?

Diese Äußerlichkeiten können die Befürchtung nicht verdecken, daß sich hinter der schillernden Oberfläche des Wohllebens bestimmter Schichten in unseren Tagen ein Abgrund auftut, weil wir zu wenig geneigt sind, geistige und finanzielle Investitionen für unsere Zukunft vorzunehmen.

In England und Frankreich ist man uns in dieser Hinsicht wesentlich voraus, dort nimmt man die ungeheuren Anstrengungen Rußlands und das Beginnen Chinas, es ihm gleichzutun, sehr ernst. Aber in den Vereinigten Staaten wurde eine solche Stimme wie die des Präsidenten der Carnegie-Stiftung, Vannevar Bush, des Chefs der amerikanischen Forschung im zweiten Weltkrieg, kaum gehört, der da vor einem Kongreßausschuß vor zwei Jahren bekanntgab, daß die Russen dreimal so viele Ingenieure und dreißigmal so viele Techniker wie die Amerikaner im Jahre ausbilden, der davor warnte, die russische Ausbildung zu unterschätzen, der feststellte, daß der geachtetste und gleichzeitig der weitaus bestbezahlteste Stand in Rußland der Lehrerstand sei — ganz im Gegenteil zu Amerika — und der ausrief: „der weiche Punkt der gesamten amerikanischen Innenpolitik ist die Schule.“

Vor einem halben Jahr plötzlich bebte die Erde in den Vereinigten Staaten, da wurde offenbar, daß der Vorstoß in den Weltenraum gelungen war, ein Wunschtraum der Menschen. Nein, seien wir ganz ehrlich, das Fliegen war ein Wunschtraum der Menschen, er ist erfüllt worden; den Vorstoß in den Weltenraum haben sich die Menschen eigentlich gar nicht gewünscht. Das wäre viel zu vermessen gewesen, das hat kaum jemand für möglich gehalten. Also es wurde offenbar, daß dieses fast über das menschliche Vorstellungsvermögen Hinausgehende von einer anderen als der amerikanischen Nation, ausgerechnet von dem großen Rivalen, erreicht worden ist. Kurz hinterher geschah etwas Ähnliches. Auch der Griff nach dem Feuer der Sonne und der Sterne gelang, die Zähmung der Wasserstoffbombe, der erste Schritt zur Verwendung der Wasserstofffusion für friedliche Zwecke anstatt für schreckliche Verheerungen. Ich nannte einmal dieses Ziel, das Urfeuer des Universums den Menschen dienstbar zu machen, „die zweite Prometheische Tat“. Ist es nicht tragisch, daß die amerikanische Regierung auf Grund bestehender Verträge die englische Regierung veranlaßte, die Bekanntgabe der großen englischen Entdeckung um vier Monate herauszuschieben, damit das amerikanische Volk ein paar Monate lang vor dem Schrecken bewahrt wurde, daß die beiden größten technischen Fortschritte, die die Menschheit je vielleicht tun kann: der Vorstoß in den Raum, der bisher den Sternen vorbehalten war, und das Herunterholen ihres Feuers auf die Erde, beides von anderen Nationen als der führenden Welt, als sich die Amerikaner empfanden, geschafft wurde? Haben sie selbst noch diese Vorstellung von sich?

Das Erdbeben hat in Amerika, und das ist gut, zumindest zur Selbsterkenntnis geführt. Es bleibt dahingestellt, wie weit mit nachhaltiger Wirkung Folgerungen gezogen werden. Walter Lippmann schrieb am 15. Februar 1958:

„Die Konzeption unserer Rolle, wie wir sie in den Nachkriegsjahren gebildet haben, ging von der grundlegenden Voraussetzung der Überlegenheit der von den Vereinigten Staaten geführten westlichen Gesellschaft aus.

Das war eine Tatsache, aber es war eine vorübergehende Tatsache. Wir müssen unser Denken jetzt darauf einstellen, daß wir eine gleiche, nicht aber eine höchste Macht sind. Wir müssen einen breiten Weg einschlagen, wir müssen das amerikanische Erziehungswesen umwandeln, das im Durchschnitt und im großen und ganzen an Qualität in der gleichen Weise abnimmt, wie die Quantität der zu Erzieherungen zunimmt. Im amerikanischen Erziehungswesen herrscht die verhängnisvolle Tendenz, immer mehr Studenten und Schüler in einem immer kleiner werdenden Teil der großen Disziplinen auszubilden, die einen gebildeten Menschen ausmachen. Worüber wir uns Sorgen machen, ist, daß wir mit einem sinkenden Niveau des Erziehungswesens, mit der Vulgarisierung des kulturellen Standards in unserer Gesellschaft zu einem großen, aber zweiklassigen Volk herabsinken — fett, philisterhaft und genußsüchtig.“

Sind die Worte dieses amerikanischen Journalisten nicht viel zu hart? Investiert Amerika nicht wirklich viel für seine Zukunft? Tut es nicht zehn- oder hundertmal so viel für die Forschung wie wir? Hat es nicht bewundernswerte Universitäten und Colleges? Ist es nicht so, daß in Amerika jedes Kind, das befähigt ist, studieren kann, so daß man mit Recht sagt, daß man selbst mit einem Niagara von Dollars kein hochbegabtes Kind aus den minderbemittelten Volksschichten finden könne, das nicht schon auf den Weg nach oben gebracht ist? Bewundern wir nicht Amerika gerade deshalb, weil es nicht, wie jeder Kommunist glauben muß, als kapitalistisches Land nur den Kindern der Wohlhabenden den Aufstieg ermöglicht und damit insofern mit Rußland gleichsteht? Der große Unterschied zu Rußland, daß dort 60 Prozent aller Studenten Naturwissenschaften und Technik studieren, in Amerika nur 8 Prozent ist ja irgendwie auch ein Beweis für die Freiheit des Westens und den Zwang im Osten, so notwendig nun auch die wesentlich stärkere Förderung des Studiums dieser Disziplinen in den Vereinigten Staaten geworden ist. Von uns aus gesehen sind die Worte des Journalisten Lippmann zu hart. Und doch,

wieviel Achtung muß man der Haltung eines Volkes entgegenbringen, das diesen und andere Männer mit der größten Schärfe sagen läßt, daß der Mc. Carthyismus mit seiner Verfolgung der Professoren und überhaupt der Gelehrten und Wissenschaftler ein Unglück war, das zumindest darüber diskutiert, daß es den Weg zurückgeben muß zu einer größeren Einfachheit des Lebens, zu weniger Wertschätzung des nur materiellen Wohllebens, zu mehr Achtung vor den Kämpfern des Geistes.

Gibt es denn bei uns auch solche Stimmen? Wer warnt hier vor den Äußerlichkeiten des Wirtschaftswunders?

Tatsache ist leider, daß wir seit Jahren zu sehr dem Heute leben, daß wir zu stark versäumt haben, diejenigen Überlegungen anzustellen, die allein eine Wirtschaft sichern können, die auch noch hinter dem Scheitelpunkt dieser Konjunkturwelle — und der ist unzweifelhaft überschritten — die Absatzmärkte behaupten kann. England hat jahrelang Hunderte von Millionen für die Atomforschung ausgegeben. Es baut jetzt für 11 Milliarden DM Atomkraftwerke größter Leistung und steht für den Export dieser Anlagen fast konkurrenzlos in der Welt da, so daß in der Wirtschaft der Vereinigten Staaten sich schärfste Kritik an den eigenen nicht ausreichenden Arbeiten erhoben hat. Frankreich hat im letzten Jahr 1 Milliarde DM für Atomforschung ausgegeben. Einige der Abgeordneten unseres Landtages waren kürzlich in einem der hochmodernen französischen Atomforschungszentren. Es baut für 6,5 Milliarden DM Atomkraftwerke und hat im eigenen Land bisher 1500 Uranfundstellen entdeckt, die die Erzeugung des ganzen benötigten elektrischen Stromes Frankreichs für unvorstellbar lange Zeiten sichern. In Deutschland ist bisher kein einziges großes Atomkraftwerk bestellt worden. Kommt ein Regierungsvertreter aus einem der Entwicklungsländer zu den großen Firmen der deutschen Elektroindustrie mit der Bitte, das neueste von ihr für ein deutsches Elektrizitätsversorgungsunternehmen errichtete Atomkraftwerk zu besuchen, so muß die Antwort lauten: „Wir haben noch keines in Auftrag bekommen, geschweige denn eines gebaut.“

Der Mann kam aus Sympathie für Deutschland. Er muß seine Bestellung doch wieder bei unseren Nachbarn aufgeben, deren nationalisierte Stromversorgungsunternehmen ganz früh das Risiko auf sich nahmen, solche Bestellungen zu erteilen. Warum fassen bei uns nicht gerade diejenigen, die für die freie Wirtschaft sind, den Entschluß, aus Selbstdisziplin und zur Erhaltung der von ihnen verteidigten Wirtschaftsform freiwillig und gemeinsam unter sich dafür zu sorgen, daß die dringend erforderlichen Bestellungen auf Atomkraftwerke in Deutschland, dessen Kraftwerke nicht nationalisiert sind, von ihnen erteilt werden. Sie müßten es zwingend nötig tun, nicht etwa, weil uns eine Energielücke akut droht — das ist eine Überlegung auf längere Sicht —, sondern weil Dampfkraftwerke alter Art kaum noch exportiert werden können, nachdem Kraftwerke auf dem Markt angeboten werden mit der gleichen Leistung wie das größte deutsche, das Goldberg-Werk bei Köln, aber nur mit einem Brennstoffverbrauch von 400 kg Uran 235 im ganzen Jahr.

Wir stehen im Schiffbau immer abwechselnd mit Japan und Italien an zweiter Stelle in der Welt. Jetzt bauen andere Völker atom-angetriebene Schiffe, die in einigen Jahren der Seefahrt ihren Stempel aufdrücken werden. Der deutsche Schiffsexport, 50 Prozent der Schiffbauproduktion, ist in größter Gefahr.

In diesem Jahr fliegen zum ersten Male genau so viele Menschen über den Ozean wie die Überquerung mit dem Schiff vornehmen. In Amerika ist die Leistung des Flugzeugs, nach Fluggastmeilen gerechnet, im Passagierverkehr jetzt an erster Stelle vor dem Eisenbahn- und Autobusverkehr. Deutschland hat sich nicht entschlossen, sich um die zivile Luftfahrt, um den Bau von Passagierflugzeugen zu bemühen, ganz im Gegensatz zur Weimarer Republik, die auf diesem Gebiete mit der „Ju 52“ führend in der Welt war.

Meine Vorschläge, die ausländischen Flugzeuge für die Lufthansa nur zu kaufen, wenn gleichzeitig eine Lizenz genommen wird und vom zehnten Stück ab der Bau in Deutschland erfolgt, wurden lächelnd zurückgewiesen. In der Flugzeugindustrie der Ostzone sind z. Z. 22 000 Menschen beschäftigt. Professor Bade, früher

Junkers-Konstrukteur, baut modernste Zivil-Düsenflugzeuge — das Modell wurde auf der Leipziger Messe gezeigt —, ähnlich etwa dem englischen „Comet“ oder der französischen „Caravelle“.

Was ist denn das? Welch merkwürdiger Ton kommt hier in die einsichtige Auseinandersetzung zwischen den Warnern vor den deutschen Unterlassungen auf dem Gebiete von Forschung und moderner Technik und ihren stumm abwartend gegenüberstehenden Gegnern? Was deutet sich da an?

Wissen etwa die deutschen Wissenschaftler und Ingenieure nicht, daß die Amerikaner und Russen auf wichtigsten Gebieten der modernen Forschung und Entwicklung sie weit hinter sich zurückgelassen haben?

Hier hat die berühmtesten Gelehrten der damaligen Zeit vertrieben. Denken wir nur an Einstein, Lise Meitner, von Neumann, Courant, Kármán, Max Born oder James Franck. Wer nicht im letzten Augenblick ging, starb in Theresienstadt oder Auschwitz, wie mein Lehrer, Professor Blumenthal aus Aachen, einer unserer bedeutendsten Mathematiker.

Nach dem Kriege holten sich die Siegermächte weitere deutsche Wissenschaftler und Ingenieure in ihre Länder.

Ist unseren Wissenschaftlern nicht bekannt, daß Frankreich und England uns in vieler Hinsicht überlegen sind? Die dortigen Regierungen haben Forschungsstätten von größter Wirkungskraft, in großer Breite, außerdem auch noch sehr gediegen, schön und aufnahmefähig für alle jungen geistigen Kräfte zugänglich. Die beiden Nationen haben eine hohe wissenschaftliche Tradition. Wir müssen ihre Überlegenheit auf vielen Feldern geistigen Schaffens anerkennen. Unsere Wissenschaftler sind sich über die Überlegenheit der USA und UdSSR, Englands und Frankreichs im Klaren.

Aber jetzt plötzlich die neuen Fakten: Förderung von Luftfahrt, Flugzeugbau und Atomtechnik in der sogenannten DDR innerer als bei uns? Ein Atomzentrum ist in der Ozeane im Anbau und nicht weniger als 22 Atomkraftwerke soll man dort planen. Ziemlich viel soll für die Universitäten und ihre Institute

geschehen. Berühmte deutsche Mediziner, die aus der Zone zurückkommen, berichten über die besondere Förderung der modernen medizinischen Wissenschaft.

Das Volk in der Zone hungert, die Anzüge sind ärmlich, ein Paar Schuhe kostet sehr viel — und keine Hoffnung, daß sich ein Hauch von Freiheit regen dürfte — aber mit Zwang und Gewalt werden Mittel für Forschung und Zukunftsentwicklungen freigemacht, und tatsächlich, es läßt sich etwas erreichen.

Hier haben wir eine der bitteren Erkenntnisse dieses Jahres. Die Hoffnung der Demokraten war jahrzehntelang, daß große geistige Leistungen nur auf dem Boden der Freiheit entstehen können. Hitlers Regiment, seine Untaten und Mißerfolge schienen diese feste Überzeugung der freiheitliebenden Menschen in der Welt zu untermauern. Durch die Vertreibung vieler schöpferischer Menschen in seiner Zeit sanken die deutschen Publikationen auf dem Gebiete der modernen Physik von 60 Prozent in der einschlägigen Literatur der Welt im Jahre 1929 auf nur 5 Prozent 1936 zurück. Wenn schon etwas technisch Bedeutsames im Dritten Reich geschah, so mußte es sehr häufig gegen den Diktator durchgeführt werden, das bekannteste Beispiel sind die Düsenflugzeuge. Aber die subtileren Methoden des Ostens haben es ermöglicht, daß dort nun trotz Diktatur große Leistungen auf dem Gebiete der Naturwissenschaften und der Technik hervorgebracht werden können.

Steht auch uns der große Schock bevor?

Über den „Sputnik“ hat mancher bei uns gelächelt. Das liegt so furchtbar weit ab von dem, was uns zugänglich ist oder uns interessiert. Viele haben sich mit dem Witz getröstet, daß der „Sputnik“ und der „Spätnik“ sich ja da oben doch nur deutsch unterhalten könnten. Hat nicht einer der Rußlandheimkehrer jetzt gesagt: „Hinter dem Berge wohnen auch noch Leute?“

Welche Reaktionen werden die sich andeutenden Versuche des Ostens, uns auf einigen speziellen Gebieten zu überrunden, bei uns auslösen. Ich spreche es offen aus: ich habe etwas Sorge um die Stimmung bei unserer studentischen Jugend, bei unseren Forschern

und Wissenschaftlern, die entstehen kann, wenn sie erkennen werden, daß nicht nur Amerika und Rußland uns davongelaufen und England und Frankreich uns auf wichtigen Gebieten überlegen sind, sondern auch die sogenannte DDR unter Umständen bessere Arbeitsmöglichkeiten, größere Entfaltungsmöglichkeiten für bestimmte technische oder naturwissenschaftliche Leistungen bieten sollte? Möglich ist das, es braucht nicht unbedingt so zu kommen — dann nämlich nicht, wenn Herr Ulbricht zu viel in „Stalinismus“ macht.

Nur ein Beispiel für Gefahren in der angedeuteten Richtung, die sich abzeichnen beginnen.

Der Landtag Nordrhein-Westfalens hat auf meine Vorschläge hin vor Jahren die Deutsche Versuchsanstalt für Luftfahrt wieder begründet, wir haben etwa 400 Forscher und Wissenschaftler in 15 Instituten wieder gesammelt, sie vielfach aus dem Ausland zurückgeholt.

Der Bund hat sich bis vor kurzem an den Investitionen nicht beteiligt. Infolge der Stagnation im Aufbau schien eine Krise über die Anstalt hereinzubrechen und mancher überlegt: „Muß ich nicht wieder ins Ausland gehen, um auf dem Gebiete, das meine Lebensarbeit ist, dort erfolgreich weiter wirken zu können?“ Bei uns also mitten im Wirtschaftswunder Krisen in den wichtigsten Forschungsstätten aus Mangel an Unterstützung und die bange Frage: „Muß ich wieder ins Ausland gehen?“

Diese Fragestellung ist übrigens kennzeichnend für eine sehr wichtige Tatsache. In der Zeit der zweiten industriellen Revolution ist es ungeheuer anziehend — geradezu ein magischer Zwang wird auf diejenigen ausgeübt, die dazu fähig sind — auf den modernen Gebieten etwas Schöpferisches zu leisten.

Bei uns werden die Technik und die Naturwissenschaften in bestimmten Kreisen wenig geschätzt. Mancher möchte einen künstlichen Gegensatz zwischen den Geistes- und den Naturwissenschaften konstruieren. Er möchte diejenigen, die sich der Naturwissenschaft und der Technik widmen und diejenigen, die sich fördern,

als „Technokraten“ bezeichnen. Man soll keinen künstlichen Gegensatz zwischen Natur- und Geisteswissenschaften konstruieren, denn den gibt es nicht. In dem Verlangen des Philosophen nach Erkenntnis steckt ganz genau dasselbe innere Gesetz der Wissenschaft wie in der Suche des Physikers nach einem neuen Naturzusammenhang, das Streben nach dem Erkennen der Wahrheit. Nicht umsonst hat einer unserer bedeutenden Physiker, Prof. v. Weizsäcker, kürzlich einen Lehrstuhl für Philosophie an der Hamburger Universität übernommen. Wenn man sich große Namen der Wissenschaft vor Augen hält, angefangen von Leibniz über Goethe, Humboldt, bis zu Einstein und Max Planck, dann weiß man um das Wirken des schöpferischen Geistes auf beiden Gebieten, dem der Naturwissenschaften und der Geisteswissenschaften zugleich.

Ich sprach von der Anziehungskraft der modernen Naturwissenschaft auf diejenigen, die sich ihr mit Leidenschaft widmen. Diese Männer streben nicht nach äußerem Glanz, nicht nach materiellen Gütern, aber sie sind ganz verbunden dem Faszinierenden der schöpferischen Möglichkeiten. Man geht ins Ausland, wenn man nur dort in seinem Fachgebiet, mag es sich dabei um Kernphysik, Aerodynamik oder die Konstruktion von Gasturbinen, um Biologie oder Medizin handeln, besser wirken kann. Die Besten aus der jungen Generation drängen sich in die Laboratorien, an deren Spitze ein großer Gelehrter steht. Ich kenne den Geist in diesen Wirkungsstätten, es ist ein guter Geist, ein kameradschaftlicher. Nicht das Egozentrische ist Trumpf. Man ist bescheiden, wenn man auch stolz ist auf die Gruppe, in der man wirkt. Ist das nicht etwas sehr Schönes?

In früheren Jahrzehnten und Jahrhunderten drängte sich die Blüte der Nation häufig an erster Stelle zum Dienst am Hofe oder in der Uniform. Da gab es die äußeren Ehren, der Stand stand über allen anderen. Man glaubte, für die Zukunft des Volkes dort eintreten zu sollen. Das war die Zeit, in der kriegerische Eroberungen glorreich erschienen.

Jetzt sind wir in die Zeit der Eroberung von Provinzen des Geistes eingetreten, und zu den Stätten des Friedens, wo diese Eroberun-

gen stattfinden, in die Laboratorien und Hörsäle, drängt sich heute die Blüte der Nationen. Wir sollten unsere Lehrer in den Schulen ganz herzlich bitten, diesen großen Unterschied zwischen heute und damals unserer jungen Generation vor Augen zu führen.

Wie oft wird da im Geschichtsunterricht erzählt: „Die Voraussetzung für die Erhaltung der Macht dieses oder jenes Staates war der Besitz einer seebeherrschenden Flotte.“ Als Spaniens Armada scheiterte, sank seine Stellung, Napoleons Traum zerbrach in Trafalgar, Englands Flotte allein begründete das Empire.

Heute wird das Ansehen und viel mehr noch die Existenz eines Volkes von seinen Laboratorien getragen, wenn das offizielle Deutschland der in mancher Hinsicht etwas unrealistischen Nachkriegszeit das auch noch nicht überall glaubt. Ist es nicht kennzeichnend, daß ein Volk die neue Situation besonders gut erkannt hat, nämlich England? Mit größter Verbissenheit und bestem Erfolg hat sich diese Nation umgestellt vom Herrschen durch Flotte und Imperialismus auf Commonwealthideen und Forschung. Durch erstklassige naturwissenschaftlich-technische Leistungen, durch friedlichen geistigen Wettbewerb hat England die Palme des Sieges für die englische Wissenschaft nach dem Kriege in vielen Fällen erungen. Dafür hat es Opfer gebracht: es hat lange nicht so schöne Autos wie wir, — es fahren drüben eine Menge alter Wagen herum —, Autobahnen hat es gar keine, die Straßen sind eng und alt. Trotzdem hat man im Jahr dort nur 5000 Verkehrstote, während wir es auf 13 000 Getötete im Jahr gebracht haben. Die Wohnverhältnisse in England sind nicht besonders gut, der ganze Lebensstil atmet wenig vom wohlhabenden Empfinden unseres Erfolgbürgers des Jahres 1958. Man hat in England die Lebensmittellkarten länger beibehalten als hier, man hat den Gürtel enger geschnallt, aber man hat für die Zukunft geopfert. In England hat man das Tor zur Zukunft aufgemacht und auch in Frankreich, trotz aller Fehler in Algerien.

In Amerika ist man ehrlich beunruhigt, daß die Russen dieses Tor weiter geöffnet haben könnten als man selbst, obwohl doch Amerika viel für Zukunftsaufgaben getan hat, nachdem sich heraus-

stellte, daß jeder Dollar für die Forschung im Mittel eine jährliche Rendite von 200 Prozent erbringt.

Wir haben der Gegenwart gelebt. Wir haben die schönen Tage eines äußerlichen Wohllebens mit Reisefieber und Malignerkrankheit herbeigewünscht und herbeigebolt. Wehe, wenn wir dadurch die Zukunft verloren hätten!

Gehört es eigentlich zu den unmittelbaren Fragen der Politik, auf diesem komplizierten Felde mitzuwirken? Was kann denn der Staat, was kann ein Parlament für die Forschung tun? Ist es nicht eine Sache der Gelehrten allein, sich ihrer Wissenschaft zu widmen? Früher war das tatsächlich der Fall: Robert Koch hat mit einem kleinen Mikroskop den Tuberkelbazillus entdeckt, Behring, als einfacher Militärarzt, den Diphtherieerreger. Diesen Leuten brauchte der Staat nicht zu helfen und er hat ihnen auch nicht geholfen. Politik und Parlament nahmen von ihrem Wirken keine Notiz. Warum muß das jetzt anders sein? Einfach deshalb, weil heute ein modernes Mikroskop, nämlich ein Elektronenmikroskop, 100 000 DM kostet, ein Atomforschungszentrum unter ein paar hundert Millionen DM nicht geplant werden kann und ein einziges Riesen-Synchrotron, wie man es zum Erzeugen von Mesonen — Bausteinen der Atomkerne aus dem elektrischen Kraftfeld heraus — braucht, als Einzelgerät allein ein paar hundert Millionen DM kostet.

Für die Forschung sind also heute Riesensummen erforderlich. Wenn man sie nun bereitstellt, hat man davon einen Nutzen für alle, dient so etwas der allgemeinen Wohlfahrt, wie Leibniz sich in seiner Gründungsurkunde der Preussischen Akademie der Wissenschaften ausdrückte? Kann der Staat in positivem Sinne Wissenschaft fördern und aufbauen? Läßt sich etwas für die Allgemeinheit erreichen, wenn der Staat ein Bündnis mit der Forschung eingeht?

In Deutschland geschieht zwar viel zu wenig, wenn man aber anfängt, stellt sich sofort heraus, welche große Möglichkeiten vorhanden sind. In Nordrhein-Westfalen ist, wenn auch mit verhältnismäßig kleinen Summen, wenigstens angefangen worden.

Die Landesregierung hat in ihrer Regierungserklärung als eines ihrer Ziele die Begründung eines großen Atomforschungszentrums bekanntgegeben. Obwohl es nicht ganz einfach ist, auf einem Gebiet, auf dem uns jahrelang jede Betätigung verboten war, Arbeitsgruppen zusammenzuführen, sind wir jetzt soweit, daß die Baupläne für 14 Institute in voller Arbeit sind, und zwar:

- Institut für Kernverschmelzung*, Leiter Prof. Fucks (Techn. Hochschule Aachen),
- Institut für Isotopentrennung*, Leiter Prof. Groth (Universität Bonn),
- Institut für Wissenschaftliches Apparatewesen*, Leiter Dr.-Ing. Beyerle (Techn. Hochschule Aachen),
- Institut für Reaktorelemente und Flugzeugtriebwerke*, Leiter Prof. Quick (Techn. Hochschule Aachen),
- Institut für Medizin*, Leiter Prof. Knipping (Universität Köln),
- Institut für Biologie*, Leiter Prof. Strugger (Universität Münster),
- Institut für Transuranchemie*, Leiter Prof. Knappwost (Universität Tübingen),
- Institut für Radiochemie*, Leiter Dozent Dr. Lindner (Techn. Hochschule Göteborg),
- Institut für Reaktorwerkstoffe*, Leiter Prof. Bollenrath, Prof. Kersten, Prof. Leibfried, Prof. Lücke (Technische Hochschule Aachen);

für die Institute für Kerntechnik, Kernchemie, Neutronenphysik, Meß- und Regeltechnik und Dokumentation stehen Berufungen bevor. Die beiden Forschungsreaktoren sind im Bau, und an der Baustelle in Jülich selbst werden alle Vorbereitungen für die Errichtung dieser wichtigen Forschungsstätte geschaffen, die voll und ganz — und das ist das Bedeutungsvolle — unter dem Gesichtspunkt der unabdingbaren Freiheit der wissenschaftlichen Forschung, losgelöst vom Staatsdirigismus, steht. (Bilder 1, 2, 3.)

Als ein zweites Forschungszentrum mit 15 Instituten ist im vorigen Jahr die schon erwähnte Deutsche Versuchsanstalt für Luftfahrt ihrer Bestimmung übergeben worden, deren Arbeitsgruppen unter großer Opferwilligkeit der wissenschaftlichen Mitarbeiter, finanziell fast allein gestützt auf das Land, aufgebaut worden sind (Bilder 4, 5, 6) 1912 bereits wurde die Deutsche Versuchsanstalt für Luftfahrt (DVL) gegründet. Über 45 Jahre lang hat die DVL wesentliches für Luftfahrtforschung und Luftfahrtindustrie getan. In der Rechtsform des eingetragenen Vereins faßt sie die Firmen der deutschen Luftfahrtindustrie zusammen. Der Krieg hat die DVL fast tödlich getroffen, nahezu alle Forschungseinrichtungen gingen in den großen Anlagen in Berlin-Adlersdorf verloren. Einem Manne ist es zu verdanken, daß die Tradition der DVL erhalten blieb und die Anstalt wieder errichtet wurde, dem Vorsitzenden ihres Aufsichtsausschusses, Prof. Seewald, der lange Jahre ihr leitender Direktor war. Von seinem Lehrstuhl in Aachen aus gelang es ihm 1950, die Unterstützung des Landes Nordrhein-Westfalen zu gewinnen, dann auch die Mitwirkung der Bayerischen Regierung und der Bundesregierung, und jetzt besitzt die DVL wieder 15 Institute mit über 400 Mitarbeitern in Aachen, Berlin, München, Freiburg und Bonn. Die Leiter der Institute sind:

- Prof. Naumann*, Institut für angewandte Gasdynamik,
- Prof. Ebner*, Institut für Festigkeit,
- Prof. Bollenrath*, Institut für Werkstofforschung,
- Prof. Ruff*, Institut für Flugmedizin,
- Dr.-Ing. Ulbricht*, Institut für Flugfunk und Mikrowellen,
- Prof. Spengler*, Institut für Flugtreib- und Schmierstoffe,
- Prof. Quick*, Institut für Steuer- und Regeltechnik,
- Prof. Leist*, Institut für Strahlantriebe,
- Dr.-Ing. Dehn (z. Z.)*, Institut für Thermodynamik,
- Prof. Lührenbaum*, Institut für Triebwerkdynamik,
- Prof. Oswatitsch*, Institut für theoretische Gasdynamik,
- Prof. Görtler*, Institut für angewandte Mathematik und Mechanik,
- Dr.-Ing. Fingado*, Institut für Flugmechanik,
- Prof. Wille*, Institut für Turbulenzforschung.

Der Vorstand besteht aus den Herren:

Prof. Quick, Prof. Ebner, Dr. Stock, Prof. Ruff, Dr. Ulbricht,
 der Vorsitzende des Aufsichtsausschusses ist jetzt
Direktor Dipl.-Ing. Frydag.

Zu den bisher zur Verfügung gestellten Mitteln trugen bei: Nord-
 rhein-Westfalen mit 58 Prozent — es stellte 84 Prozent der In-
 vestierungssummen — der Bund mit 37 Prozent, Bayern mit
 5 Prozent.

Voller Hoffnung kehrten bedeutende Wissenschaftler aus dem
 Ausland zurück. Jüngere Menschen schlossen sich den neuen Ar-
 beitsgruppen an. Der Nachwuchs aus den Hochschulen betrachtete
 es wie früher als eine Auszeichnung, in der DVL zu wirken, aber
 bisher blieb die lang erwartete, unbedingt notwendige großzügige
 Hilfe des Bundes, von Anfangsbeträgen abgesehen, aus.

Die französische Luftfahrtforschungsanstalt „ONERA“, die mit
 der DVL in etwa verglichen werden kann, hat einen Jahreshaus-
 halt von 50 Millionen DM, der voll vom Staat getragen wird. Der
 Etat der DVL für das Jahr 1957 betrug etwa 6 Millionen DM.
 Sicher ist, ohne die Hilfe des Bundes kann auf gar keinen Fall die
 Luftfahrtforschung zu dem Umfange ausgebaut werden, der auf
 diesem wichtigen Gebiet heute notwendig ist.

Vor zwei Jahren wurde das einzige deutsche Forschungsinstitut für
 Rationalisierung (Bild 7) eröffnet, das schon große Ersparnis-
 möglichkeiten in der Industrie, allein durch Erfahrungsaustausch,
 nachgewiesen hat. Für eine bestimmte Produktion, nämlich die
 von Gesenken, konnte 22 Firmen eine durchschnittliche Ersparnis-
 möglichkeit von 60 Prozent, bei der Produktion von Zahnrädern
 konnte 20 Firmen eine solche von 50 Prozent nachgewiesen wer-
 den. Große Reserven wirtschaftlicher Kraft lassen sich erschließen:
 ein Gesichtspunkt, der gerade bei sinkender Konjunktur und schär-
 ferer Konkurrenz auf dem Weltmarkt von großer Bedeutung ist.
 Auch eines der modernsten europäischen Institute für Radioastro-
 nomie (Bild 8) hat auf dem Stockert bei Müntereifel seine Arbeit
 aufgenommen. Im März 1958 ist das einzige Forschungsinstitut
 für Binnenschiffbau (Bild 9), das sich schon erfreuliche inter-

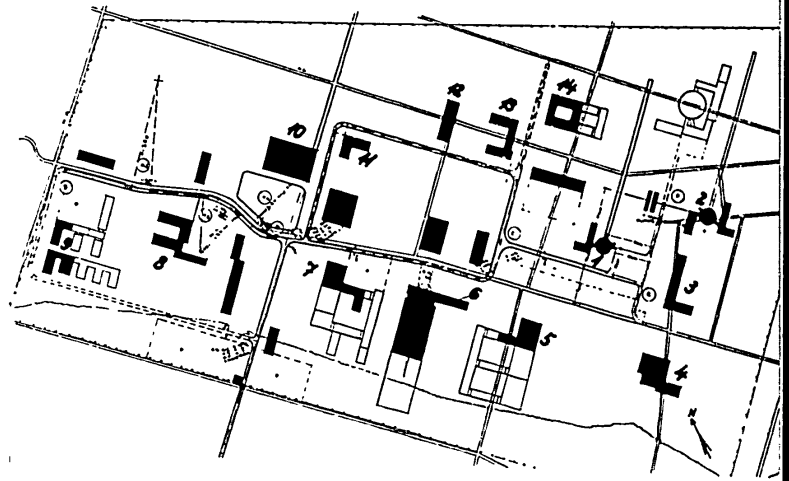


Bild 1 Lageplan des nordrhein-westfälischen Atomforschungszentrums Jülich

- 1 Forschungsreaktor „Merlin“
- 2 Materialprüfreaktor „Dido“
- 3 Institut für Neutronenphysik
- 4 Institut für Kernverschmelzung
- 5 Institut für Isotopentrennung
- 6 Institut für Wissenschaftlicher Apparatebau
- 7 Institut für Reaktorelemente und Flugzeugtriebwerke
- 8 Institut für Medizin
- 9 Institut für Biologie
- 10 Institut für Dokumentation
- 11 Institut für Meß- und Regeltechnik in Atomanlagen
- 12 Institut für Transuranechemie
- 13 Institut für Chemie
- 14 Institut für Reaktorwerkstoffe

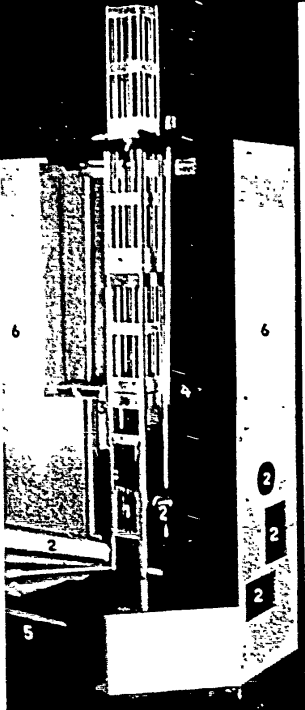


Bild 2 Modell des „Merlin“-Reaktors
1. Kern mit Brennstoffelementen, 2. Experimentieröffnungen, 3. Kühlleitung, 4. Vorratsbehälter für bestrahlte Brennstoffelemente, 5. therm. Säule, 6. Abschirmung, 7. Brücke mit Motoren für Kontrollstäbe

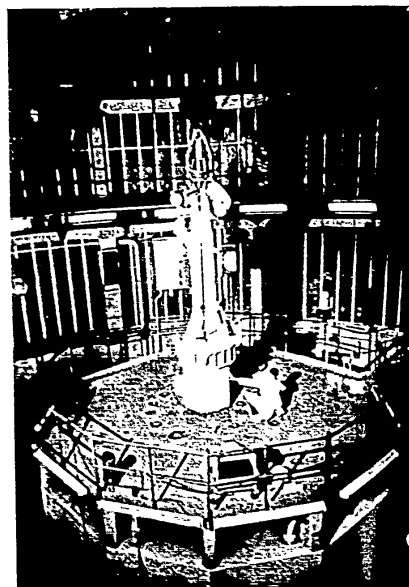


Bild 3

Die Erstaufstellung des „Merlin“-Reaktors. Mit Hilfe des Deckenkranes werden die verbrauchten Brennstoffelemente ausgetauscht



Bild 4 Institut für Festigkeit der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt in Essen (DVL)

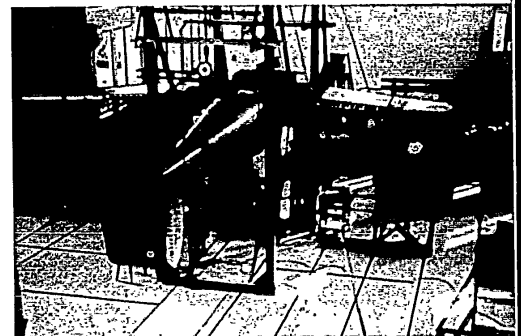


Bild 5

Festigkeitsprüfung an dem neukonstruierten deutschen Flugzeug Blume BL 500

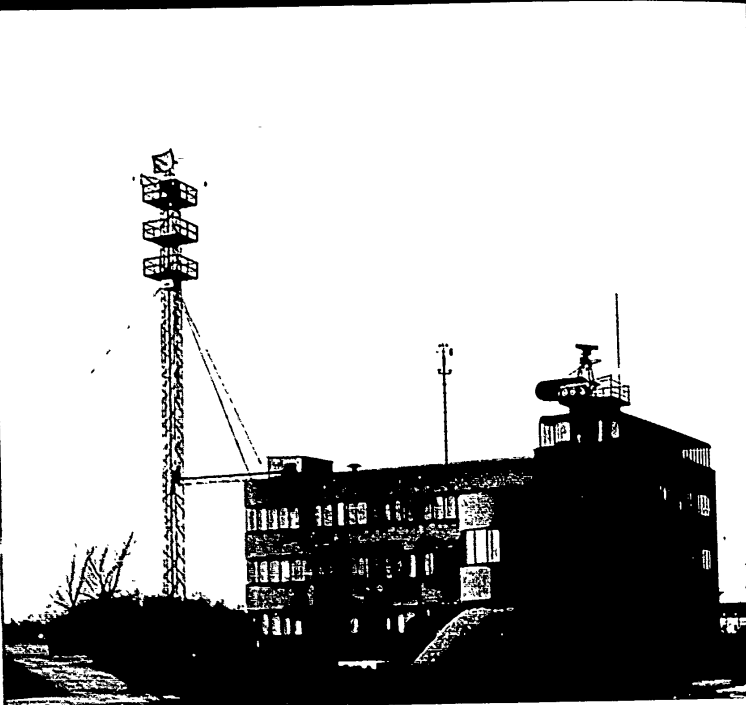


Bild 6 DVL Essen-Mühlheim (Gebäude und Mast für Mikrowellenversuche)



Bild 7 Forschungsinstitut für Rationalisierung an der Technischen Hochschule Aachen

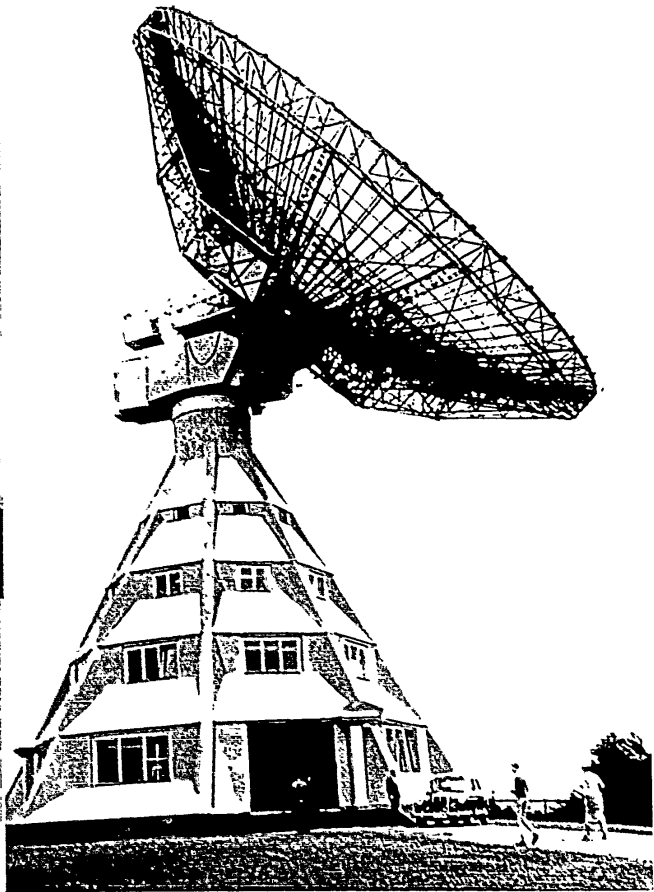


Bild 8 Radioteleskop auf dem Stockert bei Münsterfeld

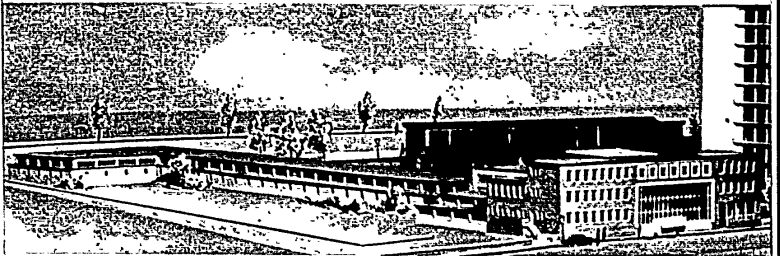
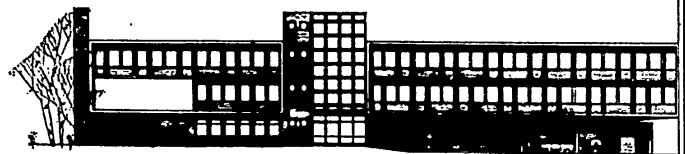


Bild 9 Versuchsanstalt für Binnenschiffbau in Duisburg

Bild 10 Neubautwurf des Institutes für Spektrochemie und angewandte Spektroskopie in Dortmund



ANALYSEKOLLEGE (DACHGLIEDER)

BRUNNEN
1950
1951
1952
1953
1954
1955
1956
1957
1958
1959
1960

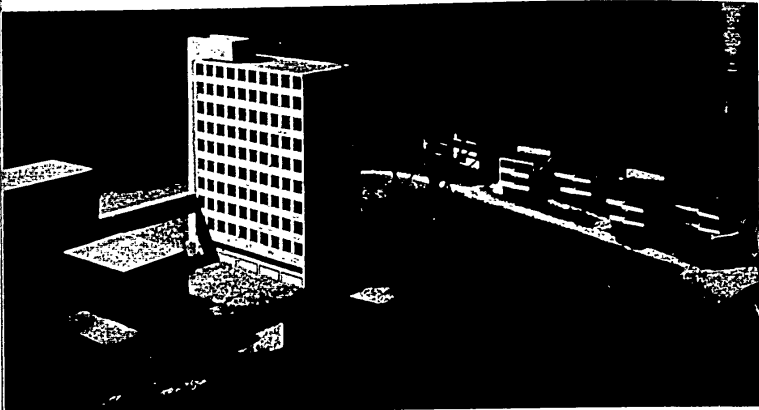


Bild 11
*Modell des Neubaus für das
Max-Planck-Institut für
Ernährungsphysiologie in
Dortmund*



Bild 12
*Synchro-Zyklotron im
Institut für Strahlen- und
Kernphysik
der Universität Bonn*



Bild 13 *Zyklotronbaus des Instituts für Strahlen- und Kernphysik der Universität Bonn*

Bild 14 *Institut für Ziegelforschung e. V. in Essen*



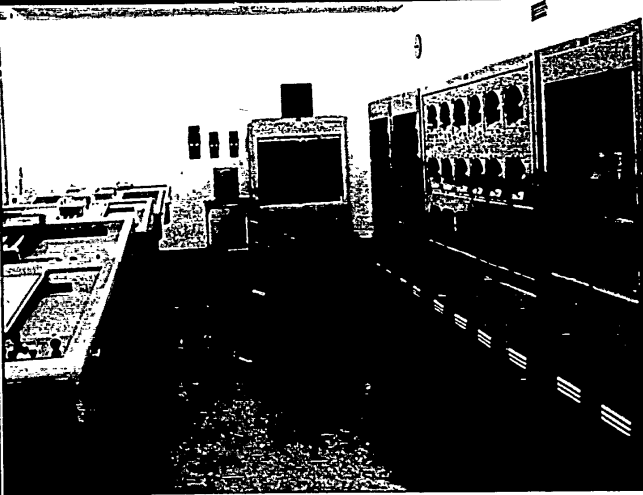


Bild 15 Integrieranlage des Instituts für instrumentelle Mathematik der Universität in Bonn

Bild 16 Vorderansicht (Modellanfahme) des im Bau befindlichen neuen Gebäudes für das Institut für Kunststoffverarbeitung in Industrie und Handwerk an der Technischen Hochschule Aachen

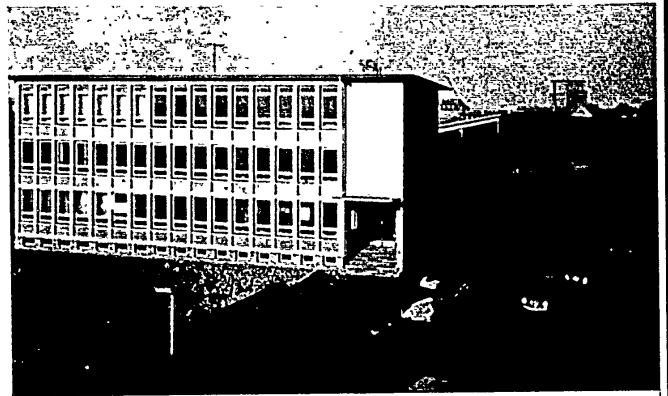
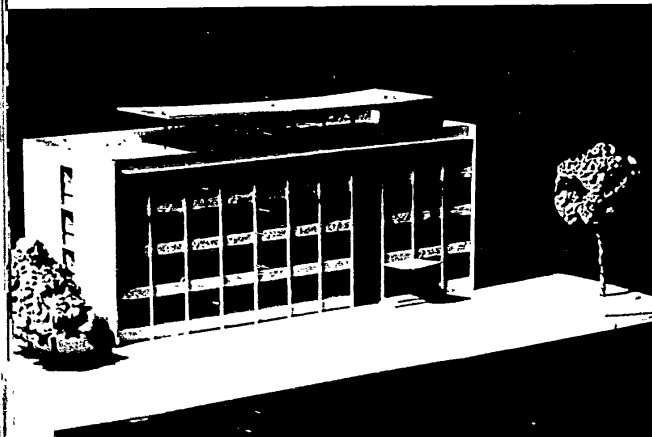
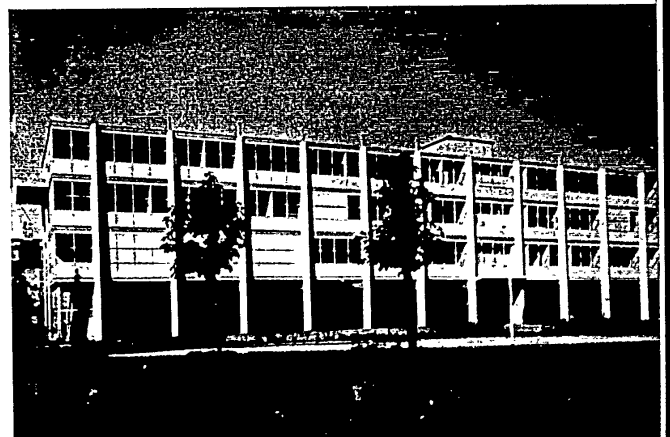


Bild 17 Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt Duisburg

Bild 18 Textilforschungsanstalt Krefeld



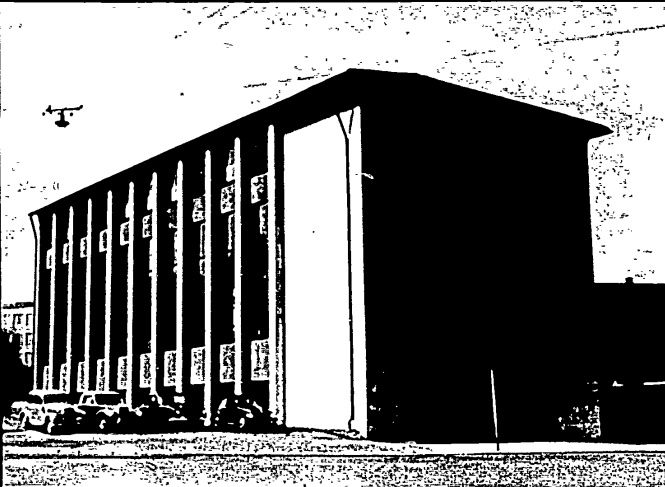


Bild 19 Forschungsinstitut Verfahrenstechnik an der Technischen Hochschule Aachen

Bild 20 Deutsches Wollforschungsinstitut an der Technischen Hochschule Aachen

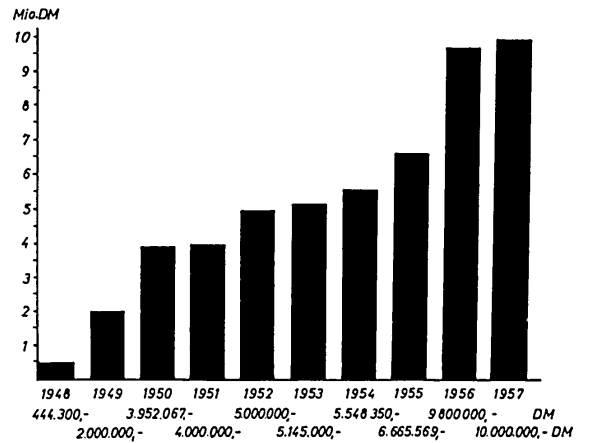
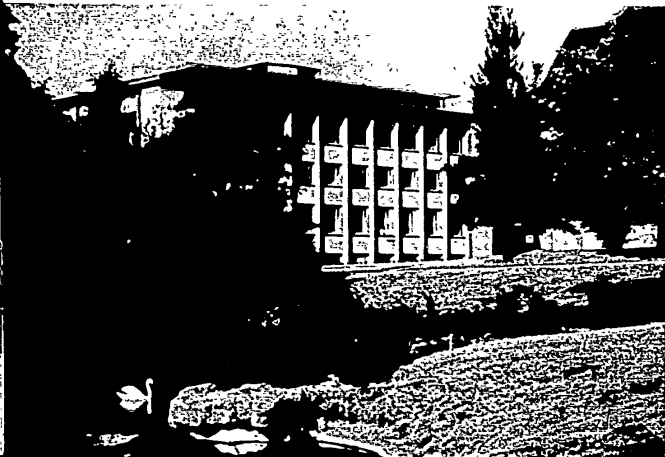


Bild 21 Bereitgestellte Haushaltsmittel des Ministeriums für Wirtschaft und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen für Forschung

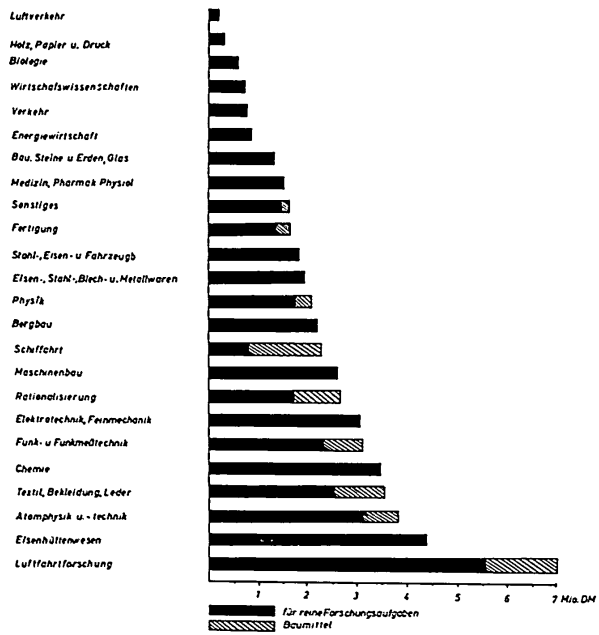


Bild 22 Einsatz der insgesamt zur Verfügung gestellten Forschungsmittel des Ministeriums für Wirtschaft und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen (Stand 10. 1. 1958) für die verschiedenen Forschungsgebiete

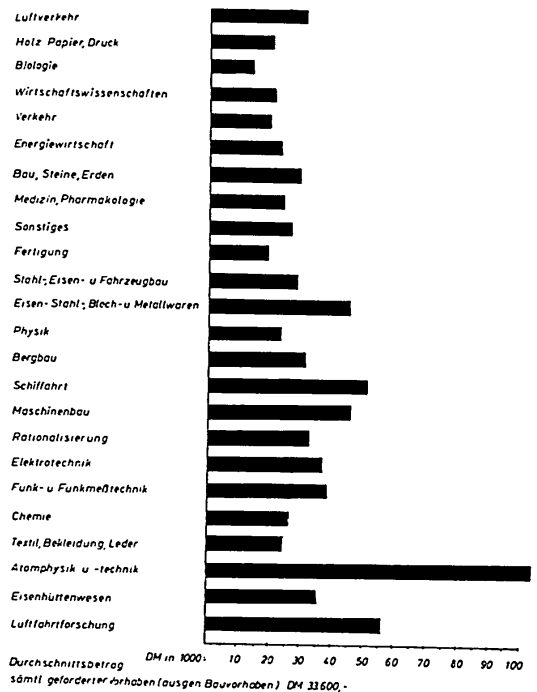


Bild 23 Durchschnittliche Förderung eines Forschungsvorhabens innerhalb der einzelnen Fachgebiete (Baumittel ausgeschlossen) beim Ministerium für Wirtschaft und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen

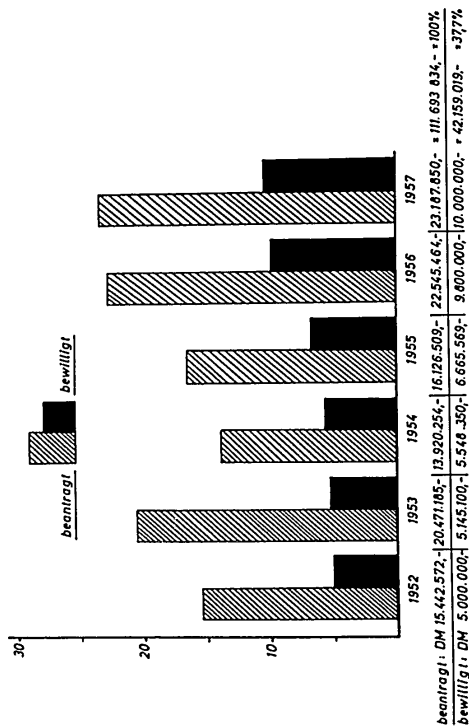


Bild 24 Gegenüberstellung der beantragten und bewilligten Forschungsmittel beim Ministerium für Wirtschaft und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen in den Jahren 1952 bis 1957

nationale Anerkennung erworben hat, mit seinem Erweiterungsbau neu eröffnet.

In Dortmund wird ein Neubau für das vor 6 Jahren gegründete Forschungsinstitut für Spektroskopie (Bild 10) errichtet, und es wird Hilfe geleistet für das in Dortmund schon im Bau befindliche bedeutungsvolle Forschungsinstitut für Ernährungsphysiologie der Max-Planck-Gesellschaft (Bild 11).

Erwähnt seien hier noch folgende Institute, die mit maßgeblicher Unterstützung des Landes errichtet werden konnten:

das 30 Millionen Elektronenvolt-Synchrozyklotron im Institut für Strahlen- und Kernphysik der Universität Bonn (Bilder 12 und 13),

das Institut für Ziegeleiforschung e. V. in Essen (Bild 14),

das Institut für Glimmlichtforschung in Köln,

das Institut für instrumentelle Mathematik an der Universität in Bonn mit mehreren Großrechenanlagen (Bild 15),

das Institut für Kunststoffverarbeitung in Industrie und Handwerk an der Techn. Hochschule Aachen (Bild 16),

die Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt Duisburg (Bild 17),

die Textilforschungsanstalt Krefeld mit ihrem Neubau (Bild 18),

das Forschungsinstitut Verfahrenstechnik an der Technischen Hochschule Aachen (Bild 19),

das Deutsche Wollforschungsinstitut an der Technischen Hochschule Aachen (Bild 20).

In den Sitzungen der Arbeitsgemeinschaft für Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen sind bisher insgesamt etwa 40 neue Forschungsinstitute angeregt worden, die alle entweder fertiggestellt sind oder sich in Vorbereitung befinden. An den bestehenden Forschungsinstituten der Universitäten, der Technischen Hochschule, an den Max-Planck-Instituten und ähnlichen wissenschaftlichen Einrichtungen sind mit Hilfe der Forschungsmittel des

Landes bisher 1500 wichtige Forschungsaufgaben durchgeführt worden, deren Ergebnisse in bisher 500 veröffentlichten Forschungsberichten*) vorgelegt wurden.

Im Zuge des wirtschaftlichen Neuaufbaues nach der Währungsreform wurde vom damaligen Wirtschaftsminister Prof. Nölting im Jahre 1948 zum ersten Male der Landtag veranlaßt, für die Förderung der naturwissenschaftlich-technischen Forschung 400 000,— DM zur Verfügung zu stellen. Dieser Haushaltsansatz wurde bereits im Jahre 1949 auf 2 Millionen DM, im Jahre 1950 auf rd. 4 Millionen DM und nach weiteren Erhöhungen auf rd. 10 Millionen DM in den beiden Jahren 1956 und 1957 auf 20 Millionen DM für 1958/59 gesteigert. Die Entwicklung dieses Haushaltstitels bis 1957 ist als Bild 21 dargestellt.

Die graphische Darstellung Bild 22 zeigt den Einsatz dieser Mittel auf den verschiedensten Forschungsgebieten.

Die Schwerpunktbildung auf den verschiedenen Forschungsgebieten ist aus den Summen für reine Forschungsaufgaben erkennbar. Als Schlüsselgebiet, das für die anderen Gebiete neue Erkenntnisse in besonderem Maße erarbeitet und dadurch auf diese befruchtend einwirkt, wie auch, um den gewaltigen Vorsprung des Auslandes wenigstens teilweise aufzuholen, wenn sie für die heimische Industrie künftig arbeiten soll, ist die Luftfahrtforschung anzusehen. Für Nordrhein-Westfalen ist sodann das Forschungsgebiet des Eisenhüttenwesens und des Bergbaues von besonderer Bedeutung. Auch treten aus der Problemstellung der heimischen Industrie die Fachgebiete Chemie, Elektrotechnik und Maschinenbau in den Vordergrund. Das Forschungsgebiet der Textilwirtschaft wurde entsprechend seiner Bedeutung für die Beschäftigtenzahl ebenfalls schwerpunktmäßig gefördert. Zudem ist das neuartige Forschungsgebiet der Funk- und Funkmeßtechnik wegen seiner künftigen Tragweite verstärkt gefördert worden. Die große

* Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen, erschienen im Westdeutschen Verlag, Köln und Opladen.

bahnbrechende Entwicklung auf dem Gebiet der Atomphysik führte unabhängig von der Errichtung des Atomzentrums auch zu einer besonderen Unterstützung der verschiedenartigen Forschungen an den Hochschulen des Landes.

In Erkenntnis der besonderen Gegebenheiten und Notwendigkeiten der Forschungsförderung entschied der Landtag, daß im Rahmen der generellen Zweckbestimmung die Mittel zusätzlich auch zu den an anderer Stelle des Haushaltsplanes veranschlagten Mitteln verwandt werden dürfen. Dabei sind insbesondere die Universitäten, die Technische Hochschule Aachen sowie wirtschaftswissenschaftliche Forschungsvorhaben hervorgehoben worden. Auf Grund dieser haushaltsrechtlichen Möglichkeiten konnten die Mittel auch wesentlich für den Bau neuer Forschungsinstitute verwandt werden. Unterstützend zu dem durch das Kultusministerium geförderten Wiederaufbau der zerstörten Forschungsstellen des Landes wurden vom Wirtschaftsministerium insbesondere denjenigen Forschungsinstituten durch Zurverfügungstellung von Baumitteln geholfen, die für die Wirtschaft des Landes von besonderer Bedeutung sind und vor allem auch neuartige Forschungsgebiete erschließen. Die Durchführung dieser Bauvorhaben war notwendig, um überhaupt erst einmal die Voraussetzungen für die Übernahme neuer oder weitergehender Forschungstätigkeit zu schaffen.

Einen Überblick über die durchschnittliche Größenordnung normaler Forschungsvorhaben auf den verschiedenartigen Forschungsgebieten bietet das nächste Bild. Einen maßgebenden Einfluß hierbei haben die Anschaffungen der notwendigen Apparaturen und Geräte, die jeweils beim Erwerb in das Eigentum des Landes übergehen (Bild 23).

Um möglichst alle Forschungsvorhaben gerecht nach ihrer Qualifikation und Dringlichkeit zu werten, wurden die eingegangenen Anträge stets in einer bzw. in zwei Sitzungen geschlossen für den gesamten Zeitraum behandelt und dadurch die Einheitlichkeit bei der Beurteilung sowie eine entsprechende Beachtung der Belange jedes Fachgebietes gesichert.

Die Forschungsmittel werden so eingesetzt, daß sie nicht das Konkurrenzgefüge der freien Wirtschaft beeinflussen. An einzelne Firmen wurden deshalb nur im Anfang in kleinem Umfange und auch hier unter Wahrung des gesamten Grundsatzes Forschungskredite gegeben; jetzt gehen die Mittel nur noch an anerkannt gemeinnützige Institute.

Grundsätzlich ist darauf hinzuweisen, daß bei der Bewilligung eines Forschungszuschusses der Forscher durch eine Auflage verpflichtet wird, über die Arbeiten und die erzielten Ergebnisse einen ausführlichen Bericht zu erstellen, der in einer Schriftenreihe des Ministeriums der Öffentlichkeit zur Kenntnis gebracht und in der Fachwissenschaft zur Diskussion gestellt wird. Der Forschungsbericht steht gleichzeitig der interessierten Industrie zur Auswertung zur Verfügung.

Bei den Beratungen des Ausschusses ist die Schwierigkeit vor allem darin zu sehen, daß die Summe der guten und dringlichen Forschungsvorhaben die zur Verfügung stehenden Mittel stets weit überstieg. Dabei ist darauf hinzuweisen, daß durch das Vorprüfverfahren bereits eine Sichtung der Anträge vorausgeht und unwesentliche oder gelegentlich auch unsinnige Vorhaben dem Beratungsausschuß nicht vorgelegt werden. Das Mißverhältnis zwischen der Summe der zur Beurteilung vorgelegten Anträge und den zur Verfügung stehenden Haushaltsmitteln geht aus dem Bild 24 hervor. Die in der Gegenüberstellung aufgeführten Antragssummen dürfen bereits nahezu ausnahmslos als sinnvolle und förderungswürdige Anträge angesehen werden, die nur wegen des Mangels an Mitteln nicht gefördert werden konnten.

Nach dem letzten Bericht der Deutschen Forschungsgemeinschaft ist der Prozentsatz der dort abgelehnten Anträge der Naturwissenschaft und Technik 6 bzw. 4 Prozent, während die Ablehnungen beim Wirtschafts- und Verkehrsministerium des Landes Nord-

rhein-Westfalen im Jahre 1956 = 33,5 Prozent und im Jahre 1957 = 32,3 Prozent betragen mußten. So sind in der Beratungssitzung vom 19. Oktober 1956 von 471 vorgelegten Anträgen 158 Vorhaben und in der Sitzung vom 30. Oktober 1957 von 424 insgesamt 137 abgelehnt bzw. um ein Jahr zurückgestellt worden. Insgesamt konnten im Durchschnitt der letzten 6 Jahre nur 37,7 Prozent der beantragten Summen befürwortet werden.

Von großem Vorteil für die gesamte Forschung war die gute Zusammenarbeit aller zentralen forschungsfördernden Stellen mit dem Land und seinen Organen, die dazu führte, daß eine gute Koordinierung der Forschungsprogramme innerhalb der Bundesrepublik erfolgte. Dadurch wurden auch Doppelarbeiten und mehrfache Finanzierungen gleicher Vorhaben grundsätzlich vermieden, soweit nicht eine mehrfache Inangriffnahme des gleichen Problems als sachdienlich angesehen wurde. In den verschiedenartigen Schwerpunktprogrammen der zentralen Stellen und der Landesstelle konnten übergebietliche und gebietseigene Probleme erfaßt und durchgeführt werden. So war naturgemäß auch die Forschungsförderung mit den Haushaltsmitteln des Ministeriums für Wirtschaft und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen im wesentlichen schwerpunktmäßig gerade aus der wirtschaftspolitischen Linie des Landes getragen.

Ich möchte hier noch zwei neue Forschungsinstitute besonders hervorheben, die im letzten Jahre entstanden sind: Das Forschungsinstitut für Talentstudien des aus der Weimarer Zeit bekannten Begründers des Deutschen Studentenwerks und der Studienstiftung des deutschen Volkes, Dr. Reinhold Schairer, der aus seiner freiwilligen Emigration während des Dritten Reiches in den Vereinigten Staaten wesentliche Erkenntnisse über die Wege zur Förderung des Nachwuchses und der jungen Talente nach Deutschland gebracht hat, die hier die Diskussionen ganz außerordentlich befruchtet haben. Der Vorschlag, das Volkswagenwerk in eine Stiftung für Forschung und Nachwuchs zu verwandeln, stammt aus diesem Institut.

Vor 14 Tagen trat zum ersten Male das Institut für internationale

technische Zusammenarbeit an der Technischen Hochschule Aachen mit einer Veranstaltung an die Öffentlichkeit, das sich der Aufgabe widmet, die Wege und Möglichkeiten zu erforschen, die am besten zur Zusammenarbeit mit den Entwicklungsländern auf technischem und Ausbildungsgebiet führen. Es sollen Freundschaften hergestellt werden mit den Technischen Hochschulen und anderen Ausbildungsstätten in diesen Ländern in Asien, Afrika oder Südamerika. Die Kenntnis über den Entwicklungsstand und die Planungsabsichten in diesen für uns alle so bedeutsamen Staaten soll vertieft werden.

Ungewöhnliche Ereignisse vollziehen sich in diesen Jahrzehnten in der Welt, von denen wir in Deutschland uns bisher kaum eine Vorstellung machen. Man rechnet damit, daß sich die Bevölkerung Chinas in den nächsten 20 Jahren von 600 auf 690 Millionen vermehrt. Hier liegt einer der größten Märkte der Welt. Wir beachten ihn nicht. Gewaltiger noch ist die Entwicklung in Indien. Man rechnet damit, daß sich in 20 Jahren Indiens Bevölkerung von jetzt fast 400 auf dann etwa 600 Millionen Menschen vermehrt. Ein Markt von gleicher Bedeutung wie China wächst heran.

In Indien wächst eine Nation zusammen, die uns freundschaftlich und aufgeschlossen gegenübersteht, sie wartet auf Hilfe und Zusammenarbeit. Hilft der Westen nicht, so muß ganz zwangsläufig die Hilfe woanders her erbeten werden; denn ohne Mitwirken und Hilfe der übrigen Welt kann das Ergebnis der Entwicklung in Indien nur Chaos, Hunger und schließlich Kommunismus sein. 40 Prozent aller Menschen in Indien sind Kinder unter 15 Jahren. Die mittlere Sterblichkeit liegt noch immer bei 32 Jahren. Wenn die westliche Welt nicht Opfer bringt für die Millionenmassen da draußen, wird der Westen isoliert werden und sein Schicksal wird besiegelt sein.

Dabei bestehen große Möglichkeiten für die künftige Entwicklung der Wohngebiete der hungernden Menschen. In Afrika und Asien sind erst 7 Prozent des zur Bewässerung zur Verfügung stehenden Wassers genutzt, riesige neue Landflächen können gewonnen wer-

den. Der Assuanstaudamm hätte mit einem Schlage den Hunger in Ägypten bannen können, die bisher ungenutzten 40 Prozent des Nilwassers wären der Bewässerung gewonnen worden, Herr Dulles wollte das nicht, die Quittung ist böse genug.

Der landwirtschaftliche Ertrag in vielen Ländern läßt sich verdoppeln und verdreifachen. Die Industrialisierung kann auch den Völkern, die bisher im Schatten lebten, eine auskömmliche Existenz sichern, wenn wir ihnen, die aus der Zeit der Unterdrückung und des Kolonialismus kommen und unserer Hilfe bedürfen, auch wirklich helfen. Opfern wir und helfen wir, so werden eine dauernde Freundschaft und eine ständige wirtschaftliche Verflechtung Dank und Lohn sein!

Nordrhein-Westfalens Landtag hat mit Aufgeschlossenheit die Wege verfolgt, bei uns der Forschung eine Gasse zu bahnen. Vor 8 Jahren schlug ich dem damaligen Ministerpräsidenten Arnold die Gründung der Arbeitsgemeinschaft für Forschung vor. Sie hat in bisher 150 Sitzungen ihrer natur- und ihrer geisteswissenschaftlichen Abteilung neue Wege erkannt und klare Ziele aufgestellt. Das Parlament hat ihrem Wirken ausgesprochenes Interesse entgegengebracht. Ihre Mitglieder haben als Dank dafür ein umfangreiches Werk, „Aufgaben deutscher Forschung“^{*}, geschaffen, das für die Geisteswissenschaften, die Naturwissenschaften und die technischen Wissenschaften die dringenden Aufgaben, die angepackt werden sollten, in klarer und deutlich umrissener Form feststellt. Es ist im Auftrage des Ministerpräsidenten Steinhoff vom Verfasser herausgegeben worden und unter anderem auch allen Abgeordneten des Bundestags, des Landtags und allen Bibliotheken, Volkshochschulen und Höheren Schulen zugänglich gemacht worden. Auch die Veröffentlichungen der Vorträge einschließlich der Diskussionen der Arbeitsgemeinschaft für Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen gehen allen Höheren Schulen, Volkshochschulen und Bibliotheken zu, damit ein möglichst wei-

^{*} Aufgaben Deutscher Forschung, Band I „Geisteswissenschaften“, Band II „Naturwissenschaften“, Band III „Technik“, erschienen im Westdeutschen Verlag Köln und Opladen

tes Ausstrahlen des Wirkens der Wissenschaft und der Erörterung der Gelehrten in Rede und Gegenrede gesichert ist.

Nordrhein-Westfalen hat ganz sicher das seinige getan. Die anderen deutschen Länder haben zum Teil die Verbindung zwischen Wissenschaft und Staat nicht in ähnlicher Form wie wir hier an Rhein und Ruhr gefunden. Ministerpräsident Zinn hat im Forschungsrat des Landes Hessen eine ähnliche Einrichtung wie die Arbeitsgemeinschaft für Forschung des Landes Nordrhein-Westfalen geschaffen, und auch in Niedersachsen ist ein ähnlicher Versuch unternommen worden. Im allgemeinen aber haben die Länder die Bedeutung der Aufgabe, der Zukunft mit Hilfe der Forschung eine Gasse zu bahnen, nicht genügend erkannt. Dabei ist aber eines sicher: nur, wenn die Länder alle Kraft, zu der sie fähig sind, dafür einsetzen, das Tor der Zukunft zu öffnen, haben sie die Berechtigung, den Bund um Hilfe anzugehen.

Mit großer Sorge ist festzustellen, daß offenbar die Vorstellung besteht, die russischen technischen Erfolge seien auf Fernraketen oder Erdsatelliten beschränkt und diese auch nur gewaltsam auf Kosten anderer Wissenschaftsgebiete erzielt. An der Unrichtigkeit dieser Ansicht ist jedoch nicht zu zweifeln. In den 12 Jahren seit Kriegsende hat in der Sowjet-Union die russische Wissenschaft, Technik und Industrie, die noch bis zum zweiten Weltkrieg wesentlich hinter den westlichen Ländern zurücklag, diesen Rückstand aufgeholt, und liegt zur Zeit fast in ihrer ganzen Breite in der Welt mit in Führung. Ganz offensichtlich behalten die Russen die Geschwindigkeit ihres Aufstiegs zu größerer wirtschaftlicher und industrieller Produktion, die sie im Laufe des letzten Jahrzehnts erreicht haben, bei und die Pläne, die sie hegen, scheinen durchaus geeignet zu sein, das Tempo des Fortschritts weiter zu beschleunigen. Wenn schon das Aufrücken von einer weit rückständigen Position in die Spitzengruppe während eines Jahrzehnts beweist, daß heute das Tempo des Fortschritts in der Sowjet-Union dem der westlichen Länder weit überlegen ist, so spricht ferner vieles dafür, daß die Russen im Laufe der allernächsten Zeit auf den Gebieten, wo noch Rückstände gegenüber dem westlichen Stand

vorhanden sind, diese aufholen werden und auf den Gebieten, wo sie bereits einen Vorsprung haben, diesen Vorsprung erweitern werden. Die Entwicklung vieler neuer Forschungszweige hat eine zunehmende Komplizierung der technischen Hilfsmittel und Verfahren für die Forschung bedingt. Es ist nicht daran zu zweifeln, daß die neuen Arbeitsgebiete in der Physik, in der Chemie, Biologie und Technik dringend in unserem hochindustrialisierten Lande betrieben werden müssen.

Jedes Forschungsgebiet muß zudem auf die Bedürfnisse und Anforderungen Rücksicht nehmen, auf die die ihm nachstehende Industrie angewiesen ist. Da der Weltmarkt an industriellen Fertigwaren heute besonders hohe Ansprüche an die Qualität und die Gebrauchstüchtigkeit stellt, andererseits von Ländern, die niedrige Arbeitslöhne haben, starke Preisunterbietungen an der Tagesordnung sind, so ist eine energische Förderung der industrienahen Forschung ein Gebot der Selbsterhaltung.

Die wirtschaftliche Lage ist in den vergangenen Jahren zweifellos schwieriger geworden und es könnte der Gedanke auftauchen, auch von der Forschung gewisse Einschränkungen zu verlangen.

Ein solches Vorgehen wäre aber genau das Gegenteil von dem, was nach unserer Ansicht in einer solchen Situation notwendig ist.

Wenn wir heute die für die Forschung zur Verfügung stehenden Gelder beschränken würden, dann wäre die mühsame Arbeit der vergangenen Jahre teilweise umsonst gewesen,

weil dann der flüssige Fortgang der Entwicklung der Forschung parallel zu der technischen Entwicklung auf den internationalen Märkten für Deutschland unterbrochen würde. Gerade in Zeiten, in denen die Schwierigkeiten und die Ansprüche des Marktes größer werden, ist es erforderlich, daß die Praxis durch ihre Forschung den nötigen Rückhalt bekommt, um mit ihrer Entwicklung auf dem Stand des Auslandes zu bleiben.

Es könnte der Standpunkt vertreten werden, daß derartige Entwicklungen auf dem technischen Gebiet auch von der Industrie

selbst finanziell getragen werden müßten. Das setzt voraus, daß die wissenschaftlichen Grundlagen bereits erarbeitet sind. Die Erarbeitung der wissenschaftlichen Grundlagen ist aber nicht nur selten Aufgabe einzelner Firmen, sondern an ihrer Entwicklung ist die gesamte Volkswirtschaft interessiert, besonders auch im Hinblick darauf, daß die Ergebnisse veröffentlicht und damit der Allgemeinheit bekanntgegeben werden. Leider zu oft wird angenommen, daß derartige Grundlagen bereits genügend vorhanden seien und daher die angewandte Forschung lediglich die Anwendung der an sich bekannten wissenschaftlichen Grundlagen betreibe. Es hat sich aber auf allen Forschungsgebieten immer mehr gezeigt, daß gerade die Grundlagen in sehr vielen Fällen längst nicht ausreichen, um die für die Praxis notwendigen Prozesse zu beherrschen, ganz abgesehen davon, daß dieses „von-der-Hand-in-den-Mund-leben“ einen Zeitverlust bringt, der die Ausnutzbarkeit gegenüber im Wettbewerb liegenden Nationen wirkungslos macht. Ferner ist besonders daran zu erinnern, daß eine laufende und enge Zusammenarbeit zwischen den verschiedenartigen Forschungsgebieten notwendig ist, um zu vertieften und vielseitig anwendbaren Erkenntnissen zu gelangen.

Es ist bekannt, daß die Steuermittel zwischen dem Bund und den Ländern aufgeteilt worden sind, und zwar entsprechend der Verteilung der öffentlichen Aufgaben. Die Aufgaben der Länder sind fest umrissen. Da die Kommunen fast keine eigenen Steuern erheben können, geht der größte Teil der Länderfinanzen den Städten und Kreisen zu. Auch fast alle anderen Aufgaben sind zwangsläufig: der Bau der Landstraßen, der Schulbau, die Wiedergutmachungen, die Justizpflege — nur ganz wenig Manövriermasse bleibt übrig — und dadurch kommt die Forschung entscheidend zu kurz.

Wir müssen also entweder den Finanzausgleich ändern — das scheint staatsrechtlich schwierig zu sein, wenngleich es das einzig Richtige wäre — oder wir müssen durch ein Verwaltungsabkommen Bundesmittel für die großen Aufgaben erhalten.

Ein solches Verwaltungsabkommen ist zwischen Bund und Län-

dern vor einiger Zeit geschlossen worden. Ich bedauere allerdings sehr, daß dem Arbeitsgremium, das diese Fragen behandeln soll, die viel zu umfassende Aufgabe eines „Deutschen Wissenschaftsrates“ gegeben worden ist. In einer solchen Lösung steckt die Gefahr eines Einflusses des entschieden abzulehnenden Staatsdirigismus. Um dies zu verhindern, habe ich gefordert, daß, unabhängig von und neben dem notwendigen und erforderlichen Verwaltungsabkommen und seiner Geschäftsstelle ein „Deutscher Forschungsrat“ geschaffen werden müsse, dem nur völlig *unabhängige* deutsche Wissenschaftler und Gelehrte angehören sollten, losgelöst von jeder direkten Verbindung mit dem Staat und seinen Organen, die Lage Deutschlands auf den einzelnen Forschungsgebieten — auch im Vergleich zum Ausland — zu klären hätten und die Wege und Ziele aufzeichnen sollten, nach denen man in Deutschland für die Zukunft vorgehen müßte.

Jetzt hat man eine Anzahl bedeutender und hochachtbarer Wissenschaftler gebeten, als eine beratende Kammer im Rahmen des sogenannten Wissenschaftsrates, der in Wirklichkeit nur eine „Clearing-Stelle“ des Verwaltungsabkommens sein sollte, mitzuarbeiten. Aber das ist natürlich nicht die erforderliche ausreichende Unabhängigkeit. Da ist zu viel Querverbindung mit den staatlichen Organen, und da diese nun einmal hauptamtlich sich ihren Aufgaben widmen, die Gelehrten aber ihre Zeit nur neben ihren übrigen Aufgaben zur Verfügung stellen können, ist zwangsläufig die Gefahr gegeben, daß der Staat und damit auch der Dirigismus das Übergewicht erhalten werden.

Man sollte nach wie vor die Forderung aufrechterhalten, daß unabhängig von dem Verwaltungsabkommen zwischen Bund und Ländern und dem entsprechenden Arbeitsstab, der einen anderen Namen als viel zu anspruchsvollen eines „Deutschen Wissenschaftsrates“ erhalten muß, ein echter „Deutscher Forschungsrat“ geschaffen wird; dieser sollte völlig frei und nicht auf Grund von Vorschriften — so kann man ja die bisherigen Wünsche und Vorschläge fast nennen — vom Bundespräsidenten berufen werden. Er sollte für seine eigenen Unkosten einen eigenen Haushalt haben, seine Mitglieder müßten Studienreisen in die ganze Welt nach

eigenem Ermessen antreten können, Gutachter gegen Bezahlung heranziehen können, und sie sollten einmal im Jahr alles, was sie für richtig und notwendig erkennen, unbeeinflusst von jeglichen Kräften von außen, der Nation mitteilen.

Eine solche Einrichtung wird mit der Zeit eine sehr große Kraft werden. Ich vergleiche einen solchen „Deutschen Forschungsrat“ gern mit einer „fleet in being“, einer großen Flotte im fernen Hafen, die allein durch ihr bloßes Dasein entscheidende Wirkung ausübt. Wenn ein solcher Forschungsrat einmal seine Auffassung darlegt, so wird man ihm vielleicht noch nicht folgen; wenn aber zwei- oder dreimal in aufeinanderfolgenden Jahren die bedeutendsten Häupter der unabhängigen Wissenschaft sagen: „das, was notwendig ist, haben Staat und Parlament nicht durchgeführt“, dann wird sich ein Sturm in der Öffentlichkeit erheben und dann wird im Raume der Politik das Notwendige *erzwungen* werden. Auch im Bundestag muß man lernen, daß man sich den echten Problemen der Zeit stellen muß. Hinter den Kapiteln und Titeln der Haushaltsberatungen muß man die großen Fragen aufleuchten lassen. Das Neue, das Schöpferische soll man hervorheben, wenn auch über Altbekanntes sich leichter diskutieren läßt.

Deutsche Parlamente, deutsche Regierungen, laßt eure Forscher nicht allein, die selbstlos für die Zukunft wirken! Sie haben keine Lobbyisten, die für sie in den Wandelgängen herumsitzen, sie haben keine Zeit und sind zu bescheiden, für sich Reklame zu machen — deutsche Politiker, betrachtet es als eine Ehre, für die Gelehrten des deutschen Volkes einzutreten!

Es ist dringend zu hoffen, daß die Auffassung von Freiheit und Würde der Wissenschaft sich durchsetzt, daß der *unabhängige* deutsche Forschungsrat kommt, der dann die geistige Führung im großen Ringen um die Zukunft übernehmen muß und der die notwendigen Voraussetzungen darlegen wird, die erforderlich sind, um das Tor der Zukunft zu öffnen. Aber, so notwendig es ist, daß wir wissen, welches die Aufgaben der deutschen Forschung sind, das Tor selbst kann nur im politischen Kampf wirklich geöffnet werden.

Ich glaube, daß zwei große Gruppen unseres Volkes in diesem Ringen vornehmlich Einfluß nehmen werden. Einmal die arbeitenden Schichten: wer hat eigentlich die Zeche zuerst zu zahlen, wenn es mit unserer Wirtschaft nicht mehr so ist, wie es uns der Höhepunkt der Konjunktur vorgegaukelt hat? Jetzt stellt es sich schon heraus,

die ärmeren Schichten haben die Zeche zuerst zu zahlen. Wenn in der Energiepolitik Fehler gemacht werden, dann legt man Feierschichten ein. Auch der Röhrenarbeiter oder der Hochofenschmann bezahlt für die Fehldispositionen der Wirtschaftspolitik, wenn Werksabteilungen stillgelegt werden. Das wußten die Menschen, die hart an der Arbeit sind, schon vorher — und deshalb haben sie mit einer Bereitwilligkeit, mit einer Aufnahmebereitschaft, die mich persönlich immer wieder auf das tiefste berührt hat, sich zu dem Gedanken der Förderung so hoher Güter wie Forschung und freier Wissenschaft bekennt.

Sie, die Armen, haben von sich aus im Geiste eines Ferdinand Lassalle sich als Partner in dem Bündnis zwischen Arbeiterschaft und Wissenschaft angeboten, und sie haben auch erklärt, daß sie bereit sind, dafür zu opfern. Sie wissen, daß, wenn sie für diese hohen Güter Opfer bringen, sie den großen tragenden geistigen Kräften ihre Referenz erweisen und ihnen Tribut zollen. Sie tun das gern, sie wissen aber auch, daß sie damit den wichtigsten Hebel für die Sicherung ihrer Existenz in Bewegung setzen. Die arbeitenden Schichten sind eine große Kraft, die uns aufrütteln kann aus der Selbstüberheblichkeit der Wirtschaftswunderepode.

Welches ist aber nun die andere Schicht, die zweite große Hoffnung, auf die unser Volk bauen kann, daß das Tor nicht geschlossen bleibt, durch das wir in die kommenden Jahrzehnte hinausgehen müssen?

Diese andere Schicht ist die deutsche Jugend. Sie hat genau wie die arbeitenden Menschen das Gespür, daß sie die Zeche bezahlen muß, wenn wir absinken, wenn wir zurückfallen auf einen unbedeutenden Platz, der weit hinter dem der

führenden Nationen liegt, wenn wir zu einem unterentwickelten Volk werden sollten.

Ein solches Zurückfallen hat es schon häufiger gegeben, das Rad der Geschichte ist schon über manches Volk, das stolz und groß war, hinweggegangen. Die Jugend dieser Länder ist dann zur Auswanderung gezwungen oder verkümmert. Kennen wir nicht alle die Bilder der tränenüberströmten Gesichter der Auswanderer, die zu Schiff vom Hafen Neapel aus Italien verlassen müssen, jenes Süditalien, in dem noch heute gut 40 Prozent der Menschen Analphabeten sind und um das sich jetzt europäische Organisationen als um ein ausgesprochen unterentwickeltes Land bemühen.

Die deutsche Jugend ist an den Problemen der Zukunft interessiert, sie ist aber bei aller Aufgeschlossenheit zugleich auch durchaus nüchtern. Dabei ist es erfreulich, daß auch die deutsche studentische Jugend kritischer und für echte Zusammenhänge interessiert ist. Wer kann dies mehr werten als diejenigen, die vor 1933 in der studentischen Bewegung tätig waren. Damals war ich Bundesvorsitzender des deutschen Republikanischen Studentenbundes. Wenn wir in Berlin zusammenkamen aus den Universitäten und Technischen Hochschulen Deutschlands, dann waren wir uns darüber klar: 80 Prozent der deutschen Studenten standen auf der Seite des kritiklos übernommenen Rechtsradikalismus. Da galt alle Tapferkeit gar nichts. Der Nationalismus in der grauenhaftesten Form triumphierte, seine Vorkämpfer waren Studenten. Das entsprach an sich gar nicht der studentischen Tradition, deren Fahne ja in Wirklichkeit die Fahne der Freiheit, nämlich „Schwarz-Rot-Gold“ war. Aber der Radikalismus hatte die Jugend mit Hilfe eines Rattenfängers eingefangen.

Wie bedeutungsvoll, daß diese heute anders ist. Heute kann man vor Hunderten oder vor Tausenden Studenten in der Aula in Göttingen oder in Köln, vor weiten Kreisen der Studentenschaft in Kiel, in Berlin oder in Freiburg sprechen. Die heute so viel kritischere und nüchternere Jugend erkennt, wo ehrliche und gute Kräfte am Werk sind und selbstlos dafür eintreten, daß uns die Zukunft nicht verlorengeht.

Jetzt die Jugend für staatspolitischen Aufbau zu gewinnen, ist ein Faktor von gar nicht zu überschätzender politischer Tragweite für die kommenden Jahre. Sind wir denn so ganz sicher, daß beim Absinken der Konjunktur die Wähler alle bei den demokratischen Parteien bleiben werden? Ich will hier nicht den Teufel an die Wand malen, die Geschichte wiederholt sich nicht. Aber sah nicht das Jahr 1929 den größten Wahlsieg der republikanischen und demokratischen Parteien in der Weimarer Zeit? Wie schnell kamen die Jahre 1931, 1932, von 1933 gar nicht zu reden. Wie schnell kann sich nach einer Hochkonjunktur Enttäuschung breitmachen und wie schnell ist dann der Nationalismus bei der Hand. Man muß den Nationalismus als einen der schauerhaftesten Instinkte der modernen Gesellschaft ablehnen, aber für einen aufrichtigen Patriotismus sein, wenn dieser durch Selbstlosigkeit dem Ganzen dienen will.

Seien wir uns darüber klar, daß die Stunde für Deutschland spät ist. Es ist eben nicht so einfach, hinter dem abgefahrenen D-Zug der technischen Entwicklung herzulaufen. Meistens fährt er schneller davon, als man denkt.

Nichts wäre gefährlicher, als die öffentliche Meinung in einen Optimismus hineinzuwiegen, daß, wenn Forderungen, wie sie vom Verfasser öfter erhoben wurden — 500 Millionen DM jährlich mehr für die Forschung, 500 Millionen DM jährlich mehr für Ausbildungsstätten, 500 Millionen DM jährlich für Stipendien — erfüllt sind, dann schon alles getan ist und wir den Anschluß an die Welt sicher schaffen. Wenn aber diese Forderungen weiterhin abgelehnt werden, dann werden wir ganz sicher gar nichts mehr schaffen. Vor einiger Zeit hieß es, die Forderungen von ein paar hundert Millionen für die Studentenstipendien fänden im freien Europa kein Gegenstück, sondern nur im kommunistischen Osten. In Wirklichkeit stammen die Zahlen nachweislich aus England. Diese Nation hat für 70 Prozent ihrer Studenten durch die seinerzeitigen Entscheidungen der Labour-Regierung Stipendien zur Verfügung gestellt, und die konservative Regierung hat noch 130 Millionen DM jährlich dazugegeben.

Es ist spät für Entscheidungen, aber wer von uns mag es auf sich nehmen zu sagen, es ist zu spät? Wir treten nach den Jahren eines etwas hektischen Aufbaues jetzt ein in Jahre der Bewährung. Hoffen wir, daß uns die Influenza, die die amerikanische Wirtschaft vorübergehend schwächt — nur noch 55 Prozent der Stahlkapazität sind genützt, die Arbeitslosenzahl ist 5 Millionen, die Autoindustrie in offener Krise — nicht ansteckt. Aber auch ohne das ist die Lage nicht einfach. Da hilft nur eines: den Blick nach vorn zu richten und mutig über den Graben zu springen.

Das Tor zur Zukunft muß geöffnet werden.

STAATSBÜRGERLICHE BILDUNGSSTELLE DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN

Leiter: Regierungsdirektor Wilhelm Mutall

Die „Staatsbürgerliche Bildungsstelle des Landes Nordrhein-Westfalen“ ist eine staatliche Einrichtung. Organisatorisch gehört sie zur Staatskanzlei. Sie ist vom Ministerpräsidenten unter Zustimmung des Landtags von Nordrhein-Westfalen geschaffen worden, um auf überparteilicher Ebene für politische Bildung und staatspolitisch wichtige Anliegen Interesse und Verantwortungsbewußtsein zu wecken.

Aufgaben:

- 1. den demokratischen Gedanken zu verbreiten und zu festigen,
- 2. das staatsbürgerliche Verantwortungsbewußtsein zu wecken und zu stärken,
- 3. die Bestrebungen zur Wiedervereinigung Deutschlands und zum europäischen Zusammenschluß zu fördern,
- 4. die Bedeutung der Länder und der bundesstaatlichen Verfassung der Bundesrepublik bewußt zu machen,
- 5. das Heimatgefühl zu vertiefen und das Verständnis für die besonderen Aufgaben und Probleme des Landes Nordrhein-Westfalen zu wecken.

Arbeitsmittel:

Um diese Aufgaben erfüllen zu können, bedient sich die Staatsbürgerliche Bildungsstelle folgender Arbeitsmittel:

- Tegungen:** Eigene Modelltagungen mit den Bildungsreferenten der Verbände, Organisationen und Institute oder spezieller Bereiche sollen Beispiele vermitteln für eine staatsbürgerliche Bildungs- und Erziehungsrbeit im Sinne der Aufgaben der Staatsbürgerlichen Bildungsstelle.
- Unterstützt** werden weiterhin die vorgenannten Einrichtungen durch materielle und ideelle Hilfe, wenn diese auf ihren Tagungen die Ziele der Staatsbürgerlichen Bildungsstelle im Rahmen der eigenen Verbandsarbeit in intensiver Form integrieren und eine gründliche Nachbereitung dieser Thematik gewährleisten.
- Veröffentlichungen:** Anregungen und Unterlagen für die der Staatsbürgerlichen Bildungsstelle aufgabene Thematik werden durch Publikationen im Umfang von etwa 30 bis 50 Seiten gegeben. Ab Mai erscheint eine eigene Schriftenreihe.
- Filme und Dia-Reihen:** Bei der Durchführung der Aufgaben der Staatsbürgerlichen Bildungsstelle erweist sich immer stärker die Bedeutung der optischen Hilfsmittel in Gestalt von Dia-Reihen, Tonbändern und Filmen. Die Staatsbürgerliche Bildungsstelle verfügt über mehr als 100 Filmkopien, deren Titel in einem geordneten Filmverzeichnis nachzulesen sind. Filme und Dia-Reihen können kostenfrei entliehen werden.
- Mit dem Aufbau von Farb-Dia-Reihen** zur staatsbürgerlichen Thematik des Landes und mit der Schaffung eines Archivs zur jüngeren Zeitgeschichte in Form von Lautdokumenten und Filmbeispielen aus den Jahren 1930-1950 ist begonnen worden.

Die Staatsbürgerliche Bildungsstelle steht allen Interessenten gern für Auskunft und Rat zur Verfügung. Zuschriften sind zu richten an die „Staatsbürgerliche Bildungsstelle des Landes Nordrhein-Westfalen“, Düsseldorf, Elisabethstraße 5 (Staatskanzlei).

DK 621.398.969 : 526

FORSCHUNGSBERICHTE
DES WIRTSCHAFTS- UND VERKEHRSMINISTERIUMS
NORDRHEIN-WESTFALEN

STAT

Herausgegeben von Staatssekretär Prof. Dr. h. c. Dr. E. h. Leo Brandt

Bericht Nr. 522

Dr.-Ing. Joachim Lorentz

Dr.-Ing. Karlheinz Brocks

Elektrische Meßverfahren in der Geodäsie



WESTDEUTSCHER VERLAG / KÖLN UND OPLADEN

STAT

DK 621.396.969 : 526

**FORSCHUNGSBERICHTE
DES WIRTSCHAFTS- UND VERKEHRSMINISTERIUMS
NORDRHEIN-WESTFALEN**

Herausgegeben von Staatssekretär Prof. Dr. h. c. Dr. E. h. Leo Brandt

Bericht Nr. 522

Dr.-Ing. Joachim Lorentz

Dr.-Ing. Karlheinz Brocks

Elektrische Meßverfahren in der Geodäsie

Als Manuskript gedruckt



WESTDEUTSCHER VERLAG / KÖLN UND OPLADEN

1958

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-WestfalenG l i e d e r u n g

1. Einführung	S.	5
2. Die Lichtgeschwindigkeit	S.	6
2.1 Optische Bestimmungsmethoden	S.	6
2.2 Optisch-elektrische Bestimmungsmethoden	S.	7
2.3 Elektrische Bestimmungsmethoden	S.	7
2.4 Mittelwerte	S.	8
2.5 Die Lichtgeschwindigkeit in der Atmosphäre	S.	8
2.6 Zusammenfassung	S.	10
3. Die Genauigkeit in der Geodäsie mit klassischen Methoden . .	S.	10
4. Elektrische Verfahren in der geodätischen Streckenmessung .	S.	11
4.1 Verfahren mit moduliertem Licht	S.	11
4.2 Phasendifferenzverfahren	S.	12
4.3 Laufzeitverfahren	S.	16
4.4 Zusammenfassung der bisherigen Erfahrungen	S.	21
5. Das Funkmeßverfahren in der geodätischen Streckenmessung . .	S.	22
5.1 Das Funkmeßverfahren	S.	22
5.2 Das Funkmeßgerät	S.	22
5.3 Die Arbeitsbedingungen eines Funkmeßgerätes in der Geodäsie	S.	25
5.4 Das Funkmeßgerät für die geodätische Messung	S.	39
5.5 Zusammenfassung	S.	47
6. Ausgeführte Streckenmessungen mit dem Funkmeßverfahren . . .	S.	47
6.1 Versuchsgerät und Gelände	S.	47
6.2 Genauigkeit der Streckenmessung	S.	50
6.3 Streckenmarkierung durch Reflektoren	S.	53
6.4 Praktische Erfahrungen	S.	64
7. Formelzeichen und Abkürzungen	S.	65
Anhang 1 (Tabelle 1 bis 5): Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit	S.	69
Anhang 2 Kurze Beschreibung der Meßverfahren	S.	74
Anhang 3 Schrifttum	S.	82

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

Übersicht

Es wird ein Überblick über die bisherige Anwendung elektrischer Meßverfahren in der Geodäsie gegeben und die Einsatzmöglichkeit elektrischer Ortungsverfahren diskutiert. Der derzeitige Stand der Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit wird beschrieben und über eigene Versuche über die Eignung des Funkmeßverfahrens für die geodätische Streckenmessung berichtet. Es ergibt sich, daß unter Ausnutzung der Möglichkeiten der elektronischen Zeitmessung und bei Beschränkung auf optisch übersehbare mittlere Strecken (etwa 300 bis 5000 m) mit einem Funkmeßgerät einfacher Ausführung die in der Geodäsie geforderte Genauigkeit zu erreichen ist. Ein ausführliches Literaturverzeichnis über dieses Sachgebiet ist angefügt.

Dieser Bericht wurde im Februar 1956 abgeschlossen.

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

1. Einführung

In der Geodäsie werden Entfernungen durch Abstandsmessungen und Winkelbestimmung ermittelt.

Abgesehen von der Vermessung der Basen für die Triangulation erster Ordnung ist die Abstandsmessung auf Strecken beschränkt, deren Endpunkte in Sichtweite liegen, die also höchstens 500 m lang sind.

Alle übrigen Strecken werden durch Winkelvermessung allein oder durch eine Kombination von Winkel- und Längenmessung (Polygonzüge) bestimmt. Dabei werden - von einer genau vermessenen Bezugsstrecke (Basis) ausgehend - die Entfernungen über trigonometrische Zusammenhänge berechnet. Diese Methoden haben den Vorzug einer beträchtlichen Genauigkeit (die jedoch von der Basislänge abhängt) und sind meßtechnisch einfach. Sie fordern aber einen erheblichen Zeitaufwand und verlangen zudem ausreichende optische Sicht.

Man ist daher bemüht, andere Methoden der Entfernungsbestimmung für die Geodäsie nutzbar zu machen. Grundsätzlich lassen sich Entfernungen aus der Laufzeit und aus Phasendifferenzen akustischer oder elektromagnetischer Wellen bestimmen [10]. Die Verwendung akustischer Wellen über größere Distanzen ist wegen der hohen Dämpfung bei einer Ausbreitung durch die Luft nicht möglich [3]. Dagegen sind Frequenzen des elektromagnetischen Spektrums für Entfernungsmessungen geeignet.

Deutsche und schwedische Arbeiten der letzten Jahre berichten über die Streckenmessung durch Messung der Laufzeit oder der Modulationsphase am modulierten Licht. Dieses Verfahren ist sehr genau, zeigt aber wie die klassischen Methoden den Nachteil, daß Gelände und Tageszeit eine einwandfreie optische Sicht geben müssen.

In neuerer Zeit wird - vor allem in englischen, kanadischen und australischen Arbeiten der vergangenen Jahre - über Vermessungen berichtet, die sich der während des Krieges und der Nachkriegsjahre bekanntgewordenen Navigationsverfahren der Luftfahrt bedienen. Hochfrequenzphasen- und Laufzeitnavigationssysteme, wie das Shoran- und das DECCA-Verfahren, werden vor allem in der Photogrammetrie ¹⁾ und bei der Vermessung von

1. Der Einsatz elektrischer Verfahren in der Photogrammetrie wird hier nicht diskutiert, doch enthält das Schriftumsverzeichnis unter [86] bis [116] die bisher erschienenen Arbeiten

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

unerschlossenen Gebieten angewandt. Die Messung kann nicht durch schlechte oder fehlende Sicht behindert werden und zeigt eine beachtliche Genauigkeit. Nachteilig ist aber, daß mehrere Stationen für die Messung erforderlich sind, was den apparativen Aufwand kompliziert.

Es liegt nahe, das Radargerät - das die Laufzeit von Hochfrequenzimpulsen zur Distanzbestimmung auswertet - für die geodätische Streckenvermessung einzusetzen, doch sind darüber bisher noch keine praktischen Erfahrungen bekannt geworden. Einmal genügt die Präzision der üblichen Geräte nicht für eine geodätische Entfernungsbestimmung, zum anderen ist es schwierig, eine Meßstrecke in geeigneter Form im Gelände zu markieren.

Der vorliegende Bericht gibt zunächst einen Überblick über den gegenwärtigen Stand der Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit und über bisherige Anwendungen elektrischer Meßverfahren in der Geodäsie. Sodann wird über eigene Untersuchungen über die Messung von Strecken zwischen 100 und 5000 m mit dem Funkmeßverfahren berichtet und die Möglichkeit von apparativen und verfahrenstechnischen Verbesserungen diskutiert.

2. Die Lichtgeschwindigkeit

Alle Funkmeßverfahren sind Laufzeit- oder Phasenmessungen an elektromagnetischen Wellen. Die Genauigkeit der elektrischen Entfernungsmessung findet daher ihre natürliche Grenze in der Genauigkeit, mit der sich die "Lichtgeschwindigkeit" bestimmen läßt. Da keine Frequenzabhängigkeit der Geschwindigkeit c_0 elektromagnetischer Wellen im Vakuum festgestellt werden konnte, gelten die für die Lichtgeschwindigkeit ermittelten Werte c_0 für das gesamte elektromagnetische Spektrum [3]. Es sind verschiedene Bestimmungsmethoden bekannt.

2.1 Optische Bestimmungsmethoden (Anhang 1, Tabelle 1)

Die optischen Verfahren benutzen in Verbesserung der klassischen Methoden von FIZEAU (rotierendes Zahnrad) und FOUCAULT (rotierender Spiegel) das sichtbare Licht für die Bestimmung von c_0 . Die Durchschnittswerte c_0 der einzelnen Beobachter weichen jedoch erheblich voneinander ab und zeigen in den Einzelergebnissen große mittlere Fehler [19], [20], [21], [22], [23], [63]. So stellten MICHELSON und Mitarbeiter bei ihren Messungen nicht erklärbare Fehler von über 30 km sec^{-1} bei den Tagesdurchschnittswerten für c_0 fest [61], [68] und fanden zudem, daß ihre Versuchsstrecke von ungefähr

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

1 Meile Länge in jedem Jahr um 6,5 mm und bei einem leichten Erdbeben in der Nachbarschaft plötzlich um 8 mm abnahm [61].

2.2 Optisch-elektrische Bestimmungsmethoden (Anhang 1, Tabelle 2)

Die optisch-elektrischen Methoden benutzen für die Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit c_0 ebenfalls den sichtbaren Bereich des Lichtes, ersetzen aber die mechanische Anordnung zur Unterbrechung des Lichtweges durch eine elektrische (Kerrzelle, Quarz). Die Meßstrecken sind kürzer, die Ergebnisse der einzelnen Beobachter stimmen besser überein, die mittleren Fehler sind geringer [24 bis 32], [63]. Die besten Ergebnisse erzielte BERGSTRAND mit einer Weiterentwicklung der Methoden von HÜTTEL und MITTELSTÄDT [119], [121], [122], [123], [124], [125].

2.3 Elektrische Bestimmungsmethoden (Anhang 1, Tabelle 3 und 4)

Es liegt nahe, die Lichtgeschwindigkeit auch mit dem Funkmeßverfahren zu bestimmen. Hierbei geht man - in Umkehrung des üblichen Verfahrens - von einer auf anderem Wege genau vermessenen Strecke aus. Bis auf die Arbeiten von ASLAKSON befriedigen die Ergebnisse jedoch nicht. Die Genauigkeit der Verfahren und Geräte in der gegebenen Form ist für die Aufgabe nicht ausreichend, die Zahl der Messungen zu gering [50], [51], [53], [54], [58], [59].

Bei der Überprüfung geodätischer Basen mit dem Shoran-Verfahren konnte aber auf diesem Wege (über einen mit der Länge der Strecke wachsenden systematischen Fehler) festgestellt werden, daß allgemein ein zu niedriger Wert der Lichtgeschwindigkeit c_0 den Auswertungen zugrunde gelegt wird. Ein von ASLAKSON aus diesem Fehler berechneter höherer Wert stimmt auffallend mit den Werten von BOL, FROOME, ESSEN und BERGSTRAND überein [33], [34], [35], [36], [37], [77].

Überprüfung geodätischer Basen mit dem Shoran-Verfahren [35]

Länge der Basis in Meilen	Abweichungen der mit dem Shoran-Verfahren erhaltenen Werte hiervon bei Benutzung von	
	$c_0 = 299776 \text{ km sec}^{-1}$ (BIRGE)	$c_0 = 299792,4 \text{ km sec}^{-1}$ (ASLAKSON)
139,0629	- 0,0059	+ 0,0017
208,7428	- 0,0112	+ 0,0001
235,6710	- 0,0126	+ 0,0002

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

BOL [39], [40] und ESSEN [41] bis [47], [52] bestimmen auf anderem Wege die Lichtgeschwindigkeit aus der Resonanzfrequenz von Mikrowellenresonatoren bekannter geometrischer Abmessungen, FROOME [48], [49], [52] hingegen mit einem Mikrowellen-Interferometer. Die erhaltenen Werte zeigen nur geringe Unterschiede.

2.4 Mittelwerte (Anhang 1, Tabelle 5)

Aus den Ergebnissen der einzelnen Beobachter sind gelegentlich Durchschnittswerte berechnet worden. Hierzu wird der einzelnen c_0 -Bestimmung ein relatives Gewicht zugeordnet, das sich aus einer Abschätzung der Unsicherheit ergibt, mit der die Bestimmungsgrößen, die Geräteparameter, Korrekturfaktoren und Auswertbeziehungen behaftet sind [67].

Bislang wurde der von BIRGE berechnete Durchschnittswert $c_0 = 299\,776$ km sec^{-1} benutzt [61], [65]. Da jedoch die neuen c_0 -Werte von ESSEN, FROOME, BERGSTRAND und ASLAKSON um 16 bis 18 km sec^{-1} höher liegen, wurden in den letzten Jahren neue Mittelwerte errechnet (STILLE, ESSEN, BEARDEN-WATTS), die nur geringfügig voneinander abweichen, aber noch um 2 bis 4 km sec^{-1} unter den oben genannten neuen Werten liegen, weil in ihre Berechnung die alten Angaben einbezogen sind.

Für die Richtigkeit eines höheren Wertes der Lichtgeschwindigkeit spricht auch, daß bei den Shoranmessungen 1945 in Italien der mittlere Fehler von ± 45 m auf ± 5 m zurückging, wenn bei den Berechnungen der Strecken für c_0 der Wert $299\,793$ km sec^{-1} statt $299\,776$ km sec^{-1} benutzt wurde [62], [74], [77], [181], [237].

2.5 Die Lichtgeschwindigkeit in der Atmosphäre

Bei der Wellenausbreitung in der Atmosphäre ändert sich die Lichtgeschwindigkeit in der Form

$$(1) \quad c = \frac{c_0}{n}$$

Hierbei bedeuten:

- c = die Lichtgeschwindigkeit in der Atmosphäre,
- c_0 = die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum,
- n = den Brechungsindex der Atmosphäre.

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

Für den Brechungsindex n der Atmosphäre gilt: [240]

$$(2) \quad (n - 1) \cdot 10^6 = a \frac{p}{T} - b \frac{e}{T} + c \frac{e}{T^2}$$

Hierbei bedeuten:

- n = Brechungsindex der Atmosphäre
- p = Luftdruck in Millibar
- T = Temperatur in Grad Kelvin
- e = Partialdruck des Wasserdampfes in der Atmosphäre in Millibar
- a, b, c = Konstanten, für die Zahlenwerte aus vier verschiedenen Arbeiten vorliegen:

	a	b	c
US Air Force	76,43	8,925	$279,8 \cdot 10^{-6}$
Nat. Bureau of Standards	79,00	0	$289,2 \cdot 10^{-6}$
ASLAKSON	77,54	9,660	$283,2 \cdot 10^{-6}$
ESSEN	77,62	12,92	$284,2 \cdot 10^{-6}$

Ähnlich gilt bei der Anwesenheit von Suspensionen in der Gestalt meteorologischer Partikel wie Hagel, Schnee, Regen oder Nebel für den Brechungsindex:

$$(3) \quad (n - 1) = \frac{3NV_p}{2} \cdot \frac{\epsilon - \epsilon_L}{\epsilon + 2\epsilon_L}$$

N = Partikelzahl
 V_p = Partikelvolumen
 ϵ = DK des Wassers (Eis)
 ϵ_L = DK der Luft

Diese Abweichung ist im allgemeinen 10^{-6} und geringer [56].

Die Lichtgeschwindigkeit c ändert sich also - wenn auch nur gering - im Maße der meteorologischen Veränderung der durchlaufenen Atmosphäre. Genaue Entfernungsmessungen sind daher nach Luftdruck p , Feuchtigkeit e und Temperatur T zu korrigieren. Da sich die meteorologischen Bedingungen sowohl über der Zeit als auch über dem Weg ändern, sind für eine solche Korrektur die meteorologischen Daten gleichzeitig mit der Messung und nicht in zu großen Abständen entlang der Meßstrecke zu bestimmen. Wird vereinfachend ein Durchschnittswert für eine Standardatmosphäre benutzt, so ist mit einem Fehler von $4 \cdot 10^{-5}$ zu rechnen [228]. Voraussetzung

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

hierfür ist allerdings, daß Dispersionserscheinungen - d.h. Frequenzabhängigkeit des Brechungsindex n - vernachlässigt werden können, was mit guter Näherung für Wellenlängen über 1 cm möglich ist [228].

2.6 Zusammenfassung

Seit über 100 Jahren ist man bemüht, die Lichtgeschwindigkeit zu bestimmen, zunächst mit optischen Methoden, in neuerer Zeit durch Resonanz- und Laufzeitmessungen an längeren elektromagnetischen Wellen. Die erreichte Genauigkeit der Bestimmung von c_0 liegt in der Größenordnung 10^{-6} . Der derzeit wahrscheinlichste Wert für c_0 dürfte 299 793 km sec⁻¹ sein.

Bei der Wellenausbreitung in der Atmosphäre ist die Lichtgeschwindigkeit c von diesem Wert etwas verschieden und schwankt in Abhängigkeit von den jeweiligen meteorologischen Verhältnissen. Es ist aber eine Korrektur möglich (vgl. 5.361).

3. Die Genauigkeit der Geodäsie mit klassischen Methoden

Die geodätischen Basen der Triangulation 1. Ordnung werden mit einer mittleren relativen Genauigkeit von $2 \cdot 10^{-6}$ und besser bestimmt [8].

Die relative Genauigkeit der aus den gemessenen Winkeln berechneten Dreieckseiten beträgt nach einer empirischen Formel:

$$(4) \quad 1 : 20\,000 \sqrt{M}$$

M = Dreieckseite in englischen Landmeilen.

Praktisch werden relative Genauigkeiten bis etwa $5 \cdot 10^{-6}$ erhalten [1], [9].

In den nachfolgenden Ordnungen der Triangulation werden die Fehler etwas größer, so daß in der 3. und 4. Ordnung (Länge der Dreieckseiten 2 bis 3 km) mit einer mittleren relativen Genauigkeit von $2 \cdot 10^{-5}$ zu rechnen ist. Hier beginnt bereits die Anwendung der großseitigen Polygonzüge, die nach Möglichkeit die Triangulation ersetzen sollen und bei denen eine mittlere relative Genauigkeit von $2 \cdot 10^{-5}$ angestrebt wird [18].

Für Gerüstpolygonzüge darf der amtlich zulässige Abschlußlängenfehler unter günstigen Umständen:

$$(5) \quad \delta z_1 = \frac{2}{3} (0,0027z + 0,00030z + 0,05) m$$

z = Länge der Meßstrecke in Metern

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

nicht überschreiten [17]. Bei einem mittleren Fehler von $\frac{\delta z_1}{3}$ beträgt die auch in der Praxis erreichte mittlere relative Genauigkeit 10^{-4} [8].

Für Längenmessungen (bis höchstens 500 m) beträgt die amtliche zulässige Fehlergrenze δz_2 unter günstigen Verhältnissen:

$$(6) \quad \delta z_2 = (0,0087z + 0,00030z + 0,05) m$$

Je nach den Geländeverhältnissen schwanken die in der Praxis erreichten mittleren relativen Genauigkeiten zwischen $3 \cdot 10^{-4}$ und 10^{-5} . Auf glatter Landstraße oder städtischen Straßen werden mittlere relative Genauigkeiten von $3 \cdot 10^{-5}$ erreicht [8].

4. Elektrische Verfahren in der geodätischen Streckenmessung4.1 Verfahren mit moduliertem Licht4.11 BERGSTRAND-Verfahren (kurze Beschreibung des Verfahrens im Anhang 2)

Nach den Erfahrungen von BERGSTRAND lassen sich bei guter Sicht mit dem nach seinem Verfahren entwickelten "Geodimeter" Strecken bis 30 km Länge mit einer mittleren relativen Genauigkeit von etwa $2 \cdot 10^{-6}$ bestimmen, wenn Druck, Feuchtigkeit und Temperatur der Atmosphäre über die Meßstrecke bekannt sind [70], [120], [124], [126], [129], [132], [133].

Bei der Überprüfung geodätischer Basen in Amerika wurden relative Genauigkeiten von 2 bis $3 \cdot 10^{-6}$ erreicht [79], [130]. Verzichtet man auf die genaue Bestimmung von c und benutzt einen Durchschnittswert, so ist noch immer mit einer mittleren relativen Genauigkeit von 10^{-5} zu rechnen [72].

4.12 Das EM_c-Gerät (Institut für angewandte Geodäsie, Frankfurt/Main)

In dem EM_c-Gerät wird das Licht ebenfalls mit Hilfe einer Kerrzelle hochfrequent moduliert und die Lichtschleife durch eine Variation der Modulationsfrequenz zwischen 20 und 21 MHz ersetzt. Das Gerät ist kleiner als der BERGSTRAND-Geodimeter. Es erreicht bei einem Meßbereich zwischen einigen Metern und Kilometern eine absolute Genauigkeit von einigen Zentimetern. Angaben über praktische Messungen im Gelände liegen bislang nicht vor [72], [79], [84], [128].

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

4.13 Terrameter nach BJERHAMMER

In dem Terrameter nach BJERHAMMER wird anstelle der Kerrzelle der die Modulationsfrequenz stabilisierende Quarz gleichzeitig zur Modulation des Lichtes benutzt. Bislang liegen nur Laboratoriumsversuche vor. Angaben über die Meßgenauigkeit fehlen [127].

4.14 Zusammenfassung

Die beschriebenen optischen Verfahren gestatten die Messung in einem Vorgang über längere Strecken als bisher. Da die Methoden gute optische Sicht voraussetzen, ist ihre Anwendung zeitlich und örtlich beschränkt.

4.2 Phasendifferenz-Verfahren

Mehrere in größerer Entfernung voneinander aufgestellte und synchron arbeitende Stationen S senden entweder unmodulierte (Systeme ohne Impulsmodulation) oder getastete (Systeme mit Impulsmodulation) elektromagnetische Wellen aus (Abb. 1). Die Lage des Ortungspunktes X wird aus der zwischen den Signalen bestehenden Laufzeitdifferenz Δt_L , die der Laufwegdifferenz Δd verhältnismäßig ist, bestimmt.

$$(7) \quad \Delta t_L = \frac{d_2 - d_1}{c} = \frac{\Delta d}{c}$$

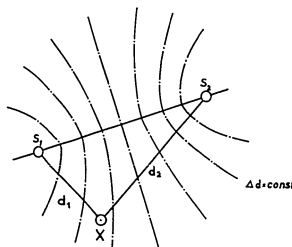


Abbildung 1
Phasendifferenzverfahren

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

Die Orte gleicher Laufwegdifferenzen liegen auf Hyperbeln (Hyperbelverfahren) [15], [16]. Besonders ausgezeichnete Hyperbeln sind in Karten eingetragen und gestatten die Umrechnung des Ortungsergebnisses in geographische Koordinaten.

Bei Verfahren mit Impulsmodulation (Abb. 2a) wird der Ortungspunkt aus dem zeitlichen Abstand der Impulse mit Hilfe eines geeichten Zeitnormals bestimmt.

Bei den Verfahren ohne Impulsmodulation (Abb. 2b) wird die Phasendifferenz zwischen den Signalen für die Ortungsbestimmung benutzt.

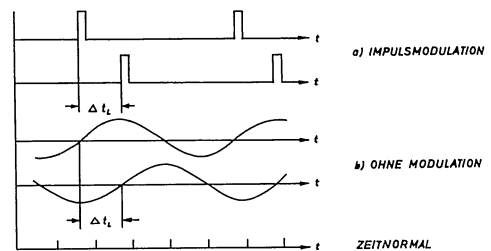


Abbildung 2
Phasendifferenzverfahren

4.21 Verfahren mit Impulsmodulation (LORAN) [136]

Das für die Langstreckennavigation entwickelte LORAN-Verfahren eignet sich wie die astronomische Standortbestimmung wegen der geringen Genauigkeit (0,5 bis 1 sm) in der Vermessung nur für Standortbestimmungen bei Tiefseelotungen auf hoher See [5], [134] bis [137]. LORAN ist aber im Gegensatz zu der astronomischen Bestimmung von der Sicht unabhängig.

4.22 Verfahren ohne Impulsmodulation

4.221 DECCA-Verfahren

Das DECCA-Verfahren ist im Anhang 2 beschrieben und eignet sich für die Streckenvermessung mittlerer Genauigkeit. Nachteilig ist, daß in dem

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

gewählten Frequenzbereich die Leitfähigkeit des Geländes stark die Ausbreitungsgeschwindigkeit der für die Messung benutzten Bodenwelle beeinflusst. Während die Leitfähigkeit bei Wasser mit guter Genauigkeit als konstant anzusehen ist, ändert sie sich bei festem Land je nach den Bodenverhältnissen ständig.

Es ist schwierig, den resultierenden Einfluß der ständig wechselnden Leitfähigkeit auf die mittlere Phasengeschwindigkeit entlang der Meßstrecke zu erfassen [144 bis 147]. Daher ergeben sich bei Seevermessungen (englische und holländische DECCA-Ketten) in 68 % aller Fälle Genauigkeiten von 0,02 der jeweiligen Streifenbreite, bei den gleichzeitig durchgeführten Landvermessungen aber nur Genauigkeiten von 0,05 bis 0,06 der Streifenbreite [76], [151]. Nach VERSTELLE [151] beträgt der Fehler in 68 % aller Fälle (Gausverteilung) für die Standortbestimmung

$$(8) \quad \delta_{68} = \frac{\sqrt{k^2 \epsilon_{rot} + k^2 \epsilon_{grün}}}{\sin \phi_H}$$

mit k_{rot} und $k_{grün}$ als den Fehlern in der Bestimmung der beiden sich unter dem Winkel ϕ_H schneidenden Hyperbeln. In 95 % der Fälle ist der Fehler durch den doppelten Wert gegeben. Für das Beispiel:

Streifenbreite rot 600 m
 Streifenbreite grün 700 m
 $k = 0,02 \cdot \text{Streifenbreite}$
 $\phi_H = 85^\circ$

sind die Fehler $\delta_{68} = 18,7$ m und $\delta_{95} = 37,4$ m.

Alle Genauigkeitsangaben gelten für Tagesmessungen. Bei Eintritt der Dämmerung wird die Bestimmungsgenauigkeit durch den Einfall der Raumbwelle wesentlich eingeschränkt [15].

Nach [152] ist es in den letzten Jahren gelungen, die Genauigkeit der Landvermessung auch auf 0,02 der Streifenbreite zu erhöhen.

Die absolute Meßgenauigkeit ist darüber hinaus von der Lage der Meßstrecke zu einer Basis der DECCA-Kette abhängig, da mit Entfernung von der Basis die Streifenbreite zunimmt. Die genauesten Ergebnisse (1 bis $2 \cdot 10^{-5}$) wurden daher unmittelbar auf der Basis erhalten (Bestimmung der Basislängen der dänischen DECCA-Kette) [153].

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

Für Vermessungen in ungünstig versorgten Bereichen kommen bewegliche DECCA-Ketten geringerer Leistung zum Einsatz. Sie sind den ortsfesten Ketten ähnlich, gestatten aber noch Ablesungen von 10^{-3} der Streifenbreite [142], [143].

Neuere Entwicklungen der DECCA arbeiten entweder mit zwei ortsfesten Nebensendern und einer beweglichen Leitstation (Küste und Schiff bei dem "Two-Range-DECCA" mit $5 \cdot 10^{-5}$ Genauigkeit) oder mit zwei Senderpaaren aus je einem Leit- und einem Nebensender (Short-Base-DECCA) mit einer Genauigkeit von 10^{-3} . Die Senderpaare mit einer Basis von 10 km werden etwa 100 km voneinander entfernt aufgestellt [79], [155], [156], [157].

4.222 RANA-(LORAC-)Verfahren

RANA oder LORAC [163] arbeitet mit zwei ortsfesten Stationen im Frequenzbereich um 1,6 MHz, die auf mehreren benachbarten Frequenzen senden. Im Empfänger am Ortungspunkt X sind für diese Frequenzen fest eingestellte Kanäle eingerichtet, über die sie zu Schwebungen zusammengeführt und aus denen Hyperbelsysteme mit einer in weiten Grenzen variablen Streifenbreite (50 bis 20 000 m) gewonnen werden. Für die Verfahren wird eine Genauigkeit von ± 1 m auf 500 km angegeben [159 bis 162]. Bei Versuchen des französischen Hydrographischen Instituts mit einer an der Seine-Bucht aufgestellten Versuchskette sind über Wasser allerdings nur relative Genauigkeiten von $2 \cdot 10^{-4}$ erreicht worden [162].

4.223 RAYDIST-Verfahren

Das amerikanische RAYDIST-Verfahren ähnelt in seinem Aufbau dem RANA-Verfahren. Es wurde bisher für See- und Küstenvermessungen und für Standortbestimmungen eingesetzt [70], [164], [165], [168 bis 171], [173]. Strecken über Wasser etwa entlang der Basis wurden mit einem mittleren Fehler von 1 Fuß pro Meile entsprechend einer mittleren relativen Genauigkeit von ungefähr $2 \cdot 10^{-4}$ vermessen [167], [172].

Messungen über kürzere Strecken zwischen etwa 0,8 und 5 km ergaben einen von der Streckenlänge unabhängigen Fehler von etwa ± 1 m [172]. Die Geschwindigkeit von Seeschiffen ("United States" 1952) konnte mit diesem Verfahren mit einer mittleren relativen Genauigkeit von $1 \cdot 10^{-4}$ festgestellt werden [166].

4.23 Zusammenfassung

Hyperbelverfahren zeigen den Vorteil einfacher Bedienung und geringen apparativen Aufwandes bei Messungen im Bereich bestehender Senderketten. Nachteilig sind: die Abhängigkeit der Meßgenauigkeit von der Lage der zu messenden Strecke relativ zur Basis der Ketten, die Unsicherheit bei der Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit über Böden wechselnder Leitfähigkeit und die Beschränkung genauer Messungen auf die Tageszeit. Verkleinerung der Streifenbreite würde die Meßgenauigkeit erhöhen.

Die gegenwärtig erreichte Genauigkeit genügt den Ansprüchen der Küsten- und Seevermessung. Hier haben sich die Verfahren durchgesetzt und werden mit Erfolg verwandt [142], [157], [158]. Für Landvermessungen genügen die bisher erreichten Genauigkeiten nicht.

4.3 Laufzeitverfahren

Ein Sender S am Anfang der zu messenden Strecke z (Abb. 3) sendet hochfrequente impulsgetastete Signale der Dauer T mit der Folgefrequenz F aus, die von einem am Ende der Strecke stehenden Reflektor R zurückgeworfen und am Ausgangspunkt von einem Empfänger E wieder aufgenommen werden. Die Länge der Meßstrecke ergibt sich aus der halben Laufzeit t_L der Impulse:

$$(9) \quad z = \frac{c \cdot t_L}{2}$$

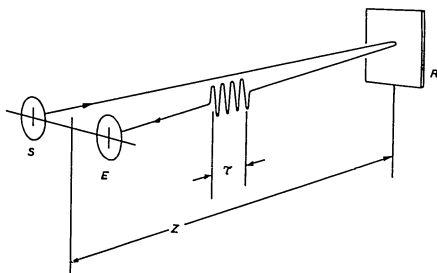


Abbildung 3
Laufzeitverfahren (Prinzip)

Bei kürzeren Strecken genügen zum Signalrückwurf passive Reflektoren, bei längeren Strecken werden die Impulse durch eine Kombination: Empfänger E, Verstärker V, Sender S nach bekannter innerer Verzögerung verstärkt zurückgestrahlt (Abb. 4) [15], [16].

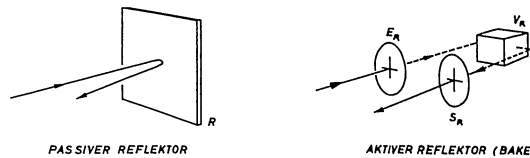


Abbildung 4
Laufzeitverfahren. Aktive und passive Reflektoren

Grundsätzlich dient jedes nach diesem Prinzip entwickelte Funkmeßgerät der Streckenvermessung. Die hohen Ansprüche an die Meßgenauigkeit in der Geodäsie schränken die hier brauchbaren Verfahren aber ein.

4.31 Verfahren mit aktiven Reflektoren

4.311 SHORAN (HIRAN) (Kurze Beschreibung des Verfahrens in Anhang 2)

Mit dem 1942 bis 1944 in Amerika entwickelten SHORAN-Verfahren für Einzelbombenabwürfe ohne Sicht wurde bereits 1945 in Italien die Basis Brescia-Gargano (618 km, 22 Meßflüge in 3500 bis 5000 m Höhe) mit der mittleren relativen Genauigkeit von $3 \cdot 10^{-5}$ geodätisch vermessen [74], [77], [181], [237].

Nach dem Kriege wurde das Verfahren in Amerika, Australien und Kanada für Vermessungsaufgaben eingesetzt:

Amerika:

In den Jahren 1946 bis 1950 wurde das Verfahren zunächst einer Prüfung auf seine Eignung zur geodätischen Streckenvermessung unterzogen:

1946 wurden in Florida sechs Strecken bekannter Länge zwischen 236 und 413 km bei 18 bis 19 Meßflügen je Strecke noch einmal

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

mit dem SHORAN-Verfahren vermessen. Mittlere relative Genauigkeit: $5 \cdot 10^{-5}$ bis $2 \cdot 10^{-6}$ [78], [174 bis 176].

1947 wurden in demselben Gebiet 47 Strecken zwischen 108 und 587 km vermessen, darunter sechs geodätische Basen. Die mittlere relative Genauigkeit bei 8 bis 18 Meßflügen je Strecke war besser als $4 \cdot 10^{-5}$. Diese Ergebnisse wurden von ASLAKSON zur Bestimmung eines neuen Wertes für die Lichtgeschwindigkeit benutzt ($299\,793\text{ km sec}^{-1}$) [33 bis 36], [69], [183].

1950 wurden zur Überprüfung dieses Wertes weitere 15 Strecken bekannter Länge zwischen 70 und 570 km bei 16 bis 18 Flügen je Strecke mit einer mittleren relativen Genauigkeit von $2 \cdot 10^{-5}$ bis $1,5 \cdot 10^{-6}$ vermessen [37], [177], [178].

Die sehr hohen relativen Genauigkeiten dieser Messungen sind wohl darauf zurückzuführen, daß die Gebiete bereits geodätisch aufgenommen waren und alle für die SHORAN-Messung notwendigen Hilfsgrößen - wie etwa Lage und Höhe der Bodenstationen - mit guter Genauigkeit zur Verfügung standen.

1951 bis 1953 wurden dann durch eine kombinierte Land- und Seetrilateration Florida, Kuba, Hispaniola, Puerto Rico und eine Anzahl kleinerer Inseln in der karibischen See durch ein SHORAN-Netz miteinander verbunden. Dieses Netz überdeckt eine Fläche von etwa 160 000 Quadratmeilen und besteht aus 136 Strecken zwischen 37 und 619 km mit einer Gesamtlänge von 34 000 km. Die mittlere relative Genauigkeit wird mit $2 \cdot 10^{-5}$ angegeben [79], [178], [184].

Auch in der Küsten- und Seevermessung wurde das SHORAN-Verfahren mit Erfolg eingesetzt, doch hängt die Reichweite in erster Linie von der Höhe der Standorte der Bodenstationen ab, da die bewegliche Station nun von einem Vermessungsschiff und nicht von einem Flugzeug getragen wird. Sie bleibt in der Regel unter 50 km.

Bei Messungen über lange Strecken auf dem Meer wird daher der "Electronic Position Indicator", ein SHORAN-Verfahren im Mittelwellenbereich, eingesetzt (vgl. 4.312) [179], [189], [200], [249], [254].

Australien:

Zur Erprobung des Verfahrens wurden sechs Strecken zwischen 256 und 501 km bei einem Durchschnitt von sechs Meßflügen je Strecke mit einer

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

mittleren relativen Genauigkeit von 10^{-4} bis $2 \cdot 10^{-5}$ bestimmt [76], [84], [201 bis 203].

Kanada:

Von 1949 bis 1953 wurde ein Gebiet etwa von der Größe Deutschlands in praktischer Messung mit einem SHORAN-Netz überzogen.

Unter harten klimatischen Bedingungen und in einem schwierigen Gelände wurden 625 Strecken mit einer Durchschnittslänge von 370 km vermessen. Bei im Durchschnitt 16 Meßflügen je Strecke ist die mittlere relative Genauigkeit besser als $2 \cdot 10^{-5}$, entsprechend den amerikanischen Ergebnissen [72], [180], [182], [185 bis 188], [190 bis 198], [204].

Die hierbei gemachten Erfahrungen führten zur Verfeinerung von Meßverfahren und Auswertemethoden sowie zur Verbesserung der technischen Apparatur, insbesondere zur weitgehenden Beseitigung ihrer systematischen Fehler [33], [79]. Als solcher zeigte sich besonders eine immer wieder beobachtete störende Abhängigkeit der inneren Laufzeit von der Intensität des empfangenen Signals. Dieser Fehler konnte - wie auch der einer zunächst zu gering angenommenen Ausbreitungsgeschwindigkeit - empirisch korrigiert werden [198], [208], [209], [214]. Das im Prinzip unveränderte, aber entsprechend den Erfahrungen verbesserte Verfahren ist als HIRAN bekannt.

4.312 Electronic Position Indicator (EPI)

Der 1947 für die Seevermessung langer Strecken entwickelte EPI entspricht im Prinzip dem SHORAN, benutzt aber - um von der optischen Sicht unabhängig zu werden - die Bodenwelle bei einer Trägerfrequenz von 1850 kHz. Die Impulsfolgefrequenz beträgt $42 \frac{2}{3}$ Hz, die Impulsdauer $50 \mu \text{ sec}$ [247 bis 249].

Für die Ausbreitungsgeschwindigkeit c wird ohne Korrektur ein Mittelwert von $299\,690\text{ km sec}^{-1}$ benutzt, ausgehend von $c_0 = 299\,792\text{ km sec}^{-1}$ [249]. Die Genauigkeit ist dadurch geringer als bei SHORAN.

1951 wurden bei einer kombinierten SHORAN-EPI-Seetrilateration in der Beringsee Strecken zwischen 175 und 685 km mit einer mittleren relativen Genauigkeit von etwa 10^{-4} vermessen [79], [252], [253].

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

4.313 OBOE und GH-Verfahren

Die dem SHORAN ähnlichen englischen Verfahren "OBOE" und "GH" wurden während des Krieges (im englischen Kolonialdienst auch nach dem Kriege) für photogrammetrische Aufgaben verwandt [88 bis 90], [92 bis 94].

Beide Verfahren sind für die Luftnavigation und den Bombenzielwurf entwickelt.

G-H (20 bis 85 MHz) entspricht dem SHORAN-Verfahren [83], [88], [89], [91], OBOE dagegen verwendet die bewegliche Station als aktiven Reflektor und mißt sie von zwei ortsfesten Stationen an. Das Verfahren arbeitete auf zunächst 211 MHz bzw. 285 MHz, später 3300 MHz. Die Impulsdauer beträgt eine Mikrosekunde bei einer Folgefrequenz von 97 bzw. 135 Hz [5], [16], [75], [85].

Strecken wurden nur vereinzelt vermessen. 1946 wurde mit OBOE bei Meßflügen zur Bestimmung der Änderung der Ausbreitungsgeschwindigkeit mit der Höhe eine mittlere relative Genauigkeit von $5 \cdot 10^{-5}$ erreicht [50], [51].

Während OBOE für den praktischen Gebrauch in der Geodäsie bzw. Photogrammetrie allgemein durch das SHORAN-Verfahren ersetzt ist, wird nach Berichten der letzten Zeit in England mit einem verbesserten G-H-Verfahren eine höhere Meßgenauigkeit erreicht. Nähere Angaben und Versuchsergebnisse liegen jedoch nicht vor [79].

4.314 Funkmeßgerät RC 184 mit aktivem Reflektor SCR 695 A

CARLA und BIRARDI berichten über italienische Versuche mit dem englischen Funkmeßgerät RC 184. Sender und aktiver Reflektor arbeiten auf 170 MHz mit einer Impulsleistung von 1 kW. Die Impulsfolgefrequenz beträgt 150 Hz, die Impulsdauer 5 μ sec, die Versuchsstrecken sind 5, 12, 19 und 40 km lang. Die Genauigkeit soll bei kurzen Strecken die des SHORAN-Verfahrens übertreffen. Versuchsergebnisse, insbesondere Angaben über die mittleren relativen Genauigkeiten, liegen nicht vor [79], [250].

4.315 Zusammenfassung

Von allen bisher für geodätische Streckenvermessungen eingesetzten elektrischen Verfahren liefert SHORAN (HIRAN) bei Bestimmung von Strecken über etwa 100 km die genauesten Ergebnisse. Durch systematische Fehlerkontrolle, durch Zusammenarbeit von Geodäten, Meteorologen, Hochfrequenz-

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

und Luftfahrttechnikern, aber auch durch eine sorgfältige Organisation der Messungen konnte die Genauigkeit von $5 \cdot 10^{-5}$ und geringer auf $1,5 \cdot 10^{-5}$ verbessert werden. Nach amerikanischen Angaben sind relative Genauigkeiten von $3 \cdot 10^{-6}$ zu erwarten [72]. Der Aufwand der SHORAN-Messung ist erheblich, aber zu rechtfertigen, da eine Triangulation nach klassischen Methoden in den durch SHORAN aufgenommenen Gebieten entweder überhaupt nicht oder nur mit erheblich größerem Aufwand an Zeit, Personal und Kosten möglich gewesen wäre.

Für die Trilateration dünn besiedelter und schwer zugänglicher Gebiete wie für die Verbindung bestehender Netze über weite Meeresteile wird sich SHORAN immer mehr durchsetzen.

4.32 Laufzeitverfahren mit passiven Reflektoren

FRÄNKEL und HANSEN benutzen wie BERGSTRAND das sichtbare Licht und erzeugen Lichtimpulse durch eine in Edelgasatmosphäre arbeitende Funkstrecke. Der Lichtimpuls wird nach Reflexion an einem Tripelapiegel wieder empfangen und mit dem Sendeimpuls durch einen in Entfernungen geeichten Phasenschieber auf einen Indikator zur Deckung gebracht. Bei guter Sicht sollen sich mit diesem Gerät Entfernungen bis etwa 5000 m mit einem wahrscheinlichen Fehler von ± 3 m messen lassen [69], [256], [258], [259], [261].

Bei dem Deutschen Geodätischen Forschungsinstitut in München ist ein Gerät für die elektrische Entfernungsmessung mit mechanischer Erzeugung der Lichtimpulse in der Entwicklung [255].

4.4 Zusammenfassung der bisherigen Erfahrungen

1. Mit einigen für die Funkortung und Navigation entwickelten Verfahren wurden in den letzten Jahren geodätische Streckenmessungen ausgeführt. Durch Verfeinerung der Verfahren, Beseitigung systematischer Fehler und Verbesserung der Geräte gelang es, die Meßgenauigkeit zu erhöhen, ohne das Prinzip zu ändern.
2. Im Einsatz bewährte Eigenentwicklungen für geodätische Streckenvermessungen mit elektromagnetischen Wellen sind - abgesehen vom BERGSTRAND-Verfahren - bisher nicht bekannt.
3. In der Praxis der See- und Küstenvermessung haben sich einige elektrische Meßverfahren geringerer Genauigkeit durchgesetzt. In der Land-

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

vermessung hingegen genügen bislang nur das BERGSTRAND-Verfahren für Kurzstrecken und HIRAN für Strecken über etwa 100 km den geodätischen Ansprüchen.

Europa ist trigonometrisch bereits aufgenommen. Elektrische Meßverfahren für längere Strecken sind hier nur von wissenschaftlichem Interesse. Auf Kurzstrecken (bis etwa 500 m Länge) ist die klassische Methode einfacher und den elektrischen Verfahren zweifellos überlegen. Überdies wirken sich die systematischen Fehler der elektrischen Verfahren auf Kurzstrecken besonders ungünstig aus.

Sinnvoll ist eine elektrische Streckenvermessung dagegen auf Strecken zwischen 500 und 5000 m, jedoch nur, wenn sie eine den klassischen Methoden entsprechende Genauigkeit erreicht. Mit ihren Methoden wären Strecken, die bislang nur in Teilabschnitten zu bestimmen sind, in einem Zug unabhängig von Sicht und Wetter in erheblich kürzerer Zeit zu messen.

Im folgenden wird daher auf Grund eigener experimenteller Arbeiten über die Möglichkeit berichtet, Mittelstrecken mit dem Funkmeßverfahren zu messen.

5. Das Funkmeßverfahren in der geodätischen Streckenmessung

5.1 Das Funkmeßverfahren (Abb. 5)

Ein Mikrowellensender S sendet periodisch Impulse P_s der Dauer τ mit der Folgefrequenz F aus in Richtung auf einen Reflektor R in der Entfernung z.

Die Impulse P_s werden an R reflektiert und laufen als Echo P_e zum Gerät zurück, wo sie nach einer Laufzeit

$$(10) \quad t_L = \frac{2z}{c}$$

im Empfänger E empfangen werden. Auf einem Bildgerät B ist die Zeit t_L ablesbar als Abstand Δ zwischen Sende- und Echoimpuls.

5.2 Das Funkmeßgerät (Abb. 6)

Zur Entfernungsbestimmung mit dem Funkmeßverfahren sind demzufolge notwendig ein Sender S, ein Empfänger E, ein Bildgerät B und ein Reflektor R.

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

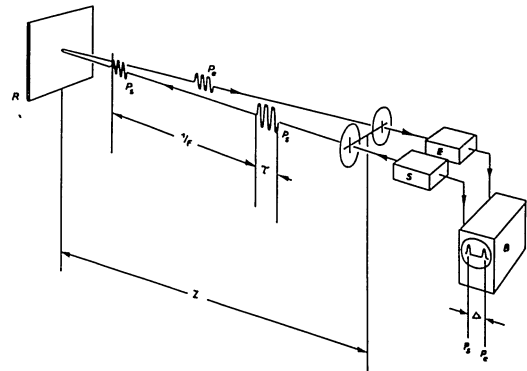


Abbildung 5
Das Funkmeßverfahren

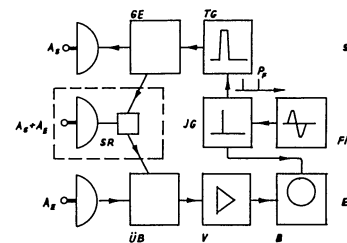


Abbildung 6
Das Funkmeßgerät

5.2.1 Sender

Ein Mikrowellengenerator GE wird periodisch durch ein Tastgerät TG für die Dauer τ getastet und strahlt Impulse hoher Leistung P_s über eine

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

Antenne A_B gebündelt, d.h. in einen räumlichen Sektor konzentriert aus. Die Tastfrequenz F des Tastgerätes TG ist durch eine Steuerimpulsfolge F_P vorgegeben, die der Impulsgeber IG von einem Frequenznormal FN ableitet.

5.22 Empfänger

Das Echo P_e wird von einer Antenne A_E mit gebündelter, d.h. in bestimmter Raumrichtung konzentrierter Empfangsempfindlichkeit aufgenommen. Sende- und Empfangshaupttrichtung sind gleich. Das Verfahren wirkt also in einem räumlichen Sektor der Breite Φ_b , Θ_b (Bündel- oder Halbwertsbreite) um die Richtung Φ , Θ (Abb. 7).

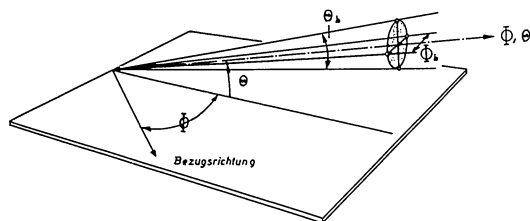


Abbildung 7

Definition der Winkel bei der Sende- und Empfangsbündelung

Beide Antennen sind daher entweder mechanisch gekoppelt und ortsgleich, oder aber zu einer einzigen Antenne vereinigt. Diese wird durch einen im Takte der Tastfrequenz F gesteuerten Schalter SR kurzzeitig für den Sendepuls P_s geöffnet und nach dessen Durchlaß auf den Empfänger umgelegt. Das Echo P_e durchläuft die Überlagerungsstufe $ÜB$ und den Verstärker V und gelangt gleichgerichtet in das Bildgerät B (Abb. 6).

5.23 Bildgerät

Das Echo wird auf dem Bildschirm als Zeitfunktion $P_e(t)$ dargestellt. Bezugsmarkierung ist der Zeitpunkt der Ausstrahlung des Impulses P_s . Ihm folgt nach einer Zeit t_L , d.h. im Abstand Δ das Bild des Echos P_e .

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

$$(11) \quad \Delta = t_L \frac{Dc}{4B}$$

- B = Bildbereich
 D = Bildschirmdurchmesser
 c = Lichtgeschwindigkeit

Aus dem Abstand Δ folgt über Gleichung (10) die gesuchte Strecke z :

$$(12) \quad z = \frac{c \cdot t_L}{2} = \frac{2B}{D} \Delta$$

Der Abstand Δ auf dem Bildschirm kann über Gleichung (12) als Strecke z geeicht werden.

5.24 Reflektoren

Reflektoren in der Funkmeßtechnik sind Objekte, deren Form, Oberfläche und Material eine Rückstrahlung zulassen. Die Rückstrahlwirkung schwach reflektierender Objekte kann durch Zusatzreflektoren erhöht werden. Markierungen auf einem von reflektierenden Objekten freien Gelände werden durch künstliche Reflektoren dargestellt. Ein Maß für die Rückstrahlwirkung eines Reflektors ist der Rückstrahlquerschnitt σ , der in der Regel experimentell gewonnen wird.

5.3 Die Arbeitsbedingungen eines Funkmeßgerätes in der Geodäsie5.31 Meßbereich

Sinnvoll ist nach 4.4 eine Anwendung des Verfahrens über Strecken zwischen 500 und 5000 m. Reichweite und Meßbereich sind also begrenzt.

5.32 Objekte

Anfang und Ende der Strecke z sind nicht natürlich vorgegeben und bedürfen in jedem Falle einer Markierung mit künstlichen Reflektoren.

5.33 Zwischengelände

Das Gelände zwischen den Markierungen ist zur geodätischen Messung nicht wählbar, sondern mit der Meßstrecke vorgegeben. Das Funkmeßverfahren mit Mikrowellen verlangt nun optische Sicht zu allen für die Echogabe bestimmten Objekten. Oft ist eine geradlinige Wellenausbreitung nicht möglich, denn Gerät und Reflektoren sind bodengebunden. Es ist aber denkbar,

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

die Schwierigkeiten zu umgehen - etwa durch abgesetzte Aufstellung der Reflektoren an Orte, zwischen denen eine freie Ausbreitung möglich ist, in genau vermessenen Abständen d_A und d_B von den Streckenendpunkten, und Messung der Strecke z' (Abb. 8).

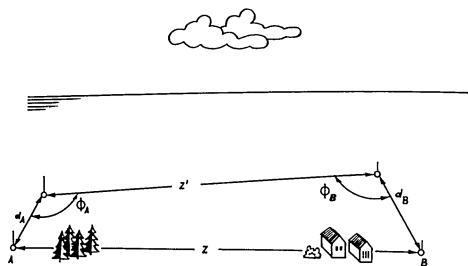


Abbildung 8
Vermessung von Strecken mit Sichthindernissen

5.34 Reflektor-Umgebung

In der praktischen Messung ist der Reflektor inmitten von Objekten aufgestellt, die gleich ihm reflektieren, soweit sie innerhalb der Anstrahlung liegen. Ihr Echo erscheint also mit dem zur Messung bestimmten Reflex P_e auf dem Bildschirm. Die Bedingung für eine exakte Messung ist nun, daß das Echo P_e eindeutig, nicht deformiert und identifizierbar ist. Daraus folgt, daß der Rückstrahlquerschnitt σ des Reflektors so groß zu wählen ist, daß sein Echo den Echopegel der Umgebung überragt. Ferner ist größtmöglicher Abstand zu anderen Objekten zu wahren, um Echointerferenzen zu vermeiden:

Objekte nämlich, deren Abstand Δz vom Reflektor in Ausbreitungsrichtung größer ist als

$$(13) \quad \Delta z_0 = \frac{cT}{2}$$

erscheinen getrennt vom Reflektorecho P_e . Das Echo von Objekten in einem geringeren Abstand fließt mit P_e zu einem Signal zusammen (Abb. 9).

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

Objekte in gleicher Distanz z wie der Reflektor R, jedoch seitlich davon um Δd abgesetzt, stören die Messung nicht, solange:

$$(14a) \quad \Delta d \gg z \operatorname{tg} \phi_0$$

(ϕ_0 = horizontale Halbwertsbreite der Senderanstrahlung)

Wird dagegen

$$(14b) \quad \Delta d \leq z \operatorname{tg} \phi_0$$

so reflektieren Objekt und Reflektor R zugleich und bilden im Empfänger E ein gemeinsames Echo aus (Abb. 9).

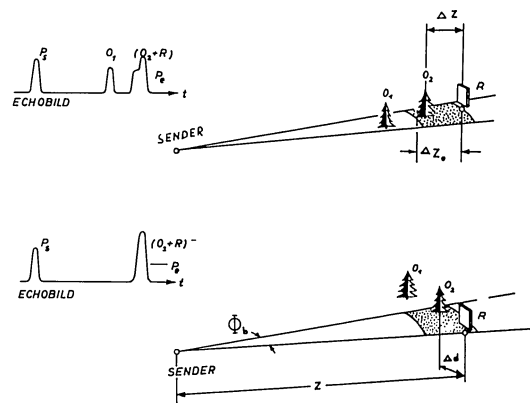


Abbildung 9
Auflösung des Funkmeßgerätes

Die Überlagerung eines Störechos führt zu Interferenzen, die das Echo P_e deformieren.

Ist

$$(15a) \quad P_e = A_0 e^{i(\omega t - kt)} \quad (A_0 = \text{maximale Amplitude, } k = \frac{2\pi}{\lambda})$$

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

das Echo der Markierung, so ist das ihm überlagerte Störzsignal

$$(15b) \quad P_{st} = b A_0 e^{i(\omega t - kx - \varphi)}$$

von gleicher Frequenz, jedoch von unterschiedlicher Amplitude ($b \neq 1$) und Phasenlage φ (infolge unterschiedlicher Reflexionsbedingungen oder Versetzung Δz in Ausbreitungsrichtung). Das Summeecho

$$(16) \quad |P_e| = |P_e + P_{st}| = A_0 \sqrt{1 + 2b \cos \varphi + b^2}$$

ist von der gegenseitigen Phasenlage φ abhängig, die dem Zufall überlassen bleibt und die sich erfahrungsgemäß fortwährend ändert, so daß auch $|P_e|$ ein ständiges Schwanken, ein "Atmen" zeigt, und zwar in den Grenzen:

$$|P_e|_{Max} = |P_e| + |P_{st}| = |P_e| (1 + b)$$

$$|P_e|_{Min} = |P_e| - |P_{st}| = |P_e| (1 - b)$$

(Abb. 10 a, b)

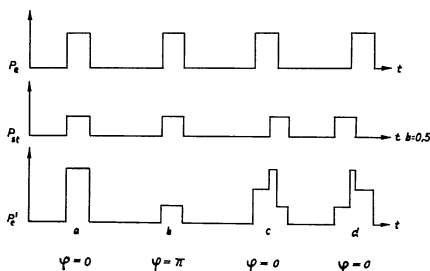


Abbildung 10
Interferenz am Oszillogramm

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

Echodeformation und "Atmen" sind um so unbedeutender, je kleiner b ist, je stärker also das Echo P_e die Summe der Störzeichen überwiegt, d.h. je größer der Rückstrahlquerschnitt σ des Reflektors ist.

Die Gleichung (16) gilt jedoch nur für die Gleichzeitigkeit von P_e und P_{st} . In der Regel ist die Störung P_{st} nicht während der vollen Dauer des Echos P_e im Empfänger wirksam (Abb. 10 c, d), sondern eilt etwas vor oder nach. So wird nur eine Flanke des Meßimpulses P_e deformiert: Bei vorlaufender Störung flimmert die Vorderflanke von P_e und die Rückflanke ist unbeeinflusst. Bei nachlaufender Störung bleibt die Vorderflanke ungestört und eine Teilinterferenz ist auf der Rückflanke wirksam.

5.35 Bodeneinfluß

Gerät und Reflektoren stehen in geringer Höhe. So erreichen trotz guter Bündelung Anteile der Strahlung den Boden, werden an ihm zum Reflektor R hin umgelenkt und treffen dort infolge des Umwegs verspätet auf das Hauptsignal, das über den direkten und kürzeren Weg: Sender - Reflektor läuft. Für den Rückweg gilt das gleiche, so daß im Empfänger E eine Selbstinterferenz des Echos eintritt, eine Überlagerung des Hauptsignals über den Direktweg mit dem schwächeren Umwegsignal (Abb. 11). Auch für diese Interferenz gilt Gleichung (16). Jetzt beschreibt b die Reflexionswirkung des Bodens und φ die Umwegverzögerung. Die Störung läuft nach und deformiert entsprechend Abbildung 10 c die Rückflanke des Markierungsimpulses. Ähnliche Signalumwege bilden sich auch an den größeren Objekten im Zwischen- gelände aus.

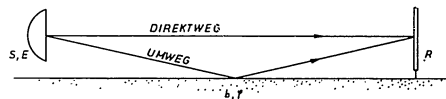


Abbildung 11
Bodenumweg-Interferenz

5.36 Genauigkeit

Die geodätische Streckenmessung verlangt eine hohe Genauigkeit. Das Funkmeßverfahren bestimmt nun Distanzen aus der Proportionalität von

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

Echolaufzeit t_L und -weg z :

$$(17) \quad z = \frac{c \cdot t_L}{2}$$

über eine als fest angenommene Ausbreitungsgeschwindigkeit c . Der maximale Meßfehler δz ist gleichermaßen die Folge ungenauer Zeitmessung δt_L wie eines Fehlers in der Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit δc :

$$(18) \quad \frac{\delta z}{z} = \frac{\delta t_L}{t_L} + \frac{\delta c}{c}$$

Nach Gleichung (1), (2) und (3) ist c über den Brechungsindex n von den wechselnden meteorologischen Bedingungen der Atmosphäre, dem Wechsel von Druck p , Temperatur T , Feuchtigkeit e und Partikelgehalt N abhängig und

$$(19) \quad \frac{\delta c}{c} = - \frac{\Delta n}{n} \approx \Delta n$$

$$\Delta n = \Delta n(p, T, e, N)$$

Im Verlauf eines Jahres wurden nach WARNER [228] Grenzwerte für n auf dem Boden beobachtet, die um etwa $35 \cdot 10^{-6}$ voneinander abweichen. Die Annahme eines unkorrigierten Wertes c bedeutet daher einen größten relativen Fehler von:

$$\left(\frac{\delta c}{c}\right)_{\max} = 3,5 \cdot 10^{-5}$$

Die Änderung δc ist über Gleichung (1) und (2) einer Korrektur zugänglich, wenn die meteorologischen Parameter über den Weg z bekannt sind. Der noch verbleibende Fehler $\frac{\delta c}{c}$ ist um so geringer, je genauer der atmosphärische Zustand bestimmt ist: je kürzer also der Weg und je homogener die Atmosphäre über ihm sind.

Möglich ist die direkte Bestimmung des lokalen Brechungsindex n mit dem Refraktometer (Abb. 12) und damit die Angabe der aktuellen Ausbreitungsgeschwindigkeit $c(n)$ in der Umgebung des Meßortes. Es liegt nahe, eine δc -Korrektur aus den Refraktometerwerten an den Endpunkten der Meßstrecke

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

oder auf der Streckenmitte abzuleiten. Eine Untersuchung über die Horizontalverteilung des Brechungsindex $n(z)$ über $z < 15$ km ist aber im Gegensatz zu eingehenden Untersuchungen über die Vertikalstruktur des räumlichen n -Feldes noch nicht bekannt.

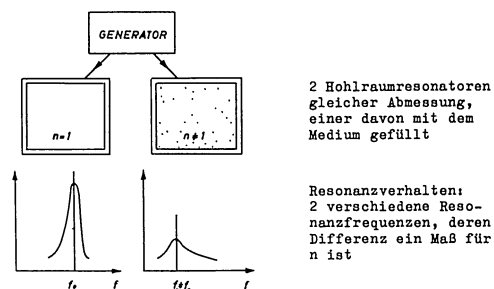


Abbildung 12
Refraktometer zur Bestimmung von n (Prinzip)

Der Zeitfehler δt_L hat verschiedene Ursachen:

(a) Im einfachsten Falle wird die Zeit t_L aus dem Abstand zweier Impulse auf dem Bildschirm bestimmt. Die Linearität der elektronischen Abbildung $\Delta(t_L)$ und deren Konstanz über der Zeit setzen der Meßgenauigkeit eine untere Grenze, wenn als Eichung gesetzt wird:

$$(20) \quad \Delta = C t_L$$

C = Abbildungsmaßstab des Bildgerätes [vgl. Gl. (12)].

(b) Es ist jedoch möglich, t_L durch den Vergleich mit einer bekannten Zeit t_N in einer elektronen-optischen Zweifachabbildung zu bestimmen. t_N ist die elektrisch gewonnene und regelbare Laufzeit einer Zeitmarke, die mit dem Echoimpuls zur Deckung gebracht wird, oder eine Zeit, die an der Schwingung eines Frequenznormals abgezählt werden kann. Nachteil der

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

Zeitmarkenmessung ist die Notwendigkeit der Eichung der elektronischen Einrichtung für t_N und deren Änderung über der Zeit.

Dieser Zeitmaßstab kann z.B. durch die Schwingung f_N eines Quarzes mit der diesem eigenen Präzision von etwa 10^{-6} dargestellt werden:

$$(21) \quad t_N = m \frac{1}{f_N}$$

m = Zahl der abgelesenen Schwingungen.

Das bedeutet aber, daß Funkmeßvorgang und Normalschwingung f_N synchronisiert werden müssen. In dieser Synchronisierung liegt eine weitere Begrenzung der Meßgenauigkeit. Ist sie unvollkommen, so sind Maßstab und Echobild in ständiger leichter Bewegung gegeneinander und das Bild ist unscharf.

(c) Als Laufzeit t_L wählt man bei der klassischen Funkmessung mit einer dort genügenden Genauigkeit die Spanne zwischen Sende- und Empfangsmoment. Beide Vorgänge sind aber über der Impulsdauer ausgedehnt, so daß zur präzisen Definition von t_L ein Bezugspunkt am Impuls selbst zu wählen ist. Das Oszillogramm des nicht durch Interferenz deformierten Meßimpulses hat nun etwa die Form eines Rechtecks mit geneigten Planken und gerundeten Ecken (Abb. 13a), in der Panoramadarstellung (PPI) die Form eines radial gestreckten Lichtpunktes (Abb. 13 b), daher sind übliche Bezugspunkte am Echo die Rechteckmitte und der Impulsschwerpunkt.

Die Länge τ' des Echobildes auf dem PPI ist vom Bildmaßstab abhängig:

$$(22) \quad \tau' = \frac{D}{2B} \cdot \frac{c\tau}{2} + \mu$$

- D = Bildschirmdurchmesser
- B = Bildbereich
- μ = Punktschärfe

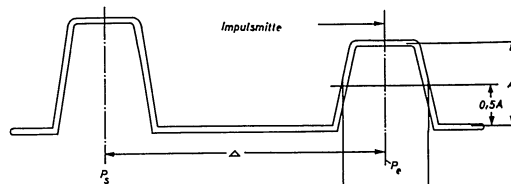
In der Praxis ist die Genauigkeit $\delta \Delta$, mit der dieser Schwerpunkt bestimmt werden kann, etwa gleich der Punktschärfe und

$$(23) \quad \delta t_L = \frac{4B}{cD} \delta \Delta = \frac{4B}{cD} \mu$$

δt_L wächst mit dem Bildbereich B und wird mit Vergrößerung des Bildschirmdurchmessers D geringer. Die relative Genauigkeit (s. S. 34):

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

a) Oszillogramm



b) Panoramabild (PPI) (Sektorausschnitt)

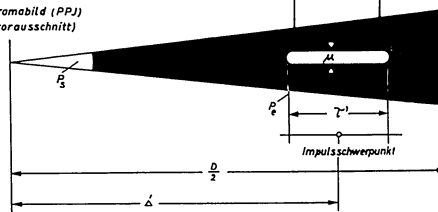


Abbildung 13
Bezugspunkte am Impulsbild

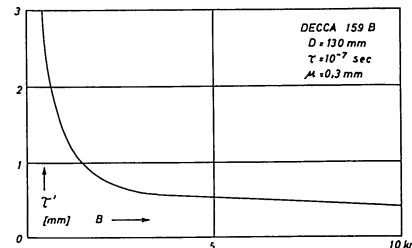


Abbildung 14
Bildlänge der Abbildung eines Einzelimpulses auf dem Panoramabildschirm

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

$$(24) \quad \frac{\delta t_i}{t_i} = \frac{\mu}{\Delta}$$

legt nahe, Δ groß zu wählen, im kleinstmöglichen Bildbereich B also zu arbeiten. Für eine günstige Einstellung - für ein Echobild im äußeren Bildschirm Drittel etwa:

$$\Delta = \frac{2}{3} \left(\frac{D}{2} \right)$$

- ist die Genauigkeit mit den Parametern des Versuchsgerätes ($D=130$ mm, $\mu = 0,3$ mm):

$$\frac{\delta t_i}{t_i} = 3 \frac{\mu}{D} = 0,7 \cdot 10^{-2}$$

Das PPI-Bild ist also für eine geodätische Messung ungeeignet.

Hinzu kommt, daß erfahrungsgemäß am Impulsbild auf dem PPI (im Gegensatz zur Darstellung auf dem Oszillogramm) eine Interferenzdeformation nur schwer zu erkennen ist. Auf diese Weise entsteht ein zusätzlicher Fehler in der Bestimmung des Schwerpunktes.

Für die Genauigkeit der Laufzeitmessung am Oszillographen gilt ebenfalls

$$\frac{\delta t_i}{t_i} = \frac{\mu}{\Delta}$$

als untere, kaum erreichbare Grenze. Am deformierten Echo ist der Fehler infolge Fehlbestimmung der Impulsmitte größer:

Die notwendige Verbesserung der Genauigkeit ist demnach zu erreichen:

- aa) durch eine Erhöhung der Bildschärfe
- bb) durch eine Streckung der Impulsbasis Δ

Zu aa) Die Abbildungsschärfe μ ist für übliches Schirmmaterial und gebräuchliche Focussierungsmethoden in der Größe $0,5 > \mu > 0,2$ mm vorgegeben. Der Zeitbezug am Impuls kann jedoch genauer festgelegt werden, wenn man sich nicht auf die Impulsmitte oder -spitze, sondern auf einen Flankenpunkt in der relativen Höhe q bezieht (Abb. 15).

Zweckmäßig wird die Impulsvorderflanke gewählt. Sie ist erfahrungsgemäß kaum deformiert, da bei der praktischen Messung das Vorfeld der

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

Reflektoren meist frei von reflektierenden Objekten gehalten wird. Der neue Bezugspunkt ist der Schnittpunkt der Niveaulinie $q \cdot \Delta$ mit einer an die Vorderflanke gelegten Geraden x , deren Fehler:

$$\delta x < \frac{\mu}{2} \quad (\text{bei } q=0,5)$$

bei hinreichend steiler Flanke allein den Zeitfehler bestimmt:

$$(25) \quad \frac{\delta t_i}{t_i} = \frac{\delta x}{\Delta}$$

Eine gute Hilfe ist hier die optische oder photographische Vergrößerung.

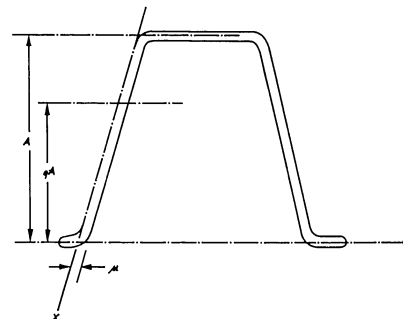


Abbildung 15
Bestimmung der Laufzeit am Oszillogramm

Zu bb) Eine Dehnung der Basis Δ durch größere Bildschirme ist nur in Grenzen möglich. Sinnvoller ist es, die verlängerte Basis auf kleinem Bildschirm flächenhaft auszuziehen, die Schirmfläche also besser zu nutzen durch Wahl der Zeitachse als Kreis, Spirale, Zickzack- oder Zeilenraster (Abb. 16).

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

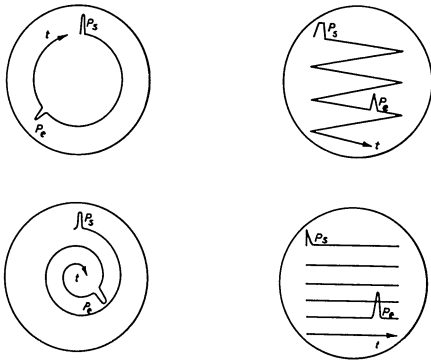


Abbildung 16
Methoden der Zeitbasisdehnung auf kleinem Schirm

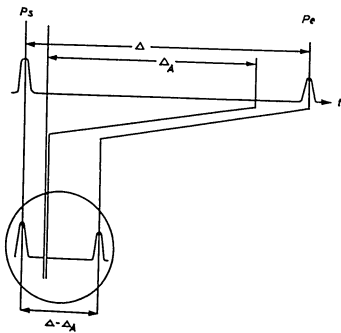


Abbildung 17
Zeitbasiskompression durch Ausblenden

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

Letztlich kann eine virtuell über den Bildschirm hinaus gedehnte Zeitbasis Δ durch Ausblenden eines definierten Darstellungsabschnitts Δ_A , also durch Einlegen einer Darstellungspause, in gewohnter Weise, d.i. in karthesischen Koordinaten, auf kleinem Schirm dargestellt werden (Abb.17). Allen Darstellungsarten der Abbildungen 16 und 17 ist gemeinsam, daß nun der Bildschirmdurchmesser um den Faktor γ gedehnt erscheint:

$$(26) \quad D = \gamma D$$

Auf diese Weise wird:

$$(27) \quad \frac{\delta t_L}{t_L} = \frac{\delta x}{\gamma D}$$

Mit:

$$\delta x = 0,2 \text{ mm und } D = 200 \text{ mm}$$

ist:

$$\frac{\delta t_L}{t_L} = \frac{10^{-3}}{\gamma}$$

Mit einer Dehnung $\gamma = 10^2$ wird so ein relativer Zeitfehler von 10^{-5} erreicht.

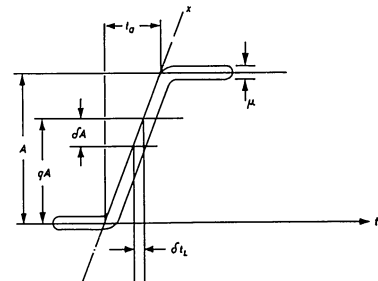


Abbildung 18
Definition des Amplitudenfehlers

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

Verläuft die Vorderflanke infolge dieser Dehnung γ sehr flach, so wirkt sich eine Ungenauigkeit δA in der Festlegung der Niveaulinie als weiterer Zeitfehler δt_L aus:

$$(28) \quad \delta t_L = \frac{t_a \delta A}{A}$$

Hier ist t_a die Anstiegszeit der Vorderflanke (Abb. 18).

(d) Der Anfang der Meßstrecke z ist in der Funkmeßtechnik der Ort des Gerätes, daher beginnt die Zeitmessung für t_L auf dem Bildschirm mit der Vorderflanke der Abbildung des Sendeimpulses P_s . Um diese darzustellen, muß der Ablenkvorgang auf dem Bildschirm kurz vor der Sendetastung ausgelöst werden. Ein Vorlauf ist unnötig, wenn - wie bei der eigenen Messung - Anfang und Ende der Strecke z durch zwei gleiche Reflektoren R markiert werden und das Gerät aus abgesetzter Position auf beide gerichtet ist. Beide Punkte sind dann unter gleichen und sinnfälligen Bedingungen im Gelände markiert, während die Zuordnung von Sendeimpuls und Streckenanfang im Gelände nur über eine Eichung möglich ist.

(e) Die Bildunschärfe und einige hier nicht weiter berücksichtigte systematische Fehler (etwa durch mangelnde Sorgfalt bei der Messung) vermeiden solche Methoden, bei denen die Laufzeit t_L elektronisch ausgewertet wird - etwa derart, daß man das Echo der Reflektoren aus der allgemeinen Echofolge herauslöst und ohne weiteren manuellen Eingriff zur Steuerung einer Zeitmessung verwendet (Abb. 19).

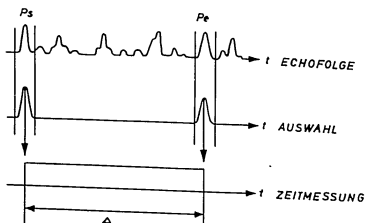


Abbildung 19
Elektronische Zeitmessung

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

(f) Methodisch wurde bei der Messung mit Erfolg von einer im Gerät zu anderen Zwecken vorgegebenen elektrischen Differenzierung der Echofolge P_e nach der Zeit

$$\dot{P}_e(t) = \frac{dP_e(t)}{dt}$$

mit nachfolgender Darstellung von \dot{P}_e Gebrauch gemacht. Die Vorderflanken der Grundimpulse P_e erscheinen dann dargestellt durch die Impulse ihrer Ableitung \dot{P}_e . Verbesserte Flankensteilheit, Ausfall komplexer Echos im Zwischengelände und in der Umgebung, und Unterdrückung leichter Deformation an der Vorderflanke von P_e erleichtern die Messung.

5.37 Beweglichkeit

Der ständige Wechsel von Einsatzort und Geländebeschaffenheit bedingt eine transportable Ausführung von Gerät und Reflektoren.

5.38 Zusammenfassung

Aus einer Betrachtung der Einsatzbedingungen des Funkmeßverfahrens in der geodätischen Messung von Strecken zwischen 0,5 und 5 km folgt: Es ist bei üblicher Methodik ein relativer Fehler unter 10^{-4} zu erwarten, vorausgesetzt, daß alle Möglichkeiten zur methodischen und apparativen Korrektur genutzt werden. Die Verbesserung der Genauigkeit bei Anwendung etwa elektronischer Methoden der Zeitmessung ist noch zu prüfen.

Die Strecke wird zweckmäßig durch zwei gleiche Reflektoren an ihren Endpunkten markiert und von dem Gerät aus abgesetzter Position gemessen. Die Einsatzmöglichkeit der bodengebundenen Einrichtung über größere Strecken ist vom Zwischengelände abhängig.

5.4 Das Funkmeßgerät für die geodätische Messung

Die Parameter eines für die geodätische Streckenmessung geeigneten Funkmeßgerätes sind aus den vorstehend beschriebenen Einsatzbedingungen zu bestimmen.

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

5.41 Sender

5.411 Wellenlänge

Die Wahl der Wellenlänge beeinflusst die Bündelungseigenschaften der Antenne und das Rückstrahlverhalten der Reflektoren.

Für ein Rotationsparabol mit dem Durchmesser D_p sind

$$(29) \quad \text{der Antennengewinn } G = C_1 \left(\frac{D_p}{\lambda} \right)^2 \quad \text{und}$$

$$(30) \quad \text{die Bündelbreite } \bar{\varphi}_b = \text{arc sin } C_2 \frac{\lambda}{D_p}$$

$$C_{1,2,3} = \text{Konstanten}$$

Für einen Tripelspiegel der Kantenlänge a ist der Rückstrahlquerschnitt

$$(31) \quad \sigma = C_3 \left(\frac{a}{\lambda} \right)^2 a^2$$

Je kürzer also die Wellenlänge λ , desto günstiger sind Gewinn G , Bündelbreite $\bar{\varphi}_b$ und Rückstrahlquerschnitt σ bei festen geometrischen Abmessungen von Antenne und Reflektor. Andererseits werden bei kurzen Mikrowellen meteorologische Störungen wirksam - entweder durch Schwächung des Signals oder durch Verdeckung der Echofolge infolge Eigenreflexion meteorologischer Partikel. Zudem verschlechtert sich die Empfindlichkeit technischer Empfänger und die Leistungsabgabe der Generatoren, je kürzer die Wellenlänge gewählt wird. Geeignet erscheint daher der Wellenlängenbereich von 0,8 bis 3,2 cm unter Ausschluß der Absorptionslücke um 1,5 cm.

5.412 Tastung

Die Zeitmessung ist auf die Vorderflanke der Impulse bezogen. Zu wählen sind Rechteckimpulse mit möglichst hoher Flankensteilheit.

Von der Impulsdauer τ , der Impulsfrequenz F sowie der Sendespitzenleistung N_s bzw. der mittleren Sendeleistung \bar{N}_s ist die Reichweite z_{\max} des Gerätes abhängig.

$$(32) \quad z_{\max} \sim N_s \tau \sqrt{F} = \frac{\bar{N}_s}{\sqrt{F}}$$

$$\text{wenn} \quad \bar{N}_s = N_s \cdot \tau \cdot F \quad \text{ist.}$$

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

Die geforderte Reichweite ist jedoch gering. Von Interesse ist aber, daß ein vorgegebenes z_{\max} mit verringerter Sendeleistung N_s erreicht werden kann, wenn τ und F entsprechend vergrößert werden. Soll dagegen die mittlere Sendeleistung \bar{N}_s niedrig bleiben, so ist die Impulsfolge F langsamer zu wählen.

Eine entgegengesetzte Bedingung für die Impulsdauer τ gibt die Gl. (13). Je kürzer der Hochfrequenzimpuls, desto weniger Objekte reflektieren aus der Umgebung des Reflektors mit diesem zur gleichen Zeit (Abb. 9). Die Impulsverkürzung ist begrenzt durch den damit verbundenen apparativen Aufwand für Impulserzeugung und -verstärkung, da die Bandbreite B_a dieser Stufen umgekehrt proportional der Impulsdauer τ ist. Aus diesen Bedingungen ergibt sich eine Impulsdauer τ von 0,3 bis $2 \cdot 10^{-7}$, während die Impulsfolge F aus der Leistungsfähigkeit von Generator und Stromversorgung folgt.

5.413 Leistung

Die geringe Reichweite z_{\max} und die Verwendung von Reflektoren mit großem Rückstrahlquerschnitt in der vorgesehenen Anwendung gestatten, die Sendeleistung des Gerätes gering zu halten.

5.414 Antenne

Zu fordern ist eine möglichst scharfe Bündelung in Horizontal- und Vertikalrichtung, um die Ausstrahlung auf die Markierungsreflektoren zu konzentrieren und um seitlich abgesetzte Objekte und den Boden des Zwischenfeldes von der Anstrahlung auszuschließen, damit störende Echointerferenzen vermieden werden. Geeignete Antennenform ist der rotationsparabolische Spiegel, der für Sender und Empfänger gemeinsam benutzt werden kann (vgl. 5.22). Die Antenne ist so hoch wie möglich anzubringen, um das Zwischenfeld zu überstrahlen.

5.42 Empfänger

An den Empfänger des Gerätes sind gegenüber den üblichen Einrichtungen keine besonderen Bedingungen zu stellen.

5.43 Darstellung und Zeitmessung

Methoden zur Darstellung und Messung der Echolaufzeit sind in Abschnitt 5.36 diskutiert worden. Die Laufzeit t_L wird entweder an einer gedehnten

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

oszillographischen Darstellung mit Hilfe eines eingeblendeten Zeitmaßstabes bestimmt oder aber elektronisch gemessen und als Resultat angegeben. Notwendig ist in beiden Fällen ein Bildgerät und ein Zeitnormal, zudem bei der letzten Methode ein Rechengerät.

5.44 Reflektoren

Bedingungen für den Markierungsreflektor sind: Großer Rückstrahlquerschnitt σ , geringe Richtungsabhängigkeit und eine leichte, stabile und transportable mechanische Ausführung. Diesen Forderungen entspricht der Tripelspiegel (Abb. 20).

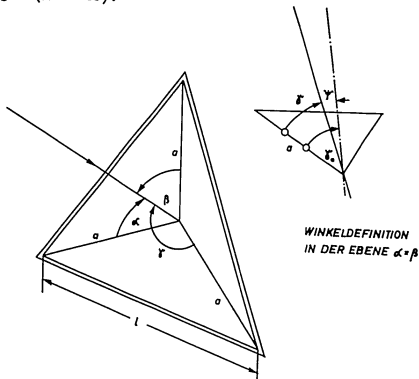


Abbildung 20
Tripelspiegel

5.441 Tripelspiegel

Der aus der Richtung α, β, γ angestrahlte Tripelspiegel zeigt einen Rückstrahlquerschnitt:

$$(33) \quad \sigma_r = \frac{4\pi}{\lambda^2} Sp^2(\alpha, \beta, \gamma)$$

$Sp(\alpha, \beta, \gamma)$ ist die Projektion der Spiegelöffnung Sp_0 in die Anstrahlungsrichtung und

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

$$(34) \quad Sp(\alpha, \beta, \gamma) = \frac{Sp_0}{\sqrt{3}} (\cos \alpha + \cos \beta + \cos \gamma)$$

Bei Drehung der Anstrahlung in der γ -Ebene sind:

$$\alpha = \beta$$

und

$$\gamma = \gamma_0 + \psi$$

$\alpha_0 = \beta_0 = \gamma_0$ = Winkel zwischen der Symmetrieachse des Spiegels und den Kanten a

Daraus wird:

$$(35) \quad Sp(\gamma_0 + \psi) = Sp_0 \cos \psi$$

mit $\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma = 1$

und $\sin \gamma_0 = \frac{1}{3} \sqrt{6}$ bez. $\cos \gamma_0 = \frac{2}{3} \sqrt{3}$

und

$$(36) \quad \sigma_r = \sigma_r(\psi) = \frac{4\pi}{\lambda^2} Sp_0^2 \cdot \cos^2 \psi$$

mit einer dem \cos^2 -Gesetz folgenden Richtungsabhängigkeit.

Es liegt nahe, die gleiche Reflexionswirkung σ_r nicht mit einem großen Spiegel, sondern durch n kleine Spiegel auszulösen, etwa durch eine Tripelspiegelkombination als Zeile oder Mosaik (Abb. 21):

$$(37) \quad \sigma_r = n \sigma_n = \frac{4\pi}{\lambda^2} \cdot n \cdot Sp_n^2 \cos^2 \psi$$

σ_n = Rückstrahlquerschnitt des Einzelspiegels

Da in die Bestimmung des Rückstrahlquerschnittes aber das Quadrat der Fläche eingeht, wird durch die Aufgliederung der Rückstrahlfläche in n Einzelspiegel die Gesamtfläche um das \sqrt{n} -fache größer. Die Abbildungen 21 und 22 bringen dafür einen Größenvergleich (s. S. 44).

Die Kombination bringt also keinen Gewinn an Raumausnutzung oder Gewichts-erleichterung. Zudem verliert die Spiegelkombination die geringe Richtungs-empfindlichkeit eines Einzelspiegels

$$(38) \quad \sigma_r = \sigma_n \cos^2 \psi$$

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

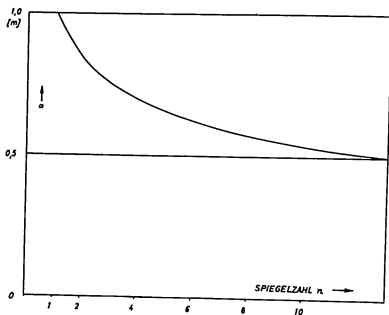


Abbildung 21
Abmessung der Einzelspiegel einer Gruppe bei gleichbleibendem Rückstrahlquerschnitt der Gesamtanordnung: $n \sigma_n = 4,2 \cdot 10^7 \text{ cm}^2$

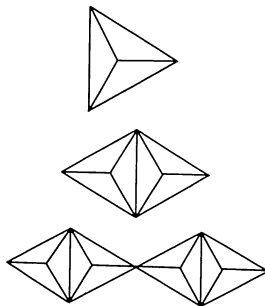


Abbildung 22
Tripel Spiegel-Kombinationen mit gleichem σ .
Größenvergleich für $n \sigma_n = 4,2 \cdot 10^7 \text{ cm}^2$ (1:50)

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

Das Spiegelpaar zeigt nämlich bereits einen Rückstrahlquerschnitt

$$(39) \quad \sigma_2 = 2 \sigma_0 \cos^2 \psi \cos^2 \left(\frac{\pi}{\lambda} \frac{l}{13} \cdot \sin \psi \right)$$

σ_0 = Rückstrahlquerschnitt des einzelnen Teilspiegels in Hauptrichtung und die Viererzeile:

$$(40) \quad \sigma_4 = 4 \sigma_0 \cos^2 \psi \cos^2 \left(\frac{\pi}{\lambda} \frac{l}{13} \sin \psi \right) \cos^2 \left(\frac{\pi}{\lambda} \frac{l}{13} \sin \psi \right)$$

Für den Einzelspiegel und das Spiegelpaar sind die Diagramme in der Abbildung 23 dargestellt. Die Winkelabhängigkeit ist bei der Zweiergruppe bereits erheblich.

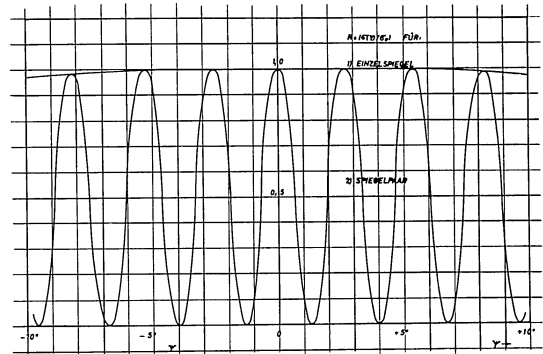


Abbildung 23
Rückstrahl diagramme für Einzelspiegel und Spiegelpaar

Im Gegensatz zu quantitativen Messungen ist in der Geodäsie aber die absolute Größe des Rückstrahlquerschnitts ohne Bedeutung, so lange sie nur zur Echogabe ausreicht. Bei zu großer Winkelempfindlichkeit schwankt

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

jedoch das Echo bei der geringsten Bewegung des Spiegels und irritiert so den Beobachter während der Ablesung am Oszillographen.

5.442 Aufstellung der Reflektoren

Die als Einzelspiegel oder Kombination ausgeführten Reflektoren werden über den Endpunkten der Meßstrecke oder in definiertem Abstand davon (5.33) aufgerichtet, und zwar so, daß sich eine direkte Sicht zum Gerät ergibt. Die Aufstellung ist wegen der großen Richtungsunabhängigkeit der Tripelspiegel nicht übermäßig stabil festzulegen. Es ist lediglich die geforderte Genauigkeit der Längenmessung einzuhalten.

Die Reflektoren können mit einfachen optischen Mitteln auf das Gerät ausgerichtet werden. Dagegen ist nach den Erfahrungen der eigenen Versuche wegen der Nebenziele und über größere Entfernungen das Einrichten der Antennen auf die Reflektoren bei den hohen Bündelschärfen schwierig. Die Suche des Reflektors auf dem Bildschirm - das übliche Verfahren zur Einstellung der Antennen - wird durch einen kleinen Hilfssender am Ort des Reflektors (auf der gleichen Frequenz und mit gebündelter Ausstrahlung in Richtung auf das Gerät) erleichtert. Dessen Signal überwiegt den Pegel aller Echozeichen und gibt so einen Anhalt für die Richtung zu den Reflektoren. Ist diese gefunden, und fest eingestellt, so ist das eigentliche Echo der Reflektoren auf dem Bildschirm unschwer aufzufinden: Der ungefähre Abstand z ist bekannt und seine Amplitude übersteigt den mittleren Echopegel beträchtlich. Zur Identifizierung wird dann entweder der Reflektor gekippt oder der Hilfssender als aktiver Reflektor eingerichtet (Bake): Sein Signal wird getastet und diese Tastung jeweils durch die Anstrahlung P_s des eigenen Gerätes ausgelöst. Auf dem Oszillogramm liegen dann Reflektorecho und Hilfssignal nebeneinander.

5.45 Zusatzeinrichtungen

Bei der Auswertung der Messung am Oszillogramm ist es zweckmäßig, das Echobild photographisch als Versuchsprotokoll festzuhalten. Die Erfahrung zeigt darüber hinaus, daß eine Ausmessung der Zeiten t_L an der Photographie methodisch günstiger ist.

Notwendiges Zubehör sind ferner Meßmittel zur Bestimmung der meteorologischen Parameter oder des Brechungsindex, wie in Abschnitt 5.361 beschrieben.

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen5.5 Zusammenfassung

Bei einem Einsatz des Funkmeßverfahrens in der Geodäsie können Methode und Gerät in nahezu ungeänderter oder sogar wesentlich vereinfachter Ausführung eingesetzt werden. Notwendig ist eine Markierung der Strecke im Gelände durch künstliche Reflektoren und eine verfeinerte Zeitmessung, die den Ansprüchen der Geodäsie an die Meßgenauigkeit gerecht wird.

6. Ausgeführte Streckenmessungen mit dem Funkmeßverfahren6.1 Versuchsgerät und Gelände6.11

Versuchsgerät ist ein Radargerät für die Küsten- und Hochseeschifffahrt vom Typ DECCA MARINE RADAR 159 B mit nachfolgenden Betriebsdaten:

Wellenlänge:	3,2 cm (X-Band)
Impulsleistung:	10 kW
Impulsdauer:	0,1 und 0,2 μ sec
Impulsfolgefrequenz:	1000 Hz
Umlauf:	23 U/min
Antennenbündelung:	1,6° horizontal, 23° vertikal
Bandbreite:	7 MHz

6.12

Bildgerät ist ein Breitbandoszillograph der Firma Grundig vom Typ 705 A mit nachfolgenden Betriebsdaten:

Bildschirmdurchmesser:	10 cm
Bandbreite:	7 MHz
Ablenkgeschwindigkeit:	40 km/sec
Synchronisierung:	extern von Radargerät

6.13

Als Markierungsreflektoren verwendet werden Tripelspiegel aus 1,5 mm starkem Aluminiumblech, die an den Kanten durch Winkeleisen gehalten sind. Die Kantenlänge a ist 1 m.

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

6.14

Versuchsgelände sind: Der Flughafen Essen-Mülheim (Abb. 24), ein leicht ansteigender Hang im Osten des Rollfeldes (Abb. 29) und eine Hügelkette jenseits der Ruhr in westlicher Richtung (Abb. 36).

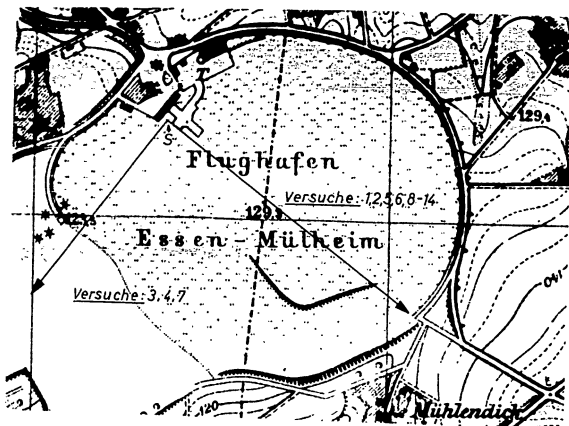


Abbildung 24

Versuchsgelände Flugplatz Essen-Mülheim mit eingetragenen Versuchsrichtungen (S = Sender). Die Nummern beziehen sich auf Tabelle 1

6.15

Aufstellungsort des Gerätes ist das Dach des Flughafengebäudes. Die Antenne steht 15 m über dem Flugplatzniveau. Die Tripelspiegel sind in allen Fällen direkt auf den Boden aufgesetzt, und zwar so, daß ihre Symmetrieachse ungefähr zum Gerät eingerichtet ist.

6.16

Meßmethode ist bei jedem Versuch: Suche des Markierungsreflektors auf dem Panoramaschirm bei umlaufender Antenne, dann Arretierung der Antenne

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

in der Richtung zum Reflektor und Umschaltung auf die Bilddarstellung am Oszillographen. Aufsuchen des Tripelspiegels auf dem Oszillogramm, Einstellung des Gerätes und Photographie des Bildschirms. Sämtliche Auswertungen sind am vergrößerten photographischen Protokoll ausgeführt.

6.17

Zubehör bei den einzelnen Versuchen war:

- 1 Spiegelreflex-Kamera (Rolleiflex-Automat)
- 1 Kleinbildkamera (Retina 1a)
- 1 Hilfssender (10 000 MHz, 15 mW-CW) mit Linsenantenne (33 db Gewinn)
- Funksprechgeräte und Transportmittel

Alle Oszillogramme sind auf Adox KB 17 bzw. KB 21 und Ilford HP3-Film aufgenommen.

6.18

Angaben über das Wetter während der Versuche wurden freundlicherweise vom Deutschen Wetterdienst, Wetteramt Essen-Mülheim, zur Verfügung gestellt.



Abbildung 25

Versuchsgelände Flugplatz Essen-Mülheim
Beispiel für eine Versuchsanordnung
A_s: Sendeantenne; R₁, R₂, R₃: Tripelspiegel

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

6.2 Versuchsreihe 1: Genauigkeit der Streckenmessung

Zur grundsätzlichen Erprobung des Verfahrens wurden zunächst auf dem Flugplatz Essen-Mülheim Versuche unter idealen Verhältnissen, d.h. ohne störende Nebenziele, durchgeführt. Anfang und Endpunkt der 40 bis 400 m langen Meßstrecken wurden mit je einem Tripelspiegel markiert. Der Anfang der Meßstrecken lag 148 bis 200 m vom Fußpunkt der Antenne entfernt. Die Meßstrecken selbst waren vorher mit einem 20 m langen Stahlband ausgemessen und wurden durch drei Tripelspiegel im Gelände doppelt ausgeführt, um aus dem Vergleich der Abstände Rückschlüsse über die Darstellungsgenauigkeit ziehen zu können (Abb. 25, s. S. 49).

6.21 Versuchsprogramm (Tabelle 1)

Tabelle 1

Versuche unter idealen Verhältnissen zur grundsätzlichen Erprobung des Funkmeßverfahrens für geodätische Streckenmessungen mit Tripelspiegeln an den Endpunkten der Meßstrecke

Vers. Nr.	Entfernungen zwischen		
	Fußpunkt Antenne und Tripelspiegel	Tripelspiegel 1 und Tripelspiegel 2	Tripelspiegel 2 und Tripelspiegel 3
1	154 m	40 m	40 m
2	154 m	100 m	100 m
3	148 m	200 m	200 m
4	148 m	400 m	400 m
5	154 m	80 m	120 m
6	154 m	150 m	50 m
7	148 m	400 m	200 m
8	200 m	200 m	100 m
9	200 m	200 m	80 m
10	200 m	200 m	70 m
11	200 m	200 m	60 m
12	200 m	200 m	50 m
13	200 m	200 m	40 m
14	200 m	200 m	30 m

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

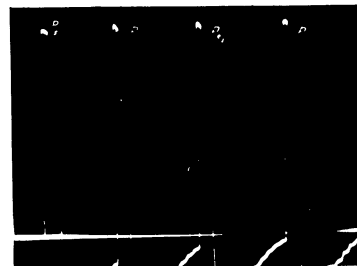


Abbildung 26

Versuch unter idealen Geländeverhältnissen auf dem Flugplatz Essen-Mülheim (Tabelle 1 Versuch 3)

Funkmeßgerät: B: 0,5 Meilen; VH: 0; AC_S: 0; AC_R: ein
Oszillograph: Ablenkung 135 kHz

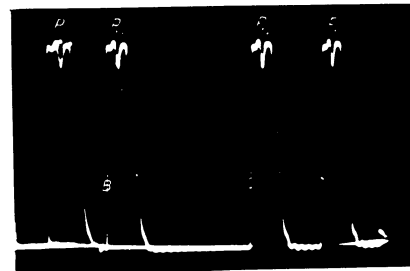


Abbildung 27

Versuch unter idealen Geländeverhältnissen auf dem Flugplatz Essen-Mülheim (Tabelle 1 Versuch 7)

Geräteeinstellung wie Abbildung 26, nur AC_R: aus

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

6.22 Auswertung

Die Oszillogramme wurden photographisch registriert und die Abstände der Echos auf Vergrößerungen (10fach bei Rolleiflex-Aufnahmen und 30fach bei Retina-Aufnahmen) mit einem Comparator ausgemessen.

Bezugspunkt für alle Messungen ist die Vorderflanke der Echos in der Höhe $q = 0,6$. Dargestellt wurde in der Regel die differenzierte Signalfolge (vgl. 5.36 f). Ein Beispiel dieser Oszillogramme geben die Abbildungen 26 und 27 (s. S. 51) für eine Doppelstrecke.

6.23 Ergebnisse

Die Tabelle 2 zeigt die aus jeweils 10 bis 30 Komparatormessungen ermittelten Durchschnittswerte.

Tabelle 2

Modellversuche auf dem Flugplatz Essen-Mülheim

Meßergebnisse

Lfd. Nr.	Strecke 1 in m	Strecke 2 in m	Abstand der Echoimpulse auf den Vergrößerungen		Abweichung Strecke 2 von Sollwert	
			Strecke 1 in mm	Strecke 2 in mm	Abs. in mm	in %
1	80	120	23,66	34,99	-0,50	-1,4
2	150	50	55,33	17,30	-1,14	-2
3	100	100	27,99	27,45	-0,54	-1,9
4	100	100	30,33	30,02	-0,31	1
5	100	100	35,44	35,24	-0,20	-0,56
6	400	200	56,04	27,62	-0,40	-0,71
7	400	200	54,72	27,48	+0,12	+0,22
8	400	400	30,46	30,79	+0,33	+1
9	400	400	33,90	34,26	-0,36	-1
10	200	100	33,57	16,86	+0,08	+0,48
11	200	80	32,46	13,10	+0,11	+0,9

Die vorzugsweise negativen relativen Differenzen liegen zwischen $-2,0 \cdot 10^{-2}$ und $+1 \cdot 10^{-2}$. Die geringste relative Differenz beträgt

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

$2,2 \cdot 10^{-3}$. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, daß das vorliegende Bildgerät über keine Zeiteichung verfügt.

6.24 Vergleich Oszillogramm - Panoramabild

Zum Vergleich mit der Darstellung auf dem Oszillogramm ist in der Abbildung 28 das Panoramabild des Versuchsgeländes mit den Bildern der Tripel- spiegel wiedergegeben. Die Meßstrecke ist in dieser Darstellung zwar deutlich markiert, aber eine genaue Messung kaum möglich.



Abbildung 28

Panoramabild mit drehender Antenne

P_{e1} und P_{e2} : Echoimpulse der Tripel- spiegel

Funkmeßgerät: $B = 0,5$ Meilen, $VH = 6$, $AC_R = 5$, $AC_S = \text{aus}$, AC_R unterdrückt die schwachen Echoimpulse der Rasenfläche des Flugplatzes

6.3 Versuchsreihe 2: Streckenmarkierung durch Reflektoren

Wie in Abschnitt 5.3 angeführt, muß bei der praktischen Messung die vorgegebene Strecke an ihren Endpunkten durch künstliche Reflektoren markiert werden. Im Versuch war zu prüfen, welche Grenzen einer solchen Markierung gesetzt sind durch die Nachbarschaft von großflächigen reflektierenden Objekten, durch Verdeckung bei vorgelagerten Sichthindernissen und durch die Ausbildung von Signalumwegen mit nachfolgenden Interferenzstörungen am Impulsbild.

6.31 Störung der Markierung durch stark reflektierende Nebenziele

6.311 Tripel Spiegel in 1400 m Entfernung vom Radargerät

Der Markierungsreflektor wurde an verschiedenen Punkten entlang einer stark befahrenen und beiderseits von Bäumen bestandenen Straße in 1400 m Entfernung vom Gerät aufgestellt. Ein Haus, ein Waldstück und der Verkehr auf der Straße wurden als Nebenziele benutzt (Abb. 29 und 30).

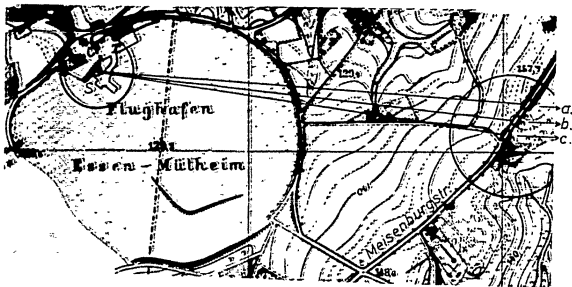


Abbildung 29

Tripel Spiegel in der Nähe stark reflektierender Nebenziele

S = Sender; a = Haus; b = Waldstück; c = Waldweg

6.3111 Tripel Spiegel vor einem zweistöckigen Haus (a)

Der Reflektor wurde in zwei Positionen (60 und 20 m) vor einem zweistöckigen Haus und dazwischenliegender Straße aufgestellt (Abb. 31).

Aus dem Oszillogramm dieses Versuches (Abb. 32 und 33a,b) ergibt sich, daß die Vorderflanke des Reflektorechos ungestört bleibt, während die Reflexe des Hauses, der Straßenbäume und des Straßenverkehrs die Rückflanke deformieren.

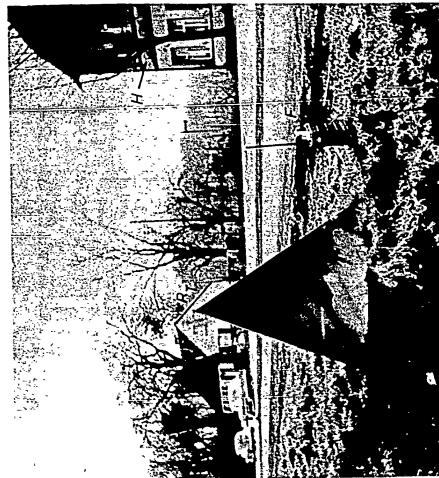


Abbildung 31
Tripel Spiegel auf der Erde 60 m senkrecht vom Haus entfernt
H = Tripel Spiegel, H = Haus, F = Funkprechgerät

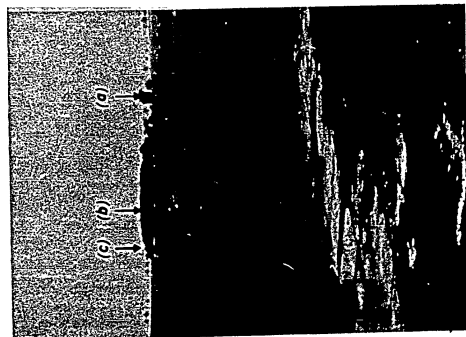


Abbildung 30
Tripel Spiegel in der Nähe stark reflektierender Nebenziele
Standpunkt: Antenne des Radargerätes

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

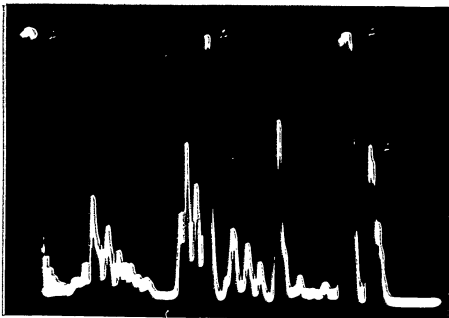


Abbildung 32
Tripelspiegel 60 m vor dem Haus

P_S - Sendepuls
 P_M - Echoimpuls des Tripelspiegels
 P_H - Echoimpuls des Hauses, stark atmend ²⁾

Funkmeßgerät: B = 1 Meile

VH = 2,5

$AC_S = 0$

$IC_H = \text{aus}$

Oszillograph: Abl. 400 kHz

2. Zwischen Tripelspiegel und Haus starker Straßenverkehr. Vorbeifahrende Fahrzeuge verstärkten die Atmung des Hausechos und deformierten die Rückflanke des Tripelspiegelechos

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

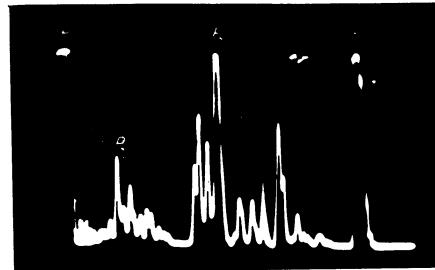


Abbildung 33a
Tripelspiegel 20 m vor dem Haus. Hausecho stark atmend auf der Rückflanke des Tripelspiegelechos. Einstellungen wie Abbildung 32



Abbildung 33b
Tripelspiegel 20 m vor dem Haus
Funkmeßgerät: Einstellung wie Abbildung 33a dazu $AC_S = 5$ und $VH = 5$.
Durch zeitabhängige Zurücknahme der Verstärkung AC_S werden - trotz höherer Gesamtverstärkung - die Echos der Nebenziele einschl. des Hausechos vor und hinter dem Tripelspiegelecho unterdrückt

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

6.3112 Tripelspiegel vor und im Hochwald (b)

Der Reflektor stand zunächst 30 m vor und dann 22 m in einem unbelaubten Hochwald ohne Unterholz mit leicht ansteigendem Boden. Den Oszillogramm. Abbildung 34 und 35a,b ist zu entnehmen, daß bei hinreichender Größe des Tripelspiegels auch bei Anwesenheit von Bäumen ein brauchbares Echo zu erwarten ist. Steht der Spiegel vor dem Wald, so atmet das Waldecho durch die stündige Bewegung der Baumäste stark auf der Rückflanke des Tripelspiegelschchos, ohne dessen Vorderflanke zu beeinflussen.

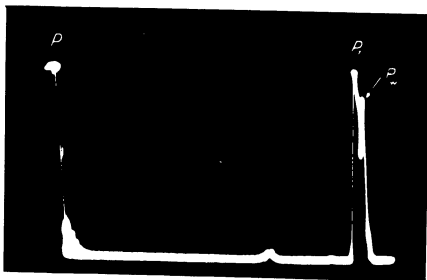


Abbildung 34

Tripelspiegel 30 m vor dem Hochwald

P_S = Sendepuls, P_T = Echoimpuls des Tripelspiegels
 P_W = Echoimpuls des Waldes (stark atmend)

Funkmeßgerät: B = 1 Meile, VH = 5, $AC_S = 5$, $AC_R =$ aus
 Oszillograph: Ablenkung 400 kHz

Wird der Tripelspiegel in den Wald hineingesetzt, dann zeigen sich auf Vorder- und Rückflanke seines Echos stark atmende Nebenechos, so daß der Fußpunkt des Tripelspiegelsignals in ständiger Bewegung ist. Eine Veränderung der Vorderflanke in halber Echohöhe (dort also, wo der Bezug der Messung angesetzt wird) ist nicht zu beobachten.

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

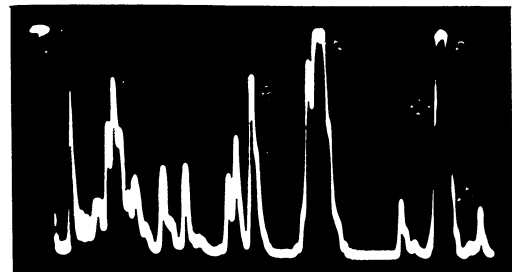


Abbildung 35a

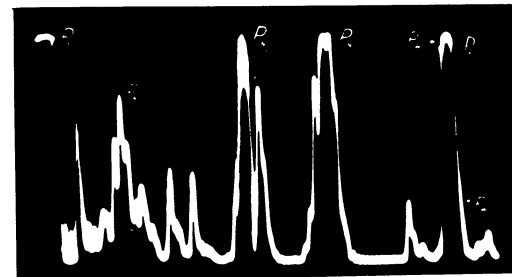


Abbildung 35b

Abbildung 35 a, b
 Tripelspiegel 22 m im Hochwald

P_S = Sendepuls, P_T = Echoimpuls des Tripelspiegels
 P_W = Echoimpuls des Waldes, P_N = Echoimpulse von Nebenzielen
 Funkmeßgerät: B = 1 Meile, VH = 2,5, $AC_S = 0$, $AC_R =$ aus
 Oszillograph: Ablenkung 400 kHz
 Die Oszillogramme sind mit etwa 1 Minute Abstand aufgenommen

Wird die Verstärkung herabgesetzt, so verschwinden nach und nach alle störenden Nebenechos, bis schließlich Sendepuls und Tripelspiegelreflex allein übrig bleiben (Abb. 36).

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen



Abbildung 36
 Tripelspiegel 22 m im Hochwald
 Einstellungen wie Abbildung 35a und b, nur $VH = 5$ und $AC_S = 5$

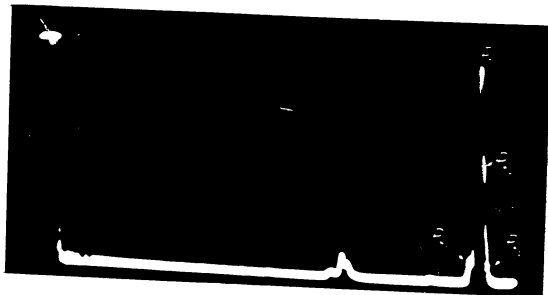


Abbildung 37
 Tripelspiegel auf einem Waldweg
 P_S = Sendepuls, P_T = Tripelspiegelecho
 P_{N1} = Nebenecho am Fuß der Vorderflanke (Waldrand, Baumgruppe)
 P_{N2} = Nebenecho auf der Rückflanke (Hügel mit Bäumen, möglicherweise auch weiter zurückliegende Teile des Waldes) des Tripelspiegelechos. Beide Nebenechos stark atmend
 Funkgerät: $B = 1$ Meile, $AC_S = 5$, $AC_R = \text{aus}$
 Oszillograph: Ablenkung 400 kHz

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

6.3113 Tripelspiegel auf einem Waldweg (c)

Der Reflektor wurde auf einem leicht ansteigenden Weg in der Höhe eines Waldrandes aufgestellt.

Die Anstrahlung ist bei einer Bündelbreite von etwa $1,6^\circ$ (horizontal) und einer Entfernung von 1400 m auf etwa 80 m beiderseits des Reflektors verteilt. Somit werden außer dem Spiegel auch ein seitlich gelegener Hochwald und eine zurückgesetzte Baumgruppe erfaßt, deren Reflexe auf der Vorder- bzw. Hinterflanke des Tripelspiegelechos erscheinen, durch Zurücknahme der Verstärkung aber unterdrückt werden können (Abb. 37).

6.312 Tripelspiegel in 4000 m Entfernung vom Radargerät

Südwestlich vom Aufstellungsort des Gerätes S liegt jenseits der Ruhr eine Anhöhe (Auberg) mit starkem Baumbestand und einer dem Flughafen zugewandten steil zur Ruhr abfallenden Lichtung (Abb. 38).



Abbildung 38
 Tripelspiegel auf dem Auberg
 S = Sender, R_T = Tripelspiegel

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

Hier wurde der Tripelspiegel R_T aufgestellt, in freier Sichtverbindung zum Gerät, im Vordergrund leichtes Buschwerk, zu den Seiten und nach hinten umbelaufter Hochwald mit geringem Unterholz. Eine optische Sicht war während der Versuche wegen des schlechten Wetters (starke Regenböen, Luftfeuchtigkeit 96 %, Dunst) nicht möglich. Das Radargerät wurde daher mit einem Hilfssender am Ort des Reflektors R_T in dessen Richtung eingewiesen und die Antenne in diese Richtung festgelegt, wobei der Reflektor zur Identifizierung einige Male auf und ab gekippt wurde.

War der Tripelspiegel einmal gefunden, so ließ sich das Oszillogramm durch Veränderung der Geräteeinstellung so weit verbessern, daß das Tripelspiegelecho nahezu von Störungen frei erschien (Abb. 39 und 40).



Abbildung 39
Tripelspiegel auf dem Aberg

Am Anfang eine Reihe stark atmender Nahziele (P_N). Starker Rauschpegel (R_P). Auf Vorder- und Rückflanke des Tripelspiegelechos (P_T) stark atmende Nebenechos (P_{N1} und P_{N2})

Funkmeßgerät: B = 3 Meilen, VH = 6, $\Delta C_S = 0$, $\Delta C_R =$ aus
Oszillograph: Ablenkung 50 kHz

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

Es ist jedoch nicht mehr frei von Amplitudenschwankungen, weil sich nun infolge der erhöhten Aufstellung und der großen Entfernung ein Signalumweg über den Untergrund im Zwischengelände ausbilden kann und damit eine Selbstinterferenz auftritt, deren Bedingungen (vor allem infolge der sehr ruhigen Wetterlage) ständig wechseln und ein "Atmen" des Tripelspiegelechos zur Folge haben. Bei den Versuchen auf dem Flughafen und an der Straße wurde dagegen eine Selbstinterferenz nicht beobachtet, weil hier der Spiegel auf dem Boden stand und sich so kein Umweg ausbilden konnte.

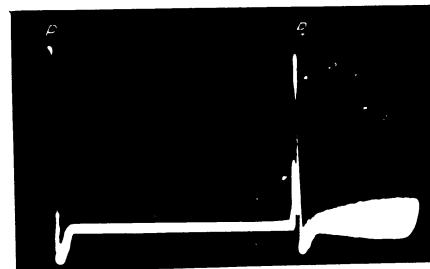


Abbildung 40
Tripelspiegel auf dem Aberg

Funkmeßgerät: Einstellung wie in Abbildung 39, dazu $\Delta C_S = 6$, $\Delta C_R =$ ein
Oszillograph: Wie Abbildung 39

6.33 Diskussion der Versuchsergebnisse

Sind reflektierende Objekte in der Nähe des Tripelspiegels zu finden, so läßt sich ihre Störwirkung auf das Echo des Reflektors durch Zurücknahme der Verstärkung und - wie bei den Versuchen häufig erprobt - durch

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

Differenzierung der Echofolge unterdrücken, wenn das Echo des Tripelspiegels das seiner Umgebung hinreichend überwiegt.

Das setzt voraus, daß der Rückstrahlquerschnitt σ des Tripelspiegels groß genug gewählt ist, und daß er voll zur Wirkung kommt (Ausrichtung und freies Vorfeld). Es setzt ferner voraus, daß nicht durch ungenügende Bündelschärfe oder trotz scharfer Bündelung infolge zu großer Entfernung oder aber durch zu lange Impulsdauer sich viele kleine und an sich unbedeutende Störsignale häufen und einen Störpegel schaffen, der groß genug ist, um das Markierungsecho zu verdecken.

6.4 Praktische Erfahrungen6.41 Wettereinfluß

Die Versuche wurden unter normalen und schlechten Wetterbedingungen ausgeführt. Bei der Größe der Reflektoren bleiben die bekannten Störeffekte der Signalschwächung und der Echoverdeckung durch Niederschlag unbedeutend. Laufzeitfehler durch unterschiedliche Wetterverhältnisse konnten wegen der geringen Meßgenauigkeit der Vorrichtung nicht beobachtet werden.

6.42 Beweglichkeit

Die Tripelspiegel in der gewählten Ausführung (Kantenlänge 1 m) waren durch einen Mann zu transportieren und auch in schwierigem Gelände einzusetzen. Eine Vorrichtung zur erhöhten Aufstellung der Reflektoren stand nicht zur Verfügung. Die ortsfeste Aufstellung des Radargerätes schränkte die Auswahl geeigneter Versuchsstrecken erheblich ein.

6.43 Geräteeinstellung

Bei der geringen Arbeitsentfernung und dem großen Rückstrahlquerschnitt der Reflektoren wurde in dem benutzten Gerät mit der geringst möglichen Verstärkung gearbeitet; Echozeichen aus dem Zwischengelände, die das Oszillogramm verwirrten, wurden durch die bei Radargeräten übliche Einrichtung einer zeitabhängigen Verstärkungsregelung (anticlutter-sea) unterdrückt.

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen7. Formelzeichen und Abkürzungen

A	Amplitude
A_S	Sendeanenne
A_E	Empfangsanenne
AC_S	Anticlutter-Sea (Zeitabhängige Verstärkungsminderung)
AC_R	Anticlutter-Rain (Differenzierung der Echoimpulse nach der Zeit)
a	Kathetenlänge der Dreiecke des Tripelspiegels
B	Bildbereich (in Abbildungen: Bildgerät)
B_a	Bandbreite
b	Amplitudenverhältnis
C	Konstanten
c_0	Lichtgeschwindigkeit im Vacuum
c	Lichtgeschwindigkeit für beliebige Medien
δ_c	Fehler durch ungenaue Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit
γ	Dehnungsfaktor für die Zeitbasis eines Oszillographen
D	Durchmesser
d	Weglängen, Abstände
Δd	Wegdifferenz
Δ	Abstand zweier Markierungen auf dem Bildschirm
δ	Fehler
E	Empfänger
e	Partialdruck des Wasserdampfes in der Atmosphäre in Millibar
ϵ	Dielektrizitätskonstante
FN	Frequenznormal
F	Impulsfolge (Tastfrequenz)
f	Frequenzen
f_M	Modulationsfrequenzen
G	Antennengewinn (Intensitätsgewinn)

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

GE	Mikrowellengenerator
IG	Impulsgeber
KG	Wellenzahl $2\pi/\lambda$
k_{rot} $k_{grün}$	Fehler in der Bestimmung der Hyperbeln (DECCA-Verfahren)
K	Kerrzelle
LS	Lichtschleife (Geodimeter)
l	Hypothenusenlänge der Dreiecke eines Tripelspiegels
λ	Wellenlänge
M	Dreieckseiten bei der Triangulation 1. Ordnung (in engl. Landmeilen = 1 ml)
m	Zahl der abgelesenen Schwingungen eines Frequenznormals
μ	Punktschärfe
N	Partikelzahl
N_s	Sendespitzenleistung
\bar{N}_s	mittlere Sendeleistung
n	Brechungsindex (Atmosphäre)
Δn	Fehler in der Bestimmung des Brechungsindex der Atmosphäre
O	reflektierende Objekte
ω	Kreisfrequenz
PPI	Panoramadarstellung
P_N	Echoimpulse von Nebenzielen
P_e	Echoimpulse
P_{st}	Störecho von Nebenzielen
P'_e	Summenecho (Nutz- und Störecho)
P_T	Echoimpulse von Tripelspiegeln
P_w	Echoimpulse eines Waldes
P_H	Echoimpulse eines Hauses
$\dot{P}_e(t)$	Differenzierung der Echofolge P_e nach der Zeit

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

P_s	Sendepuls
P_f	Steuerimpuls
P_b	Photozelle (Geodimeter)
p	Luftdruck in Millibar
$\bar{\varrho}$	Azimet, Winkel in der Horizontalen
$\bar{\varrho}_b$	horizontale Bündel- oder Halbwertsbreite
φ_H	Winkel der sich schneidenden Hyperbeln (DECCA-Verfahren)
φ	Phasenwinkel einer Schwingung
$\Delta\varphi$	Phasendifferenzen
q	relative Höhe des Meßpunktes auf der Impulsvorderflanke
ψ	Anstrahlungsrichtung eines Reflektors
R	Reflektor, Tripelspiegel
S	Sender
S_p	Spiegelöffnung
$S_p(\alpha, \beta, \gamma)$	Projektion der Spiegelöffnung in die Anstrahlungsrichtung (α, β, γ)
σ	Rückstrahlquerschnitt
SR	Schalter zur Wechselsteuerung der Antenne für Sendung und Empfang
T	Temperatur in Grad Kelvin
TG	Tastgerät
t	Zeit
t_L	Laufzeit der Impulse (Echolaufzeit)
t_a	Impulsanstiegszeit
Δt	Zeitdifferenzen
δt	Zeitfehler
τ	Impulsdauer
τ'	Länge des Echobildes auf dem Bildschirm
Θ	Elevation und Winkel in der Vertikalen

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

- Θ_b Vertikalbündel- oder Halbwertsbreite
- \bar{U}_B Überlagerungsstufe im Empfänger
- V_H regelbare Verstärkung (Funkmeßgerät)
- V_P Volumen meteorologischer Partikel
- V Verstärker
- X Ortungs- oder Aufpunkt
- Z Meßstrecke, Entfernungen
- δZ Meßfehler
- ΔZ Abstände, Streckendifferenzen
- Z_{max} größte Reichweite eines Funkmeßgerätes

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

Anhang 1
Tabelle 1
Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum (c_0)
1. Optische Methoden

Lfd. Nr.	Jahr	Beobachter	Länge der Versuchstrecke	Zahl der Messungen	Mittelwerte (in km sec ⁻¹)	Mittlere Fehler -1 (in km sec ⁻¹)	Bestimmungs- methoden	Schriftum-Nr.
1	1860-1862	NEWCOMB	5,10190 km 7,44242 km	254 in 3 Gruppen	299860	± 30	rotierender Spiegel, Fernsicht, Foucault	[2], [6], [240]
2	1898-1922	FERROTIN, FREN	11,8622 km 45,9507 km	1577 in 12 Gruppen 2465 in 23 Gruppen	299901	± 84	rotierendes Spiegel, verbessertes Niveau	[6], [63], [240]
3	1879	MICHELSON	0,605 km	60 in 14 Gruppen	299910	± 50	rotierender Spiegel, Fernsicht, Foucault	[19], [63], [240]
4	1882	MICHELSON	0,624645 km	590 in 23 Gruppen ¹⁾	299853	± 60	rotierender Spiegel, verbessertes Foucault	[63], [240]
5	1924	MICHELSON	51,42618 km	16	299802	± 30	rotierendes sechseckiges Prisma	[6], [63], [240]
6	1926	MICHELSON	35,4245 km	95 in 8 Gruppen	299796 2)	± 4	rotierendes sechseckiges Prisma	[6], [63], [240]
7	1931-1932	MICHELSON, PEASE, PEARSON	1,594,2658 km ³⁾	2895 in 233 Gruppen 24 Monaten	299774	± 11	rotierendes sechseckiges Prisma	[6], [63], [240]

1. unklar, ob Ablesungen oder selbständige Beobachtungen gemeint sind
2. Ablesungen bis 1926; 299798 km + 20 km
3. Versuchstrecke der lfd. Nr. 1 bis 6 in Luft, Werte auf Vakuum korrigiert.
4. Versuchstrecke lfd. Nr. 7 in Vakuum (0,5 bis 5,5 mmHg)

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

Tabelle 2
Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum (c)
2. Optisch-elektrische Methoden 1)

Lfd. Nr.	Jahr Beobachter	Länge der Versuchsstrecken	Zahl der Messungen	Mittelwerte (in km sec ⁻¹)	Mittlerer Fehler (in km sec ⁻¹)	Bestimmungsmethoden	Untersuchungs- bzw. Modulationsfrequenz in MHz	Schrifttum Nr.
8	1928 KAROLUS -1929 MITCHELSON	250,053 m ± 10 mm 532,103 m ± 12 mm	108 372	299778 299784,2	± 20	Konstanter Lichtweg zwischen 2 Kerral- elektrooptischen moth.-visuelle Beob.	3,296570 3,601130 4,195700 7,205614	[50], [51], [52], [63], [66]
9	1937 ANDERSON	159,3478 m ± 60 mm	651 in 12 Gruppen	299771	± 15	1 Kerral- Lichtweg, EP Modula- tion, Photokathode, wie 9, verbessert.	14,105120	[24], [61], [63], [66]
10	1940 ANDERSON	171,6147 m	2895 in 22 in Laufe von 18 Monat.	299776	± 14		19,2	[23], [61], [63], [66]
11	1940 HÜTTEL	48,5 m bis 118,4 m	135 in 8 Gruppen	299771	± 10	wie KAROLUS u. Mit- telelektroopt. Varia- tion des Lichtweges, Photokathode.	5,058560 8,299889 12,646400	[23], [61], [63], [66]
12	1949 HOUSTON	78,028 m	400 in 20 Gruppen	299775	± 9	Beste Fizeaumeth. des 2. Ordngs ein Fizeoquarz.	14,255472 115	[26], [27], [28]
13	1948 BERGSTAND	9065 m 4208 m	ohne Angaben	299796	± 2	vgl. Anhang 2	8,32157	[19], [21], [12]
14	1949 BERGSTAND	696,0448 m 5143,5825 m 182,4761 m	500 in 13 Gruppen	299793,1	± 0,25	vgl. Anhang 2	8,322230	[12], [23]
14a	1950 BERGSTAND	5413,5061 m	47	299793,14 3)	± 0,41	vgl. Anhang 2	8,322287	[12a], [23], [126]

1. Alle Messungen in Luft, auf Vakuum korrigiert
2. Korrigiert von ANDERSON wegen der nicht berücksichtigten Differenz zwischen Gruppen- und Phasengeschwindigkeit
3. Mittelwert aus den Messungen 1949 und 1950: 299 793 km sec⁻¹ ± 0,20 km sec⁻¹

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

Tabelle 3
Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum (c)
3. Elektrische Methoden (Funkverfahren)

Lfd. Nr.	Jahr Beobachter	Zahl und Länge der Versuchsstrecken	Zahl der Messungen	Mittelwerte (in km sec ⁻¹)	Mittlerer Fehler (in km sec ⁻¹)	Bestimmungsmethoden	Frequenz	Schrifttum Nr.
15	1949 ASLAKSON	47 zwischen 108 und 387 km	6-18 Mes- flüge für Jede Strecke	299792,4	± 2,4	SHORAN (vgl. Anhang 2)	230-250 MHz	[53], [54], [55]
16	1951 ASLAKSON	15 zwischen 70 und 570 km	179 Mes- flüge	299794,2	± 1,4	SHORAN (vgl. Anhang 2)	230-250 MHz	[53], [57]
17	1944 SMITH, FRANKLIN, WILLING	125 km 140 km	4 Versuche, Zahl der Mess. ohne Angabe	299795	± 50	O-H	43 MHz 59,9 MHz 59,4 MHz	[54], [59], [65]
18	1945 MENDOZA -1947	Reise zwischen Grundstationen 43,1278 km 52,2314 km	4 Versuche, Zahl der Messflüge unbekannt	299440	± 40	DECCA (vgl. Anhang 2) Verfahren über der Basis in 200 m Höhe	95 kHz 103 1/2 kHz 127 1/2 kHz	[53], [58], [65]
19	1947 JONES	50 km 67,5 km	36 in 4 Gruppen	299777	± 25	ONS Stationen an den Endpunkten der Strecken.	3300 MHz	[53], [65]
20	1949 JONES	Entfernung der 20- denstation 160 km	22 Mes- flüge in 4 Gruppen	299843	± 25	ONS Stationen an den Endpunkten der Strecken in 20000 ft und 30000 ft Höhe.	3300 MHz	[53], [65]

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

Tabelle 4
Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum (c₀)
4. Elektrische Methoden (Spezialverfahren)

Lfd. Nr.	Jahr	Beobachter	Versuchsstrecke bes. - Länge	Zahl der Messungen	Mittelwert (in km sec ⁻¹)	Mittlerer Fehler (in km sec ⁻¹)	Bestimmungsmethoden	Frequenz in MHz	Schrifttum Nr.
21	1906 -1907	ROSSA ¹⁾ DORSEY	-	220	299704	± 10 km	Verdünnte d. elektro- dynamischen Ladungen	-	[57], [61], [62]
22	1923 -1924	MERZTER ²⁾	12 Strohrohren zw. 4- 5,99065 m und 4,00269 m	12	299702 ³⁾	± 50 km	Stehende elektr. Wellen auf Drähten	um 75 MHz	[63], [64]
23	1952	BOL ³⁾	Zylinder-Resonator Länge 2,74 mm	ohne Angabe	299709,5	± 0,4	Resonanz im Hohlraum (TE ₀₁₂ und TE ₀₂₁ -Typ)	keine Angabe	[59], [63], [64]
24	1947	ESSEN ³⁾ GORDON SMITH	Zylinderresonator Durchm. 5,9957 mm	4	299792	± 9	Resonanz im Hohlraum (TE ₀₁₀ und TE ₀₁₁ -Typ)	3101,5365	[65], [63], [64]
25	1950	ESSEN ³⁾	Zylinder-Resonator Länge regulierbar Durchm. 65,1752 mm	50 in 0 Gruppen	299792,5	± 3	Resonanz im Hohlraum (TE _{01n} -Typ)	9500,9000 10330,5966	[63], [64]
26	1952	PROOME ⁴⁾	2,470 m bis 7,320 m	3 Beobach- ter mit 30 12 Mess.	299792,6	± 0,7	Interferometer mit Mikroreflexion	24005	[60]
27	1954	PROOME ⁴⁾	1,5 m bis 7,5 m	3 Beobach- ter mit 30 10 Mess.	299793,0	± 0,3	Interferometer mit Mikroreflexion	24005	[60]

1. Die Versuche haben nur historische Bedeutung
2. Berechnet aus dem von MERZTER angegebenen Wert 299 700 für c in Luft
3. In Vakuum
4. Versuchsstrecke in Luft
5. 1955 gibt ESSEN folgende Werte an: 299 792,5 ± 1 km sec⁻¹, 299 792,6 ± 0,7 km sec⁻¹

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

Tabelle 5
5. Durchschnittswerte für die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum (c₀)

Jahr	Durchschnittswert in km sec ⁻¹	Mittlerer Fehler in km sec ⁻¹	berechnet durch	Aus den Beobachtungen von (lfd. Nr. der Tabellen 1-4)	Schrifttum Nr.
1941	299 776	± 4	BIRGE	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,21,22	[61]
1943	299 777	± 20	STILLE	8,7,10,11	[66]
1944	299 773	± 10	DORSEY	1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11	[62]
1951	299 790	± 6	STILLE	7,8,10,11,12,14,15,22,23,24,25	[67]
1951	299 790,2	ohne Angabe	ESSEN	14,15,17,23,24 und Durch- schnittswert von BIRGE	[64]
1951	299 790	± 0,7	BEARDEN, WATTS	14,14a,23,25 und Durchschnitts- wert von DORSEY	[60]

Anhang 2

Kurze Beschreibung der Meßverfahren

(Technische Einzelheiten der Verfahren sind im angegebenen Schrifttum enthalten.)

1. BERGSTRAND-Verfahren (Abb. 41)

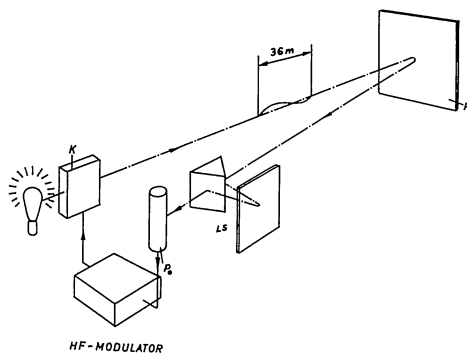


Abbildung 41
BERGSTRAND-Verfahren (Geodimeter)

Ein mit 8,33 MHz hochfrequent modulierter Lichtstrahl (Kerrzelle K) wird zu einem Planspiegel R gesandt, der das Ende der Meßstrecke markiert. Nach der Reflexion wird das Licht auf eine von der gleichen Hochfrequenz gesteuerten Photozelle Po am Anfang der Strecke geführt. Mit einer zusätzlichen Lichtschleife LS läßt sich der Lichtweg stetig verlängern, bis zwischen ausgesandtem und empfangenem Lichtstrahl Phasengleichheit besteht.

Bei der Modulationswellenlänge von etwa 36 m ist die Bedingung der Phasengleichheit (infolge der Reflexion) bei Längenänderungen von etwa 9 m

erfüllt. Die Strecke ist daher in Abschnitten von 9 m vieldeutig und muß auf einige Meter genau bekannt sein [117], [118], [123], [129], [131], [133].

Das verbesserte Modell des Geodimeters verzichtet auf die zusätzliche Lichtschleife und führt stattdessen zwei Messungen mit verschiedener Modulationsfrequenz f_{M1} und f_{M2} aus, aus der sich die Gesamtstrecke z errechnen läßt [72], [132]:

$$(41) \quad z = \frac{f}{4} \cdot \frac{c}{f_{M1} - f_{M2}}$$

2. DECCA-Verfahren (Abb. 42)

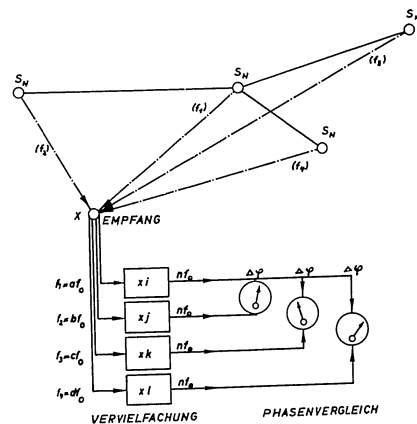


Abbildung 42
DECCA-Verfahren

In einer DECCA-Kette strahlen ein Leitsender S_H und drei Nebensender S_1, S_2, S_3 auf je einer Frequenz ($f_1 - f_4$) im Bereich von 70 bis 120 kHz, die sich

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

als ganzzahlige Vielfache von einer Frequenz f_0 ableiten lassen. Leit- und Nebensender sind phasenstarr gekoppelt.

Im Empfänger E am Ortungspunkt X werden durch unterschiedliche Vervielfachung die Signale von Leit- und Nebensender auf eine gemeinsame Vergleichsfrequenz nf_0 gebracht, an ihr die Phasendifferenzen zwischen den vier Signalen gemessen und auf drei verschiedenfarbig gekennzeichneten Anzeigeräten zur Darstellung gebracht.

Durch die gegenseitigen Phasenunterschiede $\Delta\phi$ ist der Ortungspunkt in Hyperbelkoordinaten gegeben, die für die Phasenunterschiede (O-Hyperbel) gerechnet und in Karten eingezeichnet sind [15], [16], [139] bis [14], [148] bis [150], [154], [157].

3. Das SHORAN-Verfahren (Abb. 43)

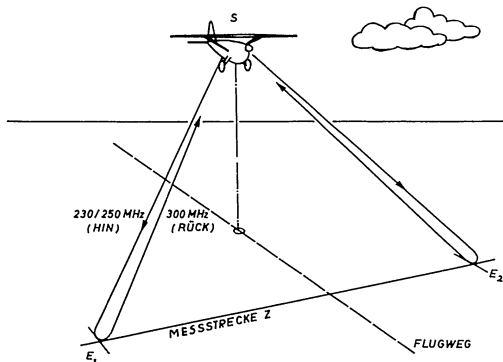


Abbildung 43
SHORAN-Verfahren. Prinzip

Ein Sender S im Ortungspunkt (Flugzeug) sendet auf 250 und 230 MHz (im Wechsel von 1/20 sec) Impulse mit einer Folgefrequenz von 930 Hz aus.

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

Zwei ortsfeste Bodenstationen E_1 und E_2 empfangen die Impulse, setzen sie mit einer festen Verzögerung von 1μ sec auf die Trägerfrequenz von 300 MHz um und strahlen sie in Richtung auf den Ortungspunkt wieder aus. Im Empfänger der beweglichen Station sind beide Antwortimpulse auf dem Bildschirm mit entgegengesetzter Polarität dargestellt und können durch dekadisch gestaffelte Phasenschieber mit dem Sendepuls zur Deckung gebracht werden. Mit den Phasenschiebern sind Zählwerke gekoppelt, auf denen sich die Entfernungen z_1 und z_2 zu den Bodenstationen ablesen lassen [15], [16], [210], [215].

Bei geodätischen Messungen sind die Bodenstationen auf den Endpunkten der zu messenden Strecke z aufgestellt, die von einem Flugzeug etwa in der Mitte in einer sogenannten Achterlinie überflogen wird. Auf diese Weise werden vier voneinander unabhängige Messungen gewonnen und ein bei der Änderung des Drehsinns der Anzeigeräte beobachteter systematischer Fehler vermieden, weil die Entfernungen zu den Bodenstationen entweder laufend zu- oder abnehmen (Abb. 44 und 45) [194].

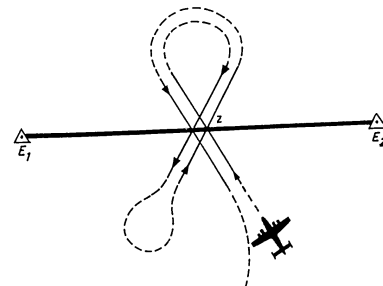


Abbildung 44
SHORAN. Überfliegen der Messstrecke z in einer Achterlinie

Bei kurzen Messstrecken (etwa 50 km) wird eine Verlängerung der Messstrecke außerhalb der Bodenstationen überflogen [194] (Abb. 46).

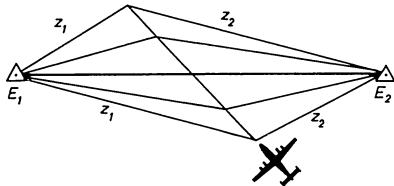


Abbildung 45
SHORAN. Überfliegen der Meßstrecke z

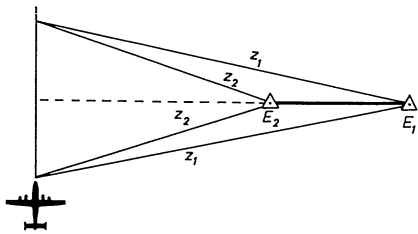


Abbildung 46
SHORAN. Überfliegen der Verlängerung der Fluchtlinie $E_1 - E_2$ außerhalb der Bodenstationen bei kurzen Meßstrecken

Zählwerke, Höhenanzeiger und weitere Instrumente zur Angabe wichtiger Meßdaten sind auf einer Tafel zusammengefaßt, die in Abständen von 2 sec während der Messungen fortlaufend fotografiert wird (Abb. 47) [19], [212].

Für die Dauer der Messung (die 50 Sekunden vor Überfliegen der Fluchtlinie beginnt und nach der gleichen Zeit endet) hält der Beobachter im Flugzeug die Antwortimpulse von Hand auf dem Bildschirm in der gegenseitigen Deckung fest [20], [21], [214].

Aus diesem photographischen Protokoll über 30 Meßwerte lassen sich Minimumsumme oder Maximaldifferenz - das sind die Entfernungen zwischen

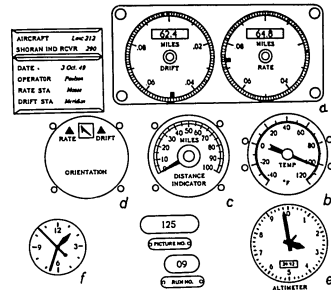


Abbildung 47

SHORAN. Instrumententafel im Flugzeug

- a) Entfernung zu den Bodenstationen: Der schwarze umlaufende Punkt gestattet Ablesungen bis auf ein 1/1000 Meile = ca. 1,6 m. "Rate" und "Drift" sind Bezeichnungen für die Bodenstationen
Rate: 64,874 Meilen
Drift: 62,450 Meilen
- b) Temperatur: in Fahrenheit, hier 102°
- c) Distance Indicator: Kontrolle der Koinzidenz der Impulse. Steht auf 0: Die Impulse liegen aufeinander
- d) Orientation: Richtungsangabe während des Überfliegens. Die Fluchtlinie wird hier von rechts nach links überflogen
- e) Altimeter: Höhenmesser (hier 12980 Fuß)
- f) Zeit: Zeit (hier 13 Uhr 33 Min. 53 Sek.)

Flugzeug und Bodenstation beim Überfliegen der Fluchtlinie z - zeichnerisch und rechnerisch bestimmen (Abb. 48 und 49) [222].

Automatische Hilfsmittel wie ein Impulsverschiebungsgerät oder eine graphische Registrierung der Entfernungen zu den Bodenstationen im Augenblick der Messung haben sich noch nicht bewährt [19], [21], [213].

Aus den mit Hilfe der Ausgleichsparabel gefundenen SHORAN-Entfernungen werden die wirklichen Entfernungen zwischen Flugzeug und Bodenstationen

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

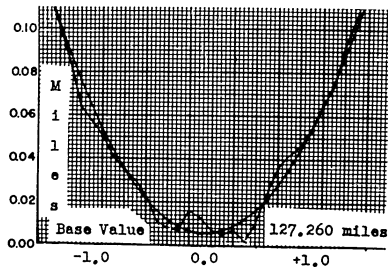


Abbildung 48

SHORAN. Ausgleichsparabel bei Meßflügen zwischen den Bodenstationen

Der angenommene Grundwert (Base Value) liegt etwas tiefer als die gemessene Minimumsumme. Um die Minimumsumme der Ausgleichsparabel zu erhalten, wird der y-Wert ihrer Gleichung für x=0 zu dem Grundwert addiert.

Beispiel: Parabelgleichung: $y = 0,05302 x^2 + 0,00538$
 Grundwert: 127,260 Meilen
 y für x = 0 + 0,00538 Meilen
 Minimumsumme: 127,26538 Meilen

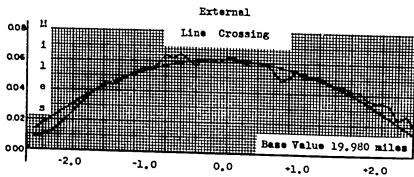


Abbildung 49

SHORAN. Ausgleichsparabel bei Meßflügen außerhalb der Bodenstationen

Der y-Wert für x=0 der Parabelgleichung wird von dem Grundwert abgezogen

Beispiel: Parabelgleichung: $y = -0,00799 x^2 + 0,06184$
 Grundwert: 19,980 Meilen
 y-Wert für x = 0 - 0,06184 Meilen
 Maximaldifferenz 19,91816 Meilen

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

durch Begrädigung des Impulsweges, der infolge des gegen den Boden ständig wachsenden Brechungsindex der Atmosphäre leicht gekrümmt ist, und durch Korrektur der Wellengeschwindigkeit aus den meteorologischen Daten bestimmt [216], [217], [220], [228].

Aus diesen wirklichen Schrägentfernungen zu den Bodenstationen wird die Länge der Fluchtlinie unter Benutzung der Höhenangaben für Flugzeug und Bodenstationen und unter Berücksichtigung der Erdkrümmung berechnet [218], [221], [225 bis 227], [231 bis 245].

Dr.-Ing. Joachim LORENTZ, Bonn
 Dr.-Ing. Karlheinz BROCKES, Mülheim (Ruhr)

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

Anhang 3

S c h r i f t t u m

Das Schrifttum ist nach fachlichen Gesichtspunkten gegliedert.
Jeder Abschnitt ist in sich alphabetisch geordnet.
Ein Autorenverzeichnis befindet sich am Ende.

G l i e d e r u n g

	<u>Nr. - Nr.</u>
1 Geodäsie, grundsätzliche Fragen der elektrischen Streckenmessung, Funkmeßverfahren	1 - 18
2 Lichtgeschwindigkeit	
2.1 Optische Methoden	19 - 25
2.2 Optisch-elektrische Methoden	24 - 32
2.3 Elektrische Methoden	33 - 59
2.4 Zusammenfassende Berichte, Bestimmung von Durchschnittswerten	60 - 68
3 Zusammenfassende Berichte über Anwendungen von elektrischen Verfahren in der Geodäsie und auch Photogrammetrie	69 - 85
4 Anwendung von elektrischen Meßverfahren nur in der Photogrammetrie	
4.1 Zusammenfassende Berichte	86 - 103
4.2 Standort- und Kursbestimmungen für Luftbilder	104 - 106
4.3 Aufnahme von Geländeprofilen	107 - 114
4.4 Auswertung von Panoramabildern für Karten	115 - 116
5 Verfahren mit moduliertem Licht	117 - 133
6 Phasendifferenzverfahren	
6.1 LORAN	134 - 138
6.2 DECCA	139 - 158
6.3 RANA (LORAC)	159 - 163
6.4 RAYDIST	164 - 173
7 Laufzeitverfahren mit aktiven Reflektoren	
7.1 SHORAN	
7.11 a) Geschichte, Planung, Versuchsberichte	174 - 204

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

7.12 b) Technik der Geräte, Beseitigung der systematischen Fehler, Hilfsgeräte	205 - 215
7.13 c) Korrektur der SHORAN-Werte, Höhenbestimmung von Flugzeug und Bodenstationen	216 - 230
7.14 d) Berechnung der Fluchtlinie zwischen den Bodenstationen aus den korrigierten SHORAN-Werten	231 - 245
7.2 Electronic Position Indicator, OBOE, G-H, Funkmeßgerät RC 184	246 - 254
8 Laufzeitverfahren mit passiven Reflektoren	255 - 262

1. Geodäsie, grundsätzliche Fragen der elektrischen Streckenmessung, Funkmeßverfahren

[1] ASLAKSON, C.I.	Some Elementary Aspects of Geodesy. Journ. Coast Geod. Surv. (1951) Nr. 4, S. 107 - 111
[2] BENZ, Fr.	Beiträge zur Frage der elektrischen Streckenmessung. Öst.Z.f.V. Telegr., Teleph., Funk- und Fernsehtech. 5 (1951) Nr. 12, S. 10 - 13
[3] BENZ, Fr.	Die physikalischen Grundlagen der elektrischen Streckenmessung. Öst.Z.f.V. 40 (1952) Nr. 3, S. 67 - 71 und Nr. 4, S. 102 - 108
[4] DE BROGLIE, L.	Les Ondes électromagnétiques centrimétriques. Editions de la Revue d'Optique et Instrumentale, Paris 1948
[5] COLIN, R.I.	Survey of Radio Navigational Aids. Elect. Commun. 24 (1947) Nr. 2, S. 219 - 261
[6] ESAU, A.	Ortung mit elektrischen und Ultraschallwellen in Technik und Natur. Arbeitsg. Forschung Nordrhein-Westfalen (1953) Heft 15, S. 7 - 38 auch in Bücherei d. Funkortung 2 Teil II (1953) S. 11 - 30
[7] HALL, J.S.	Radio Aids to Navigation. New York 1947, McGraw Hill
[8] JORDAN, W. und O. EGGERT	Handbuch der Vermessungskunde. 9. Auflage. Stuttgart 1931, Metzlersche Verlagsbuchhandlung
[9] LANSING, G.S.	How Accurate is First-Order Triangulation? Journ. Coast Geod. Surv. (April 1950) Nr. 3, S. 53 - 56

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

- [10] MESSERSCHMIDT, W. Grundlagen und Gerätefragen der Funkmeßtechnik. Arch.techn.Messen V 1122-1 (1951)
- [11] MESSERSCHMIDT, W. Die Messung von Längen mit Hilfe der Funkmeßtechnik. Archiv techn.Messen V 1122-2 (1952)
- [12] RIDENOUR, L. Radar System Engineering. New York 1947, McGraw Hill
- [13] SMITH, R.A. Radio Aids to Navigation. University Press, Cambridge 1947
- [14] SONNENBERG, G.J. Radar and Electronic Navigation. London 1947 Georg Newnes
- [15] STANNER, W. Leitfaden der Funkortung. Garmisch-Partenkirchen 1952, Elektron Verlag
- [16] ZIMMERMANN, F. Funkortung. In RINT: Handbuch für Hochfrequenz- und Elektrotechniker Bd. II, S. 483 - 534. Berlin 1953, Verlag für Radio-, Foto- und Kinetik
- [17] Reichsfestpunkterlaß RdErl.d.RM d.J. vom 15.8.1940 - VI A 8976/40 - 6810 (FP - Erl.) Mitt.d.Reichsamts f.Landesaufnahme 16 (1940) Nr. 5 (Sonderdruck)
- [18] Geodätisches Versuchsfeld Empelde. Niedersächsisches Vermessungsamt, Sonderheft Nr. 2 (1955)

2. Lichtgeschwindigkeit

2.1 Optische Methoden

- [19] MICHELSON, A.A. Preliminary Experiments on the Velocity of Light. Astrophys. Journ., Chicago, 60 (1924) Nr. 4, S. 256 - 261
- [20] MICHELSON, A.A. Measurement of the Velocity of Light between Mount Wilson and Mount San Antonio. Astrophys. Journ., Chicago, 65 (1927) Nr. 1, S. 1 - 22
- [21] MICHELSON, A.A. F.G. PEACE und F. PEARSON Measurement of the Velocity of Light in a Partial Vacuum. Astrophys. Journ., Chicago, 82 (1935) Nr. 1, S. 26 - 60
- [22] NEWCOMB, S. Measures of the Velocity of Light. Astr. Papers: Amer. Ephemeris Naut.Almanac 2 (1891), S. 197 - 230

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

- [23] FERROTIN, P. Determination de la Vitesse de la Lumière. Ann.L'Observatoire de Nice 11 (1908) S.A 1 - A 98

2.2 Optisch-elektrische Verfahren

- [24] ANDERSON, W.C. Measurement of the Velocity of Light. Rev.Sci.Instr. 8 (1937) Nr. 7, S. 239-247
- [25] ANDERSON, W.C. Final Measurements of the Velocity of Light. Journ.Opt.Soc.Amer. 31 (1941) Nr.3, S.187-197
- [26] HOUSTON, R.A. A Measurement of the Velocity of Light. Proc.Roy.Soc.Edinburgh 61 (1950) S. 95 - 104
- [27] HOUSTON, R.A. A New Method of Measuring the Velocity of Light. Nature 142 (1938) Nr. 3601, S. 833
- [28] HOUSTON, R.A. A Measurement of the Velocity of Light. Nature 164 (1949) Nr. 4180, S. 1004
- [29] HÜTTEL, A. Eine Methode zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit unter Anwendung des Kerreffektes und einer Photozelle als phasenabhängigem Gleichrichter. Ann.Phys. 5. Folge 37 (1940) Nr.5/6 S. 365 - 402
- [30] KAROLUS, A. und O. MITTELSTAEDT Die Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit unter Verwendung des elektrooptischen Kerreffektes. Phys.Z. 22 (1928) Nr. 19, S. 698 - 702
- [31] MITTELSTAEDT, O. Die Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit unter Verwendung des elektrooptischen Kerreffektes. Ann.Phys., Serie 5 2 (1929) S. 285 - 312
- [32] MITTELSTAEDT, O. Über die Messung der Lichtgeschwindigkeit. Phys.Z. 30 (1929) Nr. 6, S. 165 - 167

2.3 Elektrische Verfahren

- [33] ASLAKSON, C.I. Can the Velocity of Propagation of Radio Waves be measured by SHORAN? Trans.Amer.Geophys. Union 30 (1949) Nr. 4, S. 475 - 487
- [34] ASLAKSON, C.I. Velocity of Electromagnetic Waves. Nature 164 (1949) Nr. 4173, S. 711 - 712
- [35] ASLAKSON, C.I. A New Determination of the Velocity of Radio Waves. Journ.Coast Geod.Surv.(1950) Nr.3, S.4-6
- [36] ASLAKSON, C.I. New Determinations of the Velocity of Radio Waves. Tr.Amer.Geophys.Union 32 (1951) Nr. 6 S. 813 - 821

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

- [37] ASLAKSON, C.I. A New Measurement of the Velocity of Radio Waves. *Nature* 168 (1951) Nr. 4273, S. 505-506
- [38] BARREL, H. and M.J. PUTTOCK Measuring a Large Displacement by Interferometry. *Brit.Journ. of Appl.Phys.* 1 (1950) S. 87 - 91
- [39] BOL, K. A Determination of the Speed of Light by the Resonant Cavity Method. *Phys.Rev.* 80 (1950) Nr. 2, S. 298
- [40] BOL, K. und J. BARCLAY Ein neuer Weg zur Bestimmung der Lichtgeschwindigkeit. *Elektron* 2 (1951) Nr. 6, S. 198 - 199
- [41] ESSEN, L. The Design, Calibration and Performance of Resonance Wavemeters for Frequencies between 1000 and 25000 Mc/s. *Journ.Instn.Elect.Engrs.* Teil III 92 (1946) Nr. 9, S. 1413 - 1425
- [42] ESSEN, L. Velocity of Electromagnetic Waves. *Nature* 152 (1947) Nr. 4044, S. 611 - 612
- [43] ESSEN, L. and A.C. GORDON-SMITH The Velocity of Propagation of Electromagnetic Waves derived from the Resonant Frequencies of a Cylindrical Cavity Resonator. *Proc.Roy.Soc. London, Serie A* 194 (1948) S. 348 - 361
- [44] ESSEN, L. Velocity of Light and of Radio Waves. *Nature* 165 (1950) Nr. 4198, S. 582 - 583
- [45] ESSEN, L. The Velocity of Propagation of Electromagnetic Waves derived from the Resonant Frequencies of a Cylindrical Cavity Resonator. *Proc.Roy.Soc. London, Serie A* 204 (1950/51) S. 260 - 277
- [46] ESSEN, L. and K.D. FROOME Dielectric Constant and Refractive Index of Air and its Principal Constituents at 24,000 Mc/s. *Nature* 167 (1951) Nr. 4248, S. 512 - 513
- [47] ESSEN, L. High-Frequency Electrical Measurements. *Sonderdruck S.1-6 aus Nature* 172 (1953) S. 52
- [48] FROOME, K.D. Determination of the Velocity of Short Electromagnetic Waves by Interferometry. *Proc.Roy.Soc. London, Serie A* 213 (1952) S. 123 - 141
- [49] FROOME, K.D. Investigation of a New Form of Microwave Interferometer for Determining the Velocity of Electromagnetic Waves. *Proc.Roy.Soc. London, Serie A* 223 (1954) S. 195 - 215

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

- [50] JONES, F.E. The Measurement of the Velocity of Propagation of Centimetre Radio Waves as a Function of Height above the Earth. 1. Ground-Level Measurements of the Velocity of Propagation over a Sea Path. *Journ.Instn.Elect.Engrs.*, Teil III 94 (1947) S. 399 - 401
- [51] JONES, F.E. and B.A. CORNFORD The Measurement of the Velocity of Propagation of Centimetre Radio Waves as a Function of Height above the Earth. 2. The Measurement of the Velocity of Propagation over a Path between Ground and Aircraft at 1000, 20 000 and 30 000 Feet. *Journ.Instn.Elect.Engrs.* Teil III 96 (1949) Nr. 43, S. 447 - 452
- [52] KLINGER, H.H. Einführung in die Mikrowellen. Die Messung der Lichtgeschwindigkeit, S. 107 - 109. Stuttgart 1954
- [53] MENDOZA, E.B. A Method of Determining the Velocity of Radio Waves over Land on Frequencies near 100 KC/S. *Journ.Instn.Elect.Engrs.* Teil III 94 (1947) S. 396 - 398
- [54] MENDOZA, E.B. The Velocity of Radio Waves Near the Surface. *Union Radio scientifique internationale des Travaux de l'Assemblée générale*, VI (1947) S. 163 - 165
- [55] MERCIER, J. De la Synchronisation harmonique et multiple. II. Application à la Détermination de la Vitesse de Propagation des Ondes électromagnétiques le long des Fils conducteurs. *Journ.Phys.Radium* 2 (1924) Nr. 6, S. 173-179
- [56] NAITO, K. On the Influence of Waterdrops in the Air upon the Atmospheric Radio Refractive Index. *Papers in Meteorology and Geophysics (Japan)* 4 (1953) Nr. 3/4, S. 109
- [57] ROSA, E.B. and N.E. DORSEY A New Determination of the Ratio of the Electromagnetic to the Electrostatic Unit of Electricity. *Bull.Bureau Standards* 3 (1907) Nr.3, S.433-540 3 (1907) Nr.4, S.541-604
- [58] SMITH, R.A. Measurement of the Velocity of Propagation of Radio Waves in the Atmosphere Using Pulse Technique. *Union Radio scientifique internationale des Travaux de l'Assemblée générale* VI (1947) S. 161 - 163

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

- [59] SMITH, E.L.,
E. FRANKLIN and
F.B. WEITING
Accurate Measurement of the Group Velocity of
Radio Waves in the Atmosphere, Using Radar
Technique.
Journ.Instn.Electr.Engrs. Teil III 94 (1947)
S. 391 - 395

2.4 Zusammenfassende Berichte, Bestimmung von Durchschnittswerten

- [60] EISENEN, J.A. and
H.W. WITTS
A Re-Evaluation of the Fundamental Atomic
Constants. II. The Velocity of Light.
Phys.Rev. 81 (1951) Nr. 1, S. 74 - 75
- [61] BIEGE, E.F.
The General Physical Constants as of August
1941 with Details on the Velocity of Light
only. Section A. The Velocity of Light in
Vacuum (c).
Rep.Phys.Soc.Prog.Phys. 9 (1941) S. 92 - 101
- [62] CIELI, M.
Recenti Risultati degli Studi per le Appli-
cazioni geodetiche del Radar. Le Ultime
Determinazioni della Velocità delle Radio Onde.
Boll.Geod.Sc.aff. 10 (1951) Nr. 1, S.121-125
- [63] DOSEY, E.
The Velocity of Light.
Trans.Amer.Phil.Soc. Neue Serie 34 Teil 1
(1944) S. 1 - 109
- [64] ESSEN, L.
Proposed New Value for Velocity of Light.
Nature 167 (1951) Nr. 4242, S. 258-259
- [65] SMITTE-ROSE, R.L.
The Speed of Radio Waves and its Importance
in Some Applications.
Proc.Instn.Radio Engrs. 38 (1950) Nr. 1,
S. 16 - 20
- [66] STILLE, U.
Die atomaren Konstanten e , h , m_0 und h .
1. Hilfsgrößen.
2. Lichtgeschwindigkeit im Vakuum c_0 .
Z.Phys. 121 (1943) S. 134 - 140
- [67] STILLE, U.
Die Vakuumlichtgeschwindigkeit c_0 .
Phys.Bl. I (1951) Nr. 6, S. 260 - 264
- [68] WAEVER, J.
The Velocity of Electromagnetic Waves.
Austr.Journ.Sci. 10 (1947) Nr. 3, S. 73 - 76

3. Zusammenfassende Berichte über Anwendungen von elektrischen Verfahren
in der Geodäsie und auch Photogrammetrie

- [69] ASLAKSON, C.I.
Some Aspects of Electronic Surveying.
Amer.Soc.Civ.Engrs. 17 (1952) S. 1-17

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

- [70] ASLAKSON, C.I.
Electronics in Surveying. Proc.Amer.Soc.Civ.
Engrs. 79 (1953) Separate Nr. 284, S. 1 - 15
- [71] BOAGA, G.
Le Applicazioni Geodetiche del Radar.
Ann.Geofis. 2 (1949) Nr. 2, S. 203 - 221
- [72] GIGAS, E.
Geodätische Entfernungsmessungen. Mitt.Inst.
angew.Geod. Reihe B (1954) Nr. 15, S.9-24
- [73] JUNG, R.
Längenermittlung durch Funkmessung.
Z.f.V. 75 (1950) Nr. 1, S. 24
- [74] HART, C.A.
Modern mapping (Including the Employment of
Radio Technique and with Special Reference to
Economic Development)
Emp.Surv.Rev. 2 (1947) Nr. 65, S.101 - 112
- [75] HART, C.A.
Some Aspects of the Influence on Geodesy of
Accurate Range Measurement by Radio Methods
with Special Reference to Radar Techniques.
Bull.Geod. Neue Serie 10 (1948) S. 307-532
- [76] HART, C.A. und
R. ROELOFS
VIII^e Assemblée générale de l'Association de
Géodésie de l'Union géodésique et géophysique
internationale Oslo 1948: Report of Working
Group of the Radar Processes. Discussion on
the Application of Radio-Technique to Geodesy
with Special Reference to Radar Methods.
Bull.Geod. Neue Serie (1949) Nr.12, S. 24 - 32
- [77] HART, C.A.
Air Survey. The Application of Modern Techni-
ques to Surveying and Mapping.
Journ.Roy.Aero.Soc. 54 (1950) Nr. 478,
S. 613 - 639
- [78] HART, C.A.
IX^e Assemblée générale de l'Association de
Géodésie de l'Union Géodésique et Géophysique
Internationale Brüssel 1951: Rapport Général
Nr. 3. Applications Géodésiques de la Radio-
télégraphie (Spécialement des Précédés du
Type Radar). Sonderdruck (27 Seiten)
- [79] HART, C.A.
X^e Assemblée générale de l'Association de
Géodésie de l'Union Géodésique et Géophysique
Internationale Rom 1954: Rapport Général Nr.3
(provisoire). Applications Géodésiques de la
Radiotélégraphie (Spécialement des Précédés
du Type Radar). Sonderdruck (14 Seiten).
Zusammenfassung in Int.Hydr.Rev. 31 (1954)
Nr. 2, S. 165 - 172
- [80] KÜSTER, K.
Strecken- und Winkelmessung mit Hilfe elek-
trischer Verfahren.
(Als Manuskript.)

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

- [81] LICHTÉ, H. Entfernungsmessungen mit Radar. Z.f.V. 76 (1951) Nr. 9, S. 257 - 265
- [82] STEFFENHAGEN, K. Elektrische Streckenmessung mit Hilfe des Relais-Sendeverfahrens. Funk und Ton 2 (1947) Nr. 6, S. 318 - 320
- [83] STEFFENHAGEN, K. Zur Anwendung der elektrischen Entfernungsmessung in der Geodäsie. Funk und Ton 6 (1951) Nr. 8, S. 412 - 413
- [84] STIPA, V. Elektrophysikalische Methoden der Längenmessung und ihre Anwendung im bergmännischen Vermessungswesen. Mitt.Marktscheidewesen 62 (1956) Nr. 1, S. 33 - 43
- [85] VULLO, A. Il Radar nelle Applicazioni geodetiche. Boll.Geod.Soc.Aff. 2 (1950) Nr. 4, S. 365-404

4. Anwendung von elektrischen Meßverfahren nur in der Fotogrammetrie

4.1 Zusammenfassende Berichte

- [86] BONIFACINO, B. Aspetti attuali delle Fotogrammetria aerea con l'impiego del Radar. Riv.del Cat. 7 (1952) Nr. 4, S. 246 - 248
- [87] EDEN, J.A. Survey Operations with Radar Equipment. Photogr. (1949) Nr. 2, S. 61 - 69
- [88] HART, C.A. and E.A. MISKIN Report on Preliminary Investigations in Connection with the Possible Employment of Radar for Survey. Great Britain War Office. Directorate of Military Survey. Air Survey Research Paper Nr. 2 (1944)
- [89] HART, C.A. and E.A. MISKIN Preliminary Report on Accuracy of Fixation of Air Camera in Space. Employment of "Oboe" for Air Survey. Great Britain War Office. Directorate of Military Survey. Survey Research Paper, Nr. 9 (1944)
- [90] HART, C.A. Radar as a Survey Aid: Some Possible Methods of its Application. Great Britain War Office. Directorate of Military Survey. Air Survey Research Paper Nr. 8 (1944)
- [91] HART, C.A. Range Measurement and Fixation by Radar and the Effects of Inaccuracies of Range Determination on Fixation. Great Britain War Office. Directorate of Military Survey. Air Survey Research Paper Nr. 7 (1945)

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

- [92] HART, C.A. and E.A. MISKIN Employment of "Oboe" for Air Survey; Second Accuracy Report. Great Britain War Office. Directorate of Military Survey. Air Survey Research Paper Nr. 10 (1945)
- [93] HART, C.A. Mapping by remote Control with the Aid of Radar, Development and Scope of a new Technique of Survey measurement. Great Britain War Office. Directorate of Military Survey. Air Survey Research Paper Nr. 19 (1946)
- [94] HART, C.A. Surveying from Air Photographs fixed by remote Control. Emp.Surv.Rev. 2 (1947) Nr. 64, S. 71 - 83
- [95] HENRY, J.E. Experimental Investigations of SHORAN for Mapping and Charting. Phot.Eng. 12 (1946) S. 377 - 378
- [96] LAURILA, S. On the SHORAN-Photogrammetric Position Fixing. Photogr.Amsterdam 11 (1955) Nr. 4, S.121-126
- [97] LICHTÉ, H. Die Anwendung der Funkmeßtechnik in der Fotogrammetrie. Allgem.Vermessungsnachrichten (1951) Nr. 12, S. 290 - 294
- [98] LORENZ, G.G. Application of SHORAN to Photogrammetric Mapping. Phot.Eng. 12 (1946) S. 381 - 385
- [99] RADCLIFFE, D.L. Aeronautical Chart Research and Development. Phot.Eng. 12 (1952) Nr. 3, S. 508 - 512
- [100] SAFFERY, J. The Navigators Problem in Aerial Survey. Journ.Inst.Navig. 2 (1949) S. 222 - 226
- [101] THOMPSON, J.K. SHORAN - Application to Mapping. The Canad.Surv. 10 (1950) Nr. 4, S. 2 - 7
- [102] TROREY, L.G. Subcommittee on Application of Electronics in Photogrammetry. Phot.Eng. 12 (1953) Nr. 1, S. 168 - 174
- [103] WILSON, A.M. SHORAN for the Photogrammetrist. Phot.Eng. 16 (1950) Nr. 1, S. 73 - 82

4.2 Standort- und Kursbestimmungen für Luftbilder

- [104] RICHARDSON, R.C. A Straight-Line-Flight Indicator for the Pilot of a Radar-Equipped Aircraft. Aust. Journ. appl. Sci. 2 (1951) Nr. 2, S. 223 - 234

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

- [105] RICHARDSON, R.C. and Straight Flight of Aircraft Equipped with Radar-Operated Pilot's Indicator. J. WARNER
Phot.Eng. 16 (1950) Nr. 4, S. 544 - 549
- [106] STOCK, E.H. Some Fundamental Errors of a Triangulation Computer. National Research Council of Canada. Radio and Electrical Engineering Divisions. ERB 244 NRC Nr. 2418 (1951)

4.3 Aufnahme von Geländeprofilen

- [107] BLACHUT, T.J. and The Radar Profile and its Application on Photogrammetric Mapping. R.D. LEASK
Photogr.Amsterdam 2 (1952/53) Heft 1, S.17-32
- [108] MC CAFFREY, B.I. The Airborne Profile Recorder. Phot.Eng. 16 (1950) Nr. 5, S. 673 - 681
- [109] KELSH, H.T. Report on Airborne Profile Recorder. Phot.Eng. 18 (1952) Nr. 1, S. 92 - 94
- [110] JOWITT, S. Levelling by Radar Altimeter. Engng.Journ.Montreal 32 (1950) Nr. 8, S. 689 - 694
- [111] LANDEN, D. Advances in Photogrammetry. Phot.Eng. 17 (1951) Nr. 4, S. 647 - 648
- [112] SPEERT, J. Radar Altimetry Operations of the United States Geological Survey in 1950. Trans.Amer. Geoph.Union 32 (1951) Nr. 4, S. 544 - 546
- [113] TROREY, L.G. Reconnaissance Air Mapping Operational Methods of Mapping with sparse Ground Control. Phot.Eng. 16 (1950) Heft 1, S. 32 - 37
- [114] Ground Profiles recorded by Radar Altimeter. Flight Aircraft Eng. 57 (1950) Nr.2146, S.195

4.4 Auswertung von Panoramabildern für Karten

- [115] PODEYN, G.J. Proceedings of the 14th Annual Meeting. Radar Charting - A New Application of Photogrammetry. Phot.Eng. 14 (1948) Nr. 1, S. 114 - 123
- [116] RAYMOND, R.C. Electronic Contour Mapping. Proc.Nat.Elect.Confer. 1949 (Sonderdruck).

5. Verfahren mit moduliertem Licht

- [117] BERGSTRAND, E. Measurement of Distances by High Frequency Light Signalling. Arkiv Mat., Astr. och Fys. 29 A (1943) Nr. 30, S. 1 - 12

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

- [118] BERGSTRAND, E. Measurement of Distances by High Frequency Light Signalling. Tätigkeit der baltischen geodätischen Kommission 1944-1947. S.101-111 (Helsinki 1948). Besprochen in Veröffentlichungen des Instituts für Erdmessung Nr. 3, S. 71 - 73 (1949)
- [119] BERGSTRAND, E. A Preliminary Determination of the Velocity of Light. K.Svenska Vetenskapsakademien 36 A (1948) Nr.20 Arkiv Mat., Astr. och Fys. 36 A (1949) Nr. 20, S. 1 - 11
- [120] BERGSTRAND, E. Measurement of Distances by High Frequency Light Signalling. Bull.Géod., Neue Serie (1949) Nr. 11, S. 81 - 92, 102 - 103
- [121] BERGSTRAND, E. Velocity of Light and Measurement of Distances by High-Frequency Light Signalling. Nature 163 (1949) S. 338
- [122] BERGSTRAND, E. Velocity of Light. Nature 165 (1950) Nr. 4193, S. 405
- [123] BERGSTRAND, E. A Determination of the Velocity of Light. Arkiv för Fysik Stockholm 2 (1950) Nr. 15, S. 119 - 150
- [124] BERGSTRAND, E. Measurement of Distances with the Geodimeter. Rikets Allmänna Kartverk Meddelande Nr.16 (1951)
- [125] BERGSTRAND, E. A check Determination of the Velocity of Light. Arkiv för Fysik, Stockholm 3 (1951) Nr. 26, S. 479 - 490
- [126] BERGSTRAND, E. Distance Measuring by Means of Modulated Light. Bull.Géod. (1952) Nr. 24, S. 243 - 250
- [127] BJERHAMMER, A. Elektrooptisk avståndsmätning. Svensk Lantmäteritidskrift 2 (1955)
- [128] GIGAS, E. Gerät zur elektrischen Entfernungsmessung. Arbeitsberichte Nr. 1, 2, 3 des Instituts für angewandte Geodäsie Frankfurt/Main
- [129] LANGERAAR, W. De Geodimeter. Tijd. Kad. Landm. (1952) S. 291 - 303
- [130] MACKENZIE, J.C.C. The Geodimeter Measurement of the Ridgeway and Caithness Bases 1953. Ordnance Survey Professional Paper, New Series Nr. 19 H.M.S.O. (1954)

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

- [131] HENTWIG, Z. Sekundärelektronenvervielfacher und ihre technische Bedeutung. Frequenz 4 (1950) Nr. 12, S. 328 - 332
- [132] The Geodimeter: an Instrument for the Accurate Measurement of Distances by High Frequency Light Variations. Emp.Surv.Rev. 11 (1952) Nr. 85, S. 290 - 301 (1952) Nr. 86, S. 363 - 371
- [133] Description of Aga Geodimeter, Type NASM-1, BERGSTRAND System. Int.Hydr.Rev. 30 (1953) Nr. 1, S. 171-173

6. Phasendifferenzverfahren6.1 LORAN

- [134] CLARKE, J.O. The Use of LORAN for Survey Work in the Pacific. Journ.Inst.Nav. 6 (1953) Nr. 3, S. 307 - 312
- [135] DAVIS, C.W. Recent Developments in the Use of LORAN. Int.Hydr.Rev. 30 (1953) Nr. 2, S. 7 - 13
- [136] HUGON Trying out the "LORAN" System. Int.Hydr.Rev. 26 (1949) Nr. 2, S. 52 - 58
- [137] LEIPSON, G. Electronics and its Application in the Work of the Hydrographic Office. Phot.Eng. 12 (1946) Nr. 4, S. 385 - 387
- [138] PIERCE, J.A., A.A. MC.KENZIE and R.H. WOODWARD LORAN. New York 1948, Mc.Graw Hill

6.2 DECCA

- [139] FRIESESLEBEN, H.C. DECCA-Karten. Telefunkenzeitung 26 (1953) Nr. 98, S. 49-53
- [140] HILDING, S. Computation of Lattice Charts for the DECCA Navigator System in the Gauss Conformal Projection. Int.Hydr.Rev. 26 (1949) Nr.2, S. 46-51
- [141] LANGERAAR, W.R. and N. NETH The Stability of DECCA Patterns under Various Circumstances and the Influence of Time on that Stability. Int.Hydr.Rev. 30 (1953) Nr. 1, S. 29 - 57
- [142] LARSSON, H. Investigation of the Accuracy obtained with the DECCA System for Survey in the Southern Baltic. Int.Hydr.Rev. 26 (1949) Nr.2, S.25-45

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

- [143] POWELL, C. Developments in DECCA Refinements in a Radio Aid to Surveying. Int.Hydr.Rev. 31 (1954) Nr. 2, S. 37 - 46
- [144] PRESSEY, B.G., C.S. FOWLER and R.W. MASON A Precision Phase Comparator for Use at Low Radio Frequencies. Proc.Inst.Elect.Engrs. Teil IV 99 (1952) Monograph Nr. 44, S. 318 - 325
- [145] PRESSEY, B.G., G.E. ASHWELL and C.S. FOWLER The Measurement of the Phase Velocity of Ground Wave Propagation at Low Frequencies over a Land Path. Proc.Inst. of Elect.Engrs.Teil II 100 (1953) Nr. 64, S. 73 - 84
- [146] PRESSEY, B.G., G.E. ASHWELL and C.S. FOWLER An Investigation of the Change of Phase with Distance of a Low-Frequency Ground Wave Propagated across a Coast Line. Radio Research Board, Radio Navig. Aids Committee, Paper Nr. RNA 36 (Mai 1954)
- [147] REYNOLDS, L.G. An Examination of Some Site and Transmission-Path Errors of the Decca Navigator System with Use over Land. Proc.Inst.Elect.Engrs. Teil III 100 (1953) Nr. 63, S. 29 - 35
- [148] ROBERTS, G.E. The Design and Development of the Decca Flight Log. Journ.Brit.Instn.Radio Engrs. (1952) Nr. 2, S. 117 - 131
- [149] ROESSLER, E. Hyperbelnavigation in Deutschland. E.T.Z. 72 (1951) Nr. 199, S. 567 - 572
- [150] ULBRICHT, G. Das DECCA-Navigationsverfahren. Telefunkenzeitung 24 (1951) Nr. 91, S. 86-97
- [151] VERSTELLE, J.Th. DECCA as an Aid to Land-Surveying. Investigation on Accuracy of the DECCA Navigator Systems. Report on Trials in the Netherlands August 1949. Int.Hydr.Rev. 26 (1949) Nr. 2, S. 59 - 64
- [152] VERSTELLE, J.Th. Practical Survey-Applications of Decca and Accuracy-Data from Operational Trials. Arch.Int.Photogr.Amsterdam X, 1 (1950) S. 123 - 155
- [153] VERSTELLE, J.Th. An Evaluation of the Accuracy of Decca as a Means of Distance Measuring over Land. Int.Hydr.Rev. 31 (1954) Nr. 2, S. 73 - 86
- [154] Das DECCA-Navigationsverfahren. Hydrographisches Institut Hamburg 1952

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

- [155] Short Base Decca. Decca Navigator Co. London Survey Section (Mai 1954)
- [156] Two Range Decca. Modified Chain Layouts. Decca Navigator Co. London Survey Section (Juni 1954)
- [157] The Decca Navigator System as an Aid to Survey. Decca Navigator Co. London Survey Section Issue 4a (Februar 1955)
- [158] Survey and Exploration with Decca. Decca Navigator Co. London Survey Section (Dez. 1955)

6.3 RANA (LORAC)

- [159] HONORÉ, E., E. TORCHEUX Les radionavigateurs RANA. Onde Elec. 32 (1953) Nr. 314, S. 319 - 327
- [160] HONORÉ, E. RANA Radio-navigators. Int.Hydr.Rev. 30 (1953) Nr. 2, S. 33 - 38
- [161] HONORÉ, E. Das RANA-Funkortungsverfahren und seine Anwendungsmöglichkeiten für die Schifffahrt. Bücherei d.Funkortung 4 Teil 5 (1954) S.45-53
- [162] HONORÉ, E. Der Radionavigator RANA. Bücherei d.Funkortung 5 Teil 2 (1955) S.25-46
- [163] SLUSSER, E.A. Radiolocation in Oil Prospecting. Electronics 22 (1949) Nr. 8, S. 70 - 74

6.4 RAYDIST

- [164] BARROS, J., A.DE MONTEIRO and J.L. DE OLIVEIRA Use of RAYDIST System in Portuguese Guinea Survey. Inter.Hydr.Rev. 31 (1954) Nr. 2, S. 11 - 31
- [165] BENSON, J.N. and J.E. SWAFFORD RAYDIST System for Radiolocation and Tracking. Elect.Engng. New York 72 (1953) Nr. 11, S. 983 - 987
- [166] COMSTOCK, J.P. and C.E. HASTINGS RAYDIST Speed Measuring Equipment on the SS "United States" Sea Trials. Trans.Soc.Nav. Archit.Mar.Engngs. New York 60 (1952) S.148-179
- [167] DEEGAN, Ch. J. RAYDIST. A method of Surveying by Use of Radio Waves. Oil and Gas Journ. 48 (1949) Nr. 9, S. 69 - 71, 90 - 91
- [168] HASTINGS, C.E. RAYDIST - a Radio Navigation and Tracking System. Tele-Techn. New York (1947) Nr. 6, S. 30 - 35

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

- [169] HASTINGS, C.E. The Application of RAYDIST to hydrographic Surveying. Inter.Hydr.Rev. 26 (1949) Nr. 2, S. 19 - 24
- [170] LEIFSON, G. Hyperbolic Positioning Systems for Hydrographic Surveys. Inter.Hydr.Rev. 30 (1953) Nr. 1, S. 19 - 28
- [171] SOEIRO DE BRITO, J.B.V. Sofala Bank Survey by the Mozambique Hydrographic Survey. Inter.Hydr.Rev. 30 (1953) Nr. 2, S. 15 - 22
- [172] WATERFIELD, H.H. and C. HILLIARD RAYDIST for Shallow Water Hydrography. Military Engrs. 42 (1951) Nr. 296, S.419-421
- [173] Latest Development in RAYDIST for Precise Position Location in Marine Navigation, Hydrography, Dredging and Electronic Surveying. Int.Hydr.Rev. 31 (1954) Nr. 2, S. 33 - 36

7. Laufzeitverfahren mit aktiven Reflektoren

7.1 SHORAN

7.11 Geschichte, Planung, Versuchsberichte

- [174] ASLAKSON, C.I. and D.A. RICE Use of SHORAN in Geodetic Control. Trans.Amer. Geoph.Union 27 (1946) Nr. 4, S. 459 - 463
- [175] ASLAKSON, C.I. Tactical Use of SHORAN and Accuracy obtained. Phot.Eng. 13 (1946) Nr. 4, S. 379 - 381
- [176] ASLAKSON, C.I. SHORAN Investigations for Triangulation. Int.Hydr.Rev. 24 (1947) S. 178 - 180
- [177] ASLAKSON, C.I. Use of SHORAN to Detect Surveying Error. Military Engr. Washington 42 (1951) Nr. 296, S. 436 - 437
- [178] ASLAKSON, C.I. The Importance of SHORAN Surveying in the Southern Hemisphere. Proc.Amer.Soc.Civ.Engngs. Separate Nr. 353 72 (1953) S. 1 - 14
- [179] BURMISTER, C.A. SHORAN in Hydrographic Surveying. Int.Hydr.Rev. 26 (1947) S. 181 - 185
- [180] GIGAS, E. Das moderne kanadische Verfahren der Landesvermessung. Umschau (1952) Nr. 13, S. 389 - 391
- [181] HALLIDAY, D.J. Geodetic Measurement by Radar. Nature 164 (1949) Nr. 4180, S. 1005 - 1006

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

- [182] MACDONALD, K.W. SHORAN Operations. Canad.Surv. 10 (1951) Nr. 7, S. 16 - 20
- [183] MARUSSI, A. Nuove Applicazioni della Radiotecnica alla Geodesia ed alla Fotogrammetria. Boll.Geod. Sci.aff. 2 (1950) Nr. 3, S. 325 - 326
- [184] PARKIM, E.J. Adjustment of the Florida-Puerto Rico Hiran Trilateration Net of the U.S.Air Force. Coast and Geodetic Survey Report (Juli 1954) S. 1-16 und Addendum (August 1954) S. 1-6
- [185] RANNIE, J.L. The Geodetic Survey of Canada. SHORAN Triangulation. Emp.Surv.Rev. 10 (1949) Nr. 74, S. 153 - 154
- [186] RANNIE, J.L. SHORAN - An Electronic Tool for Surveying and Mapping. Engng.Journ.Montreal 32 (1950) Nr.8, S.682-688
- [187] BALLARD, B.G. Diskussion of the Paper: SHORAN - An electronic Tool for Surveying and Mapping. Engng.Journ. Montreal 32 (1950) Nr. 11, S. 982 - 984
- [188] RANNIE, J.L. SHORAN-Electronic Tool for Control Surveying and Mapping. Surv.a.Mapp. 11 (1951) Nr.1, S.53-60 auch in: Amer.Soc.Civ.Engrs. (1950) S. 682 - 687
- [189] RICE, D.A. Geodetic Application of SHORAN. Journ.Coast Geod.Surv. (1950) Nr.3, S. 7-12
- [190] ROSS, J.E.R. SHORAN: Application to Geodetic Triangulation. Canad.Surv. 10 (1950) Nr. 3, S. 9 - 18
- [191] ROSS, J.E.R. SHORAN Control. Canad.Surv. 10 (1951) Nr. 7, S. 10 - 15
- [192] ROSS, J.E.R. Final Adjustment: Manitoba-Saskatchewan SHORAN Net. Canad.Surv. 10 (1951) Nr. 8, S. 2 - 8
- [193] ROSS, J.E.R. SHORAN Triangulation in northern Canada. Report for General Conference Brüssel 1951 of the International Union of Geodesy and Geophysics. International Association of Geodesy S. 1-29
- [194] ROSS, J.E.R. SHORAN Operations in Canada. Sonderdruck des Department of Mines and Technical. Surveys (1952) S. 3 - 31
- [195] ROSS, J.E.R. SHORAN Triangulation in Canada. Bull.Geod. Neue Serie Nr. 24 (1952) S. 207-242

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

- [196] ROSS, J.E.R. SHORAN Operations in Canada. Int.Hydr.Rev. 30 (1953) Nr.2, S.23-31 auch in: Surv.a.Mapp. 12 (1952) Nr.4
- [197] ROSS, J.E.R. Canadian SHORAN Efforts, 1949-1953. Emp.Surv.Rev. 12 (1954) Nr. 92, S. 242 - 254 (1954) Nr. 93, S. 290 - 303
- [198] ROSS, J.E.R. SHORAN Trilateration in Canada 1949-1953. Report for the X.General Conference, Rom 1954 of the International Union of Geodesy and Geophysics, International Association of Geodesy S. 3 - 46
- [199] SENNERT, H.G. The History of SHORAN. Phot.Engng. 12 (1946) Heft 4, S. 375 - 376
- [200] STERN, E.B. SHORAN Radio: Wars Contribution to Oil Exploration. Oil and Gas Journ. 46 (1948) S. 70 - 72
- [201] WARNER, J. Operational Aspects of the Use of Radar for Geodetic Surveying. Commonwealth Scientific and Industrial Organization. Radiophysics Laboratory Australien Report Nr. 92 (1949)
- [202] WARNER, J. The Applications of Radar to Surveying. Emp.Surv.Rev. 10 (1950) Nr.78, S. 338 - 349
- [203] WARNER, J. The Application of Radar to Geodetic Surveying. Austr.Journ.Appl.Sci. 1 (1950) Nr.2, S.133-146
- [204] Geodetic Survey of Canada. SHORAN Experiments over the Geodetic Survey Framework in Ontario and Quebec. Canad.Surv. 2 (1949) Nr. 12, S. 21 - 24
- 7.12 Technik der Geräte, Beseitigung der systematischen Fehler, Hilfsgaräte
- [205] BATTISON, F.H. Communications System, Geodetic-Photographic Operations. Canad.Surv. 10 (1950) Nr. 6, S. 2 - 7
- [206] CARD, L.C. SHORAN Electronics. Canad.Surv. 10 (1950) Nr. 3, S. 3 - 8
- [207] CARD, L.C. Calibration of SHORAN Ground Nets. Canad.Surv. 10 (1950) Nr. 5, S. 2 - 7
- [208] COLE, H.S. SHORAN Calibration. Journ.Coast Geod.Surv. (1951) Nr.4, S. 81-84
- [209] JONES, E.E. SHORAN Study and Calibration. Journ.Coast Geod.Surv. (1949) Nr.2, S. 8 - 12

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

- [210] KROEMMELBEIN, W.F. SHORAN for Surveying. Electronics 21 (1948) Nr. 3, S. 112 - 117
- [211] MILLER, H.E. A Sum-Distance Indicator and Graphical Recorder for Radar Surveying. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization. Radiophysics Laboratory Australien Report Nr. 88 (1948)
- [212] NORMAN, R.A. SHORAN Navigational Techniques. Canad.Surv. 10 (1950) Nr. 4, S. 8 - 17
- [213] RICHARDSON, R.C. An Aided Layer for SHORAN. Austr.Journ.Appl.Sci. 3 (1952) Nr.1, S.16-24
- [214] WARNER, J. The Effect of Signal Strength upon Equipment Errors in Radar Surveying. Commonwealth Scientific and Industrial Organization, Radiophysics Laboratory, Australien Report Nr. 91 (1949)
- [215] WARNER, J. Equipment used in Precision Measurement of Long Lines by Radar. Commonwealth Scientific and Industrial Organization. Radiophysics Laboratory, Australien Report Nr. 94 (1949)

7.13 Korrektur der SHORAN-Werte, Höhenbestimmung von Flugzeug und Bodenstationen

- [216] ASLAKSON, C.I. and O.O. FICKEISSEN The Effect of Meteorological Conditions on the Measurement of Long Distances by Electronics. Trans.Amer.Geoph.Union 31 (1950) Nr. 6, S. 816 - 826
- [217] COOPER, B.F. Reduction Procedures in SHORAN Geodetic Measurements. Laboratories of the National Research Council of Canada. Electr.Engng. and Radio Branch Report Nr. ERA-145 (1947)
- [218] GERKE, K. Die Genauigkeit der Stationshöhen für elektromagnetisch gemessene Strecken. Allg.Verm.Nachr. (1954) Nr. 6, S. 135 - 141
- [219] GODSON, W.L. A Note on the Barometric Determination of Altitude. Meteorological Division Department of Transport. Canada CIR-2172, TEC-124, S. 1-7 (1952)
- [220] GRANT, G. Some Meteorological Problems of Electronic Surveying. Roy.Met.Soc. Canadian Branch.Toronto 3 (1952) Nr. 3, S. 1 - 8

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

- [221] HENRY, T.J.G. Aircraft Altimetry and Meteorology. Met.Division, Department of Transport, Canada CIR-1549, TEC-53 (1949) S. 1 - 30
- [222] MC LEAN, B.A. Reduction of SHORAN Results. Canad.Surv. 10 (1950) Nr. 5, S. 10 - 15
- [223] MONAGHAN, P.A. Meteorological Aspects of SHORAN. Canad.Surv. 10 (1950) Nr. 6, S. 8 - 14
- [224] PAULSEN, L.V. SHORAN Operational Procedure. Ground and Air. Canad.Surv. 10 (1950) Nr. 5, S. 8 - 9
- [225] STOCK, E.H. The Determination of Geometric Altitude by Pressure Altimetry. National Research Council of Canada, Radio and Electrical Engineering Division, Report ERA-183 (1950)
- [226] THOMPSON, A. The Computation of Elevation from Meteorological Observations. Meteorological Division, Department of Transport, Canada, CIR-2286, OBS-184 (1953) S. 1 - 22
- [227] THOMPSON, A. Shorevic. Meteorological Observations and Computation of Elevations. Meteorological Division, Department of Transport, Canada, S. 1 - 15
- [228] WARNER, J. Effect of Meteorological Factors upon Velocity of Radio Waves. Commonwealth Scientific and Industrial Organisation Radiophysics Laboratory, Australien, Report Nr. 93 (1949) S. 1 - 14
- [229] WARNER, J. A Method of Reduction of Line-Crossing Observations in Radar Surveying. Commonwealth Scientific and Industrial Organisation Radiophysics Laboratories, Australien, Report Nr. 90 (1949) S. 1 - 21
- [230] WARNER, J. The Accurate Determination of Aircraft Altitude. Journ.Inst.Navig. (1949) Nr.2, S.159-164

7.14 Berechnung der Fluchtlinie zwischen den Bodenstationen aus den korrigierten SHORAN-Werten

- [231] BONIFACINO, B. Sulla Determinazione di lunghi Archi di Meridiano con l'Impiego del Radar. Riv.del Cat. neue Serie 6 (1951) Nr. 1, S. 26 - 32
- [232] BONIFACINO, B. Sulla Determinazione di un Punto mediante il Radar. Riv.del Cat. neue Serie 6 (1951) Nr. 6 S. 385 - 387

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

- [232] BONIFACINO, B. Un Procedimento di Determinazione planimetrica di un Punto con i moderni Metodi radioelettrici e relativa Compensazione. Riv.del Cat. neue Serie 7 (1952) Nr. 5/6, S. 324 - 326
- [234] COLE, J.H. Computation of Distances of Long Arcs for Radio Purposes. Emp.Surv.Rev. 8 (1946) Nr. 59, S. 191 - 194
11 (1952) Nr. 83, S. 214 - 218
- [235] GODSON, W.L. A Proposed Technique for the Reduction of SHORAN Data. Trans.Amer.Geoph.Union 34 (1953) Nr. 5, S. 673 - 679
- [236] GRANT, A.S.G. The Application of Ray-Tracing Methods to the Reduction of SHORAN to Map Distances. Trans.Amer.Geoph.Union 33 (1952) Nr. 5, S. 645 - 649
- [237] KROLL, C.W. A Rigorous Method for Computing Geodetic Distance from SHORAN Observations. Trans.Amer.Geoph.Union 30 (1949) Nr.1, S.1-4
- [238] LAMBERT, W.D. The Distance between two Widely Separated Points on the Surface of the Earth. Journ. Wash.Acad.Sci. 32 (1942) Nr. 5, S. 125 - 130
- [239] RINNER, K. Geometrie mit Strecken. Schweiz.Z.f.V. (1948) Nr. 7, S. 176 - 180
(1948) Nr. 8, S. 195 - 198
- [240] RINNER, K. Über die Reduktion großer elektronisch gemessener Entfernungen. Z.f.Verm. 81 (1956) Nr. 2, S. 47 - 55
- [241] ROSS, J.E.R. Geodetic Problems in SHORAN. Geod.Surv. of Canada, Publication (1949) Nr. 76, S. 1 - 90
- [242] ROSS, J.E.R. SHORAN Trilateration Adjustment. Report for 10.General Conference of the International Union of Geodesy and Geophysics, Rom 1954, S. 1 - 5
- [243] SALMASO, S. Radargeodesia. Studie sulla Precisione ottenibile dalla Localizzazione Radar e sulla Compensazione delle Misure ai Fini geodetici. Boll.Geod.Sci. aff. 12 (1953) Nr.2, S.225-255
- [244] VERSTELLE, J.Th. Some Geodetic Problems involved in the Computation of Long Distances measured by SHORAN or Similar Electronics or Radio Equipment. Photogr.Amsterdam (1949) Nr. 1, S. 17-28
(1949) Nr. 2, S. 81-83

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

- [245] WARSCHALOWSKI, E. Triangulation d'un Type nouveau. Publications of the Polish Geodetic Institute Nr.2 Warschau. Ausf.dtsch.Bespr. in Veröff.d. Inst.f.Erdmessung, Bamberg (1949) Nr. 3, S. 60 - 71 (Dr. WOLF)
- 7.2 Electronic Position Indicator (EPI), OBOE, G-H, Funkmeßgerät RC 184
- [246] BRUDER, W.A. SHORAN and Electronic Position Indicator, Field-Sheet Construction. Journ. Coast Geod.Surv. (1950) Nr.3, S.57-63
- [247] BURMISTER, C.A. Electronics in Hydrographic Surveying. Journ.Coast Geod.Surv. (1948) Nr.1, S.3-29
- [248] BURMISTER, C.A. Measuring Long Lines by Electronic Methods. Journ.Coast Geod.Surv. (1951) Nr.4, S.4-11
- [249] BURMISTER, C.A. Electronic Position Indicator. Int.Hydr.Rev. 31 (1954) Nr.1, S. 113-132
- [250] CARLA, M. and B. BIRARDI. Esperienze sulle Applicazione del Radar alla Geodesia. Boll.Geod.Sci.aff. 12 (1953) Nr. 2, S. 195 - 224
- [251] JONES, F.E. Oboe. A Precision Ground Controlled Blind Bombing System. Journ.Instn.Elect.Engns. Teil III A 23 (1946) Nr. 2, S. 496 - 512
- [252] MEADE, B.K. Preliminary Adjustment of SHORAN and EPI Observations in the Bering Sea. Journ.Coast Geod.Surv. (1953) Nr.5, S. 10-12
- [253] PIERCE, Ch. Datum Connection to the Bering Sea Islands. Journ.Coast Geod.Sturv. (1953) Nr.5, S. 3-10
- [254] Plotting SHORAN Position, when near Base Line Extension of Stations. (as used by Ship "Explorer" in Alaska) Journ.Coast Geod.Sturv. (1951) Nr.4, S. 91-92
8. Laufzeitverfahren mit passiven Reflektoren
- [255] ELLENBERGER Neuer lichtelektrischer Langstreckenmesser Verm.Rundschr. 17 (1955) Nr. 11, S. 401 - 405
- [256] FRAENKEL, H. und W.W. HANSEN Entfernungsbestimmungen mit Lichtimpulsen. Frequenz 2 (1949) Nr. 2, S. 57

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

- [257] GRIFONE, L. Riflettore omnidirezionale per Microonde. Ric.Scient. Rom 22 (1952) Nr.5, S. 2307-2313
- [258] HANSEN, W.W. Surveying with Pulsed Light Radar. Electronics 21 (1948) Nr. 7, S. 76 - 79
- [259] HOOVER, Ch.A. Development of an Optical Radar System for Surveying Purposes. Trans.Amer.Geoph.Union 31 (1950) Nr. 4, S. 518 - 524
- [260] ROBERTSON, S.D. Targets for Microwave Radar Navigation. Bell.Syst.Tech.Journ. 26 (1947) Nr. 10, S. 852 - 869
- [261] STRAUSS, H.A., L.J. RÜGER, C.A.WERT, S.J. REISMAN, M. TAYLOR, R.J.DAVIS, J.H. TAYLOR The MPC-1 Radar Electronics 19 (1946) Nr. 3, S. 140 - 147
- [262] STÜBER, C. Verwendung künstlicher Rückstrahlobjekte in der Funkmeßtechnik. Arch.elekt.Übertragung 4 (1950) S. 275 - 279

Autorenverzeichnis

- ANDERSON, W.C. [24], [25]
- ASEWELL, G.E. [143], [146]
- ASLAKSON, C.I. [1], [33] bis [37], [69], [70], [174 bis 178], [216]
- BALLARD, B.G. [187]
- BARCLAY, J. [40]
- BARREL, H. [38]
- BARROS, J. [164]
- BATTISON, P.H. [205]
- BEARDEN, J.A. [60]
- BENSON, J.M. [165]
- BENZ, Fr. [2], [3]
- BERGSTRAND, E. [117 bis 126]
- BIRARDI, B. [250]

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

- BIRGE, R.T. [61]
- BJERHAMMER, A. [127]
- BLACHUT, T.J. [107]
- BOAGA, G. [71]
- BOL, K. [39], [40]
- BONIFACINO, B. [86], [231 bis 233]
- DE BROGLIE, L. [4]
- BRUDER, W.A. [246]
- BURMISTER, C.A. [179], [247], [248], [249]
- CAFFREY MC, B.I. [108]
- CARD, L.C. [206], [207]
- CARLA, M. [62], [250]
- CLARKE, J.O. [134]
- COLE, H.S. [208]
- COLIN, R.I. [5]
- COMSTOCK, J.P. [166]
- COOPER, B.F. [217]
- CORNFORD, B.A. [51]
- DAVIS, C.W. [135]
- DAVIS, R.J. [261]
- DEEGAN, Ch.J. [167]
- DORSEY, N.E. [57], [63]
- EDEN, J.A. [87]
- EGGERT, O. [8]
- ELLENBERGER [255]
- ESAU, A. [6]
- ESSEN, L. [41] bis [47], [64]
- FICKEISSEN, O.O. [216]
- FOWLER, C.S. [144] bis [146]
- FRANKLIN, E. [59]
- FRÄNKEL, H. [256]
- FREIESLEBEN, H.C. [139]
- FROOME, K.D. [46], [48], [49]
- GERKE, K. [218]
- GIGAS, E. [72], [128], [180]
- GODSON, W.L. [219], [235]
- GORDON-SMITH, A.C. [43]
- GRANT, G. [220]
- GRANT, A.S.G. [236]
- GRIFONE, L. [257]
- HALL, J.S. [7]
- HALLIDAY, D.J. [181]
- HANSEN, W.W. [256], [258]
- HART, C.A. [74] bis [79], [88 bis 94]
- HASTINGS, C.E. [166], [168], [169]
- HENRY, J.E. [95]
- HENRY, T.J.G. [221]
- HILDING, S. [140]
- HILLIARD, C. [172]
- HONORÉ, E. [159 bis 162]
- HOOVER, Ch.A. [259]
- HOUSTON, R.A. [26], [27], [28]
- HUGON [136]
- HÜTTEL, A. [29]

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

JONES, E.E. [209]
 JONES, F.E. [50], [51], [251]
 JORDAN, W. [8]
 JOWITT, S. [110]
 JUNG, R. [73]
 KAROLUS, A. [30]
 KELSH, H.T. [109]
 KENZIE MC, A.A. [138]
 KLINGER, H.H. [52]
 KRÖMMELBEIN, W.T. [210]
 KROLL, C.W. [237]
 KÜSTER, K. [80]
 LAMBERT, W.D. [238]
 LANDEN, D. [111]
 LANGERAAR, W.R. [129], [141]
 LANSING, G.S. [9]
 LARSSON, H. [142]
 LAURILA, S. [96]
 LEAN MC, B.A. [222]
 LEASK, R.D. [107]
 LEIFSON, G. [137], [170]
 LICHTHE, H. [8], [97]
 LORENZ, G.G. [98]
 MACDONALD, K.W. [182]
 MACKENZIE, J.C.C. [130]
 MARUSSI, A. [183]
 MASON, R.W. [144]
 MEADE, B.K. [252]
 MENDOZA, E.B. [53], [54]
 MERCIER, J. [55]
 MESSERSCHMIDT, W. [10], [11]
 MICHELSON, A.A. [19 bis 21]
 MILLER, H.E. [211]
 MISKIN, E.A. [88], [89], [92]
 MITTELSTÄDT, O. [30 bis 32]
 MONAGHAN, P.A. [223]
 MONTEIRO DE, A. [164]
 NAITO, K. [56]
 NENTWIG, K. [131]
 NETH, N. [141]
 NEWCOMB, S. [22]
 NORDMANN, R.A. [212]
 OLIVEIRA DE, J.L. [164]
 PARKIN, E.J. [184]
 PAULSEN, L.V. [224]
 PEACE, F.G. [21]
 PEARSON, F. [21]
 PERROTIN, P. [23]
 PIERCE, Ch. [253]
 PODEYN, G.J. [115]
 POWELL, C. [143]
 PRESSEY, G.G. [144 bis 146]
 PUTTOCK, M.J. [38]

Forschungsberichte des Wirtschafts- und Verkehrsministeriums Nordrhein-Westfalen

RADCLIFFE, D.L. [99]
 RANNIE, J.L. [185], [186], [188]
 RAYMOND, R.C. [116]
 REISMANN, S.J. [261]
 REYNOLDS, L.G. [147]
 RICE, D.A. [174], [189]
 RICHARDSON, R.C. [104], [103], [213]
 RIDENOUR, L. [12]
 RINNER, K. [239], [240]
 ROBERTS, G.E. [148]
 ROBERTSON, S.D. [260]
 ROELOFS, R. [76]
 ROESSLER, E. [149]
 ROSA, E.B. [57]
 ROSS, J.E.R. [190 bis 198], [241], [242]
 RÜGER, L.J. [261]
 SAFFERY, J. [100]
 SALMASO, S. [243]
 SENNERT, H.G. [199]
 SLUSSER, E.A. [163]
 SMITH, R.A. [13], [58], [59]
 SMITH-ROSE, R.L. [65]
 SOEIRO DE BRITO, J.B.V. [171]
 SONNENBERG, G.J. [14]
 SPBERT, J. [112]
 STANNER, W. [15]
 STEFFENHAGEN, K. [83], [83]
 STERN, E.B. [200]
 STILLE, U. [66], [67]
 STIPA, V. [84]
 STOCK, E.H. [106], [225]
 STRAUSS, H.A. [261]
 STÜBER, C. [262]
 SWAFFORD, J.E. [165]
 TAYLOR, J.H. [261]
 TAYLOR, N. [261]
 THOMPSON, J.K. [101]
 THOMSON, A. [226], [227]
 TORCHEUX, E. [159]
 TROREY, L.G. [102], [113]
 ULBRICHT, G. [150]
 VERSTELLE, J.Th. [151], [152], [153], [244]
 VULLO, A. [85]
 WARNER, J. [68], [103], [201], [202], [203], [214], [219], [228], [229], [230]
 WARSCHALOWSKI [245]
 WATERFIELD, H.H. [172]
 WATTS, H.M. [60]
 WERT, C.A. [261]
 WHITUNG, F.B. [59]
 WILSON, A.M. [103]
 WOODWARD, R.H. [138]
 ZIMMERMANN, F. [16]
 Ohne Verfasser: [17], [16], [114], [132], [154 bis 158], [173], [204], [254]

FORSCHUNGSBERICHTE
DES WIRTSCHAFTS- UND VERKEHRSMINISTERIUMS
NORDRHEIN-WESTFALEN

Herausgegeben von Staatssekretär Prof. Leo Brandt

- HEFT 1
Prof. Dr.-Ing. E. Fiebig, Aachen
Untersuchungen über die physikalische Wirkung von Sauerstoffgas
1952, 20 Seiten, 4 Abb., DM 6,75
- HEFT 2
Prof. Dr. W. Fuchs, Aachen
Untersuchungen über die physikalische Wirkung von Sauerstoffgas
1952, 12 Seiten, 3 Abb., 6 Tabellen, DM 10,-
- HEFT 3
Tab.-Wissenschaftl. Büro für die Bauforschungsindustrie
Bisfeld
Untersuchungen über die physikalische Wirkung von Sauerstoffgas
1952, 44 Seiten, 7 Abb., 3 Tabellen, DM 12,50
- HEFT 4
Prof. Dr. E. A. Müller und Dipl.-Ing. H. Spitz, Dortmund
Untersuchungen über die Hitzbelastung in Hüttenbetrieben
1952, 28 Seiten, 5 Abb., 1 Tabelle, DM 9,-
- HEFT 5
Dipl.-Ing. W. Fritze, Aachen
Feldversuche an Turbinenmaschinen
1952, 40 Seiten, 30 Abb., 3 Schaltbilder, DM 1,-
- HEFT 6
Prof. Dr. W. Fuchs, Aachen
Untersuchungen über die Zusammensetzung und Verwendbarkeit von Schweißelektroden
1952, 36 Seiten, DM 10,50
- HEFT 7
Prof. Dr. W. Fuchs, Aachen
Untersuchungen über emulsifizierte Petroleum
1952, 36 Seiten, 1 Abb., 17 Tabellen, DM 10,50
- HEFT 8
M. El. Aliger und H. Straumann, Essen
Algen-Cultivierverfahren im Sommer 1951
1951, 32 Seiten, 4 Abb., 20 Tabellen, DM 9,75
- HEFT 9
Tab.-Wissenschaftl. Büro für die Bauforschungsindustrie
Bisfeld
Untersuchungen über die zweckmäßige Wirkung von Leinwandspinnstoffen unter Berücksichtigung der Anwendung hoher Geschwindigkeiten des Garnes
Vorentscheid für Zetteln und Schäten von Leinwandspinnstoffen auf Hochleistungsmaschinen
1952, 48 Seiten, 7 Abb., 7 Tabellen, DM 9,25
- HEFT 10
Prof. Dr. W. Fuchs, Aachen
"Das Streifenpaar" als neues System zur mechanischen Vergrößerung kleiner Verschiebungen und seine technische Anwendungsmöglichkeiten
1951, 20 Seiten, 6 Abb., DM 4,50
- HEFT 11
Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre, Technische Hochschule Aachen
1. Untersuchungen über Metallbearbeitung im Fertigvorgang mit Hartmetallwerkzeugen und negativem Spanwinkel
2. Weiterentwicklung des Schleifverfahrens für die Herstellung von Präzisionswerkzeugen unter Verwendung hoher Temperaturen
3. Untersuchung von Oberflächenveränderungsverfahren zur Steigerung der Bearbeitbarkeit hochbeanspruchter Bauteile
1951, 80 Seiten, 61 Abb., DM 15,75
- HEFT 12
Elektronen-Strahl, Langberg (RM)
Induktive Erwärmung mit Nierfrequenz
1952, 22 Seiten, 6 Abb., DM 5,20
- HEFT 13
Tab.-Wissenschaftl. Büro für die Bauforschungsindustrie
Bisfeld
Das Nillspinnen von Baufasergarnen mit chemischen Zusätzen zum Spinnbad
1953, 32 Seiten, 4 Abb., 19 Tabellen, DM 10,-
- HEFT 14
Forschungsinstitut für Acetylen, Dortmund
Untersuchungen über Aceton als Lösungsmittel für Acetylen
1952, 64 Seiten, 10 Abb., 26 Tabellen, DM 12,25
- HEFT 15
Wäskensforschung Krefeld
Trocknen von Wäskensstoffen
1953, 48 Seiten, 14 Abb., 2 Tabellen, DM 9,-
- HEFT 16
Max-Planck-Institut für Kohlenforschung, Mülheim a. d. Ruhr
Arbeiten des MPI für Kohlenforschung
1951, 104 Seiten, 9 Abb., DM 17,80
- HEFT 17
Ingenieur-Institut für Eisenbau, M.-Gladbach
Untersuchung der Verzugvorgänge in den Streckweilen verschiedener Spinnmaschinen 1. Bereich
Vergleichende Prüfung mit verschiedenen Dickenelbgeräten
1952, 36 Seiten, 15 Abb., DM 8,-
- HEFT 18
Wäskensforschung Krefeld
Grundlagen zur Erfassung der chemischen Schädigung beim Wäskern
1953, 68 Seiten, 15 Abb., 15 Tabellen, DM 12,75
- HEFT 19
Tab.-Wissenschaftl. Büro für die Bauforschungsindustrie
Bisfeld
Die Auswirkung des Schließens von Leinwandspinnstoffen auf den Verzugvorgang, sowie die Feuchtigkeits- und Dehnungsverhältnisse der Garne und Gewebe
1951, 48 Seiten, 1 Abb., 9 Tabellen, DM 9,-
- HEFT 20
Tab.-Wissenschaftl. Büro für die Bauforschungsindustrie
Bisfeld
Trocknung von Leinwandspinnstoffen I
Vorgang und Einwirkung auf die Carboxylgruppen
1951, 62 Seiten, 18 Abb., 7 Tabellen, DM 12,-
- HEFT 21
Tab.-Wissenschaftl. Büro für die Bauforschungsindustrie
Bisfeld
Trocknung von Leinwandspinnstoffen II
Spinnanordnung und Luftführung beim Trocknen von Leinwandspinnstoffen
1951, 66 Seiten, 22 Abb., 9 Tabellen, DM 11,-
- HEFT 22
Tab.-Wissenschaftl. Büro für die Bauforschungsindustrie
Bisfeld
Die Reparaturmöglichkeit von Wäskstühlen
1951, 28 Seiten, 7 Abb., 3 Tabellen, DM 5,80
- HEFT 23
Institut für Starkstromtechnik, Aachen
Beobachtungen und experimentelle Untersuchungen zur Kenntnis der Mesadyne als Uniformer von konstanter Spannung auf Kondensatorstrom
1953, 32 Seiten, 20 Abb., 4 Tafeln, DM 9,75
- HEFT 24
Institut für Starkstromtechnik, Aachen
Vergleich verschiedener Generatoren-Messverfahren in Bezug auf statisches Verhalten
1951, 44 Seiten, 21 Abb., DM 8,50
- HEFT 25
Gießerei für Kalkstein, Mülheim a. d. Ruhr
Versuche über die Eigenschaften von Kalkstein
1951, 38 Seiten, DM 11,-
- HEFT 26
Tab.-Wissenschaftl. Büro für die Bauforschungsindustrie
Bisfeld
Vergleichende Untersuchungen zweier physikalischer Eigenschaften von Kalkstein
1951, 64 Seiten, 30 Abb., DM 12,50
- HEFT 27
Prof. Dr. E. Liebig, Münster
Untersuchungen zur Resistenz des Antriebspflanzensubstrates Kalkstein, Antriebsmittel E.
1951, 16 Seiten, 1 Tabelle, DM 3,80
- HEFT 28
Prof. Dr. E. Liebig, Münster
Catalysa-offiziell E. Studien zur Erhaltung, Blütenbildung und Resistenz der Drogengewinnung
1951, 24 Seiten, 2 Abb., 1 Tabelle, DM 5,20
- HEFT 29
Tab.-Wissenschaftl. Büro für die Bauforschungsindustrie
Bisfeld
Die Auswirkung der Leinwand in Geweben
1951, 100 Seiten, 14 Abb., 10 Tabellen, DM 17,80
- HEFT 30
Gießerei für Kalkstein, Mülheim a. d. Ruhr
Kontinuierliche Erzeugung und Veränderung von teilschmelzbaren, Aufarbeitung von Steinbruchschmelzen zu verkäuflicher oder verweilbarer Schmelze
1951, 36 Seiten, 15 Abb., 10 Tabellen, DM 10,50
- HEFT 31
Dipl.-Ing. A. Stamer, Essen
Messung des Leistungsbedarfs von Doppeltrommel-Gebläsen
1951, 54 Seiten, 18 Abb., 12 Tabellen, DM 11,-
- HEFT 32
Tab.-Wissenschaftl. Büro für die Bauforschungsindustrie
Bisfeld
Der Einfluss der Naturgemäßnisse auf Qualität und Verarbeitbarkeit von Leinwandspinnstoffen und die Eigenschaften der Leinwandspinnstoffe unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses von Schützen- und Spinnwechseln in der Leinwandspinnerei
1951, 64 Seiten, 2 Abb., 12 Tabellen, DM 11,50
- HEFT 33
Kalkstein-Industrie, Aachen
Eine Methode zur Bestimmung von Schwefelkohlendioxid und Schwefelwasserstoff in Rauchgasen und in der Atmosphäre
1951, 32 Seiten, 8 Abb., 3 Tabellen, DM 6,50
- HEFT 34
Forschungsinstitut für Eisenbau, M.-Gladbach
Untersuchungen über die Eigenschaften von Kalkstein
1951, 32 Seiten, 15 Abb., 15 Tabellen, DM 9,80

HEFT 409

Prof. Dr. phil. F. Weyer, Dr. phil. W. Koch, Dr. rer. nat. Ch. Huber-Gensch und Dipl.-Phys. H. Rehd, Düsseldorf
Das Auftreten eines kubischen Nitrids in aluminiumlegierten Stählen

in Vorbereitung

HEFT 410

Prof. Dr. phil. F. Weyer, Prof. Dr. rer. techn. A. Kochendörfer, Dr. phil. nat. M. Hempel, Düsseldorf und Dipl.-Phys. E. Hillenbagen, Köln
Biegeversuche mit Flachproben aus Alpha-Eisen-Einkristallen zur Bestimmung der Wechselfestigkeit und der Gleitspuren

in Vorbereitung

HEFT 411

Prof. Dr. W. Halbig und Dr. L. Sommer, Frankfurt/M
Grundlegende Versuche zur Keimungsphysiologie von Pilzsporen

in Vorbereitung

HEFT 412

Prof. Dr.-Ing. H. Opitz, Aachen
Kennwerte und Leistungsbedarf für Werkzeugmaschinengetriebe

in Vorbereitung

HEFT 413

Prof. Dr.-Ing. H. Opitz, Aachen
Richtwerte für das Fräsen von unlegierten und legierten Baustählen mit Hartmetall, Teil II

in Vorbereitung

HEFT 414

Dr. med. H. K. Parchwitz und Dr. med. C. Winkler, Bonn
Speicherung organischer Farbstoffe und künstlich radioaktiver Substanzen in Geschwülsten

in Vorbereitung

HEFT 415

Prof. Dr.-Ing. W. Paul, Dr. rer. nat. O. Osbergbau und Dipl.-Phys. E. Fischer, Bonn
Ein Ionenkäfig

in Vorbereitung

HEFT 416

Oberreg.-Gewerberat Dipl.-Ing. G. Striacke, Hamburg
Die Wirkung von Lärm auf den Schlaf des Menschen

in Vorbereitung

HEFT 417

Prof. Dr.-Ing. habil. E. Rißger, Berlin
I. Teil: Die Entwicklung des Weltluftverkehrs, Ergänzungsbericht 1954
II. Teil: Die zivile Luftfahrtpolitik der USA

in Vorbereitung

HEFT 418

O. Gdmire, Mulheim/Ruhr
Über die Randlochkarte als Hilfsmittel in der Dokumentation

in Vorbereitung

HEFT 419

K. Brooks
Die Messungen der Reflexionseigenschaften künstlicher und natürlicher Materialien mit quasi-optischen Methoden bei Mikrowellen

in Vorbereitung

HEFT 420

M. Vogel
Das Spektralgebiet zwischen dem langwelligen Ultrarot und Mikrowellen

in Vorbereitung

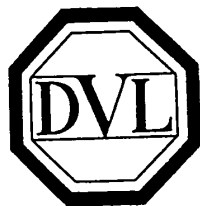
HEFT 421

ORR Dipl.-Volkswirt Dr. H. Rogmann, Düsseldorf
Die Erforschung der Verkehrskonjunktur und der langzeitigen Dynamik in der Verkehrswirtschaft (Zusammenfassung der eingegangenen Stellungnahmen und Vorschläge)

in Vorbereitung

WESTDEUTSCHER VERLAG · KÖLN UND OPLADEN

DEUTSCHE VERSUCHSANSTALT FÜR LUFTFAHRT E.V.
STAT



Bericht Nr. 52

K. Eberts

Entwicklung einiger Meßverfahren und einer frequenz- und
amplituden-stabilisierten Meßeinrichtung zur gleichzeitigen Bestimmung
der komplexen Dielektrizitäts- und Permeabilitätskonstante von festen
und flüssigen Materialien im rechteckigen Hohlleiter und im freien
Raum bei Frequenzen von 9 200 und 33 000 MHz

Herausgegeben im April 1958
von der
Zentrale für Wissenschaftliches Berichtswesen
der
Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt e. V. - Mülheim (Ruhr)



STAT

WESTDEUTSCHER VERLAG / KÖLN UND OPLADEN

DK (621.317.335.3 + 621.317.41) : 621.3.029.64/.65
(537.226.2 + 538.213) : 538.56.029.64/.65

K. EBERTS

Entwicklung einiger Meßverfahren und einer frequenz- und amplitudenstabilisierten Meßeinrichtung zur gleichzeitigen Bestimmung der komplexen Dielektrizitäts- und Permeabilitätskonstante von festen und flüssigen Materialien im rechteckigen Hohlleiter und im freien Raum bei Frequenzen von 9200 und 33 000 MHz

DVL-Bericht Nr. 52, Westdeutscher Verlag, Köln und Opladen, April 1958, 122 Seiten mit 37 Abb.

Nach einem kurzgefaßten Überblick der bekannten Meßmethoden zur Messung der elektrischen und magnetischen Materialkonstanten werden die mathematischen Ableitungen aller notwendigen physikalischen Größen für die speziellen Verhältnisse in leeren und gefüllten rechteckigen Hohlleitern gebracht. Es entwickeln sich sechs Meßverfahren für flüssige und feste Dielektrika und für Ferrite, von denen die geeignetsten Methoden auch für das Interferometer zugeschnitten werden. Ebenfalls werden die Gleichungen zur Bestimmung der maximalen Fehler angeführt. Der zweite Teil beschreibt neben Einzeluntersuchungen verschiedener Bauelemente die Technik der Anlage mit neuartigen frequenz- und amplitudenstabilisierten Generatoren. Den Abschluß bildet eine Liste mit Meßergebnissen diverser Materialien.

DK (621.317.335.3 + 621.317.41) : 621.3.029.64/.65
(537.226.2 + 538.213) : 538.56.029.64/.65

K. EBERTS

Entwicklung einiger Meßverfahren und einer frequenz- und amplitudenstabilisierten Meßeinrichtung zur gleichzeitigen Bestimmung der komplexen Dielektrizitäts- und Permeabilitätskonstante von festen und flüssigen Materialien im rechteckigen Hohlleiter und im freien Raum bei Frequenzen von 9200 und 33 000 MHz

DVL-Bericht Nr. 52, Westdeutscher Verlag, Köln und Opladen, April 1958, 122 Seiten mit 37 Abb.

Nach einem kurzgefaßten Überblick der bekannten Meßmethoden zur Messung der elektrischen und magnetischen Materialkonstanten werden die mathematischen Ableitungen aller notwendigen physikalischen Größen für die speziellen Verhältnisse in leeren und gefüllten rechteckigen Hohlleitern gebracht. Es entwickeln sich sechs Meßverfahren für flüssige und feste Dielektrika und für Ferrite, von denen die geeignetsten Methoden auch für das Interferometer zugeschnitten werden. Ebenfalls werden die Gleichungen zur Bestimmung der maximalen Fehler angeführt. Der zweite Teil beschreibt neben Einzeluntersuchungen verschiedener Bauelemente die Technik der Anlage mit neuartigen frequenz- und amplitudenstabilisierten Generatoren. Den Abschluß bildet eine Liste mit Meßergebnissen diverser Materialien.

DK (621.317.335.3 + 621.317.41) : 621.3.029.64/.65
(537.226.2 + 538.213) : 538.56.029.64/.65

K. EBERTS

Entwicklung einiger Meßverfahren und einer frequenz- und amplitudenstabilisierten Meßeinrichtung zur gleichzeitigen Bestimmung der komplexen Dielektrizitäts- und Permeabilitätskonstante von festen und flüssigen Materialien im rechteckigen Hohlleiter und im freien Raum bei Frequenzen von 9200 und 33 000 MHz

DVL-Bericht Nr. 52, Westdeutscher Verlag, Köln und Opladen, April 1958, 122 Seiten mit 37 Abb.

Nach einem kurzgefaßten Überblick der bekannten Meßmethoden zur Messung der elektrischen und magnetischen Materialkonstanten werden die mathematischen Ableitungen aller notwendigen physikalischen Größen für die speziellen Verhältnisse in leeren und gefüllten rechteckigen Hohlleitern gebracht. Es entwickeln sich sechs Meßverfahren für flüssige und feste Dielektrika und für Ferrite, von denen die geeignetsten Methoden auch für das Interferometer zugeschnitten werden. Ebenfalls werden die Gleichungen zur Bestimmung der maximalen Fehler angeführt. Der zweite Teil beschreibt neben Einzeluntersuchungen verschiedener Bauelemente die Technik der Anlage mit neuartigen frequenz- und amplitudenstabilisierten Generatoren. Den Abschluß bildet eine Liste mit Meßergebnissen diverser Materialien.

DK (621.317.335.3 + 621.317.41) : 621.3.029.64/.65
(537.226.2 + 538.213) : 538.56.029.64/.65

K. EBERTS

Entwicklung einiger Meßverfahren und einer frequenz- und amplitudenstabilisierten Meßeinrichtung zur gleichzeitigen Bestimmung der komplexen Dielektrizitäts- und Permeabilitätskonstante von festen und flüssigen Materialien im rechteckigen Hohlleiter und im freien Raum bei Frequenzen von 9200 und 33 000 MHz

DVL-Bericht Nr. 52, Westdeutscher Verlag, Köln und Opladen, April 1958, 122 Seiten mit 37 Abb.

Nach einem kurzgefaßten Überblick der bekannten Meßmethoden zur Messung der elektrischen und magnetischen Materialkonstanten werden die mathematischen Ableitungen aller notwendigen physikalischen Größen für die speziellen Verhältnisse in leeren und gefüllten rechteckigen Hohlleitern gebracht. Es entwickeln sich sechs Meßverfahren für flüssige und feste Dielektrika und für Ferrite, von denen die geeignetsten Methoden auch für das Interferometer zugeschnitten werden. Ebenfalls werden die Gleichungen zur Bestimmung der maximalen Fehler angeführt. Der zweite Teil beschreibt neben Einzeluntersuchungen verschiedener Bauelemente die Technik der Anlage mit neuartigen frequenz- und amplitudenstabilisierten Generatoren. Den Abschluß bildet eine Liste mit Meßergebnissen diverser Materialien.

DK (621.317.335.3 + 621.317.41) : 621.3.029.64/65

(537.226.2 + 538.213) : 538.56.029.64/65

DEUTSCHE VERSUCHSANSTALT FÜR LUFTFAHRT E.V.



Bericht Nr. 52

K. Eberts

Entwicklung einiger Meßverfahren und einer frequenz- und amplituden-stabilisierten Meßeinrichtung zur gleichzeitigen Bestimmung der komplexen Dielektrizitäts- und Permeabilitätskonstante von festen und flüssigen Materialien im rechteckigen Hohlleiter und im freien Raum bei Frequenzen von 9 200 und 33 000 MHz

Herausgegeben im April 1958
von der
Zentrale für Wissenschaftliches Berichtswesen
der
Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt e.V. - Mülheim (Ruhr)



WESTDEUTSCHER VERLAG / KÖLN UND OPLADEN

Übersicht

Es wird ein kurzgefaßter Überblick der bisher bekannten Meßmethoden zur Messung der elektrischen und magnetischen Materialkonstanten bei Zentimeter- und Millimeterwellen gegeben. Behandelt werden die Verfahren mit Hohlraumresonatoren, Leitungen, Meßbrücken und Methoden im freien Raum.

Weiterhin werden die mathematischen Ableitungen der Leitungsabschlüsse, der Wellenwiderstände, der Fortpflanzungskonstanten, der Phasenmaße und Leitungswellenlängen für die speziellen Verhältnisse bei leeren und gefüllten rechteckigen Hohlleitern gebracht.

In den folgenden Kapiteln entwickeln sich mit Hilfe der Leitungstheorie sechs Meßverfahren für feste und flüssige Dielektrika und für Ferrite, von denen die beiden geeignetsten Methoden auch für das Interferometer zugeschnitten werden. Die angeführten partiellen Ableitungen der interessanten Gleichungen ermöglichen die Bestimmung der maximalen Fehler.

Im zweiten Teil der Arbeit werden die experimentellen Schwierigkeiten angedeutet und die Anlagen beschrieben, von denen die Einrichtungen zur Stabilisierung der Frequenz und Amplitude neuartig sind. Die Notwendigkeit des technischen Aufwandes wird klargelegt durch Einzeluntersuchungen an verschiedenen Bauelementen.

Ein Kapitel ist der Angabe von Meßergebnissen gewidmet. Es wurden die dielektrischen Werte von festen und flüssigen, natürlichen und künstlichen Stoffen gemessen, außerdem Angaben über die magnetischen Eigenschaften von zwei verschiedenen Ferriten gemacht.

G l i e d e r u n g

1. Problemstellung	S. 5
2. Bekannte Meßmethoden	S. 5
3. Allgemeine Darstellung des Eingangswiderstandes einer Leitung	S. 11
4. Feldtheorie im rechteckigen Hohlleiter	S. 18
5. Erstes Meßverfahren für feste Dielektrika mit graphischer Auswertung	S. 30
6. Erweiterung auf flüssige Stoffe	S. 35
7. Zweites Meßverfahren für Dielektrika mit Reaktanzleitung . .	S. 38
8. Drittes Meßverfahren für Dielektrika. Kurzschluß und Abschluß mit Z_0	S. 40
9. Viertes und endgültiges Meßverfahren für feste Dielektrika .	S. 43
10. Praktisch ausgeführte Messungen zum vierten Meßverfahren . .	S. 46
11. Fünftes und endgültiges Meßverfahren für flüssige Dielektrika	S. 50
12. Eine Messung zur Kontrolle der Meßkammer	S. 65

13. Sechstes Meßverfahren zur gleichzeitigen Bestimmung der Dielektrizitäts- und Permeabilitätskonstante von festen Stoffen S. 66

14. Praktisch ausgeführte Messung zum sechsten Verfahren S. 79

15. Die Verhältnisse beim Interferometer S. 83

16. Experimentelle Ausführung S. 87

17. Fehlerrechnungen S. 110

18. Ergebnisse S. 119

19. Schrifttum S. 121

Mülheim (Ruhr), im Oktober 1956

Institut für Mikrowellen der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt e.V.

Leiter: Dr.-Ing. G. ULBRICHT

vormals

Institut für Hochfrequenztechnik

Leiter: Prof. Dr. ESAU (+)

D 82, von der Fakultät für Maschinenwesen und Elektrotechnik der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen genehmigte Dissertation

1. Problemstellung

Der ursprüngliche Zweck vorliegender Arbeit war die Anwendung der bekannten Leitungsmeßverfahren zur DK-Messung auf den rechteckigen Hohlleiter bei Zentimeter- und Millimeterwellen. Aufbauend auf den Arbeiten von FORST und HERSPING bei Dezimeterwellen, die sich der koaxialen Meßleitung bedient hatten, sollte versucht werden, die bisherige Technik bei den höheren Frequenzen zu diskutieren und den neuen Verhältnissen anzupassen. Es zeigte sich aber, daß der frequenzmäßige Sprung über fast zwei Zehnerpotenzen neue Meßverfahren bedingte, sowohl theoretisch als auch experimentell.

Der Übergang auf den rechteckigen Hohlleiter bringt mathematisch die Abhängigkeit des Wellenwiderstandes von der Wellenlänge und eine von der Luftwellenlänge λ_0 verschiedene Leitungswellenlänge λ_g (g = Guide) mit sich, eine erhebliche Erhöhung der Auswerteschwierigkeit. Experimentell steigen die Anforderungen an die Meßgenauigkeit in gleichem Maße, wie die Wellenlänge sich verkürzt, und das unter erschwerten mechanischen Bedingungen. Runde Leitungsgebilde lassen sich mit größerer Präzision herstellen als rechteckige. Außerdem kommt hinzu, daß die zur Verfügung stehenden Generatoren nur einige Milliwatt Leistung abgeben, wovon noch ein großer Teil zur Stabilisierung und Tastmodulation benötigt wird. Für die eigentliche Messung steht dann noch ein Rest von ca. einem halben Milliwatt zur Verfügung. Das entspricht bei genügender Entkopplung der Meßsonden von der Leitung bei dem schlechten Wirkungsgrad der Dioden einer Signalspannung zwischen 10^{-8} und 10^{-6} V. Dementsprechend sind die Anforderungen an den Meßverstärker.

Unter Berücksichtigung dieser Gründe macht es sich die vorliegende Arbeit zur Aufgabe, einige Meßverfahren und die dazugehörigen experimentellen Einrichtungen zu entwickeln, die den gestellten Bedingungen möglichst genau Rechnung tragen.

2. Bekannte Meßmethoden

In den letzten Jahren sind vor allem in den Vereinigten Staaten sehr viele Veröffentlichungen über Dielektrika erschienen, da die Mikrowellentechnik in ihrer vielfältigen Anwendung Auskunft über das elektrische Verhalten vorwiegend von Kunststoffen verlangt.

Als Beispiel aus der Luftfahrt sei die Frage nach dem Verhalten eines Radarimpulses beim Durchlaufen einer aus Kunststoff bestehenden aerodynamischen Verkleidung einer Radarantenne (Radome) gestellt. Die Tatsache, daß der Brechungsindex $n = \sqrt{\epsilon}$ ist, zeigt die Bedeutung dieser Frage für die Anwendung von Geräten zur künstlichen Erweiterung des Sichtbereiches. Von gleicher Wichtigkeit ist der elektrische Verlustwinkel $\operatorname{tg} \delta$, der Aufschluß über eventuell unnötige Energieverluste bzw. Erwärmung im Medium gibt.

Im jährlich erscheinenden Digest of the Literature on Dielectrics der National Academy of Sciences finden sich neben speziellen einzelnen Arbeiten, wie z.B. von HIPPEL, eine große Anzahl Veröffentlichungen über Theorie, Technik und Messung des dielektrischen Verhaltens von festen, flüssigen und gasförmigen Stoffen in äußeren statischen und hochfrequenten Feldern. Einzelne Arbeiten gehen bis zu Frequenzen von 25 000 MHz. Deshalb sei hier darauf verzichtet, auf die Theorie der Dielektrizitäts- und Permeabilitätskonstante einzugehen und die Frequenzabhängigkeit näher zu erklären. Ausgehend von DEBYE finden sich viele umfassende Arbeiten (BÖTTCHER) über das verwickelte Thema.

Um einen Teil der mathematischen Schwierigkeiten zu umgehen, führen verschiedene Autoren in ihrer Meßmethodik Näherungen ein, die nicht immer ganz in ihren Auswirkungen abzuschätzen sind. So findet sich in den Arbeiten über die Messung der Permeabilitätskonstante von Ferriten meistens die Randbedingung $\epsilon' = 1, \epsilon'' = 0$, die eine erhebliche Verfälschung des Ergebnisses bringen kann. Andere Arbeiten machen die Schichtdicke der zu untersuchenden Stoffe dünn und ersetzen die auftretende komplexe hyperbolische Tangensfunktion durch ihr Argument. Häufig wird die Auswertung einer Messung graphisch getätigt, und man nimmt die unumgänglichen Ungenauigkeiten in Kauf. Andere Vernachlässigungen bestehen darin, daß die Feldtheorie der Hohlraumresonatoren für verlustlosen Inhalt aufgestellt wird und der Berechnung zugrunde liegt, man bei der Messung aber ein komplexes Medium mehr oder minder großen Volumens hineingibt.

a) Hohlraumresonatoren

Die in der Mikrowellentechnik üblichen Resonatoren haben Gütefaktoren um 10 000 und stellen damit ein empfindliches Meßorgan dar. Sie werden meistens in zylindrischer Form hergestellt und bieten in der mechanischen

Bearbeitung keine übergroßen Schwierigkeiten. Unterschieden wird grundsätzlich zwischen E- und H-Resonatoren, entsprechend der möglichen Schwingungsmodi. Beiden gemeinsam ist eine Resonanzverschiebung und Veränderung der Güte durch eingefülltes Dielektrikum.

Der E-Resonator, mit dem Wellenmodus E_{010} angeregt, hat eine von der Resonatorlänge unabhängige Resonanzfrequenz. Die Bestimmung der Resonanzkurve erfolgt durch Variation der Oszillatorfrequenz, die in relativ weiten Grenzen möglich sein muß, da ein in die Zylinderachse eingebrachtes dielektrisches Stäbchen erhebliche Resonanzverschiebungen bedingt. ϵ' und $\operatorname{tg} \delta$ erhält man nach BÖRGNIS aus den Gleichungen:

$$\frac{\epsilon'}{\epsilon_0} - 1 = K_1 \left(\frac{R}{\rho} \right)^2 \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \quad \text{und} \quad \operatorname{tg} \delta = \frac{K_2}{\epsilon' \epsilon_0} \left(\frac{R}{\rho} \right)^2 (d' - d)$$

mit R = Resonatorradius, $\Delta \lambda$ = Resonanzänderung durch Dielektrikum, $d' - d$ = Dämpfungsänderung durch Dielektrikum, K_1, K_2 = Konstante.

Der H-Resonator schwingt in H_{01n} -Modus. Durch Änderung der Zylinderlänge läßt sich die Resonanzfrequenz verschieben. Dabei ist der Kolben kontaktlos ausgeführt, da keine radialen Feldlinien vorhanden sind und die kreisförmigen zum Rand hin Null werden. Zwischen dem scheibenförmigen Medium und der Wand ist also ein eventueller Spalt ebenfalls ohne Bedeutung. Kritisch ist aber eine genaue Gangführung des Kolbens, da die Kolbenstellung auf etwa 1/1000 mm genau abgelesen werden muß. Für die Verwendung des H-Resonators zur DK-Messung spricht vor allem die hohe erreichbare Güte bei diesem Typ und die günstigen Abmessungen bei Wellenlängen zwischen 1 und 4 cm. Für Messungen von kleinem $\operatorname{tg} \delta$ (10^{-4}) dürften die Resonatormethoden die geeignetsten sein.

b) Quasi-optische Methoden

Bei dem Übergang zu immer kürzeren Wellenlängen lassen sich die notwendigen Wellenleiter und sonstigen Bauelemente nicht mehr mit der geforderten Genauigkeit herstellen. Bei Wellenlängen kleiner als 8 mm dürfte wohl die Grenze der Leitungs- und Hohlraumverfahren erreicht sein, und man ist gezwungen, Anleihen bei der Optik zu machen. Die für die Mikrowellentechnik interessanteste Anordnung der Optik ist das MICHELSON-Interferometer (Abb. 1).

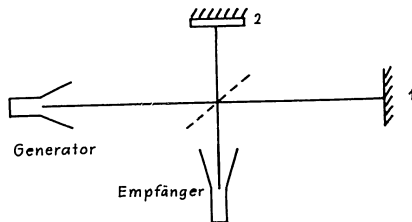


Abbildung 1

Von einer Lichtquelle, in diesem Falle einem gut gebündelten Mikrowellen-generator, trifft eine gerichtete Welle durch einen halbdurchlässigen Spiegel, aus Dielektrikum oder einem Gitter bestehend, auf einen metallischen ebenen Reflektor 1, um von da durch den Halbspiegel zum Empfänger reflektiert zu werden. Ein Teil des Wellenzuges wird aber nach Verlassen des Generators am Halbspiegel auf den vorerst blanken metallischen Reflektor 2 geworfen und gelangt von dort geradlinig ebenfalls zum Empfänger. Durch geeignete Stellung des beweglichen Reflektors 1 läßt sich durch Überlagerung der beiden Teilwellen am Empfänger Feldstärkemaximum und -minimum des Stehwellenbildes bestimmen. Das Stehwellenverhältnis $m = U_{\max}/U_{\min}$ müßte in diesem Falle natürlich unendlich sein, da ja nur reine Blindwiderstände im Feld vorhanden sein dürften. Leider sorgen gewisse Abstrahlungsverluste doch für ein leichtes Anheben der Spannung U_{\min} von Null.

Die zu untersuchende dielektrische Platte wird nun auf den Reflektor 2 aufgebracht und damit ein komplexer Reflexionskoeffizient ins Feld eingeführt. Aus den veränderten Phasen- und Stehwellenverhältnissen läßt sich der Reflexionsfaktor des Materials und damit auch seine elektrischen Werte berechnen.

Um unangenehme Beugungserscheinungen an den verschiedenen Reflektoren zu verhindern, müssen sie sehr groß gegen die Wellenlänge sein. Außerdem muß Sorge getragen werden, daß die Abstände zwischen den einzelnen Reflektoren größer sind als die sich ausbildenden Nahfelder vor den jeweiligen Flächen.

Zugänglich ist nur der über die ganze Platte gemittelte dielektrische Wert des Materials. Streustrahlung an der vielleicht nicht genau ebenen Oberfläche (Scattering) führt zu einer scheinbaren Erniedrigung des Reflexionsfaktors und Erhöhung des Verlustwinkels. Fehlerhafte Ergebnisse treten ebenfalls auf bei nicht genau senkrechtem Einfall oder bei Verwendung von Strahlern, deren austretende Wellenfront nicht eben ist.

Andere Meßverfahren im freien Raum bedienen sich der Anordnung nach Abbildung 2.

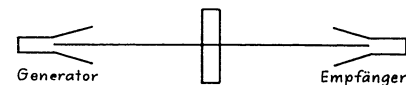


Abbildung 2

In eine Ausbreitungsstrecke wird eine Platte der zu untersuchenden Substanz gebracht und die Empfangsverhältnisse werden vorher und nachher verglichen.

In wieder anderer Variation des Verfahrens vergleicht man die direkt empfangene Energie mit der an einer Probe reflektierten Energie, etwa nach dem Schema der Abbildung 3.

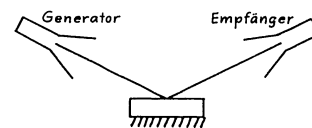


Abbildung 3

Allen Verfahren im freien Raum ist die Anfälligkeit gegenüber äußeren Störfeldern nachzusagen, aber auch der Vorteil des einfachen mechanischen Aufbaus und die Möglichkeit der Frequenzvariation bis zu kleinsten Wellenlängen.

c) Meßleitungsverfahren

Die Messung der dielektrischen und magnetischen Konstanten in geschlossenen Leitungssystemen umgeht viele der vorgenannten Fehlerquellen. Sie ist im Rahmen der durch den Hohlleiter gegebenen Grenzen frequenzunabhängig, frei von Einflüssen durch äußere elektromagnetische Störfelder und hat praktisch keine Strahlungsverluste aufzuweisen. Die zu messenden Stoffe können auf recht verschiedene Art in den Hohlleiter eingebracht werden. Bedingung ist allerdings in fast allen Fällen gutes Einpassen in den Leitungsquerschnitt.

Unterschieden wird zwischen direkten Impedanzmessungen und Messungen der Ausbreitungskonstante γ sowohl bei unbegrenzt langen, gefüllten Leitungen als auch bei gefüllten Leitungsabschnitten. Am sinnvollsten scheinen aber Eingangsimpedanzmessungen an gefüllten Leitungsabschnitten, die auch experimentell die kleinsten Schwierigkeiten bieten.

Da mit Ausnahme der graphischen Lösung zur Auswertung zwei Messungen notwendig sind, wird die Impedanz des Meßobjektes auf verschiedene Arten bei der zweiten Messung verändert. Dies geschieht in allen bekannten Fällen durch Veränderung der Probenlänge oder des Leitungsabschlusses hinter der Probe (Leerlauf oder Kurzschluß). Solche Variationen sind aber immer mit mechanischen Schwierigkeiten verbunden.

Bekannt sind auch Methoden, die ihre Ergebnisse auf Leistungsmessungen mit Bolometerbrücken im Hohlleiter zurückführen. Üblicherweise wird aber aus der Verschiebung des letzten Spannungsminimums vom Leitungsende und dem veränderten Stehwellenverhältnis nach Einbringen des Prüfobjektes ausgegangen.

d) Brückenverfahren

Recht saubere Messungen lassen sich durch verschiedenartige Brückenverfahren durchführen. Im Prinzip sind Brückenschaltungen bei allen vorgenannten Verfahren im Resonator, im freien Raum und in Leitungen möglich, jedoch werden sie vorwiegend für Leistungsmessungen angewandt.

Eine elegante Methode wird von BELJERS und van de LINDT angegeben. Sie bedienen sich zweier magischer T, von denen das eine mit fester Detektorauskopplung als Brückenelement dient, das zweite als veränderliche Impedanz. Die zwei gleichwertigen Arme des zweiten magischen T dienen als

Stichleitungen und werden durch Kurzschlußkolben abgeschlossen, während der vierte Arm durch seinen Wellenwiderstand abgeschlossen ist. Man hat also die Möglichkeit, Real- und Imaginärteil des einen Brückenzweiges, bestehend aus einer mit Dielektrikum gefüllten Leitung, im anderen Brückenarm künstlich und geeicht nachzubilden. Durch Vertauschung der Kolben erhält man wieder eine Nullabgleichstellung. Aus der dabei auftretenden Verschiebung Δ der Kolben ergeben sich das Stehwellenverhältnis und die Phasenverschiebung. Wenn es gelungen ist, mit den Kurzschlußkolben reproduzierbare Kurzschlußebenen darzustellen, kann das Verfahren mit großer Genauigkeit arbeiten.

Ein ähnliches Brückenverfahren wird von PLATT und dem Verfasser angegeben zur Bestimmung des komplexen Reflexionsfaktors eines Mediums, woraus sich ebenfalls die DK ermitteln läßt. Vom Generator wird über einen Richtkopppler ein Teil der HF-Amplitude über ein Dämpfungsglied und einen Phasenschieber auf den einen Arm eines magischen T gegeben, während in den zweiten Arm die gesamte vom Medium reflektierte Amplitude gelangt. Aus den Daten des Dämpfungsgliedes und des Phasenschiebers bei Nullabgleich der Brücke lassen sich die gesuchten Größen errechnen.

3. Allgemeine Darstellung des Eingangswiderstandes einer Leitung

In den folgenden Kapiteln sollen nun die für die Methodik der Meßverfahren notwendigen mathematischen Grundlagen ausgearbeitet werden.

Der Abschlußwiderstand einer Leitung ist eine im allgemeinen komplexe Größe und kann durch seinen Real- und Imaginärteil bestimmt werden. Zur Festlegung von R_e sind zwei reelle Meßgrößen zugänglich, nämlich das Stehwellenverhältnis $m = U_{\max}/U_{\min}$ und der Abstand des ersten Spannungsminimums vom Leitungsende, der mit l bezeichnet werden soll. Wenn man R_e auf den Wellenwiderstand $Z_0 = \sqrt{L/C}$ und l auf die Leitungswellenlänge λ bezieht, erhält man die Gleichungen:

$$(1) \quad p = \frac{R_e}{Z_0}$$

und

$$(2) \quad \xi = \frac{l}{\lambda_g}$$

Angedeutet werden die Verhältnisse durch die Abbildungen 4 und 5.

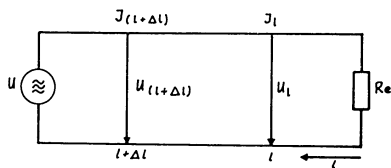


Abbildung 4

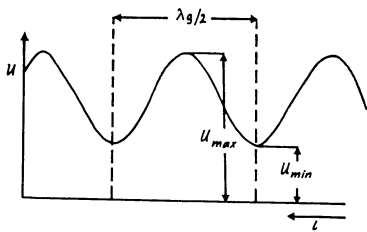


Abbildung 5

a) Die Differentialgleichung einer verlustfreien Wechselstromleitung

Es gelten folgende Gleichungen:

$$(3) \quad U_{(l+\Delta l)} - U_l - J_l j \omega L \Delta l = 0$$

$$(4) \quad J_{(l+\Delta l)} - J_l - U_l j \omega C \Delta l = 0$$

Die abgebrochene Taylor-Entwicklung liefert:

$$U_l + \dot{U}_l \Delta l - U_l = J_l j \omega L \Delta l$$

$$J_l + \dot{J}_l \Delta l - J_l = U_l j \omega C \Delta l$$

$$\text{mit } \dot{U}_l = \dot{J}_l j \omega L$$

und der Elimination von J_l erhält man:

$$(5) \quad \dot{U}_l = U_l j \omega C j \omega L = -\omega^2 LC U_l$$

Der Lösungsansatz:

$$U_l = K_1 e^{q l}; \quad q^2 K_1 e^{q l} = -\omega^2 LC K_1 e^{q l}; \quad q = \pm j \omega \sqrt{LC}$$

ergibt die allgemeine Lösung für die Spannung:

$$(6) \quad U_l = K_1 e^{j \omega \sqrt{LC} l} + K_2 e^{-j \omega \sqrt{LC} l}$$

Für den Strom folgt:

$$J_l = \frac{1}{j \omega L} \dot{U}_l = \frac{1}{j \omega L} \left\{ j \omega \sqrt{LC} K_1 e^{j \omega \sqrt{LC} l} - j \omega \sqrt{LC} K_2 e^{-j \omega \sqrt{LC} l} \right\}$$

mit $\sqrt{LC}/L = \sqrt{C/L} = 1/z_0$ wird schließlich:

$$(7) \quad J_l = \frac{1}{z_0} \left\{ K_1 e^{j \omega \sqrt{LC} l} - K_2 e^{-j \omega \sqrt{LC} l} \right\}$$

Der erste Summand stellt eine nach rechts laufende Welle dar. Für die Wellenlänge erhält man aus:

$$(8) \quad \omega \sqrt{LC} \cdot \lambda_g = 2\pi \quad \lambda_g = \frac{2\pi}{\omega \sqrt{LC}}$$

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ergibt sich zu:

$$(9) \quad v = \lambda_g \cdot f = \lambda_g \frac{\omega}{2\pi} = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

Führt man in die Gleichungen (6) und (7) die Ausdrücke (2) und (8) ein, so erhält man:

$$(10) \quad U_{(l)} = K_1 e^{j 2\pi \xi} + K_2 e^{-j 2\pi \xi}$$

$$(11) \quad J_{(l)} = \frac{1}{z_0} \left\{ K_1 e^{j 2\pi \xi} - K_2 e^{-j 2\pi \xi} \right\}$$

b) Bestimmung der Integrationskonstanten

Die Spannungs- und Stromverteilung längs der Leitung ist völlig bestimmt, wenn die Spannung U_e am Ende der Leitung und der Abschlusswiderstand gegeben sind. K_1 und K_2 lassen sich also durch U_e und R_e ausdrücken. Für $\xi = 0$ ergibt sich also:

$$U_e = K_1 + K_2 ; \quad J_e = \frac{4}{z_0} [K_1 - K_2]$$

Daraus folgt:

$$U_e = J_e R_e = \frac{R_e}{z_0} [K_1 - K_2]$$

Unter Berücksichtigung von Gleichung (1) erhält man:

$$K_1 - K_2 = \frac{U_e}{p}$$

Zusammen mit $K_1 + K_2 = U_e$ ergibt das:

$$(12) \quad K_1 = \frac{U_e}{2} \left[1 + \frac{1}{p} \right]$$

und

$$(13) \quad K_2 = \frac{U_e}{2} \left[1 - \frac{1}{p} \right]$$

Mit den Gleichungen (12) und (13) werden die Gleichungen (10) und (11) zu:

$$(14) \quad U(\xi) = \frac{U_e}{2} \left[1 + \frac{1}{p} \right] e^{j2\pi\xi} + \frac{U_e}{2} \left[1 - \frac{1}{p} \right] e^{-j2\pi\xi}$$

$$(15) \quad J(\xi) = \frac{4}{z_0} \left\{ \frac{U_e}{2} \left[1 + \frac{1}{p} \right] e^{j2\pi\xi} - \frac{U_e}{2} \left[1 - \frac{1}{p} \right] e^{-j2\pi\xi} \right\}$$

Zur Vereinfachung erfolgt Multiplikation der Gleichung (14) mit $\frac{2p}{U_e}$ und der Gleichung (15) mit $z_0 \frac{2p}{U_e}$:

$$(16) \quad \frac{2p}{U_e} U(\xi) = [p+1] e^{j2\pi\xi} + [p-1] e^{-j2\pi\xi}$$

$$(17) \quad z_0 \frac{2p}{U_e} J(\xi) = [p+1] e^{j2\pi\xi} - [p-1] e^{-j2\pi\xi}$$

Die Spannungs- und Stromverteilungen setzen sich also aus einer zum Leitungsende hinlaufenden $[p+1] e^{j2\pi\xi}$ und einer vom Leitungsende her zurücklaufenden $[p-1] e^{-j2\pi\xi}$ Welle zusammen.

c) Abschluß der Leitung mit beliebiger Last

Spannung und Strom sind, von Konstanten abgesehen, Summe oder Differenz zweier Zeiger, die sich mit wachsendem ξ entgegengesetzt um gleiche Winkel drehen. Pro Wellenlänge erfolgt eine Drehung. Es ergeben sich also stehende Wellen.

Der Strom eilt der Spannung um 90° voraus, und seine Amplitude im Strommaximum ist gleich der Spannungsamplitude im Spannungsmaximum dividiert durch den Wellenwiderstand z_0 . Da die Maxima einer Größe immer in der Mitte zwischen ihren Minima liegen, fallen also allgemein die Strommaxima mit den Spannungsminima und die Stromminima mit den Spannungsmaxima zusammen.

Die Spannung hat ein Maximum an den Stellen ξ , an denen die beiden Zeiger gleiche Richtung haben. Hier addieren sich die Beträge:

$$(18) \quad \left| \frac{2p}{U_e} \right| U_{\max} = |p+1| + |p-1|$$

Die Spannung hat ein Minimum an den Stellen ξ , an denen die beiden Zeiger entgegengesetzte Richtung haben. Hier subtrahieren sich die Beträge:

$$(19) \quad \left| \frac{2p}{U_e} \right| U_{\min} = |p+1| - |p-1|$$

Daraus ergibt sich das Stehwellenverhältnis zu:

$$(20) \quad m = \frac{|p+1| + |p-1|}{|p+1| - |p-1|} \quad \text{oder} \quad \frac{m+1}{m-1} = \frac{|p+1|}{|p-1|}$$

Im Spannungsminimum an der Stelle ξ unterscheiden sich die Zeiger in ihrem Richtungswinkel um ein ungerades Vielfaches von π .

$$(21) \quad \text{Arc} \{ [p+1] e^{j2\pi\xi} \} - \text{Arc} \{ [p-1] e^{-j2\pi\xi} \} = [2n+1] \pi$$

$$(22) \quad \text{Arc} \left\{ \frac{\rho+1}{\rho-1} \right\} = [2n+1] - 4\pi\xi$$

Aus den Gleichungen (20) und (22) folgt:

$$\frac{\rho+1}{\rho-1} = \frac{m+1}{m-1} e^{j[(2n-1) - 4\pi\xi]}$$

Mit $e^{j(2n+1)\pi} = -1$ erhält man:

$$(23) \quad \frac{\rho+1}{\rho-1} = \frac{1+m}{1-m} e^{-j4\pi\xi}$$

Aus Gleichung (23) folgt ρ zu:

$$(24) \quad \rho = \frac{Re}{z_0} = \frac{1-jm \operatorname{tg} 2\pi\xi}{m-j \operatorname{tg} 2\pi\xi}$$

Aufteilen in Real- und Imaginärteil durch Multiplikation mit dem komplex-konjugierten Nenner ergibt:

$$(25) \quad \frac{Re}{z_0} = \frac{m[1+\operatorname{tg}^2 2\pi\xi]}{m^2+\operatorname{tg}^2 2\pi\xi} + j \frac{\operatorname{tg} 2\pi\xi[1-m^2]}{m^2+\operatorname{tg}^2 2\pi\xi}$$

oder abgekürzt:

$$(26) \quad Re = z_0 [x+jy]$$

Für $U_{\min} = 0 \rightarrow m = \infty$

Anwenden der Hospitalischen Regel auf Gleichung (24):

$$(27) \quad \frac{d(Re/z_0)}{dm} = \frac{Re}{z_0} = -j \operatorname{tg} 2\pi\xi$$

Der Ausdruck Gleichung (27) gilt für reine Blindwiderstände als Abschluß der Leitung.

d) Graphische Darstellung

Wenn man Gleichung (25) graphisch darstellt, erhält man für konstantes m bei Variation von ξ von $0 - 0,5$ Kreise im ersten und zweiten Quadranten der komplexen Ebene, deren Mittelpunkte auf der reellen Achse liegen. Für $m = 1$ schrumpft der Kreis in dem Punkt $1 \pm j0$ zusammen. Der linke Schnittpunkt mit der reellen Achse ist mit $1/m$ gegeben, der rechte mit m . Für $m = \infty$ geht der Kreis in die imaginäre Achse über. Für konstantes ξ erhält man Kreise, deren Mittelpunkte alle auf der imaginären Achse liegen, und die alle den Punkt $1 \pm j0$ schneiden (s. Abb. 6).

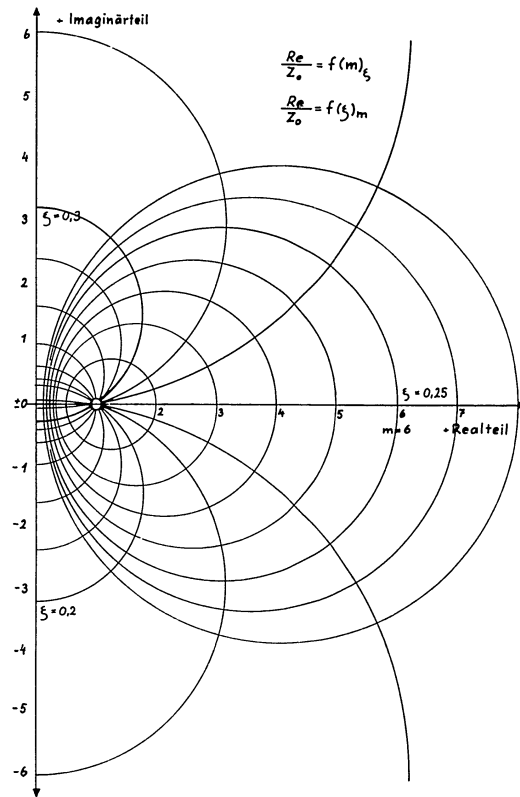


Abbildung 6

4. Feldtheorie im rechteckigen Hohlleiter

Da im rechteckigen Hohlleiter, wie bereits angedeutet, alle bekannten Leitungsgleichungen nur in spezieller Form Gültigkeit haben, soll zuerst auf die Theorie dieses Leitungstyps eingegangen werden.

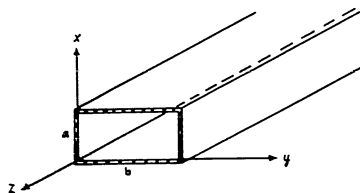


Abbildung 7

Bei dem skizzierten Leitungsgebilde sei unendlich gut leitendes Wandmaterial vorausgesetzt. Dann kann die Eindringtiefe des Feldes und damit der Leitungsverlust zu Null angenommen werden. Die Ausbreitungsrichtung sei z. Ebenso zu Null werden die Tangentialkomponenten der elektrischen Feldstärke an der Wandung des Hohlleiters. Dafür gelten die folgenden Randbedingungen:

$$(28) \quad \mathcal{E}_z = 0 \quad \text{für} \quad y = 0, \quad y = b$$

$$(29) \quad \mathcal{E}_y = 0 \quad \text{für} \quad x = 0, \quad x = a$$

$$(30) \quad \mathcal{E}_x = 0 \quad \text{für} \quad x = 0, \quad x = a, \quad y = 0, \quad y = b$$

a) Die Differentialgleichung des mit verlustbehafteten Stoffen gefüllten Hohlleiters

Die Maxwell'schen Gleichungen lauten:

$$(31) \quad \text{rot } \mathcal{H} = \mathcal{K} + \epsilon \frac{\partial \mathcal{E}}{\partial t}$$

$$(32) \quad \text{rot } \mathcal{E} = - \frac{\partial \mathcal{H}}{\partial t}$$

$$(33) \quad \mathcal{D} = \epsilon' \epsilon_0 \mathcal{E}$$

$$(34) \quad \mathcal{H} = j \omega \epsilon' \epsilon_0 \mathcal{E}$$

In räumlichen Koordinaten geschrieben folgt daraus für die Kreisfrequenz ω :

$$\frac{\partial \mathcal{H}_z}{\partial y} - \frac{\partial \mathcal{H}_y}{\partial z} = j \omega \epsilon_0 \epsilon' \mathcal{E}_x + \mathcal{K}_x$$

$$\frac{\partial \mathcal{H}_x}{\partial z} - \frac{\partial \mathcal{H}_z}{\partial x} = j \omega \epsilon_0 \epsilon' \mathcal{E}_y + \mathcal{K}_y$$

$$\frac{\partial \mathcal{H}_y}{\partial x} - \frac{\partial \mathcal{H}_x}{\partial y} = j \omega \epsilon_0 \epsilon' \mathcal{E}_z + \mathcal{K}_z$$

(35)

$$\frac{\partial \mathcal{E}_z}{\partial y} - \frac{\partial \mathcal{E}_y}{\partial z} = - j \omega \mu_0 \mathcal{H}_x [\mu' - j \mu'']$$

$$\frac{\partial \mathcal{E}_x}{\partial z} - \frac{\partial \mathcal{E}_z}{\partial x} = - j \omega \mu_0 \mathcal{H}_y [\mu' - j \mu'']$$

$$\frac{\partial \mathcal{E}_y}{\partial x} - \frac{\partial \mathcal{E}_x}{\partial y} = - j \omega \mu_0 \mathcal{H}_z [\mu' - j \mu'']$$

Alle Feldgrößen sind komplex. Man nennt ϵ die absolute Dielektrizitätskonstante des betreffenden Materials, auch DK genannt; ihren Wert für Vakuum nennt man ϵ_0 . Er ist $\epsilon_0 = 0,0886 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vcm}$. Das Verhältnis ϵ/ϵ_0 für ein beliebiges Material heißt seine relative DK ϵ_r .

Sie ist im allgemeinen eine komplexe dimensionslose Zahl

$$(36) \quad \epsilon_r = \epsilon' - j \epsilon''$$

Mit dem Proportionalitätsfaktor μ wird die magnetische Permeabilität bezeichnet. Entsprechend ϵ_0 wird mit μ_0 die Permeabilität des Vakuums benannt und

$$(37) \quad \mu_r = \mu/\mu_0 = \mu' - j \mu''$$

ist ebenfalls eine dimensionslose komplexe Zahl. Es ist $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-8} \frac{Vs}{Acm}$.

Führt man üblicherweise für die Ausbreitung in z-Richtung das Fortpflanzungsmaß γ nach dem Schema:

$$H = H_0 e^{\gamma z} \quad \text{und} \quad E = E_0 e^{\gamma z}$$

ein, so sind alle Größen mit dem Faktor $e^{\gamma z}$ multipliziert zu denken. An Stelle der Ableitungen nach z erscheint dann der Faktor γ . Damit wird das Gleichungssystem (35) zu:

$$\frac{\partial \mathcal{H}_z}{\partial y} - \delta \mathcal{H}_y = j \omega \epsilon_0 \epsilon' \mathcal{E}_x + \mathcal{K} \mathcal{E}_x$$

$$\gamma \mathcal{H}_x - \frac{\partial \mathcal{H}_z}{\partial x} = j \omega \epsilon_0 \epsilon' \mathcal{E}_y + \mathcal{K} \mathcal{E}_y$$

$$\frac{\partial \mathcal{H}_y}{\partial x} - \frac{\partial \mathcal{H}_x}{\partial y} = j \omega \epsilon_0 \epsilon' \mathcal{E}_z + \mathcal{K} \mathcal{E}_z$$

(38)

$$\frac{\partial \mathcal{E}_z}{\partial y} - \delta \mathcal{E}_y = j \omega \mu_0 \mathcal{H}_x [\mu' - j\mu'']$$

$$\gamma \mathcal{E}_x - \frac{\partial \mathcal{E}_z}{\partial x} = -j \omega \mu_0 \mathcal{H}_y [\mu' - j\mu'']$$

$$\frac{\partial \mathcal{E}_y}{\partial x} - \frac{\partial \mathcal{E}_x}{\partial y} = -j \omega \mu_0 \mathcal{H}_z [\mu' - j\mu'']$$

Diese Gleichungen beschreiben alle Feldformen im Hohlleiter. Hier interessieren aber nur die transversal-elektrisch polarisierten Wellen, die TE-Wellen. Für sie existiert keine E-Komponente in Ausbreitungsrichtung, also $\mathcal{E}_z = 0$. Damit wird aus Gleichungssystem (38):

$$(39) \quad \frac{\partial \mathcal{H}_z}{\partial y} - \gamma \mathcal{H}_y = \mathcal{E}_x [j \omega \epsilon_0 \epsilon' + \mathcal{K}]$$

$$(40) \quad \gamma \mathcal{H}_x - \frac{\partial \mathcal{H}_z}{\partial x} = \mathcal{E}_y [j \omega \epsilon_0 \epsilon' + \mathcal{K}]$$

$$(41) \quad \frac{\partial \mathcal{H}_y}{\partial x} - \frac{\partial \mathcal{H}_x}{\partial y} = 0$$

$$(42) \quad \gamma \mathcal{E}_y = j \omega \mu_0 \mathcal{H}_x [\mu' - j\mu'']$$

$$(43) \quad \gamma \mathcal{E}_x = -j \omega \mu_0 \mathcal{H}_y [\mu' - j\mu'']$$

$$(44) \quad \frac{\partial \mathcal{E}_z}{\partial x} - \frac{\partial \mathcal{E}_x}{\partial y} = -j \omega \mu_0 \mathcal{H}_z [\mu' - j\mu'']$$

Aus Gleichung (43) folgt:

$$(45) \quad \mathcal{H}_y = - \frac{\gamma \mathcal{E}_x}{j \omega \mu_0 [\mu' - j\mu'']}$$

Gleichung (45) in Gleichung (39) ergibt:

$$(46) \quad \frac{\partial \mathcal{H}_z}{\partial y} + \frac{\gamma \mathcal{E}_x}{j \omega \mu_0 [\mu' - j\mu'']} = \mathcal{E}_x [j \omega \epsilon_0 \epsilon' + \mathcal{K}]$$

Aus der Gleichung (44) folgt:

$$(47) \quad \mathcal{H}_z = \frac{-\frac{\partial \mathcal{E}_y}{\partial x} + \frac{\partial \mathcal{E}_x}{\partial y}}{j \omega \mu_0 [\mu' - j\mu'']}$$

und

$$(48) \quad \frac{\partial \mathcal{H}_z}{\partial y} = \frac{-\frac{\partial^2 \mathcal{E}_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathcal{E}_x}{\partial y^2}}{j \omega \mu_0 [\mu' - j\mu'']}$$

Gleichung (48) in Gleichung (46) eingeführt:

$$(49) \quad -\frac{\partial^2 \mathcal{E}_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \mathcal{E}_x}{\partial y^2} + \delta^2 \mathcal{E}_x = \mathcal{E}_x [j \omega \epsilon_0 \epsilon' + \mathcal{K}] j \omega \mu_0 [\mu' - j\mu'']$$

Aus Gleichung (42) folgt:

$$(50) \quad \mathcal{H}_x = \frac{\gamma \mathcal{E}_y}{j \omega \mu_0 [\mu' - j\mu'']}$$

Gleichung (50) in Gleichung (40) ergibt:

$$(51) \quad \frac{\delta^2 \psi_y}{j \omega \mu_0 [\mu' - j \mu'']} - \frac{\partial \psi_x}{\partial x} = \psi_y [j \omega \epsilon_0 \epsilon' + \kappa]$$

Aus Gleichung (47) folgt:

$$(52) \quad \frac{\partial \psi_x}{\partial x} = \frac{-\frac{\partial^2 \psi_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi_x}{\partial x \partial y}}{j \omega \mu_0 [\mu' - j \mu'']}$$

Gleichung (52) in Gleichung (51) liefert:

$$(53) \quad j^2 \psi_y + \frac{\partial^2 \psi_y}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 \psi_x}{\partial x \partial y} = \psi_y [j \omega \epsilon_0 \epsilon' + \kappa] j \omega \mu_0 [\mu' - j \mu'']$$

Gleichung (42) und Gleichung (43) nach ψ_y bzw. ψ_x aufgelöst und nach ∂_x bzw. ∂_y abgeleitet und in Gleichung (41) eingeführt, ergibt:

$$(54) \quad -\frac{\delta \partial \psi_x}{\partial x} = -\frac{\delta \partial \psi_y}{\partial y}$$

Aus Gleichung (54) folgt:

$$(55) \quad \frac{\partial^2 \psi_x}{\partial x \partial y} = -\frac{\partial^2 \psi_y}{\partial y^2}$$

und

$$(56) \quad \frac{\partial^2 \psi_y}{\partial x \partial y} = -\frac{\partial^2 \psi_x}{\partial x^2}$$

Gleichung (55) in Gleichung (53) eingeführt:

$$(57) \quad j^2 \psi_y + \frac{\partial^2 \psi_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi_y}{\partial y^2} = \psi_y [j \omega \epsilon_0 \epsilon' + \kappa] j \omega \mu_0 [\mu' - j \mu'']$$

Gleichung (56) in Gleichung (49) eingeführt:

$$(58) \quad j^2 \psi_x + \frac{\partial^2 \psi_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi_x}{\partial y^2} = \psi_x [j \omega \epsilon_0 \epsilon' + \kappa] j \omega \mu_0 [\mu' - j \mu'']$$

Aus Gleichung (57) und (58) folgt:

$$(59) \quad \frac{\partial^2 \psi_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi_y}{\partial y^2} = \psi_y \{-\omega^2 \epsilon_0 \epsilon' \mu_0 [\mu' - j \mu''] + j \kappa \omega \mu_0 [\mu' - j \mu''] - \delta^2\}$$

und

$$(60) \quad \frac{\partial^2 \psi_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi_x}{\partial y^2} = \psi_x \{-\omega^2 \epsilon_0 \epsilon' \mu_0 [\mu' - j \mu''] + j \kappa \omega \mu_0 [\mu' - j \mu''] - \delta^2\}$$

b) Lösung der Differentialgleichungen

Als Lösungsansatz bietet sich an:

$$(61) \quad \sin px \cos qy, \quad \sin px \sin qy, \quad \cos px \cos qy, \quad \cos px \sin qy$$

Dann bestehen die allgemeinen Lösungen aus den Gleichungen:

$$(62) \quad \psi_x = A_1 \sin px \cos qy + A_2 \cos px \cos qy + A_3 \sin px \sin qy + A_4 \cos px \sin qy$$

$$\psi_y = B_1 \sin px \cos qy + B_2 \cos px \cos qy + B_3 \sin px \sin qy + B_4 \cos px \sin qy$$

Zum Beweis der Richtigkeit werde ψ_x und ψ_y zweimal differenziert:

$$(63) \quad \frac{\partial \psi_x}{\partial x} = A_1 p \cos px \cos qy - A_2 p \sin px \cos qy + A_3 p \cos px \sin qy - A_4 p \sin px \sin qy$$

$$(64) \quad \frac{\partial^2 \psi_x}{\partial x^2} = -p^2 A_1 \sin px \cos qy - p^2 A_2 \cos px \cos qy - p^2 A_3 \sin px \sin qy - p^2 A_4 \cos px \sin qy = -p^2 \psi_x$$

$$(65) \quad \frac{\partial \psi_x}{\partial y} = -q A_1 \sin px \sin qy - q A_2 \cos px \sin qy + q A_3 \sin px \cos qy + q A_4 \cos px \cos qy$$

$$(66) \quad \frac{\partial^2 \psi_x}{\partial y^2} = -q^2 A_1 \sin px \cos qy - q^2 A_2 \cos px \cos qy - q^2 A_3 \sin px \sin qy - q^2 A_4 \cos px \sin qy = -q^2 \psi_x$$

Aus Gleichung (60), (64) und (66) folgt:

$$(67) \quad -p^2 \psi_x - q^2 \psi_x = \psi_x \left\{ -\omega^2 \epsilon_0 \epsilon' [\mu' - j\mu''] \mu_0 + j\omega \mu_0 [\mu' - j\mu''] - \gamma^2 \right\}$$

bzw.

$$(68) \quad p^2 + q^2 = \omega^2 \epsilon_0 \epsilon' \mu_0 [\mu' - j\mu''] - j\omega \mu_0 [\mu' - j\mu''] + \gamma^2$$

Die Grenzbedingungen Gl. (28) bis (30) liefern:

$$(69) \quad \text{für } y = 0 \longrightarrow 0 = A_1 \sin px + A_2 \cos px$$

und

$$(70) \quad x = 0 \longrightarrow 0 = B_2 \cos qx + B_4 \sin qx$$

Aus den Ausdrücken Gl. (69) und (70) folgt dann:

$$(71) \quad A_1 = A_2 = B_2 = B_4 = 0$$

Damit erhält man aus Gleichung (65) und der sinngemäßen Ableitung der Gleichung (59):

$$(72) \quad \frac{\partial \psi_x}{\partial x} = A_3 p \cos px \sin qy - A_4 p \sin px \sin qy$$

$$(73) \quad \frac{\partial \psi_y}{\partial y} = -B_1 q \sin px \sin qy + B_3 q \sin px \cos qy$$

Nun noch die Grenzbedingungen Gl. (54) ergibt sich dann:

$$(74) \quad A_4 p + B_1 q = 0; \quad A_3 = 0; \quad B_3 = 0$$

und es bleibt:

$$(75) \quad \psi_x = A_4 \cos px \sin qy$$

$$(76) \quad \psi_y = -A_4 \frac{p}{q} \sin px \cos qy$$

Nun noch die Grenzbedingungen der Gl. (28) bis (30) für $y = b$ und $x = a$:

$$(77) \quad 0 = A_4 \cos px \sin qb \quad \text{für alle } x$$

$$(78) \quad 0 = -A_4 \frac{p}{q} \sin pa \cos qy \quad \text{für alle } y$$

Die erste Gleichung (77) fordert:

$$(79) \quad qb = n\pi \quad \text{mit } n = 0, 1, 2, \dots$$

Die zweite Gleichung (78) fordert:

$$(80) \quad pa = m\pi \quad \text{mit } m = 0, 1, 2, \dots$$

Die Lösungen lauten also schließlich, wenn A für A_4 geschrieben wird:

$$(81) \quad \psi_x = A \cos m\pi \frac{x}{a} \sin n\pi \frac{y}{b}$$

$$(82) \quad \psi_y = -A \frac{mb}{na} \sin m\pi \frac{x}{a} \cos n\pi \frac{y}{b}$$

Und es ist nach Gleichung (68), (79) und (80):

$$(83) \quad \gamma^2 = -\omega^2 \epsilon_0 \epsilon' \mu_0 [\mu' - j\mu''] - j\omega \mu_0 [\mu' - j\mu''] + \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2$$

Für die Komponenten der magnetischen Feldstärke ergibt sich auf gleichem Wege, nämlich durch Einsetzen der drei E-Komponenten aus den Gleichungen (39) bis (41) in die Gleichungen (42) bis (44):

$$(84) \quad \mathcal{H}_x = \frac{j}{j\omega\mu_0 [\mu' - j\mu'']} A \frac{mb}{na} \sin m\pi \frac{x}{a} \cos n\pi \frac{y}{b}$$

$$(85) \quad \mathcal{H}_y = \frac{j}{j\omega\mu_0 [\mu' - j\mu'']} A \cos m\pi \frac{x}{a} \sin n\pi \frac{y}{b}$$

$$(86) \quad \mathcal{H}_z = \frac{1}{j\omega\mu_0 [\mu' - j\mu'']} A \frac{b}{n\pi} \left\{ \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 \sin m\pi \frac{x}{a} \cos n\pi \frac{y}{b} + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2 \cos m\pi \frac{x}{a} \sin n\pi \frac{y}{b} \right\}$$

Die Gleichungen (81) bis (86) beschreiben also die verschiedenen $TE_{m,n}$ -Wellen. In unserem Falle liegt die $HE_{0,1}$ -Welle vor. Hier ist dann:

$$(87) \quad \psi_x = A \sin \pi \frac{y}{b} e^{\delta x}; \quad \psi_y = 0; \quad \psi_z = 0$$

$$\begin{aligned} \beta_1 &= 0 \\ (87) \quad \beta_2 &= \frac{\delta}{j \omega \mu_0 [\mu' - j \mu'']} A \sin \pi \frac{y}{b} e^{-\delta z} \\ \beta_3 &= \frac{1}{j \omega \mu_0 [\mu' - j \mu'']} A \frac{\pi}{b} \cos \pi \frac{y}{b} e^{-\delta z} \end{aligned}$$

c) Berechnung der Fortpflanzungskonstante $\delta = \alpha + j \beta$

Aus Gleichung (83) erhält man für die $TE_{0,1}$ -Welle:

$$(88) \quad \delta^2 = \left(\frac{\pi}{b}\right)^2 - \omega^2 \epsilon_0 \epsilon' \mu_0 [\mu' - j \mu''] + j \omega \mu_0 [\mu' - j \mu''] = [\alpha + j \beta]^2$$

Jetzt muß die Leitfähigkeit \mathcal{K} noch durch die dielektrischen Materialkonstanten ausgedrückt werden. Es gilt ganz allgemein:

$$(89) \quad R = \frac{\rho l}{F}$$

oder

$$(90) \quad R = \frac{l}{\mathcal{K} F}$$

$$(91) \quad C = \frac{Q}{U} = \frac{Q \cdot F}{E l} = \frac{\epsilon_0 \epsilon' F}{l}$$

Der Verlustwinkel

$$(92) \quad \tan \delta = \frac{R \omega}{R_0} = \frac{1}{\omega C R}$$

oder auch

$$(93) \quad \tan \delta = \frac{\mathcal{K}''}{\mathcal{K}'}$$

Aus Gleichung (89) bis (93) ergibt sich:

$$(94) \quad \tan \delta = \frac{l \mathcal{K}'' F}{\omega \epsilon_0 \epsilon' F l} = \frac{\mathcal{K}''}{\omega \epsilon_0 \epsilon'}$$

$$(95) \quad \mathcal{K} = \epsilon_0 \epsilon' \omega$$

Gleichung (95) in Gleichung (88) eingeführt:

$$(96) \quad \delta^2 = \sqrt{\left(\frac{\pi}{b}\right)^2 - \omega^2 \epsilon_0 \mu_0 [\epsilon' \mu' - \epsilon'' \mu'']} + j \omega^2 \epsilon_0 \mu_0 [\epsilon'' \mu'' + \epsilon' \mu']$$

Mit:

$$(97) \quad \epsilon_0 \mu_0 = \frac{1}{c^2}$$

wird:

$$(98) \quad \delta^2 = \sqrt{\left(\frac{\pi}{b}\right)^2 - \frac{\omega^2}{c^2} [\epsilon' \mu' - \epsilon'' \mu'']} + j \frac{\omega^2}{c^2} [\epsilon'' \mu'' + \epsilon' \mu']$$

Außerdem gilt:

$$(99) \quad c^2 = \lambda_0^2 f^2$$

$$(100) \quad \omega^2 = [2 \pi f]^2$$

$$(101) \quad \frac{\omega^2}{c^2} = \left(\frac{2 \pi}{\lambda_0}\right)^2$$

Gleichung (99) bis (101) in Gleichung (98) eingeführt und den ersten

Summanden mit $\frac{4 \lambda_0^2}{4 \lambda_0^2}$ erweitert:

$$(102) \quad \delta^2 = j \frac{2 \pi}{\lambda_0} \sqrt{[\epsilon' \mu' - \epsilon'' \mu''] - j [\epsilon'' \mu'' + \epsilon' \mu']} - \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^2$$

Für einen nur mit Dielektrikum gefüllten Hohlleiter wird $\mu' = 1$ und $\mu'' = 0$:

$$(103) \quad \delta^2 = j \frac{2 \pi}{\lambda_0} \sqrt{\epsilon' - j \epsilon'' - \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^2} = \alpha + j \beta$$

Im verlustlosen Medium ist $\epsilon'' = 0$, und man erhält für das Phasenmaß:

$$(104) \quad \beta = \frac{2 \pi}{\lambda_0} \sqrt{\epsilon' - \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^2}$$

Das β des leeren Hohlleiters wird zu:

$$(105) \quad \beta_0 = \frac{2 \pi}{\lambda_0} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^2}$$

oder besser nach der später folgenden Gleichung (114): $\beta_0 = \frac{2 \pi}{\lambda_g}$

d) Berechnung der Wellenwiderstände

Es gilt für den Poyntingschen Vektor:

$$(106) \quad \vec{\gamma} = [\vec{\psi}_x \times \vec{\psi}_y]$$

und damit:

$$(107) \quad Z_1 = \frac{\psi_x}{\psi_y}$$

Aus Gleichung (87) folgt:

$$(108) \quad Z_1 = \frac{j \omega \mu_0 [\mu' - j \mu'']}{\delta} = \frac{\omega \mu_0 [\mu' - j \mu'']}{\frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{[\epsilon' \mu' - \epsilon'' \mu''] - j [\epsilon' \mu'' + \epsilon'' \mu'] \cdot \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^2}}$$

Mit Gleichung (99) und (100) wird dann allgemein für den Wellenwiderstand

$$(109) \quad Z_1 = \frac{\sqrt{\mu_0/\epsilon_0} [\mu' - j \mu'']}{\sqrt{[\epsilon' \mu' - \epsilon'' \mu''] - j [\epsilon' \mu'' + \epsilon'' \mu'] \cdot \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^2}}$$

Darin stellt $\sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$ den Wellenwiderstand des freien Raumes dar. Er beträgt 377Ω .Im leeren Hohlleiter ist $\epsilon' = \mu' = 1$ und $\epsilon'' = \mu'' = 0$ also:

$$(110) \quad Z_0 = \frac{\sqrt{\mu_0/\epsilon_0}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^2}}$$

Wenn die Füllung aus einem verlustlosen Dielektrikum besteht, wird:

$$(111) \quad Z_1 = \frac{\sqrt{\mu_0/\epsilon_0}}{\sqrt{\epsilon' - \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^2}}$$

Bei verlustbehaftetem Dielektrikum gilt:

$$(112) \quad Z_1 = \frac{\sqrt{\mu_0/\epsilon_0}}{\sqrt{\epsilon' - j \epsilon'' - \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^2}}$$

Bei nur permeabler Füllung würde der Wellenwiderstand zu:

$$(113) \quad Z_1 = \frac{\sqrt{\mu_0/\epsilon_0} [\mu' - j \mu'']}{\sqrt{\mu' - j \mu'' - \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^2}}$$

Bei all diesen Ausdrücken ist fälschlicherweise vom Wellenwiderstand gesprochen worden. Ihrer wirklichen Definition nach handelt es sich aber um Feldwellenwiderstände. Um die im üblichen Sinne bekannten Wellenwiderstände zu bekommen, müssten alle Ausdrücke mit dem Faktor $\frac{\pi^2 a}{8b}$ multipliziert werden.

e) Berechnung der Luftwellenlänge aus der Leitungswellenlänge

Im freien Raum beträgt der Wellenwiderstand $\sqrt{\mu_0/\epsilon_0}$, und es herrscht die Luftwellenlänge λ_0 . Nach Gleichung (110) war der Wellenwiderstand des Hohlleiters:

$$Z_0 = \frac{\sqrt{\mu_0/\epsilon_0}}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^2}}$$

Es gilt ferner die Beziehung:

$$\frac{\lambda_0}{Z_0} = \frac{\lambda_g}{\sqrt{\mu_0/\epsilon_0}}$$

oder auch:

$$(114) \quad \lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^2}}$$

 λ_g ist der Messung auf der Meßleitung zugänglich. Gleichung (114) muß also nach λ_0 aufgelöst werden, und es ergibt sich die Luftwellenlänge zu:

$$(115) \quad \lambda_0 = \frac{\sqrt{\lambda_g^2 \cdot (2b)^2}}{\lambda_g^2 + (2b)^2}$$

5. Erstes Meßverfahren für feste Dielektrika mit graphischer Auswertung

a) Berechnung einer Leitung mit verschiedenen Wellenwiderständen

Gegeben sei folgende Leitungskombination:

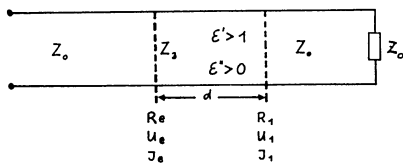


Abbildung 8

Nach den Prinzipien der Leitungstheorie berechnet sich der Eingangswiderstand R_e einer Leitung durch schrittweises Bestimmen der Widerstände in den einzelnen Ebenen, und zwar am Ende beginnend. Die allgemeinen Leitungsgleichungen lauten für diesen einfachen Fall:

$$U_e = U_1 \operatorname{Cof} \gamma d + J_1 z_1 \operatorname{Sin} \gamma d \quad (116)$$

$$J_e = J_1 \operatorname{Cof} \gamma d + \frac{U_1}{z_1} \operatorname{Sin} \gamma d$$

mit $R_e = \frac{U_e}{I_e}$ und $R_1 = \frac{U_1}{I_1} = z_0$ wird:

$$R_e = \frac{z_0 J_1 \operatorname{Cof} \gamma d + z_1 J_1 \operatorname{Sin} \gamma d}{J_1 \operatorname{Cof} \gamma d + \frac{U_1}{z_1} \operatorname{Sin} \gamma d} \quad (117)$$

Division mit $\operatorname{Cof} \gamma d$ liefert:

$$R_e = \frac{z_0 + z_1 \frac{J_1}{I_1} \operatorname{tg} \gamma d}{1 + \frac{z_0}{z_1} \frac{J_1}{I_1} \operatorname{tg} \gamma d} \quad (118)$$

Bringt man als Abschluß der Leitung mit z_1 einen Kurzschluß an, so wird:

$$\frac{U_1}{J_1} = R_1 = z_1 = 0$$

Damit wird aus Gleichung (118):

$$R_{eK} = z_1 \operatorname{tg} \gamma d \quad (119)$$

und

$$\frac{R_{eK}}{z_0} = \frac{z_1}{z_0} \operatorname{tg} \gamma d \quad (120)$$

b) Auswertung der Funktion

Eine Zusammenfassung der Gleichungen (103), (110) und (112) in die Gleichung (120) liefert eine implizite Funktion für ϵ' und ϵ'' .

$$\frac{R_{eK}}{z_0} = \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2b}\right)^2}}{\sqrt{\epsilon' - j\epsilon'' \left(\frac{\lambda}{2b}\right)^2}} \operatorname{tg} \left\{ j \frac{2\pi d}{\lambda_0} \sqrt{\epsilon' - j\epsilon'' \left(\frac{\lambda}{2b}\right)^2} \right\} \quad (121)$$

Mit dem Theorem:

$$\operatorname{tg} jz = j \operatorname{tg} z \quad (122)$$

wird

$$\frac{R_{eK}}{z_0} = \frac{j \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2b}\right)^2}}{\sqrt{\epsilon' - j\epsilon'' \left(\frac{\lambda}{2b}\right)^2}} \operatorname{tg} \left\{ \frac{2\pi d}{\lambda_0} \sqrt{\epsilon' - j\epsilon'' \left(\frac{\lambda}{2b}\right)^2} \right\} \quad (123)$$

Zur Aufteilung der Wurzelausdrücke in Real- und Imaginärteil gilt folgende Beziehung:

$$\sqrt{u \pm jv} = \sqrt{\frac{1}{2}(\sqrt{u^2 + v^2} + u)} \pm j \sqrt{\frac{1}{2}(\sqrt{u^2 + v^2} - u)} = U \pm jV \quad (124)$$

Es ergibt sich:

$$(125) \quad \sqrt{\varepsilon' - j \varepsilon'' \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^2} = \sqrt{\frac{1}{2} \left(\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2 - 2 \varepsilon' \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^2 + \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^4 + \varepsilon' - \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^2 \right)}$$

$$- j \sqrt{\frac{1}{2} \left(\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2 - 2 \varepsilon' \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^2 + \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^4 - \varepsilon' + \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^2 \right)} = U - jV$$

Es soll sein:

$$(126) \quad \frac{2 \pi d}{\lambda_0} [U - jV] = U' - jV'$$

Mit Gleichung (125) und (126) wird Gleichung (123) zu:

$$(127) \quad \frac{\text{Re } z}{z_0} = \frac{j \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^2}}{U - jV} \text{tg} [U' - jV']$$

Es gilt folgendes Additionstheorem:

$$(128) \quad \text{tg} [U' - jV'] = \frac{\sin 2U' - j \sin 2V'}{\cos 2U' + \text{Cof} 2V'}$$

Gleichung (128) in Gleichung (127) liefert:

$$(129) \quad \frac{\text{Re } z}{z_0} = \frac{j \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^2} [\sin 2U' - j \sin 2V']}{[U - jV] [\cos 2U' + \text{Cof} 2V']}$$

$$= \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^2} [-V \sin 2U' + U \sin 2V'] + j \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^2} [V \sin 2V' + U \sin 2U']}{[U^2 + V^2] [\cos 2U' + \text{Cof} 2V']}$$

Auf eine Gleichung etwas anderer Form kommt man, wenn man das nachfolgende Theorem anwendet:

$$(130) \quad \text{tg} [U' - jV'] = \frac{\text{tg } U' [1 - \text{tg}^2 V'] - j \text{tg } V' [1 + \text{tg}^2 U']}{1 + \text{tg}^2 U' \text{tg}^2 V'}$$

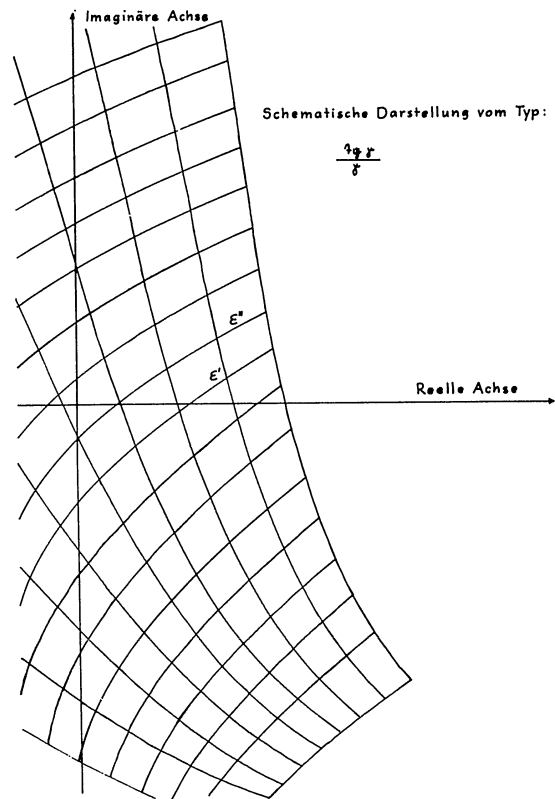


Abbildung 9

Diesen Ausdruck in Gleichung (127) eingeführt:

$$(131) \quad \frac{Re_K}{Z_0} = \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{2}{V}\right)^2} \{-V \operatorname{tg} U' [1 - \operatorname{tg}^2 V'] + U \operatorname{tg} V' [1 + \operatorname{tg}^2 U']\}}{[U^2 + V^2][1 + \operatorname{tg}^2 U' \operatorname{tg}^2 V']} + j \frac{\sqrt{1 - \left(\frac{2}{V}\right)^2} \{U \operatorname{tg} U' [1 - \operatorname{tg}^2 V'] + V \operatorname{tg} V' [1 + \operatorname{tg}^2 U']\}}{\text{Nenner}}$$

Für $V' > 5,3$ wird $\operatorname{tg} V' = \operatorname{tg}^2 V' = 1,0000$ auf vier Stellen und damit:

$$(132) \quad \frac{Re_K}{Z_0} = \frac{U \sqrt{1 - \left(\frac{2}{V}\right)^2} + j \sqrt{1 - \left(\frac{2}{V}\right)^2}}{U^2 + V^2}$$

c) Bestimmung von ϵ' und ϵ'' durch graphische Auswertung

Wenn man die Gleichung (129) in der komplexen Ebene graphisch darstellt, erhält man unter Festlegung von den drei Parametern λ_0 , b und d zwei verschiedene Kurvenscharen für konstantes ϵ' bei Variation von ϵ'' und für konstantes ϵ'' bei Variation von ϵ' . Für $V' > 5,3$ leistet die Gleichung (132) gute Dienste, da sie sich wesentlich leichter numerisch auswerten läßt. Zur schematischen Darstellung siehe Abbildung 9 (S. 33).

d) Kritik

Mit Abbildung 6 und 9 ist also eine erste Möglichkeit zur Auswertung der Messung von ϵ' und ϵ'' gegeben. Mit den Meßwerten des Stehwellenverhältnisses m und der Verschiebung ξ geht man in die Abbildung 6 hinein und findet einen Punkt in der komplexen Ebene im Schnittpunkt der Kurven der gemessenen m - und ξ -Werte. Über diesem gleichen Punkt findet sich dann in der Abbildung 9 der Schnittpunkt der Kurven des entsprechenden ϵ' und ϵ'' . Die Auswertefehler liegen also im Rahmen der Zeichengenauigkeit der beiden Kurvenblätter.

Dieses Verfahren hat den Vorteil einer schnellen Auswertung, den Nachteil, daß zu jeder Probenlänge und zu jeder Frequenz neue Kurvenscharen gezeichnet werden müssen. Ähnliche Gedankengänge finden sich auch bei v.HIPPEL.

6. Erweiterung auf flüssige Stoffe

Erhebliche mathematische Schwierigkeiten bereitet die Erfassung der elektrischen Werte der Meßkammerwandungen. Das Problem liegt in der Integration aller Reflexionen der auftretenden Welle auf das geschichtete Medium. Geschichtetes Medium insoweit, als der Meßkammerwandung auch eine Dielektrizitätskonstante zukommt.

a) Ein Versuch auf quasi-optischer Basis

Eine Möglichkeit bietet der optische Weg. Die Gleichung

$$(133) \quad n = \sqrt{\epsilon}$$

liefert die Beziehung zwischen optischem Brechungsindex n und der DK.

Gegeben sei folgende Anordnung:

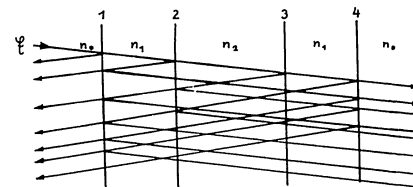


Abbildung 10

Man kann für die Trennflächen 1 bis 4 die Reflexions- und Transmissionskoeffizienten aufstellen, z.B.:

$$(134) \quad r_{1,2} = \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}$$

$$(135) \quad t_{1,2} = \frac{2 n_1}{n_1 + n_2}$$

Wenn man nun die Zahl der auftretenden Reflexionen gegen Unendlich gehen läßt, erhält man recht komplizierte Ausdrücke für die

transmitierte und reflektierte Welle nach Amplitude und Phase. Da ist der nachfolgend beschriebene Weg mit wesentlich weniger Aufwand verbunden.

b) Kompensation der Meßkammerwandung

Auf Grund der besonderen Verhältnisse in dem durch ein Reflexionsklystron angeregten rechteckigen Hohlleiter, nämlich der nur in kleinen Grenzen veränderlichen Wellenlänge, bietet sich eine Methode zur Ausschaltung der Einflüsse der Meßkammerwandungen an. Man kann durch einen Querschnittsprung den Wellenwiderstand des Hohlleiters ändern und diese Änderung durch Ausfüllen mit einem Dielektrikum wieder kompensieren. Einer Querschnittsänderung wirkt also die DK des Wandmaterials entgegen (WEISSFLOCH). Als Wandmaterial diene Trolitul.

$$[\epsilon' = 2,539; \epsilon'' < 0,0001 \rightarrow \epsilon'' \approx 0]$$

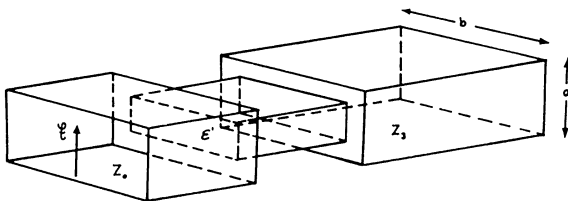


Abbildung 11

c) Berechnung des Wandquerschnittes

Um keine Reflexionen auftreten zu lassen, sollen die Wellenwiderstände des leeren Hohlleiters und der Meßkammerwandungen gleich sein. Es wird gefordert:

$$(136) \quad Z_x / Z_z = 1$$

Aus Gleichung (110) und (111) folgt:

$$(137) \quad \frac{\sqrt{1 - (\frac{\lambda_z}{2b})^2}}{\sqrt{\epsilon'_w - (\frac{\lambda_z}{2b})^2}} = 1$$

$$(138) \quad 1 - (\frac{\lambda_z}{2b})^2 = \epsilon'_w - (\frac{\lambda_z}{2b})^2$$

Damit ergibt sich b_x im Querschnittsprung zu:

$$(139) \quad b_x = \frac{\lambda_z}{2\sqrt{\epsilon'_w - 1 + (\frac{\lambda_z}{2b})^2}}$$

Das Verhältnis von b_x zu a_x wird beschrieben durch die Gleichung:

$$(140) \quad \frac{b_x}{a_x} \sqrt{1 - (\frac{\lambda_z}{2b})^2} = \frac{b_x}{a_x} \sqrt{\epsilon'_w - (\frac{\lambda_z}{2b})^2}$$

Daraus folgt:

$$(141) \quad a_x = \frac{a \cdot b_x \sqrt{\epsilon'_w - (\frac{\lambda_z}{2b})^2}}{b \sqrt{1 - (\frac{\lambda_z}{2b})^2}}$$

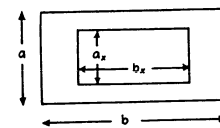


Abbildung 12

d) Kritik

Durch Verwendung dieser für eine Frequenz kompensierten Meßkammerwände ist die Möglichkeit gegeben, auch flüssige Dielektrika der Messung

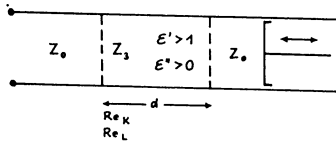
zugänglich zu machen. Es sei aber auf die durch hohe Güte bedingte Schmalbandigkeit besonders hingewiesen.

7. Zweites Meßverfahren für Dielektrika mit Reaktanzleitung

Dieses zweite, wie auch das dritte und vierte angeführte Verfahren basieren auf dem Gedanken, durch eine zweite eingeführte Messung den nur schwer auswertbaren komplexen Ausdruck $\gamma_{ij} d$ zu eliminieren. Das zu untersuchende Medium wird unter zwei verschiedenen Bedingungen in den Hohlleiter eingeführt und gemessen, wodurch man zwei Gleichungen für diesen Ausdruck erhält. Durch Gleichsetzen fällt er dann heraus.

a) Feste Stoffe

Gegeben sei nachstehende Leitungsanordnung:



A b b i l d u n g 13

Die Leitungsgleichungen für den Leerlauffall, am Ende der Leitung mit z_3 befindet sich ein Spannungsmaximum, lauten:

$$(142) \quad Re_L = z_3 C \gamma_{ij} d = \frac{z_3}{\gamma_{ij} d}$$

Für den Kurzschlußfall ergab sich nach Gleichung (119):

$$(119) \quad Re_K = z_3 \gamma_{ij} d$$

oder

$$(143) \quad \gamma_{ij} d = \frac{Re_K}{z_3}$$

Gleichung (143) in Gleichung (142) liefert:

$$(144) \quad z_3^2 = Re_L Re_K$$

Aus Gleichung (25) folgt jetzt, ähnlich wie Gleichung (26):

$$(145) \quad Re_K = z_0 [x_k + jy_k]$$

$$(146) \quad Re_L = z_0 [x_l + jy_l]$$

Diese beiden Gleichungen in die Gleichung (145) eingeführt, liefert dann:

$$(147) \quad z_3^2 = z_0^2 [x_k x_l - y_k y_l] + j z_0^2 [x_k y_l + x_l y_k]$$

$$(148) \quad \frac{1}{z_3^2} = \frac{[x_k x_l - y_k y_l] - j [x_l y_k + x_k y_l]}{z_0^2 [x_k x_l - y_k y_l]^2 + [x_l y_k + x_k y_l]^2}$$

Nach Gleichung (112) gilt:

$$(149) \quad \frac{1}{z_3^2} = \frac{\epsilon' - j\epsilon'' - \left(\frac{d}{2b}\right)^2}{\mu_0 / \epsilon_0}$$

und nach Gleichung (110):

$$(150) \quad z_0^2 = \frac{\mu_0 / \epsilon_0}{1 - \left(\frac{d}{2b}\right)^2}$$

Gleichung (149) und (150) in die Gleichung (148) eingeführt:

$$\epsilon' - j\epsilon'' - \left(\frac{d}{2b}\right)^2 = \frac{[1 - \left(\frac{d}{2b}\right)^2] [x_k x_l - y_k y_l] - j [1 - \left(\frac{d}{2b}\right)^2] [x_l y_k + x_k y_l]}{[x_k x_l - y_k y_l]^2 + [x_l y_k + x_k y_l]^2}$$

Schließlich erhält man (s. S. 40):

$$(151) \quad \epsilon' = \frac{[1 - (\frac{\lambda}{2d})^2][x_k x_l - y_k y_l]}{[x_k^2 + y_k^2][x_l^2 + y_l^2]} + (\frac{\lambda}{2d})^2$$

$$(152) \quad \epsilon'' = \frac{[1 - (\frac{\lambda}{2d})^2][x_k y_k + x_l y_l]}{\text{Nenner}}$$

b) Flüssigkeiten

Falls bei diesem Meßverfahren flüssige Stoffe untersucht werden sollen, lassen sich die umseitig beschriebenen kompensierten Meßkammerwandungen verwenden. Es muß nur dafür Sorge getragen werden, daß am Ende der zu messenden Flüssigkeit mit der Reaktanzleitung Leerlauf- und Kurzschlußfall dargestellt werden.

c) Kritik

Dieses für die Koaxialleitung durchaus gebräuchliche Verfahren, welches dort auch ordentliche Ergebnisse liefert, hat aber für den rechteckigen Hohlleiter nur akademischen Wert. Erstens bereitet die mechanische Herstellung einer exakten Reaktanzleitung, also eines verschiebbaren Kurzschlusses, erhebliche Schwierigkeiten. Ein Kurzschlusseschieber für Zentimeterwellen hat keine klar definierte Kurzschlußebene, da die Kontaktschwierigkeiten zu groß sind. Aus diesem Grunde ist es fast nicht möglich, den für die beiden Messungen nötigen Kurzschluß- und Leerlauf fall darzustellen. Es ließe sich zwar der Kurzschlußfall durch eine feste Kurzschlußplatte und der Leerlauf fall durch Ansetzen eines $\lambda/4$ -Stückes unter Festlegung der Wellenlänge erreichen, wobei aber wieder größte Schmalbandigkeit in Kauf genommen werden müßte.

8. Drittes Meßverfahren für Dielektrika. Kurzschluß und Abschluß mit z_0

a) Feste Stoffe

Gegeben sei folgende Leitung: (Siehe Abb. 14)

Die erste Messung findet bei R_1 =Kurzschluß statt und liefert die Gleichung:

$$(143) \quad \gamma_3 \delta d = \frac{R_{EK}}{z_3}$$

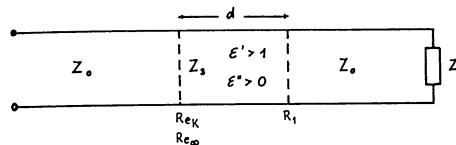


Abbildung 14

Bei der zweiten Messung wird der Kurzschluß durch den Wellenwiderstand der unendlich langen Leitung ersetzt. Diese Verhältnisse werden beschrieben durch die Gleichung:

$$(118) \quad Re_{\infty} = \frac{z_0 + z_3 \gamma_3 \delta d}{1 + \frac{z_0}{z_3} \gamma_3 \delta d}$$

Gleichung (143) und Gleichung (118) ergeben zusammen:

$$(153) \quad Re_{\infty} = \frac{z_0 + R_{EK}}{1 + \frac{z_0 R_{EK}}{z_3^2}}$$

Auflösen nach $\frac{1}{z_3^2}$ liefert:

$$(154) \quad \frac{1}{z_3^2} = \frac{z_0 + R_{EK} - Re_{\infty}}{z_0 R_{EK} Re_{\infty}}$$

Aus Gleichung (25) und Gleichung (145) folgt, ähnlich wie Gleichung (26):

$$(155) \quad Re_{\infty} = z_0 [x_{\infty} + jy_{\infty}]$$

Gleichung (155) gilt bei Abschluß der Leitung mit dem Wellenwiderstand. Einführen der Widerstände in die Gleichung (154) liefert (s. Gl. 156):

$$(156) \quad \frac{1}{Z_3} = \frac{[x_k x_{\infty} - y_k y_{\infty}] + x_{\infty} [x_k^2 + y_k^2] - x_k [x_{\infty}^2 + y_{\infty}^2]}{z_3^2 [x_{\infty}^2 + y_{\infty}^2] [x_k^2 + y_k^2]}$$

$$- j \frac{[x_k y_{\infty} + x_{\infty} y_k] + y_{\infty} [x_k^2 + y_k^2] - y_k [x_{\infty}^2 + y_{\infty}^2]}{\text{Nenner}}$$

Mit Gleichung (110) und (112) wird:

$$(157) \quad \epsilon' = \frac{[1 - (\frac{\lambda}{2b})^2] \{x_k x_{\infty} - y_k y_{\infty} + x_{\infty} [x_k^2 + y_k^2] - x_k [x_{\infty}^2 + y_{\infty}^2]\}}{[x_{\infty}^2 + y_{\infty}^2] [x_k^2 + y_k^2]} + (\frac{\lambda}{2b})^2$$

$$(158) \quad \epsilon'' = \frac{[1 - (\frac{\lambda}{2b})^2] \{x_k y_{\infty} + x_{\infty} y_k + y_{\infty} [x_k^2 + y_k^2] - y_k [x_{\infty}^2 + y_{\infty}^2]\}}{\text{Nenner}}$$

$$(159) \quad \text{tg } \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}$$

b) Flüssigkeiten

Auch bei diesem Verfahren lassen sich die beschriebenen kompensierten Meßkammerwände einbauen.

c) Kritik

Bei dieser Methode liegen die Verhältnisse schon wesentlich besser, wenn es gelingt, die unendliche lange Leitung experimentell sauber darzustellen. Der Fehler des Abschlußwiderstandes, der direkt in die Meßgenauigkeit eingeht, läßt sich mit einiger Erfahrung im 3-cm-Hohlleiter bis auf etwa 2 % herabdrücken, derweil er in kleineren Hohlleitern ungünstiger liegt.

Bei der Herstellung solcher Abschlußwiderstände kommt es darauf an, die gesamte anfallende HF-Energie reflexionsfrei zu absorbieren. Das wird am besten erreicht durch Einbringen eines möglichst dünnen (gleich oder kleiner 0,3 mm) dielektrischen Trägers in die Hohlleitermitte parallel zu \vec{E} , welcher mit einer halbleitenden hochohmigen Schicht versehen ist (gleich

oder größer $1000 \Omega / \text{cm}^2$). Die Schichtdicke muß kleiner als die Eindringtiefe des Feldes sein, um ein Aufteilen des Hohlleiters in zwei neue Leiter mit zu kleiner Grenzwellenlänge zu verhindern. Um Reflexionen am Eingang des Flächenwiderstandes zu verhüten, darf er erst langsam von einer Spitze ausgehend über mindestens eine halbe Wellenlänge die volle Höhe des Hohlleiters erreichen.

9. Viertes und endgültiges Meßverfahren für feste Dielektrika

a) Allgemeine Verfahrenstechnik

Das folgende Verfahren scheint dem Verfasser für die Anwendung im Hohlleiter am besten geeignet, da es den Genauigkeitsanforderungen am leichtesten voll Rechnung trägt. Es werden beim Messen nur Leitungsstücke mit konstanter, aber beliebiger Länge benötigt. Außerdem ist es im Rahmen der durch den Hohlleiter gegebenen Wellenlängen frequenzunabhängig und mechanisch sehr einfach. In der Auswertung ist es mathematisch exakt, also ohne jede Näherungsrechnung.

b) Leitungsanordnung bei der ersten Messung

Gesucht ist der Eingangswiderstand folgender Leitungskombination:

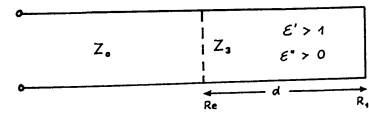


Abbildung 15

Es gilt:

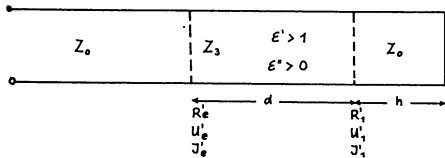
$$(160) \quad \text{Re} = z_3 \text{tg } \gamma d$$

oder

$$(161) \quad \text{tg } \gamma d = \frac{\text{Re}}{z_3}$$

c) Leitungsanordnung bei der zweiten Messung

Bei der zweiten Messung wird hinter das gefüllte Stück Leitung ein leeres Stück Hohlleiter angeflanscht, dessen Länge beliebig, aber klar definiert sei. Daraus resultiert ein neuer Eingangswiderstand R_e' , der nun berechnet werden soll. Die Leitung hat jetzt folgenden Aufbau:



A b b i l d u n g 16

Es gilt:

$$(162) \quad R_1' = j z_0 \operatorname{tg} \beta, \quad h = j z_0 C_0$$

mit:

$$(163) \quad C_0 = \operatorname{tg} \beta \cdot h$$

Die Leitungsgleichungen für die Eingangsebene lauten:

$$(164) \quad U_0' = U_1' \operatorname{Cof} \gamma d + J_1' z_3 \operatorname{Sin} \gamma d$$

$$J_0' = J_1' \operatorname{Cof} \gamma d + \frac{U_1'}{z_3} \operatorname{Sin} \gamma d$$

Mit $U_1' = I_1' R_1'$ und Division durch $\operatorname{Cof} \gamma d$ erhält man:

$$(165) \quad R_e' = \frac{R_1' + z_3 \operatorname{tg} \gamma d}{1 + \frac{R_1'}{z_3} \operatorname{tg} \gamma d} = \frac{j z_0 z_3 C_0 + z_3^2 \operatorname{tg} \gamma d}{z_3 + j z_0 C_0 \operatorname{tg} \gamma d}$$

Auflösen nach $\operatorname{tg} \gamma d$ liefert:

$$(166) \quad \operatorname{tg} \gamma d = \frac{j z_0 z_3 C_0 - z_3 R_e'}{j z_0 C_0 R_e' - z_3^2}$$

d) Bestimmung von ϵ' und ϵ''

Mit Gleichung (161) und (166) sind zwei Ausdrücke gefunden worden, mit deren Hilfe $\operatorname{tg} \gamma d$ herausfällt. Die Division der beiden Gleichungen liefert:

$$(167) \quad 1 = \frac{j z_0 z_3^2 C_0 - z_3^2 R_e'}{j z_0 C_0 R_e' R_e' - z_3^2 R_e'} = \frac{j z_0 C_0 - R_e'}{\frac{1}{z_3^2} [j z_0 C_0 R_e' R_e' - R_e']}$$

Auflösen nach $\frac{1}{z_3^2}$ gibt:

$$(168) \quad \frac{1}{z_3^2} = \frac{j z_0 C_0 - R_e' + R_e}{j z_0 C_0 R_e' R_e'}$$

Einführen von Gleichung (26) in der Form:

$$(169) \quad R_e = z_0 [x + jy]$$

und

$$(170) \quad R_e' = z_0 [x' + jy']$$

ergibt:

$$(171) \quad \frac{1}{z_3^2} = \frac{x - x' + j [y - y' + C_0]}{z_0^2 C_0 [-xy' - x'y] + j z_0^2 C_0 [xx' - yy']}$$

Multiplikation mit dem komplex-konjugierten Nenner liefert:

$$(172) \quad \frac{1}{z_3^2} = \frac{[x^2 + y^2]y - [x'^2 + y'^2]y' + C_0 [xx' - yy']}{z_0^2 C_0 [x^2 + y^2][x'^2 + y'^2]} - j \frac{[x^2 + y^2]x' - [x'^2 + y'^2]x + [xy' + x'y]C_0}{\text{Nenner}}$$

Mit Gleichung (112) erhält man schließlich:

$$(173) \quad \epsilon' = \frac{[1 - (\frac{\lambda_0}{2b})^2] \{ [x'^2 + y'^2] y - [x^2 + y^2] y' + C_0 [xx' - yy'] \}}{C_0 [x^2 + y^2] [x'^2 + y'^2]} + \frac{(\frac{\lambda_0}{2b})^2}{(2b)}$$

$$(174) \quad \epsilon' = \frac{[1 - (\frac{\lambda_0}{2b})^2] \{ [x^2 + y^2] x' - [x'^2 + y'^2] x + C_0 [xy' - x'y] \}}{\text{Nenner}}$$

e) Verlustarme Dielektrika

Für Stoffe mit vernachlässigbar kleinen Verlusten

$$(175) \quad (\text{tg } \delta < 10^{-4})$$

wird das Stehwellenverhältnis unendlich, und Gleichung (25) bzw. (26) geht in Gleichung (27) über. Damit gilt:

$$(176) \quad x = x' = \epsilon' = 0$$

Gleichung (176) in Gleichung (173) eingeführt ergibt dann:

$$(177) \quad \epsilon' = \frac{[1 - (\frac{\lambda_0}{2b})^2] [y' - y - C_0]}{yy' C_0} + \frac{(\frac{\lambda_0}{2b})^2}{(2b)}$$

f) Kritik

Nach sehr leicht durchzuführenden Messungen lassen sich mit Hilfe der einfachen Endgleichungen die beiden Anteile der DK von festen Stoffen exakt bestimmen. Das Verfahren ist ohne mathematische Vernachlässigungen ausgeführt, ist im Bereich des Hohlleiters frequenzunabhängig und gestattet ohne Kunstgriffe die Messung von ϵ' über alle möglichen Werte. Lediglich die Bestimmung des Verlustwinkels ist auf Werte größer 10^{-4} durch die Eigenverluste der Leitung beschränkt. Dieser Mangel haftet nicht der Methode, sondern allgemein dem Leitungsprinzip an.

10. Praktisch ausgeführte Messungen zum vierten Meßverfahren

a) Messung der DK von Pertinax bei 3,26 cm Wellenlänge

Festlegen der beiden letzten Minima vor dem Kurzschluß auf der Meßleitung ergibt die Werte:

$$l_{01} = 0,5600 \text{ cm}; \quad l_{02} = 2,8850 \text{ cm.}$$

Daraus folgt:

$$\lambda_g/2 = 2,3250 \text{ cm}; \quad \lambda_g = 4,6500 \text{ cm.}$$

Die Leitungskombination der ersten Messung zeigt Abbildung 17, die der zweiten Abbildung 18.



Abbildung 17

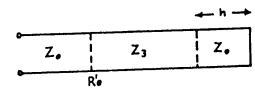


Abbildung 18

Meßwerte nach Abbildung 17

$$l_1 = 2,6500 \text{ cm}$$

$$m = 28,5 \text{ db} = 26,6060$$

Meßwerte nach Abbildung 18

$$l_1' = 0,8100 \text{ cm}$$

$$m' = 24,2 \text{ db} = 16,2183$$

Die Luftwellenlänge berechnet sich nach Gleichung (115) aus der Rohrwellenlänge

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{\lambda_g^2 - (2b)^2}{\lambda_g^2 + (2b)^2}} = \sqrt{\frac{21,6225 \cdot 20,7936}{21,6225 + 20,7936}} = 3,2558 \text{ cm}$$

Aus Gleichung (163) und (105) folgt für die Konstante:

$$C_0 = \text{tg } \beta_0 h = \text{tg} \left\{ \frac{2\pi h}{\lambda_0} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^2} \right\} = \text{tg} \left\{ \frac{6,2832 \cdot 1,0100}{3,2558} \sqrt{1 - 0,5098} \right\} \\ = \text{tg } 4,3646 = 4,7808$$

Die Verschiebung berechnet sich aus Gleichung (2):

$$\xi = \frac{l}{\lambda_g} = \frac{l_1 - l_{01}}{\lambda_g} = 0,4495; \quad \xi' = \frac{l'}{\lambda_g} = \frac{l_1' - l_{01}}{\lambda_g} = 0,0538$$

Die Variablen folgen aus Gleichung (25):

$$x = \frac{m [1 + \operatorname{tg}^2 2\pi\zeta]}{m^2 + \operatorname{tg}^2 2\pi\zeta} = \frac{29,4741}{707,9870} = 0,0416; \quad x^2 = 0,0017$$

$$x' = \frac{m [1 + \operatorname{tg}^2 2\pi\zeta']}{m'^2 + \operatorname{tg}^2 2\pi\zeta'} = \frac{18,2224}{263,1569} = 0,0692; \quad x'^2 = 0,0048$$

$$y = \frac{\operatorname{tg} 2\pi\zeta [1 - m^2]}{m^2 + \operatorname{tg}^2 2\pi\zeta} = \frac{232,0684}{707,9870} = 0,3278; \quad y^2 = 0,1075$$

$$y' = \frac{\operatorname{tg} 2\pi\zeta' [1 - m'^2]}{m'^2 + \operatorname{tg}^2 2\pi\zeta'} = \frac{-92,4047}{263,1569} = -0,3500 \quad y'^2 = 0,1225$$

Mit diesen errechneten Werten geht es in die Gleichung (173) und (174).

$$\xi' = \frac{[1 - (\frac{\lambda}{2b})^2] \{ [x'^2 + y'^2] y' - [x^2 + y^2] y + C_0 [xx' - yy'] \}}{C_0 [x^2 + y^2] [x'^2 + y'^2]} + \left(\frac{\lambda}{2b}\right)^2$$

$$\xi' = \frac{0,4902 (0,0417 + 0,0382 + 0,5622)}{4,7808 \cdot 0,1072 \cdot 0,1273} + 0,5098$$

$$(178) \quad \xi' = \frac{0,3148}{0,0665} + 0,5098 = 5,2436$$

$$\xi'' = \frac{[1 - (\frac{\lambda}{2b})^2] \{ [x^2 + y^2] x' - [x'^2 + y'^2] x + C_0 [xy' + x'y] \}}{C_0 [x^2 + y^2] [x'^2 + y'^2]}$$

$$\xi'' = \frac{0,4902 (0,0076 - 0,0053 + 0,0387)}{0,0665} = \frac{0,0201}{0,0665}$$

$$(179) \quad \xi'' = \underline{0,3022}$$

Der Verlustwinkel errechnet sich wie folgt:

$$(180) \quad \operatorname{tg} \delta = \frac{\xi''}{\xi'} = \frac{0,3022}{5,2436} = \underline{0,0576}$$

b) Messung der DK von Trolitul bei 0,93 cm Wellenlänge

Auch hier werden erst die beiden Bezugsminima bei kurzgeschlossener Meßleitung festgelegt:

$$l_{01} = 9,2227 \text{ cm}; \quad l_{02} = 9,8434 \text{ cm. Daraus folgt: } \lambda_g/2 = 0,6207 \text{ cm}$$

Die Messungen der Leitungskombinationen nach Abbildung 17 und 18 lieferten für $h = 0,3557 \text{ cm}$ und $z_3 = z_2$:

$$\begin{array}{ll} l_1 = 8,9684 \text{ cm} & l'_1 = 8,8847 \text{ cm} \\ l_2 = 9,5890 \text{ cm} & l'_2 = 9,5055 \text{ cm} \\ \lambda_g/2 = 0,6206 \text{ cm} & \lambda_g/2 = 0,6208 \text{ cm} \\ m = \infty & m' = \infty \end{array}$$

Aus den drei gemessenen Werten der Leitungswellenlänge ergibt sich im Mittel:

$$\lambda_g = 1,2414 \text{ cm}$$

Die Luftwellenlänge berechnet sich nach Gleichung (115) mit $2b = 1,4100 \text{ cm}$ zu:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{\lambda_g^2 (2b)^2}{\lambda_g^2 + (2b)^2}} = \sqrt{0,8682} = 0,9318 \text{ cm}$$

Die Konstante C_0 wird nach Gleichung (163) und (105) zu:

$$C_0 = \operatorname{tg} \frac{2\pi h}{\lambda_g} = \operatorname{tg} 0,4228 = 0,4234$$

Die Verschiebung ergibt sich nach Gleichung (2):

$$\xi = \frac{l}{\lambda_g} = \frac{l_1 - l_{01}}{1,2414} = 0,2951; \quad \xi' = \frac{l'}{\lambda_g} = \frac{l'_1 - l_{01}}{1,2414} = 0,2278$$

Wegen $m = m' = \infty$ wird $x = x' = 0$; y und y' erhält man nach Gleichung (27):

$$y = -\operatorname{tg} 2\pi\xi = -\operatorname{tg} 1,8542 = 3,4331; \quad y' = -\operatorname{tg} 2\pi\xi' = -6,1218$$

Diese Werte werden nun in die Gleichung (177) eingeführt:

$$\mathcal{E}' = \frac{[1 - (\frac{\lambda_e}{\lambda})^2] [y' - y - C_0]}{y y' C_0} + (\frac{\lambda_e}{\lambda})^2 = \frac{0,5632 [-9,6783]}{-2,5935} + 0,4368$$

$$(181) \quad \mathcal{E}' = 2,5385$$

$$(182) \quad \operatorname{tg} \delta < 10^{-4}$$

c) Kritik

Die Meßergebnisse für Trolitul und Pertinax stimmen recht gut mit den Ergebnissen anderer Arbeiten überein. Nach Angaben von KEBBEL soll Pertinax eine DK haben von:

$$\mathcal{E}' = 5,3; \quad \mathcal{E}'' = 0,42$$

Die Unterschiede im Imaginärteil werden wohl durch Feuchtigkeitsunterschiede bzw. anders geartete Tränklacke begründet sein.

Für Trolitul schwanken die Angaben zwischen $2,4 < \mathcal{E}' < 2,6$. Die Herstellerfirma nennt $\mathcal{E}' = 2,5$, vermutet aber aus Messungen des optischen Brechungsindex einen Wert von 2,54.

11. Fünftes und endgültiges Meßverfahren für flüssige Dielektrika

a) Allgemeine Verfahrenstechnik

Im vierten Meßverfahren für feste Stoffe werden die beiden Messungen durch Zuschalten eines leeren Stückes Hohlleiter mit dem Wellenwiderstand Z_0 hinter die Probe variiert. Es tritt dadurch in den Endgleichungen eine Konstante C_0 auf. Die Erweiterung dieses Verfahrens auf flüssige Stoffe führt statt des einen Leitungsstückes Z_0 drei Leitungsstücke Z_2 ein, von denen sich eines abwechselnd vor bzw. hinter die Probe setzt, und die beiden anderen die Probe einschließen. Sie sind mit einem im Rahmen der Meßmöglichkeit verlustlosen Dielektrikum gefüllt (Trolitul) und dienen als Meßkammerwandung. Der Einfluß der Wandung soll nicht kompensiert oder vernachlässigt werden, sondern in der theoretischen Behandlung mit allen Auswirkungen erfaßt sein. Dadurch ist die jetzt auftretende Konstante C_1 bedingt.

b) Leitungsanordnung bei der ersten Messung

Die Abbildung 19 zeigt die Leitungsanordnung zur ersten Messung. Der rechte Teil der Leitung ist in der Praxis als homogenes Stück der Länge $2h$ ausgebildet. Lediglich aus mathematischen Gründen wird er in zwei Stufen behandelt.

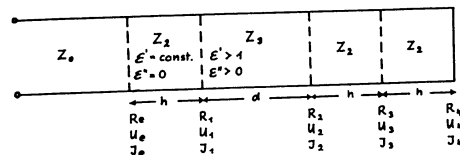


Abbildung 19

Nach der Leitungstheorie gilt unter Berücksichtigung der Gleichungen (183) und (184):

$$(183) \quad \operatorname{Cof} j\beta = \cos \beta$$

$$(184) \quad \operatorname{Sin} j\beta = j \sin \beta$$

$$U_3 = U_4 \cos \beta_2 h + j J_4 Z_2 \sin \beta_2 h$$

$$J_3 = J_4 \cos \beta_2 h + j \frac{U_4}{Z_2} \sin \beta_2 h$$

Mit $U_4 = 0$ wird

$$(185) \quad R_3 = \frac{U_3}{J_3} = j Z_2 \operatorname{tg} \beta_2 h$$

Es soll sein:

$$(186) \quad \operatorname{tg} \beta_2 h = C_1$$

Damit

$$(187) \quad R_1 = j Z_2 C_1$$

Für die zweite Ebene gilt:

$$U_2 = U_3 \cos \beta_2 h + j J_3 z_2 \sin \beta_2 h$$

$$J_2 = J_3 \cos \beta_2 h + j \frac{U_3}{z_2} \sin \beta_2 h$$

Mit $U_3 = I_3 R_3$ wird:

$$(188) \quad R_2 = \frac{U_2}{J_2} = \frac{R_3 + j z_2 \operatorname{tg} \beta_2 h}{1 + j \frac{R_3}{z_2} \operatorname{tg} \beta_2 h} = \frac{j 2 z_2 C_1}{1 - C_1^2} = j C_1$$

Für die erste Ebene folgt:

$$U_1 = U_2 \operatorname{Cof} \gamma d + J_2 z_1 \operatorname{Sin} \delta d$$

$$J_1 = J_2 \operatorname{Cof} \delta d + \frac{U_2}{z_1} \operatorname{Sin} \delta d$$

Mit $U_2 = I_2 R_2$ wird:

$$(189) \quad R_1 = \frac{U_1}{J_1} = \frac{j z_2 C_1 + z_1^2 \operatorname{tg} \delta d}{z_1 + j C_1 \operatorname{tg} \delta d}$$

Für die Eingangebene folgt:

$$U_e = U_1 \cos \beta_1 h + j J_1 z_1 \sin \beta_1 h$$

$$J_e = J_1 \cos \beta_1 h + j \frac{U_1}{z_1} \sin \beta_1 h$$

Mit $U_1 = I_1 R_1$ wird:

$$R_e = \frac{U_e}{J_e} = \frac{R_1 + j z_1 \operatorname{tg} \beta_1 h}{1 + j \frac{R_1}{z_1} \operatorname{tg} \beta_1 h}$$

Mit Gleichung (189) und (186) wird:

$$(190) \quad R_e = \frac{\operatorname{tg} \delta d [z_1^2 z_2 - z_1^2 C_1 C_2] + j z_1 [z_1 C_1 + z_2^2 C_1]}{j \operatorname{tg} \delta d [z_1 C_1 + z_2^2 C_1] + z_1 [z_1 - C_1 C_2]}$$

Auflösen nach $\operatorname{tg} \gamma d$:

$$(191) \quad \frac{1}{\operatorname{tg} \gamma d} = \frac{z_1^2 [z_1 - j \operatorname{Re} C_1] - z_2^2 C_1 C_2 - j \operatorname{Re} z_1 C_2}{z_1 [\operatorname{Re} (z_1 - C_1 C_2) - j (z_1 C_1 + z_2^2 C_1)]}$$

Es sollen folgende Abkürzungen gelten:

$$(192) \quad C_1 = z_1^2 C_1 C_2 = \frac{2 z_1^3 C_1^2}{1 - C_1^2}$$

$$(193) \quad C_4 = z_1 C_1 = \frac{2 z_1^2 C_1}{1 - C_1^2}$$

$$(194) \quad C_6 = z_1 - C_1 C_2 = \frac{z_1 - 3 z_1 C_1^2}{1 - C_1^2}$$

$$(195) \quad C_8 = z_1 C_1 + z_2^2 C_1 = \frac{3 z_1^2 C_1 - C_1^2 z_1^2}{1 - C_1^2}$$

Die Gleichungen (192) bis (195) in die Gleichung (191) eingeführt liefert:

$$(196) \quad \frac{1}{\operatorname{tg} \gamma d} = \frac{z_1^2 [z_1 - j \operatorname{Re} C_1] - C_2 - j \operatorname{Re} C_4}{z_1 [\operatorname{Re} C_6 - j C_8]}$$

c) Leitungsanordnung bei der zweiten Messung

Es soll durch einfaches Umdrehen der Leitungskombination ein zweiter Ausdruck für den komplexen Tangens gefunden werden (s. Abb. 20).

Entsprechend der Gleichung (187) gilt:

$$(197) \quad R_3' = j z_2 C_1$$

Für die zweite Ebene gilt:

$$U_2' = U_3' \operatorname{Cof} \gamma d + J_3 z_2 \operatorname{Sin} \gamma d$$

$$J_2' = J_3' \operatorname{Cof} \gamma d + \frac{U_3'}{z_2} \operatorname{Sin} \gamma d$$

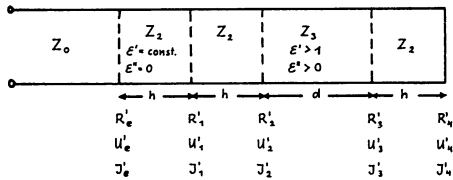


Abbildung 20

Mit \$U_3 = I_3 R_3\$ wird:

$$(198) \quad R_2' = \frac{U_2'}{J_2'} = \frac{R_3' + z_3 \frac{2\eta y d}{1 + \frac{R_3'}{z_3} \frac{2\eta y d}{2\eta y d}}}{1 + \frac{R_3'}{z_3} \frac{2\eta y d}{2\eta y d}} = \frac{j z_3 z_2 C_4 + z_3^2 \frac{2\eta y d}{2\eta y d}}{z_3 + j z_2 C_4 \frac{2\eta y d}{2\eta y d}}$$

Für die erste Ebene gilt:

$$U_1' = U_2' \cos \beta_1 h + j J_2' z_1 \sin \beta_1 h$$

$$J_1' = J_2' \cos \beta_1 h + j \frac{U_2'}{z_1} \sin \beta_1 h$$

Mit \$U_2 = I_2 R_2\$ wird:

$$(199) \quad R_1' = \frac{U_1'}{J_1'} = \frac{\frac{2\eta y d [z_1^2 z_2 - z_1^2 C_4^2] + j 2 z_3 z_2 C_4}{j \frac{2\eta y d}{2\eta y d} [z_1^2 C_4 + z_1^2 C_4] + z_3 z_2 [1 - C_4^2]}}{\frac{j z_3 z_2 C_4 + z_3^2 \frac{2\eta y d}{2\eta y d}}{z_3 + j z_2 C_4 \frac{2\eta y d}{2\eta y d}}}$$

Die Eingangsebene liefert:

$$U_e' = U_1' \cos \beta_1 h + j J_1' z_1 \sin \beta_1 h$$

$$J_e' = J_1' \cos \beta_1 h + j \frac{U_1'}{z_1} \sin \beta_1 h$$

Mit \$U_e = I_e R_e\$ wird:

$$(200) \quad R_e' = \frac{U_e'}{J_e'} = \frac{z_1 R_1' + j z_1^2 C_4}{z_1 + j C_4 R_1'}$$

Mit Gleichung (199) liefert das:

$$R_e' = \frac{2\eta y d [z_1^2 z_2 - z_1^2 C_4^2 - z_1^2 C_4^2 - z_3^2 z_2 C_4^2] + j 2 z_3 z_2^2 C_4 + j z_3 z_2^2 C_4 - j z_3 z_2^2 C_4^2}{j \frac{2\eta y d}{2\eta y d} [2 z_1^2 C_4 + z_1^2 C_4 (1 - C_4^2)] + z_3 z_2 [1 - 3 C_4^2]}$$

Auflösen nach \$1/2\eta y d\$:

$$(201) \quad \frac{1}{2\eta y d} = \frac{z_3^2 [z_1 - z_3 C_4^2 - j Re' 2 C_4] - 2 z_3^2 C_4^2 - j Re' z_3^2 C_4 [1 - C_4^2]}{z_3 [Re' (z_1 - 3 z_3 C_4^2) - j z_1^2 C_4 (3 - C_4^2)]}$$

Es werden folgende Abkürzungen eingeführt:

$$(202) \quad C_7 = z_1 - z_3 C_4^2 = z_3 [1 - C_4^2] = C_8$$

$$(203) \quad C_8 = 2 z_3^2 C_4^2$$

$$(204) \quad C_9 = z_1^2 C_4 [1 - C_4^2]$$

$$(205) \quad C_{10} = z_1 - 3 z_3 C_4^2 = z_3 [1 - 3 C_4^2]$$

$$(206) \quad C_{11} = z_1^2 C_4 [3 - C_4^2]$$

Die Gleichungen (202) bis (206) ergeben mit Gleichung (201):

$$(207) \quad \frac{1}{2\eta y d} = \frac{z_3^2 [C_7 - j Re' 2 C_4] - C_8 - j Re' C_9}{z_3 [Re' C_{10} - j C_{11}]}$$

d) Bestimmung von \$\epsilon'\$ und \$\epsilon''\$

Beim Gleichsetzen der Gleichungen (207) und (196) fällt der Tangens heraus, und man erhält:

$$\frac{z_3^2 [C_7 - j Re' 2 C_4] - C_8 - j Re' C_9}{z_3 [Re' C_{10} - j C_{11}]} = \frac{z_3^2 [z_1 - j Re' C_4] - C_8 - j Re' C_9}{z_3 [Re' C_8 - j C_9]}$$

Auflösen nach \$1/z_3^2\$ liefert:

$$\frac{1}{z_3^2} = \frac{[z_1 - j Re' C_4] [Re' C_{10} - j C_{11}] - [C_7 - j Re' 2 C_4] [Re' C_8 - j C_9]}{[C_8 + j Re' C_4] [Re' C_{10} - j C_{11}] - [C_8 + j Re' C_9] [Re' C_8 - j C_9]}$$

Ausmultipliziert ergibt sich:

$$\frac{1}{z_3^2} = \frac{\operatorname{Re}' [z_2 C_{10} + 2C_6 C_7] - \operatorname{Re} [C_1 C_{11} + C_2 C_7] - j \{ \operatorname{Re} \operatorname{Re}' [C_4 C_8 - 2C_1 C_9] + z_2 C_{11} - C_4 C_7 \}}{\operatorname{Re}' [C_4 C_{10} - C_4 C_7] + \operatorname{Re} [C_4 C_{11} - C_1 C_9] + j \{ \operatorname{Re} \operatorname{Re}' [C_4 C_{10} - C_1 C_9] - C_3 C_{11} + C_4 C_8 \}}$$

mit den Konstanten:

$$(208) \quad \frac{1}{z_3^2} = \frac{\operatorname{Re}' C_{12} - \operatorname{Re} C_{13} - j [\operatorname{Re} \operatorname{Re}' C_{14} + C_{15}]}{\operatorname{Re}' C_{16} + \operatorname{Re} C_{17} + j [\operatorname{Re} \operatorname{Re}' C_{18} + C_{19}]}$$

$$(209) \quad C_{12} = z_2 C_{10} + 2C_6 C_7 = \frac{z_2^2 [1 + 2C_1^2 + C_1^4]}{1 - C_1^2}$$

$$(210) \quad C_{13} = C_1 C_{11} + C_2 C_7 = \frac{z_2^2 [1 - C_1^2 - C_1^4 + C_1^6]}{1 - C_1^2}$$

$$(211) \quad C_{14} = C_1 C_{10} - 2C_1 C_9 = \frac{z_2 [-C_1 + 2C_1^3 + 3C_1^5]}{1 - C_1^2}$$

$$(212) \quad C_{15} = z_2 C_{11} - C_4 C_7 = 0$$

$$(213) \quad C_{16} = C_3 C_{10} - C_4 C_7 = \frac{z_2^2 [-C_1^2 - 2C_1^4 - C_1^6]}{1 - C_1^2}$$

$$(214) \quad C_{17} = C_4 C_{11} - C_3 C_9 = \frac{z_2^2 [4C_1^2 + 4C_1^4]}{1 - C_1^2}$$

$$(215) \quad C_{18} = C_4 C_{10} - C_3 C_9 = \frac{z_2^2 [C_1 - 2C_1^3 - 3C_1^5]}{1 - C_1^2}$$

$$(216) \quad C_{19} = -C_3 C_{11} + C_4 C_8 = 0$$

Mit Gleichungen (209) bis (216) wird Gleichung (208) zu:

$$\frac{1}{z_3^2} = \frac{\operatorname{Re}' C_{12} - \operatorname{Re} C_{13} - j \operatorname{Re} \operatorname{Re}' C_{14}}{\operatorname{Re}' C_{16} + \operatorname{Re} C_{17} + j \operatorname{Re} \operatorname{Re}' C_{18}}$$

Multiplikation von Zähler und Nenner mit $[1 - C_1^2] z_2^{-1}$ ergibt:

$$(217) \quad \frac{1}{z_3^2} = \frac{\operatorname{Re}' C_{20} - \operatorname{Re} C_{21} - j \operatorname{Re} \operatorname{Re}' C_{22}}{\operatorname{Re}' C_{23} + \operatorname{Re} C_{24} + j \operatorname{Re} \operatorname{Re}' C_{25}}$$

Mit:

$$(218) \quad C_{20} = z_1 [1 + 2C_1^2 + C_1^4]$$

$$(219) \quad C_{21} = z_1 [1 - C_1^2 - C_1^4 + C_1^6]$$

$$(220) \quad C_{22} = -C_1 + 2C_1^3 + 3C_1^5$$

$$(221) \quad C_{23} = z_1^2 [-C_1^2 - 2C_1^4 - C_1^6]$$

$$(222) \quad C_{24} = z_1^2 [4C_1^2 + 4C_1^4]$$

$$(223) \quad C_{25} = z_1^2 [C_1 - 2C_1^3 - 3C_1^5]$$

Aufteilen der Eingangswiderstände R_0 und R_0' in Real- und Imaginärteil liefert nach Gleichung (26):

$$(224) \quad \operatorname{Re} = z_0 x + j z_0 y$$

$$(225) \quad \operatorname{Re}' = z_0 x' + j z_0 y'$$

Gleichung (224) und (225) eingeführt liefert dann:

$$(226) \quad \frac{1}{z_3^2} = \frac{x' C_{20} - x C_{21} + x y z_0 C_{22} + x' y z_0 C_{22} + j [y C_{20} - y C_{21} - x x' z_0 C_{23} + y y' z_0 C_{23}]}{x' C_{23} + x C_{24} - x y z_0 C_{25} - x' y z_0 C_{25} - j [y C_{23} - y C_{24} - x x' z_0 C_{25} + y y' z_0 C_{25}]}$$

Multiplikation mit dem komplex konjugierten Nenner:

$$(227) \quad \frac{1}{z_2^2} = \frac{[x^2+y^2] \{ C_{20}C_{25} - yz_0 [C_{20}C_{25} - C_{21}C_{24}] - [x^2+y^2] \{ C_{21}C_{24} - yz_0 [C_{21}C_{25} + C_{22}C_{24}] \}}{[x^2+y^2] \{ C_{21}^2 - yz_0 2 C_{23}C_{24} \} + [x^2+y^2] \{ C_{24}^2 - yz_0 2 C_{24}C_{25} \}}$$

$$\frac{-[x^2+y^2][x^2+y^2]z_0^2 C_{23}C_{24} + [xx'+yy'] [C_{20}C_{24} - C_{21}C_{23}] - [x^2+y^2][x^2+y^2]z_0^2 C_{23}C_{25} + [xx'+yy'] 2 C_{23}C_{24}}{}$$

$$-j \frac{[x^2+y^2]xz_0 [C_{20}C_{23} + C_{22}C_{23}] - [x^2+y^2]xz_0 [C_{20}C_{24} - C_{21}C_{23}] - [xy'-xy] [C_{20}C_{23} + C_{21}C_{23}]}{\text{Nenner}}$$

Aufteilen der linken Seite in Real- und Imaginärteil nach Gleichung (112):

$$(228) \quad \frac{1}{z_2^2} = \frac{\epsilon' - (\frac{3\epsilon}{2})^2}{\mu_0/\epsilon_0} - j \frac{\epsilon''}{\mu_0/\epsilon_0}$$

Gleichung (228) in Gleichung (227) ergibt bei Änderung der Vorzeichen des zweiten und dritten Summanden des Zählers:

$$(229) \quad \frac{\epsilon'}{\mu_0/\epsilon_0} = \frac{[x^2+y^2] [z_0^2 C_{20} - yz_0 z_1^2 C_{23}] + [x^2+y^2] [z_0^2 C_{20} - yz_0 z_1^2 C_{24}] + [x^2+y^2] [z_0^2 C_{25} - yz_0 z_1^2 C_{24}] + [x^2+y^2] [z_0^2 C_{23} - yz_0 z_1^2 C_{25}]}{}$$

$$\frac{+[x^2+y^2][x^2+y^2]z_0^2 z_1^2 C_{20} + [xx'+yy']z_1^2 C_{21} + (\frac{3\epsilon}{2})^2}{+[x^2+y^2][x^2+y^2]z_0^2 z_1^2 C_{23} + [xx'+yy']z_1^2 C_{20} + \mu_0/\epsilon_0}$$

$$(230) \quad \frac{\epsilon''}{\mu_0/\epsilon_0} = \frac{([x^2+y^2]x - [x^2+y^2]x')z_0 z_1^2 C_{23} - [xy'-xy]z_0^2 C_{24}}{\text{Nenner}}$$

Darin bedeuten die Konstanten:

$$(231) \quad C_{20}C_{23} = z_1^4 [-C_1^2 - 4C_1^4 - 6C_1^6 - 4C_1^8 - C_1^{10}] - C_{24}z_1^4$$

$$(232) \quad z_0 [C_{20}C_{25} - C_{22}C_{23}] = z_0 z_1^2 [C_1 - C_1^3 - 6C_1^5 - 2C_1^7 + 5C_1^9 + 3C_1^{11}] - C_{24}z_0 z_1^3$$

$$(233) \quad -C_{21}C_{24} = z_1^4 [-4C_1^2 + 8C_1^4 - 4C_1^6] = C_{23}z_1^4$$

$$(234) \quad -z_0 [C_{21}C_{25} + C_{22}C_{24}] = z_0 z_1^2 [-C_1 + 7C_1^3 - 2C_1^5 - 26C_1^7 - 13C_1^9 + 3C_1^{11}] - C_{24}z_0 z_1^3$$

$$(235) \quad -z_0^2 C_{22}C_{25} = z_0^2 z_1^2 [C_1^2 - 4C_1^4 - 2C_1^6 + 12C_1^8 + 9C_1^{10}] - C_{20}z_0^2 z_1^2$$

$$(236) \quad C_{20}C_{24} - C_{21}C_{23} = z_1^4 [5C_1^2 + 13C_1^4 + 10C_1^6 + 2C_1^8 + C_1^{10} + C_1^{12}] - C_{24}z_1^4$$

$$(237) \quad z_0 [C_{20}C_{23} + C_{22}C_{23}] = z_0 z_1^2 [C_1 + C_1^3 - 6C_1^5 - 14C_1^7 - 11C_1^9 - 3C_1^{11}] = C_{23}z_0 z_1^2$$

$$(238) \quad z_0 [C_{21}C_{24} - C_{22}C_{24}] = z_0 z_1^2 [C_1 + C_1^3 - 6C_1^5 - 14C_1^7 - 11C_1^9 - 3C_1^{11}] = C_{23}z_0 z_1^2$$

$$(239) \quad C_{20}C_{24} + C_{21}C_{23} = z_1^4 [3C_1^2 + 11C_1^4 + 14C_1^6 + 6C_1^8 - C_1^{10} - C_1^{12}] = C_{24}z_1^4$$

$$(240) \quad C_{23}^2 = z_1^6 [C_1^4 + 4C_1^6 + 6C_1^8 + 4C_1^{10} + C_1^{12}] = C_{25}z_1^6$$

$$(241) \quad 2z_0 C_{23}C_{25} = z_0 z_1^2 [-2C_1^2 + 12C_1^4 + 16C_1^6 + 6C_1^8] = C_{24}z_0 z_1^2$$

$$(242) \quad C_{24}^2 = z_1^6 [16C_1^4 + 32C_1^6 + 16C_1^8] = C_{27}z_1^6$$

$$(243) \quad 2z_0 C_{24}C_{25} = z_0 z_1^2 [8C_1^2 - 8C_1^4 - 40C_1^6 - 24C_1^8] = C_{28}z_0 z_1^2$$

$$(244) \quad z_0^2 C_{24}^2 = z_0^2 z_1^4 [C_1^2 - 4C_1^4 - 2C_1^6 + 12C_1^8 + 9C_1^{10}] - C_{27}z_0^2 z_1^4 = C_{20}z_0^2 z_1^4$$

$$(245) \quad 2C_{23}C_{24} = z_1^6 [-8C_1^4 - 24C_1^6 - 24C_1^8 - 8C_1^{10}] = C_{40}z_1^6$$

Kürzen von z_2^2 und μ_0/ϵ_0 und Einführen der Gleichungen (110) und (111) liefert:

$$\begin{aligned} \epsilon' &= \frac{[x^2+y^2] \left\{ \frac{1}{\epsilon_w - (\frac{\lambda_0}{2b})^2} C_{28} - y \frac{1}{[1 - (\frac{\lambda_0}{2b})^2] [\epsilon_w - (\frac{\lambda_0}{2b})^2]} C_{27} \right\} +}{\frac{1}{\epsilon_w - (\frac{\lambda_0}{2b})^2} [x^2+y^2] \left\{ \frac{1}{\epsilon_w - (\frac{\lambda_0}{2b})^2} C_{35} - y \frac{1}{[1 - (\frac{\lambda_0}{2b})^2] [\epsilon_w - (\frac{\lambda_0}{2b})^2]} C_{36} \right\} +} \\ (246) \quad &+ \frac{[x^2+y^2] \left\{ \frac{1}{\epsilon_w - (\frac{\lambda_0}{2b})^2} C_{28} - y \frac{1}{[1 - (\frac{\lambda_0}{2b})^2] [\epsilon_w - (\frac{\lambda_0}{2b})^2]} C_{27} \right\} +}{[x^2+y^2] \left\{ \frac{1}{\epsilon_w - (\frac{\lambda_0}{2b})^2} C_{35} - y \frac{1}{[1 - (\frac{\lambda_0}{2b})^2] [\epsilon_w - (\frac{\lambda_0}{2b})^2]} C_{36} \right\} +} \\ &+ \frac{[x^2+y^2][x^2+y^2] \frac{1}{1 - (\frac{\lambda_0}{2b})^2} C_{30} + [xx'+yy'] \frac{1}{\epsilon_w - (\frac{\lambda_0}{2b})^2} C_{31}}{[x^2+y^2][x^2+y^2] \frac{1}{1 - (\frac{\lambda_0}{2b})^2} C_{30} + [xx'+yy'] \frac{1}{\epsilon_w - (\frac{\lambda_0}{2b})^2} C_{31}} + \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^2 \\ (247) \quad \epsilon' &= \frac{[x^2+y^2]x - [x^2+y^2]x'}{\text{Nenner}} \frac{1}{[1 - (\frac{\lambda_0}{2b})^2] [\epsilon_w - (\frac{\lambda_0}{2b})^2]} C_{32} - [xy - xy'] \frac{1}{\epsilon_w - (\frac{\lambda_0}{2b})^2} C_{33} \end{aligned}$$

Erweitern der beiden Ausdrücke mit $\epsilon_w' - (\frac{\lambda_0}{2b})^2$ und Zusammenfassung führt unter Beachtung der Umrechnung

$$(248) \quad C_i / \overline{C_i} = \overline{C_i}$$

zu folgenden Gleichungen:

$$\begin{aligned} \epsilon' &= \frac{[\epsilon_w' - (\frac{\lambda_0}{2b})^2] [x^2+y^2] \left\{ C_{18} - y \frac{[\epsilon_w - (\frac{\lambda_0}{2b})^2]}{1 - (\frac{\lambda_0}{2b})^2} C_{19} \right\} + [x^2+y^2] \left\{ C_{18} - y \frac{[\epsilon_w - (\frac{\lambda_0}{2b})^2]}{1 - (\frac{\lambda_0}{2b})^2} C_{19} \right\} +}{[x^2+y^2] \left\{ C_{35} - y \frac{[\epsilon_w - (\frac{\lambda_0}{2b})^2]}{1 - (\frac{\lambda_0}{2b})^2} C_{36} \right\} + [x^2+y^2] \left\{ C_{35} - y \frac{[\epsilon_w - (\frac{\lambda_0}{2b})^2]}{1 - (\frac{\lambda_0}{2b})^2} C_{36} \right\} +} \\ (249) \quad &+ \frac{[x^2+y^2][x^2+y^2] \frac{[\epsilon_w - (\frac{\lambda_0}{2b})^2]}{1 - (\frac{\lambda_0}{2b})^2} C_{30} + [xx'+yy'] C_{31}}{[x^2+y^2][x^2+y^2] \frac{[\epsilon_w - (\frac{\lambda_0}{2b})^2]}{1 - (\frac{\lambda_0}{2b})^2} C_{30} + [xx'+yy'] C_{31}} + \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^2 \end{aligned}$$

$$(250) \quad \epsilon' = \frac{[\epsilon_w' - (\frac{\lambda_0}{2b})^2] \left\{ [x^2+y^2]x - [x^2+y^2]x' \frac{[\epsilon_w - (\frac{\lambda_0}{2b})^2]}{1 - (\frac{\lambda_0}{2b})^2} C_{32} - [xy - xy'] C_{33} \right\}}{\text{Nenner}}$$

Bei Division aller Konstanten von C_{26} bis C_{40} mit $C_1 [1 + C_1^2]^2$ ergeben sich folgende Vereinfachungen:

$$(251) \quad \frac{C_{28}}{C_1 [1 + C_1^2]^2} = -C_1 - 2C_1^3 - C_1^5 = C_{41} \quad (252) \quad \frac{[\epsilon_w - (\frac{\lambda_0}{2b})^2]}{1 - (\frac{\lambda_0}{2b})^2} = C_{42}$$

$$(253) \quad \frac{C_{37}}{C_1 [1+C_1]^2} = 1 - 3C_1^2 - C_1^4 + 3C_1^6 = C_{33}$$

$$(254) \quad \frac{C_{38}}{C_1 [1+C_1]^2} = -4C_1 + 8C_1^3 - 4C_1^5 = C_{34}$$

$$(255) \quad \frac{C_{39}}{C_1 [1+C_1]^2} = -1 + 9C_1^2 - 19C_1^4 + 3C_1^6 = C_{35}$$

$$(256) \quad \frac{C_{40}}{C_1 [1+C_1]^2} = C_1 - 6C_1^3 + 9C_1^5 = C_{36}$$

$$(257) \quad \frac{C_{41}}{C_1 [1+C_1]^2} = 5C_1 + 3C_1^3 - C_1^5 + C_1^7 = C_{37}$$

$$(258) \quad \frac{C_{42}}{C_1 [1+C_1]^2} = C_1^3 + 2C_1^5 + C_1^7 = C_{38}$$

$$(259) \quad \frac{C_{43}}{C_1 [1+C_1]^2} = -2C_1^3 + 4C_1^5 + 6C_1^7 = C_{39}$$

$$(260) \quad \frac{C_{44}}{C_1 [1+C_1]^2} = -16C_1^3 = C_{40}$$

$$(261) \quad \frac{C_{45}}{C_1 [1+C_1]^2} = 8C_1^2 - 24C_1^4 = C_{41}$$

$$(262) \quad \frac{C_{46}}{C_1 [1+C_1]^2} = -8C_1^3 - 8C_1^5 = C_{42}$$

$$(263) \quad \frac{C_{47}}{C_1 [1+C_1]^2} = 1 - C_1^2 - 5C_1^4 - 3C_1^6 = C_{43}$$

$$(264) \quad \frac{C_{48}}{C_1 [1+C_1]^2} = 3C_1 + 5C_1^3 + C_1^5 - C_1^7 = C_{44}$$

Mit diesen letztlichen Konstanten erhält man endlich:

$$(265) \quad \begin{aligned} \mathcal{E}'_w &= \frac{[\mathcal{E}'_w - (\frac{\lambda}{2l})^2] \{ [x^2+y^2][C_{41} - yC_{42}C_{43}] + [x^2+y^2][C_{44} - yC_{45}C_{46}] + \\ &+ [x^2+y^2][C_{48} - yC_{49}C_{50}] + [x^2+y^2][C_{50} - yC_{51}C_{52}] \} + (\frac{\lambda}{2l})^2 \\ &+ [x^2+y^2][x^2+y^2]C_{43}^2C_{46} + [xx' + yy']C_{47} \} + (\frac{\lambda}{2l})^2 \\ &+ [x^2+y^2][x^2+y^2]C_{42}^2C_{46} + [xx' + yy']C_{52} \end{aligned}$$

$$\mathcal{E}''_w = \frac{[\mathcal{E}'_w - (\frac{\lambda}{2l})^2] \{ [x^2+y^2]x - [x^2+y^2]x' \} C_{42}C_{52} - [xy' - x'y]C_{52}}{\text{Nenner}}$$

e) Vereinfachte Auswertung durch Randbedingung

Mit den Gleichungen (265) läßt sich also die DK von Flüssigkeiten in einer Meßkammer exakt bestimmen. Zeitraubend ist dabei nur die Berechnung der Konstanten. Deshalb soll jetzt zum Abschluß der Rechnung eine Randbedingung eingeführt werden, deren Einhaltung keine Schwierigkeiten macht, die Auswertarbeit aber wesentlich erleichtert.

Wenn man die Dicke der Meßkammerwandung so wählt, daß C_1 klein bleibt bei gegebener Wellenlänge, dann können die C_1^3 und höheren Potenzen gegenüber den niedrigeren vernachlässigt werden. Für den Fall:

$$0 < |C_1| < 0,03 \quad \text{wird} \quad |C_1^3|_{\text{max}} = 0,00027$$

und $|8C_1^2|$, wie in C_{44} vorhanden ist, zu 0,000216, also vernachlässigbar klein. In den Konstanten C_{48} , C_{50} und C_{52} darf wegen des Fehlens niedrigerer Potenzen natürlich erst ab einschließlich C_1^4 abgebrochen werden. Eine Zusatzbedingung ist allerdings, daß C_1 nicht Null werden darf, da sonst die zweite Messung mit der ersten identisch wäre, was sich auch im Unbestimmtwerden der Endgleichungen ausdrückt.

Für C_1^3 und höhere Potenzen nahe Null folgt aus den Gleichungen (265):

$$\epsilon' = \frac{[\epsilon_w - (\frac{\lambda}{2b})^2] \{ [x^2 + y^2] [-C_1 - y C_{01} (1 - 3C_1^2)] + [x^2 + y^2] [-4C_1 - y C_{02} (-1 + 9C_1^2)] + [x^2 + y^2] [C_1^2 + y C_{01} 2C_1^2] + [x^2 + y^2] [16C_1^2 - y C_{02} 8C_1^2] \}}{[x^2 + y^2] [C_1^2 + y C_{01} 2C_1^2] - [x^2 + y^2] 8C_1^2} + \left(\frac{\lambda}{2b}\right)^2$$

$$(266) \quad \frac{+ [x^2 + y^2] [x^2 + y^2] C_{01}^2 C_1 + [x^2 + y^2] 5C_1}{+ [x^2 + y^2] [x^2 + y^2] C_{02}^2 C_1 - [x^2 + y^2] 8C_1^2} + \left(\frac{\lambda}{2b}\right)^2$$

$$\epsilon'' = \frac{[\epsilon_w - (\frac{\lambda}{2b})^2] \{ [x^2 + y^2] x [-x^2 + y^2] C_{01} [1 - C_1^2] - [xy - xy] 3C_1 \}}{\text{Nenner}}$$

f) Verlustarme Flüssigkeiten

Für C_1^3 und höhere Potenzen nahe Null und $x = x' = \epsilon'' = 0$ folgt aus den Gleichungen (266):

$$(267) \quad \epsilon' = \frac{[\epsilon_w - (\frac{\lambda}{2b})^2] \{ y^2 [-C_1 - y C_{01} (1 - 3C_1^2)] + y^2 [-4C_1 - y C_{02} (-1 + 9C_1^2)] + y^2 y^2 C_{01}^2 C_1 + y y^2 5C_1 \}}{y^2 [C_1^2 + y C_{01} 2C_1^2] + y^2 [16C_1^2 - y C_{02} 8C_1^2] + y^2 y^2 C_{01}^2 C_1 - y y^2 8C_1^2} + \left(\frac{\lambda}{2b}\right)^2$$

g) Kritik

Es wurde ein Meßverfahren für flüssige Stoffe entwickelt, welches nach den Grundsätzen der Leitungstheorie ohne Näherung aus zwei Messungen durch Umdrehen der Leitungskombination die dielektrischen Konstanten der Berechnung zugänglich macht. Eine erst in die Endgleichungen eingeführte Bedingung gestattet bei beliebig kleinem Fehler eine wesentliche Vereinfachung der Auswertung.

12. Eine Messung zur Kontrolle der Meßkammer

Zur Kontrolle der Meßkammer soll eine Messung durchgeführt werden, deren Ergebnis bekannt sein soll. Bei leerer bzw. mit Luft gefüllter Meßkammer muß bei der Messung für ϵ' der Wert 1 herauskommen.

Pestlegen der beiden Bezugsminima für den Kurzschluß am Leitungsende liefert die Meßwerte:

$$l_{01} = 0,8855 \text{ cm}; \quad l_{02} = 3,1900 \text{ cm. Daraus folgt: } \lambda_g/2 = 2,3065 \text{ cm}$$

Die erste Messung liefert in der Kombination nach Abbildung 19

$$l_1 = 2,1234 \text{ cm}; \quad l_2 = 4,4301 \text{ cm. Daraus folgt: } \lambda_g/2 = 2,3067 \text{ cm}$$

Die zweite Messung liefert in der Kombination nach Abbildung 20

$$l_1' = 2,1501 \text{ cm}; \quad l_2' = 4,4568 \text{ cm. Daraus folgt: } \lambda_g/2 = 2,3067 \text{ cm}$$

Das Stehwellenverhältnis ist für beide Messungen: $m = \infty$

Als mittlere Leitungswellenlänge ergibt sich dann: $\lambda_g = 4,6133 \text{ cm}$

Für die Luftwellenlänge erhält man:

$$\lambda_w = \sqrt{\frac{\lambda_g^2 \cdot (2b)^2}{\lambda_g^2 + (2b)^2}} = \sqrt{\frac{21,2825 \cdot 20,9215}{42,2040}} = 3,2484 \text{ cm}$$

Die Konstante C_1 folgt aus der Gleichung (186) mit $\epsilon_w' = 2,5385$ nach der Messung Gleichung (181) und $h = 1,1300 \text{ cm}$ zu:

$$C_1 = \text{tg} \left\{ \frac{2\pi h}{\lambda_w} \sqrt{\epsilon_w' - \left(\frac{\lambda_w}{2b}\right)^2} \right\} = \text{tg} \{ 2,1859 \cdot 1,4263 \} = \text{tg} 3,1177 = -0,0243$$

Die Verschiebung berechnet sich aus Gleichung (2) zu:

$$\xi = \frac{l}{\lambda_g} = \frac{2,1234 - 0,8835}{4,6133} = 0,2688; \quad \xi' = \frac{2,1501 - 0,8835}{4,6133} = 0,2746$$

y und y' folgt aus Gleichung (27):

$$y = -\text{tg} 2\pi\xi = -\text{tg} 1,6887 = 8,4422; \quad y' = -\text{tg} 2\pi\xi' = 6,4292$$

Die Konstante C_{42} errechnet sich aus Gleichung (252):

$$C_{42} = \sqrt{\frac{\epsilon_w - \left(\frac{z_1}{z_2}\right)^2}{1 - \left(\frac{z_1}{z_2}\right)^2}} = 4,1037$$

Mit diesen Größen geht es jetzt in die Endgleichung (267) für verlustarme Flüssigkeiten. Da $|C_1|$ im vorliegenden Fall kleiner als 0,03 ist, kann die vereinfachte Auswertung erfolgen. Man erhält:

$$\epsilon' = \frac{2,0342 [-704,6351 + 930,1682 - 293,7695 - 6,5946]}{0,8483 - 4,4687 - 293,7695 + 0,0060} + 0,5043$$

$$\epsilon' = \frac{152,2212}{297,3839} + 0,5043 = \underline{1,0162}$$

a) Kritik

Der freie Raum hat ein ϵ' von 1,00. Das vorliegende Meßergebnis ist also mit einem Fehler von +1,6 % behaftet. Neben der Genauigkeit der Längenmessung geht ebenfalls das ϵ'_w der Meßkammerwand in das Ergebnis ein. Zweitens ist die Messung des Wandmaterials im Abschnitt 10 b) auch mit gewissen Fehlern in der Größenordnung bis 1,5 % behaftet und damit für das Fehlergebnis mit verantwortlich. Es wäre aber nicht sinnvoll, mit dieser Messung rückwärts die Messung des Troltituls korrigieren zu wollen, da die aufgetretenen Fehler sich in erträglichen Grenzen halten und durchaus auch andere Gründe haben können.

13. Sechstes Meßverfahren zur gleichzeitigen Bestimmung der Dielektrizitäts- und Permeabilitätskonstante von festen Stoffen

a) Allgemeine Verfahrenstechnik

Neben den Größen ϵ' und ϵ'' sind nun auch die magnetischen Materialkonstanten μ' und μ'' zu bestimmen. Es werden also vier Bestimmungsgleichungen benötigt. Zwei Gleichungen lassen sich ähnlich wie bisher aus dem Wellenwiderstand ableiten, die beiden anderen müssen über die Fort-

pflanzungskonstante γ berechnet werden. Die Leitungsanordnung bei den beiden Messungen soll gleich der im vierten Verfahren beschriebenen sein.

b) Zwei erste Bestimmungsgleichungen

Für den neuen Wellenwiderstand erhält man aus Gleichung (109):

$$\frac{1}{z_1^2} = \frac{[\epsilon' - j\epsilon''][\mu' - j\mu''] - \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^2}{(\mu_r/\epsilon_r)[\mu' - j\mu'']^2} \tag{268}$$

$$= \frac{[\epsilon'\mu' + \epsilon''\mu''][\mu'^2 + \mu''^2] - \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^2[\mu'^2 - \mu''^2]}{(\mu_r/\epsilon_r)[\mu'^2 + \mu''^2]^2} - j \frac{[\epsilon''\mu' - \epsilon'\mu''][\mu'^2 + \mu''^2] + 2\left(\frac{z_2}{z_1}\right)^2\mu'\mu''}{(\mu_r/\epsilon_r)[\mu'^2 + \mu''^2]^2}$$

Mit Gleichung (268) ist die Trennung von Real- und Imaginärteil ausgeführt. Da die Messungen nach dem gleichen Schema wie im vierten Meßverfahren für feste dielektrische Stoffe erfolgen, kann die Gleichung (172) ganz übernommen werden. Für die Größe $1/z_3^2$ ist lediglich sinngemäß $1/z_1^2$ zu setzen.

(269) Realteil Gl. (268) = Realteil Gl. (172) = A

(270) Imaginärteil Gl. (268) = Imaginärteil Gl. (172) = B

Damit sind zwei Bestimmungsgleichungen gefunden.

c) Bestimmung der Fortpflanzungskonstanten durch Umkehrfunktionen

Ebenfalls übernommen werden können die beiden Gleichungen (160) und (166) unter Änderung von z_3 in z_1 . Aus Gleichung (160) folgt:

(271)
$$z_1 = \frac{Re}{\gamma_g \gamma_d}$$

Gleichung (271) in Gleichung (166) eingeführt liefert:

(272)
$$\gamma_g^2 \gamma_d = \frac{j z_1 C_r Re + Re^2 - Re Re^1}{j z_1 C_r Re^1} = C$$

Da es zu $\gamma_g^2 \gamma_d$ keine Umkehrfunktion gibt, soll in einen linearen

Ausdruck umgerechnet werden. Es gilt:

$$(273) \quad \operatorname{tg} 2\gamma d = \frac{2 \operatorname{tg} \gamma d}{1 + \operatorname{tg}^2 \gamma d} \quad \text{oder} \quad \operatorname{tg}^2 \gamma d = \frac{2 \operatorname{tg} \gamma d}{\operatorname{tg} 2\gamma d} - 1$$

Das Gleichsetzen der Ausdrücke Gleichung (272) und (273) ergibt:

$$(274) \quad \frac{2 \operatorname{tg} \gamma d}{\operatorname{tg} 2\gamma d} = C + 1$$

Mit:

$$\operatorname{tg} \gamma d = \frac{\operatorname{Im} 2\gamma d}{\operatorname{Re} 2\gamma d + 1} = \frac{\operatorname{Im} \gamma d}{\operatorname{Re} \gamma d}$$

wird Gleichung (274) zu:

$$\frac{2 \operatorname{Im} 2\gamma d}{\operatorname{Re} 2\gamma d + 1} = C + 1$$

oder:

$$(275) \quad \operatorname{Co} 2\gamma d = \frac{1+C}{1-C}$$

Gleichung (272) liefert mit Gleichung (275):

$$(276) \quad \operatorname{Co} 2\gamma d = \frac{-j z_0 C_0 \operatorname{Re}' + j z_1 C_0 \operatorname{Re} + \operatorname{Re}^2 - \operatorname{Re} \operatorname{Re}'}{j z_0 C_0 \operatorname{Re}' - j z_1 C_0 \operatorname{Re} - \operatorname{Re}^2 + \operatorname{Re} \operatorname{Re}'}$$

Nach Gleichung (26) gilt:

$$(277) \quad \operatorname{Re} = z_0 x + j z_1 y; \quad \operatorname{Re}' = z_0 x' + j z_1 y'$$

Gleichung (277) in Gleichung (276) liefert:

$$\operatorname{Co} 2\gamma d = \frac{x^2 - y^2 - x x' + y y' - C_0 [y + y'] - j [z_0 y' + x y - 2 x y - C_0 [x' + x]]}{-x^2 + y^2 + x x' - y y' + C_0 [y - y'] - j [z_0 y' - x y + 2 x y + C_0 [x' - x]]}$$

Multiplikation mit dem komplex konjugierten Nenner:

$$\operatorname{Co} 2\gamma d = \frac{[x^2 + y^2] \{ [2 [x x' + y y'] - [x^2 + y^2] - [x^2 + y^2] \} + 2 C_0 [y - y'] - C_0^2 + C_0^2 [x^2 + y^2] + \dots}{\{ 2 [x x' + y y'] - [x^2 + y^2] - [x^2 + y^2] \} \cdot \{ -[x^2 + y^2] - 2 C_0 y - C_0^2 \}}$$

(278)

$$+ j \frac{2 C_0 [x^2 + y^2] x' + [x^2 + y^2] x - 2 x y y' + C_0 [x y - x y']}{\text{Nenner}} = D' + j E'$$

Zu Gleichung (278) lautet die gesuchte Umkehrfunktion:

$$(279) \quad 2\gamma d = \operatorname{Co} \operatorname{Co} [D' + j E'] \quad (2\gamma d)^2 = \{ \operatorname{Co} \operatorname{Co} [D' + j E'] \}^2$$

Darin ist $(2\gamma d)^2$ nach Gleichung (102):

$$(280) \quad (2\gamma d)^2 = \left(\frac{4\pi d}{\lambda_0} \right)^2 \left[\left(\frac{\Delta a}{2b} \right)^2 - \mathcal{E}' \mu' + \mathcal{E}'' \mu'' \right] + j \left(\frac{4\pi d}{\lambda_0} \right)^2 [\mathcal{E}' \mu' + \mathcal{E}'' \mu''] = F' + j G'$$

Damit wird Gleichung (279) zu:

$$(281) \quad F' + j G' = \{ \operatorname{Co} \operatorname{Co} [D' + j E'] \}^2$$

d) Weitere zwei Bestimmungsgleichungen

Zur Auflösung der Umkehrfunktion gelten folgende Beziehungen:

$$(282) \quad \{ \operatorname{Co} \operatorname{Co} [D' + j E'] \}^2 = [H' + j J']^2 = H'^2 - J'^2 + j 2H'J'$$

Darin bedeutet:

$$(283) \quad \operatorname{Co} H' = \sqrt{\left(\frac{D'+1}{2} \right)^2 + \left(\frac{E'}{2} \right)^2} + \sqrt{\left(\frac{D'-1}{2} \right)^2 + \left(\frac{E'}{2} \right)^2}$$

$$(284) \quad \cos J' = \sqrt{\left(\frac{D'+1}{2} \right)^2 + \left(\frac{E'}{2} \right)^2} - \sqrt{\left(\frac{D'-1}{2} \right)^2 + \left(\frac{E'}{2} \right)^2}$$

Hierzu gilt eine Vorzeichenregel, nämlich: Wenn für H' ein positives Vorzeichen gewählt wird, dann hat $\sin G'$ das gleiche Vorzeichen wie E' . Die Bestimmungsgleichungen für H' und I' erhält man wiederum durch Bildung der Umkehrfunktionen der Beziehungen Gleichung (283) und (284), die tabellarisch erfaßt sind. Eventuell ist zu berücksichtigen, daß

$$\arccos \cos x = \frac{\pi}{2} - \arcsin x$$

ist.

Es gilt:

$$(285) \quad H' = \arccos \left\{ \sqrt{\left(\frac{D'+A}{2}\right)^2 + \left(\frac{E'}{2}\right)^2} + \sqrt{\left(\frac{D'-A}{2}\right)^2 + \left(\frac{E'}{2}\right)^2} \right\}$$

$$(286) \quad J' = \arccos \left\{ \sqrt{\left(\frac{D'+A}{2}\right)^2 + \left(\frac{E'}{2}\right)^2} - \sqrt{\left(\frac{D'-A}{2}\right)^2 + \left(\frac{E'}{2}\right)^2} \right\}$$

Aus Gleichung (280) und (281) mit Gleichung (282) erhält man:

$$(287) \quad F' + jG' = H'^2 - J'^2 + j2H'J'$$

und damit die beiden weiteren Bestimmungsgleichungen:

$$(288) \quad E'^2 \mu' - E' \mu'^2 = \frac{H'^2 - J'^2}{\left(\frac{2\pi d}{\lambda_0}\right)^2} - \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^2 = L'$$

und

$$(289) \quad E' \mu'^2 + E'^2 \mu' = \frac{2H'J'}{\left(\frac{2\pi d}{\lambda_0}\right)^2} = K'$$

Leider ist mit diesen beiden neuen Bestimmungsgleichungen noch keine konkrete Aussage zu machen, da sie unendlich vieldeutig sind. Die Area-Funktion nach Gleichung (285) ist definiert als:

$$b + ja = \ln \left\{ z \pm \sqrt{z^2 - 1} \right\} = \arccos G' (p + jq)$$

und damit im Vorzeichen zweideutig. Wesentlich unangenehmer ist noch die

Bestimmung von I' nach der Arcus-Funktion, da wegen der Periodizität der Kreisfunktionen: $\cos(x + 2n\pi) = \cos x$ auch der Absolutbetrag mit 2π periodisch ist. Eine weitere Unbestimmtheit ist auch mit den Wurzelausdrücken im Argument der Umkehrfunktionen gegeben. Damit hat die mathematische Entwicklung ausgehend von der Gleichung (272) nur die Bedeutung eines naheliegenden Experimentes.

Die hier angegebenen Vieldeutigkeiten liegen letztlich schon begründet in der komplexen Wurzel der Ausbreitungskonstante nach Gleichung (102), die außerdem noch als Argument einer quadratischen hyperbolischen Tangens-Funktion auftritt.

Physikalisch gesehen ergibt sich die Tatsache, daß es zur Darstellung eines bestimmten Eingangswiderstandes einer gefüllten Leitung mehr als einen Füllstoff gibt, dessen elektrisches Verhalten eine bestimmte Phaselage und ein bestimmtes Stehwellenverhältnis bedingt. Vieldeutigkeit der Materialkonstanten ist also auf jeden Fall naturbedingt und unabwendbar. Trotzdem besteht die Möglichkeit einer strengen Auswahl durch physikalische Gesichtspunkte.

In folgenden soll ein anderer Weg der Auswertung besprochen werden. Gleichung (272) lautet in etwas anderer Form geschrieben:

$$(289a) \quad \sqrt{C} + d = \sqrt{C} = \sqrt{D + jE}$$

Zur Berechnung von D und E werden in den komplexen Meßwert C die Widerstände Re und Re' nach der Beziehung Gleichung (26) eingeführt:

$$(289b) \quad C = \frac{jC_0 [x + jy] + [x + jy]^2 - [x + jy][x' + jy']}{jC_0 [x' + jy']}$$

Aufteilen in Real- und Imaginärteil durch Multiplikation mit dem komplex-konjugierten Nenner liefert

$$(289c) \quad D = \frac{-[x'^2 + y'^2]y + C_0 [xx' + yy'] - [x' - y']y' + 2xy}{C_0 [x'^2 + y'^2]}$$

(289d)
$$E = \frac{[x^2 + y^2]x + C_0 [x'y - xy'] - [x^2 - y^2]x' - 2xyy'}{C_0 [x^2 + y^2]}$$

Diese Gleichungen sind gegenüber den Beziehungen Gleichung (278) bedeutend leichter zu handhaben. Weiter gilt:

(289e)
$$\gamma y r d = \sqrt{D + jE} = r \cdot \sqrt{r} \cdot e^{j\frac{\varphi}{2}} = r \sqrt{r} (\cos \frac{\varphi}{2} + j \sin \frac{\varphi}{2})$$

worin Betrag und Winkel definiert sind als:

(289f)
$$r = \sqrt{D + E^2} \quad \text{und} \quad \varphi = \arctan \frac{E}{D}$$

Damit gilt und soll sein:

(289g)
$$\gamma y r d = \sqrt{D + E^2} \left\{ \cos \left[\frac{1}{2} \arctan \frac{E}{D} \right] + j \sin \left[\frac{1}{2} \arctan \frac{E}{D} \right] \right\} = F + jG$$

Der hyperbolische Tangens hat eine eindeutige Umkehrfunktion, nämlich:

(289h)
$$(rd)^2 = \left(\operatorname{th} \gamma y r d \right)^2 = (H + jJ)^2 = H^2 - J^2 + j2HJ$$

Von RYBNER wird als Lösung angegeben:

(289i)
$$H = \frac{1}{2} \operatorname{th} \gamma y r d \left(\frac{2r}{1+r^2} \cos \varphi_1 \right)$$

(289j)
$$J = \frac{1}{2} \arctan \left(\frac{2r}{1-r^2} \sin \varphi_1 \right)$$

Als Betrag und Winkel sind darin definiert:

(289k)
$$r_1 = \sqrt{F^2 + G^2} \quad \cos \varphi_1 = \frac{F}{\sqrt{F^2 + G^2}} \quad \sin \varphi_1 = \frac{G}{\sqrt{F^2 + G^2}}$$

Einführen der Gleichung (289g) und (289k) in die Gleichung (289i) und (289j) liefert:

(289l)
$$H = \frac{1}{2} \operatorname{th} \gamma y r d \left\{ \frac{2 \sqrt{D + E^2} \cos \left[\frac{1}{2} \arctan \frac{E}{D} \right]}{1 + \sqrt{D + E^2}} \right\}$$

(289m)
$$J = \frac{1}{2} \arctan \left\{ \frac{2 \sqrt{D + E^2} \sin \left[\frac{1}{2} \arctan \frac{E}{D} \right]}{1 + \sqrt{D + E^2}} \right\}$$

Schließlich erhält man mit Gleichung (289k):

$$(rd)^2 = H^2 - J^2 + j2HJ$$

oder mit Gleichung (102):

(289n)
$$\left(\frac{2rd}{\lambda_0} \right)^2 \left\{ \left[\left(\frac{\lambda_0}{2b} \right)^2 - \mathcal{E}'\mu' + \mathcal{E}''\mu'' \right] + j \left[\mathcal{E}'\mu' + \mathcal{E}''\mu'' \right] \right\} = H^2 - J^2 + j2HJ$$

Daraus folgen nun zwei Bestimmungsgleichungen:

(289o)
$$\mathcal{E}'\mu'' - \mathcal{E}''\mu' = \frac{H^2 - J^2}{\left(\frac{2rd}{\lambda_0} \right)^2} - \left(\frac{\lambda_0}{2b} \right)^2 = L$$

(289p)
$$\mathcal{E}'\mu' + \mathcal{E}''\mu'' = \frac{2HJ}{\left(\frac{2rd}{\lambda_0} \right)^2} = K$$

In den beiden Ausdrücken für H und J ist das Argument der beiden Kreisfunktionen $\frac{1}{2} \arctan \frac{E}{D}$ mit π vieldeutig. Es gilt:

(289q)
$$\frac{1}{2} \arctan \frac{E}{D} = n\pi + \frac{1}{2} \arctan \frac{E}{D}$$

Damit ist das Vorzeichen der Kreisfunktionen frei wählbar. Aus der Gleichung (289p) läßt sich aber die Bedingung ableiten, daß H und J gleiches Vorzeichen haben müssen, weil $\mathcal{E}'\mu'' + \mathcal{E}''\mu'$ positiv sein muß. Es gilt

also der Absolutwert der sin- bzw. cos-Funktion. Mit diesen Überlegungen ist H eindeutig geworden, da der Area-Tangens ebenfalls eindeutig ist.

Anders liegen die Verhältnisse beim Arcus-Tangens für I. Diese Funktion ist mit π vieldeutig. Eine Auswahlregel folgt am Ende der Rechnung.

Neben den Gleichungen (289 o) und (289 p) gelten noch die beiden ersten Bestimmungsgleichungen (269) und (270):

$$\frac{[\mathcal{E}'\mu' + \mathcal{E}''\mu''] [\mu'^2 + \mu''^2] - \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 [\mu'^2 - \mu''^2]}{[\mu'^2 + \mu''^2]^2}$$

(290)

$$= \frac{[1 - \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2] \{ [x^2 + y^4] y - [x^2 - y^2] y' + [\pi x' - y y'] C_0 \}}{C_0 [x^2 + y^2] [x^2 + y^2]} = A$$

$$\frac{[\mathcal{E}'\mu' - \mathcal{E}''\mu''] [\mu'^2 + \mu''^2] + 2 \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \mu' \mu''}{[\mu'^2 + \mu''^2]^2}$$

(291)

$$= \frac{[1 - \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2] \{ [x^2 + y^2] x' - [x^2 + y^2] x + [x y' + x' y] C_0 \}}{C_0 [x^2 + y^2] [x^2 + y^2]} = B$$

Damit stehen für die vier Unbekannten \mathcal{E}' , \mathcal{E}'' , μ' und μ'' diese vier Bestimmungsgleichungen zur Verfügung.

e) Berechnung von \mathcal{E}' , \mathcal{E}'' , μ' und μ''

Zur Berechnung der dielektrischen Größen eignen sich die beiden ersten Gleichungen. Deshalb werde Gleichung (289 p) mit μ'' und Gleichung (289 o) mit μ' multipliziert und addiert:

$$(292) \quad \mathcal{E}' = \frac{L\mu'' + K\mu'}{\mu'^2 + \mu''^2}$$

Zum zweiten werde Gleichung (289 o) mit μ' und Gleichung (289 p) mit μ'' multipliziert und subtrahiert:

$$(293) \quad \mathcal{E}'' = \frac{K\mu'' - L\mu'}{\mu'^2 - \mu''^2}$$

Einführen der Gleichungen (292) und (293) in Gleichung (290) liefert:

$$(294) \quad 2K\mu'\mu'' - L[\mu'^2 - \mu''^2] - \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 [\mu'^2 - \mu''^2] + A[\mu'^2 + \mu''^2]^2$$

Einführen derselben Gleichungen in Gleichung (291) liefert:

$$(295) \quad K[\mu'^2 - \mu''^2] + 2L\mu'\mu'' + 2\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 \mu'\mu'' + B[\mu'^2 + \mu''^2]^2$$

Im weiteren soll Gleichung (294) mit B und Gleichung (295) mit A multipliziert und voneinander subtrahiert werden:

$$(296) \quad 2\mu'\mu'' [KB - AL - A\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2] - [\mu'^2 - \mu''^2] [BL + B\left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2 + KA] - O$$

Jetzt werde Gleichung (294) mit $\left[L + \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2\right]$ und Gleichung (295) mit K multipliziert und voneinander subtrahiert:

$$[\mu'^2 - \mu''^2] \{ -[L + \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2] K^2 - [\mu'^2 + \mu''^2] \{ A[L + \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2] - BK \}$$

$$(297) \text{ oder: } [\mu'^2 - \mu''^2] Q - [\mu'^2 + \mu''^2]^2 P$$

$$(298) \text{ mit: } Q = -[L + \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2] K^2$$

$$(299) \text{ und: } P = A[L + \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right)^2] - BK$$

Gleichung (296) in Form einer quadratischen Gleichung für μ' geschrieben lautet:

$$\mu'^2 [BL + B \left(\frac{\lambda}{2}\right)^2 + KA] - \mu' \mu'' 2 [KB - AL - A \left(\frac{\lambda}{2}\right)^2] - \mu''^2 [BL + B \left(\frac{\lambda}{2}\right)^2 + KA] = 0 \quad (300)$$

Als quadratische Gleichung in klassischer Form erhält man aus Gleichung (300):

$$\mu'^2 + \mu' \frac{\mu'' 2 [AL + A \left(\frac{\lambda}{2}\right)^2 - KB]}{[BL + B \left(\frac{\lambda}{2}\right)^2 + KA]} - \mu''^2 = 0 \quad (301)$$

oder

$$\mu'^2 + \mu' \mu'' M - \mu''^2 = 0 \quad (302)$$

M ist hierin definiert als:

$$M = \frac{2 [A [L + \left(\frac{\lambda}{2}\right)^2] - KB]}{B [L + \left(\frac{\lambda}{2}\right)^2] + KA} = \frac{2P}{B [L + \left(\frac{\lambda}{2}\right)^2] + KA} \quad (303)$$

Als Lösung der Gleichung (302) bietet sich an:

$$\mu' = -\mu'' \frac{M}{2} \pm \sqrt{\mu''^2 \left(\frac{M}{2}\right)^2 + \mu''^2} \quad (304)$$

$$\mu' = \mu'' \left\{ -\frac{M}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{M}{2}\right)^2 + 1} \right\} \quad (305)$$

Die Klammer muß hier ein positives Vorzeichen haben, da $1, \mu''$ positiv ist und 2. für

$$-\infty < M < +\infty \rightarrow \sqrt{\left(\frac{M}{2}\right)^2 + 1} > + \frac{M}{2} \quad \text{ist.} \quad (306)$$

Es wird also:

$$\mu' = \mu'' N \quad (307)$$

mit:

$$N = -\frac{M}{2} + \sqrt{\left(\frac{M}{2}\right)^2 + 1} \quad (308)$$

Gleichung (307) in Gleichung (297) liefert:

$$\mu''^2 = \frac{[N^2 - 1] Q}{[N^2 + 1]^2 P} \quad (309)$$

und endlich:

$$\mu' = \pm \sqrt{\frac{[N^2 - 1] Q}{[N^2 + 1]^2 P}} \quad (310)$$

Zur praktischen Anwendung dieser Rechnung fehlt noch die genaue Bestimmung der Größe I. Die vier Unbekannten ϵ' , ϵ'' , μ' und μ'' nehmen verschiedene Werte an, wenn statt I mit $I + n\pi$ gerechnet wird. Aus physikalischen Überlegungen heraus ist n gleich der Anzahl ganzer Halbwellen in der zu untersuchenden Probe im Hohlleiter.

Die Wellenlänge im mit Medium gefüllten Hohlleiter $\lambda_{\epsilon \mu}$ folgt aus der Beziehung:

$$\frac{\lambda_{\epsilon \mu}^2}{\text{Betrag } z^2} = \frac{\lambda_0^2}{z^2} \quad \text{oder}$$

$$\lambda_{\epsilon \mu}^2 = \frac{\lambda_0^2 \cdot \text{Betrag } z^2}{z^2}$$

Mit der Gleichung (268) und (110) folgt daraus:

$$\lambda_{\epsilon \mu} = \sqrt{\frac{\lambda_0^2 [\mu'^2 + \mu''^2] [1 - \left(\frac{\lambda}{2}\right)^2]}{[\epsilon' \mu' + \epsilon'' \mu''] [\mu'^2 + \mu''^2] - \left(\frac{\lambda}{2}\right)^2 [\mu'^2 - \mu''^2]^2 + [\epsilon' \mu' - \epsilon'' \mu''] [\mu'^2 + \mu''^2] + 2 \left(\frac{\lambda}{2}\right)^2 \mu' \mu''^2}}$$

Mit den für verschiedene $n\pi$ errechneten Werten von ϵ und μ bestimmt sich $\lambda_{\epsilon \mu}$. Nur einer von diesen $\lambda_{\epsilon \mu} / 2$ -Werten paßt n mal in die Länge d der

gefüllten Leitung, womit die richtigen Werte gefunden sind. In der Praxis sollte man sich bemühen, die Größe d so klein zu halten, daß sie für jedes zu erwartende ϵ und μ kleiner als $\lambda_g \epsilon \mu / 2$ ist. Dann ist $n = 0$.

f) Zusammenfassung und Kritik des sechsten Verfahrens

Mit vorliegenden Verfahren lassen sich streng alle vier Materialkonstanten bestimmen. Es wird dabei nach folgendem Schema gearbeitet:

1. Messen von l , m und λ_g

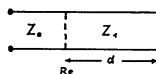


Abbildung 21

2. Messen von l' , m' und λ_g in folgender Kombination:

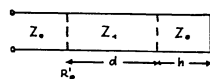


Abbildung 22

3. Berechnung von x und y nach Gleichung (25)
4. Berechnung von x' und y' nach Gleichung (25)
5. Berechnung von λ_0 und C_0 nach Gleichung (115) und (163) bzw. (105)
6. Berechnung von A und B nach Gleichung (295) und (296)
7. Berechnung von D und E nach Gleichung (289c) und (289d)
8. Berechnung von H und I nach Gleichung (289 l) und (289 m)
9. Berechnung von K und L nach Gleichung (289 p) und (289 o)
10. Berechnung von P und Q nach Gleichung (299) und (298)
11. Berechnung von M und N nach Gleichung (303) und (308)
12. Berechnung von μ'' und μ' nach Gleichung (310) und (307)
13. Berechnung von ϵ' und ϵ'' nach Gleichung (293) und (292)

Nach dem Studium der Theorie und der Methodik vorliegender Arbeit zur Messung der magnetischen Konstanten erhebt sich die Frage nach dem sinnvollen Zweck derartiger Messungen. Es herrscht vielerorts die Meinung vor, bei derartig hohen Frequenzen gäbe es kein Material mehr mit meßbarer Permeabilität. Im allgemeinen sind auch die μ -Werte der bekannten Ferrite bis 10 000 MHz verschwunden. Trotzdem soll es nach Angaben von KERSTEN und WIJN Stoffe geben, die im Gebiet der Millimeterwellen noch gyromagnetische Resonanzen zeigen. Im übrigen läßt sich das Verfahren auch bei Verwendung der entsprechenden Hohlleiter noch bei längeren Wellenlängen anwenden, da es in keiner Weise frequenzabhängig ist.

14. Praktisch ausgeführte Messung zum sechsten Verfahren

Probe: CII Hyperox, gemahlen.

Festlegen der beiden Bezugsminima am Leitungsende vor dem Kurzschluß:

$$l_{01} = 0,6472 \text{ cm}; \quad l_{02} = 3,0112 \text{ cm}; \quad \text{Daraus folgt: } \lambda_g/2 = 2,3640 \text{ cm}$$

Die erste Messung liefert in der Kombination nach Abbildung 15:

$$l_1 = 0,4202 \text{ cm}; \quad l_2 = 2,7847 \text{ cm}; \quad m = 27,5 \text{ db}; \quad \lambda_g/2 = 2,3645 \text{ cm}$$

Die zweite Messung liefert in der Kombination nach Abbildung 16:

$$l_1' = 1,1412 \text{ cm}; \quad l_2' = 3,5055 \text{ cm}; \quad m' = 17,2 \text{ db}; \quad \lambda_g/2 = 2,3643 \text{ cm}$$

λ_g ist im Mittel: 4,7285 cm.

Mit $2b = 4,5740$ cm wird nach Gleichung (115) die Luftwellenlänge zu:

$$\lambda_0 = \sqrt{\frac{22,3587 \cdot 20,9245}{43,2802}} = 3,2876 \text{ cm}, \quad \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_g}\right)^2 = 0,5166$$

Die Konstante C_0 nach Gleichung (163) und (114) mit h gleich 2,9440 cm

$$C_0 = \text{tg} \frac{2\pi h}{\lambda_0} = \text{tg} [3,9420 - \pi] = \text{tg} 0,7704 = 0,9704; \quad C_0^2 = 0,9417$$

Die Verschiebung errechnet sich nach Gleichung (2) zu:

$$\xi = \frac{l_2 - l_{02}}{\lambda_g} = \frac{2,7847 - 3,0112}{4,7285} = 0,4520$$

$$\zeta' = \frac{l' - l_{es}}{\lambda_g} = \frac{1,1442 - 0,6472}{4,7285} = 0,1045$$

$$\operatorname{tg} 2\pi \zeta = \operatorname{tg} 2,8400 = -0,3111; \quad \operatorname{tg}^2 2\pi \zeta = 0,09678$$

$$\operatorname{tg} 2\pi \zeta' = \operatorname{tg} 0,6566 = 0,7707; \quad \operatorname{tg}^2 2\pi \zeta' = 0,5940$$

$$m = 27,5 \text{ db} = 23,712; \quad m^2 = 562,26$$

$$m' = 17,2 \text{ db} = 7,2444; \quad m'^2 = 52,481$$

x, x', y und y' berechnen sich nach Gleichung (26) zu:

$$x = \frac{23,712 \cdot 1,09678}{562,26 + 0,097} = 0,04625; \quad x^2 = 0,002139$$

$$x' = \frac{7,2444 \cdot 1,5940}{52,481 + 0,5940} = 0,2176; \quad x'^2 = 0,04735$$

$$y = \frac{-0,3111 \cdot [-561,26]}{562,36} = 0,3105; \quad y^2 = 0,09641$$

$$y' = \frac{0,7707 \cdot [51,481]}{53,075} = -0,7475; \quad y'^2 = 0,5588$$

A und B berechnen sich nach Gleichung (290) und (291):

$$A = \frac{0,4834 \{0,1882 + 0,0737 + 0,2350\}}{0,9704 \cdot 0,09855 \cdot 0,6062} = \frac{0,2402}{0,05797} = 4,1435$$

$$B = \frac{0,4834 \{0,02144 - 0,02804 + 0,03201\}}{0,05797} = 0,2118$$

D und E berechnen sich nach Gleichung (289c) und (289d):

$$D = \frac{-[0,6062] \cdot 0,3105 + 0,9704 [0,04007 - 0,23210] + [0,09427] \cdot 0,7475 + 0,00625}{0,9704 \cdot 0,6062}$$

$$= -0,7953$$

$$E = 0,2601$$

H und I berechnen sich nach Gleichung (289 l) und (289 m):

$$H = \frac{1}{2} \operatorname{ar} \operatorname{tg} \left\{ \frac{2 \sqrt{0,7002} \cdot \cos \left[\frac{1}{2} \operatorname{arc} \operatorname{tg} (-0,3270) \right]}{1 - \sqrt{0,7002}} \right\}$$

$$= 1,1989$$

$$J = \frac{1}{2} \operatorname{arc} \operatorname{tg} \left\{ \frac{1,8296 \sin (-0,1580)}{1 - 0,8368} \right\} = \frac{1}{2} \operatorname{arc} \operatorname{tg} \left\{ \frac{1,8296 \sin (\pi - 0,1580)}{0,1632} \right\}$$

$$= 0,5275$$

Durchgeführt werde die weitere Rechnung für I + 2\pi und d = 2,0370 cm. Dann erhält man für K und L nach Gleichung (289 o) und (289 p):

$$L = \frac{-44,949}{15,156} = -0,5166 = -3,4824$$

$$K = \frac{-16,330}{15,156} = -1,0775$$

Q und P berechnen sich nach Gleichung (289) und (299):

$$Q = -9,9570$$

$$P = -12,517$$

M und N berechnen sich nach Gleichung (303) und (308):

$$M = \frac{-25,034}{-0,6282 + 4,4646} = -6,5254$$

$$N = 3,2627 + \sqrt{41,6452} = 6,6752$$

\mu'' berechnet sich nach Gleichung (310):

$$\mu'' = \sqrt{\frac{43,558 [-9,9570]}{2075,5 [-12,517]}} = 0,1292$$

\mu' berechnet sich nach Gleichung (307):

$$\mu' = 0,8624;$$

$$\operatorname{tg} \delta_{\mu} = \frac{\mu''}{\mu'} = 0,1498$$

ϵ'' berechnet sich nach Gleichung (292):

$$\epsilon'' = \frac{-0,4499 + 0,9292}{0,7606} = 0,6302$$

ϵ' berechnet sich nach Gleichung (293):

$$\epsilon' = \frac{0,4392 + 3,0032}{0,7606} = 4,1315$$

$$\operatorname{tg} \delta_{\epsilon} = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} = 0,1525$$

Wenn man an Stelle von $I + 2\pi$ mit I , $I + \pi$ und $I + 3\pi$ die Rechnung durchführt, ergeben sich für die Unbekannten die Werte in der Tabelle.

	I	$I + \pi$	$I + 2\pi$	$I + 3\pi$
ϵ'	1,5955	2,9190	4,1315	5,5957
ϵ''	-2,1999	0,3724	0,6302	0,7215
$\operatorname{tg} \delta_{\epsilon} \cdot 10^3$	-1,3788	0,1276	0,1525	0,1289
μ'	0,0703	0,4666	0,8624	1,2586
μ''	0,1494	0,1394	0,1292	0,1191
$\operatorname{tg} \delta_{\mu} \cdot 10^3$	2,1240	0,2988	0,1498	0,0946

Wegen der negativen Vorzeichen scheidet die Rechnung für I gleich aus. Für die Halbwellenlänge $\lambda_{\epsilon} \epsilon_{\mu} / 2$ im Medium ergibt sich nach Gleichung (310a) für die Werte der Spalten:

$$I + \pi \rightarrow \lambda_{\epsilon} \epsilon_{\mu} / 2 = 0,7681 \text{ cm}$$

$$I + 2\pi \rightarrow \quad \quad = 0,8072 \text{ cm}$$

$$I + 3\pi \rightarrow \quad \quad = 0,8072 \text{ cm}$$

Für die Probenlänge $d = 2,0370$ cm ist für diese Wellenlänge $n = 2$. Damit fällt die Auswahl eindeutig auf die Werte der Spalte $I + 2\pi$.

Wenn man günstigerweise die Probenlänge in der Größe von wenigen Millimetern gewählt hätte, wären die Ergebnisse der Spalten $I + n\pi$ derart extrem geworden, daß sich eine Überprüfung dieser Werte erübrigt hätte.

15. Die Verhältnisse beim Interferometer

Schon eingangs bei der Besprechung des Interferometers ist auf die gute Verwendungsmöglichkeit bei Millimeterwellen hingewiesen worden. Im folgenden sollen deshalb die beiden geeignetsten unter Abschnitt 9. und 13. angeführten Verfahren für feste Stoffe auch für den freien Raum behandelt werden.

Der Übergang soll mathematisch durchgeführt werden mit Hilfe der Grenzwertbildung:

$$(311) \quad b \rightarrow \infty$$

Dieser Vorgang bedingt die unendliche Ausdehnung der Hohlleiter-Breitseite. Daraus folgt für das auftretende Störglied:

$$(312) \quad \left(\frac{\Delta b}{2b}\right)^2 = 0$$

Die Definitionsgleichungen der Wellenwiderstände, Ausbreitungskonstanten und Phasenmaße nach den Gleichungen (102) bis (112) werden dann zu:

$$(313) \quad z_0^* = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0} = 377 \Omega$$

$$(314) \quad z_1^* = \frac{z_0^* [\mu' - j\mu'']}{\sqrt{[\epsilon' - j\epsilon''] [\mu' - j\mu'']}} = z_0^* \sqrt{\frac{\mu' - j\mu''}{\epsilon' - j\epsilon''}}$$

$$(315) \quad z_1^* = \frac{z_0^*}{\sqrt{\epsilon' - j\epsilon''}}$$

$$(316) \quad z_1^* = \frac{z_0^*}{\sqrt{\epsilon' - j\epsilon''}}$$

$$(317) \quad \beta_1^* = \frac{2\pi}{\lambda_0}$$

(318)
$$\beta_0^+ = \frac{2\pi \sqrt{\epsilon'}}{\lambda_0}$$

(319)
$$\gamma^+ = j \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{[\epsilon' \mu' - \epsilon'' \mu''] - j [\epsilon'' \mu' + \epsilon' \mu'']}$$

(320)
$$\gamma_{\epsilon'}^+ = j \frac{2\pi}{\lambda_0} \sqrt{\epsilon' - j \epsilon''}$$

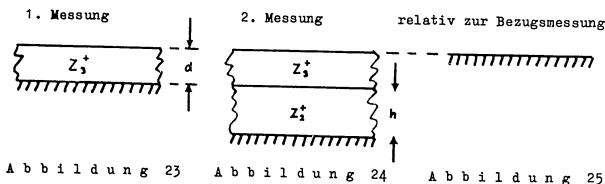
In den Beziehungen (25) bis (27) ändert sich lediglich der Bezugswellenwiderstand in:

(321)
$$R_0 = z_0^+ [x + jy]$$

a) Viertes Meßverfahren in die Quasi-Optik übertragen

Die Darstellung zweier verschiedener Eingangswiderstände einer Leitung, die als Abschlußwiderstände in der Bezugsebene der Meßleitung wirken, muß nun auf gleiche Art im freien Raum geschehen. In der Leitung werden die Proben in Form von kurzen Stücken eingepaßt, hier haben sie die Ausdehnung von Platten. Kurzschlüsse bestehen im freien Raum aus ebenen Metallplatten.

Für einen Aufbau der zu untersuchenden Objekte nach Art der Abbildungen 23, 24 und 25 gelten die aus Gleichung (161) bzw. (166) übergeleiteten Ausdrücke.



(322)
$$\gamma_{\epsilon'}^+ d = \frac{R_0^+}{z_0^+}$$

(323)
$$\gamma_{\epsilon'}^+ d = \frac{j z_2^+ z_1^+ C_1^+ - z_1^+ R_0^+}{j z_1^+ C_1^+ R_0^+ - z_1^+ z_2^+}$$

Anstelle der Ausdrücke z_0 steht hier z_2^+ , da die zu messende Platte mit dem Wellenwiderstand z_2^+ in der zweiten Messung nicht etwa im Abstand h über der Kurzschlußplatte frei schwebt, sondern auf einer Platte mit z_2^+ , deren ϵ' genau bekannt ist (Trolitul), aufliegt. Nach dem Auflösen nach $1/z_2^+$ erhält man auf bekanntem Wege:

(324)
$$\epsilon' = \frac{[x^2 + y^2] y - [x^2 + y^2] y' + C_1^+ [xx' - yy']}{C_1^+ [x^2 + y^2] [x^2 + y^2]}$$

und

(325)
$$\epsilon'' = \frac{[x^2 + y^2] x' - [x^2 + y^2] x + C_1^+ [xy' + x'y]}{C_1^+ [x^2 + y^2] [x^2 + y^2]}$$

mit

(326)
$$C_1^+ = \text{tg} \left\{ \frac{2\pi h}{\lambda_0} \sqrt{\epsilon''} \right\}$$

Für verlustarme Medien gilt:

(327)
$$\epsilon' = \frac{y' - y - C_1^+}{yy' C_1^+}$$

b) Sechstes Meßverfahren in die Quasi-Optik übertragen

Es wird wieder unter den gleichen Voraussetzungen gemessen wie bei festen Dielektrika nach Abschnitt 9. bzw. 15 a). Der Ablauf der mathematischen Entwicklung ist ebenfalls bekannt. Deshalb sollen jetzt nur unter Berücksichtigung der neuen Verhältnisse, die in den Gleichungen (313) bis (321) klargelegt sind, die wesentlichsten Zwischengleichungen gebracht werden. Aus den alten Beziehungen leiten sich folgende neue ab:

(328) (290)
$$\frac{\epsilon' \mu' + \epsilon'' \mu''}{\mu'^2 + \mu''^2} = \frac{[x^2 + y^2] y - [x^2 + y^2] y' + C_1^+ [xx' - yy']}{C_1^+ [x^2 + y^2] [x^2 + y^2]} = A^+$$

(329) (291)
$$\frac{\epsilon'' \mu' - \epsilon' \mu''}{\mu'^2 + \mu''^2} = \frac{[x^2 + y^2] x' - [x^2 + y^2] x + C_1^+ [xy' + x'y]}{C_1^+ [x^2 + y^2] [x^2 + y^2]} = B^+$$

$$(330) \quad (289c) \longrightarrow D^* = \frac{-[x^2+y^2]y + C_0^* [xx'+yy'] - [x^2-y^2]y' + 2xyy'}{C_0^* [x^2+y^2]}$$

$$(330a) \quad (289d) \longrightarrow E^* = \frac{[x^2+y^2]x + C_0^* [xy-xy'] - [x^2-y^2]x' - 2xyy'}{C_0^* [x^2+y^2]}$$

$$(331) \quad (289 l) \longrightarrow H^* = \frac{1}{2} \operatorname{Ar} \operatorname{tg} \left\{ \frac{2\sqrt{D^{*2}+E^{*2}} \cdot \cos \left[\frac{1}{2} \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{E^*}{D^*} \right]}{1 + \sqrt{D^{*2}+E^{*2}}} \right\}$$

$$(332) \quad (289m) \longrightarrow J^* = \frac{1}{2} \operatorname{arc} \operatorname{tg} \left\{ \frac{2\sqrt{D^{*2}+E^{*2}} \cdot \sin \left[\frac{1}{2} \operatorname{arc} \operatorname{tg} \frac{E^*}{D^*} \right]}{1 - \sqrt{D^{*2}+E^{*2}}} \right\}$$

$$(333) \quad (289 o) \longrightarrow \mathcal{E}'\mu^* - \mathcal{E}^*\mu' = \frac{H^{*2}-J^{*2}}{\left(\frac{2\pi d}{\lambda_0}\right)^2} = L^*$$

$$(334) \quad (289 p) \longrightarrow \mathcal{E}'\mu^* + \mathcal{E}^*\mu' = \frac{2H^*J^*}{\left(\frac{2\pi d}{\lambda_0}\right)^2} = K^*$$

$$(335) \quad (299) \longrightarrow P^* = A^*L^* - B^*K^*$$

$$(336) \quad (298) \longrightarrow Q^* = -L^{*2} - K^{*2}$$

$$(337) \quad (303) \longrightarrow M^* = \frac{2P^*}{B^*L^* + K^*A^*}$$

$$(338) \quad (308) \longrightarrow N^* = -\frac{M^*}{2} + \sqrt{\frac{M^{*2}}{4} + 1}$$

$$(339) \quad (310) \longrightarrow \mu^* = \sqrt{\frac{[N^{*2}-1] Q^*}{[N^{*2}+1]^2 P^*}}$$

$$(340) \quad (307) \longrightarrow \mu^* = \mu^* N^*$$

$$(341) \quad (292) \longrightarrow \mathcal{E}^* = \frac{L^*\mu^* + K^*\mu'}{\mu^{*2} + \mu'^2}$$

$$(342) \quad (293) \longrightarrow \mathcal{E}' = \frac{K^*\mu^* - L^*\mu'}{\mu^{*2} + \mu'^2}$$

c) Kritik

Durch die Abwandlung dieser Gleichungen läßt sich nach dem gleichen Schema wie bei den Meßleitungsverfahren die Messung der Materialkonstanten im Interferometer ausführen. Die Auswertarbeit ist durch die Vereinfachung der Einzelausdrücke kleiner geworden, und die Wellenlänge kann, zumindest theoretisch, bis in die Größe der Lichtwellen verkürzt werden. Die Ergebnisse dieser Messungen sind aber mit einem etwas größeren Fehler behaftet als bei der Leitungsmethode. Das ist auf das Einbringen der dielektrischen Abstandsplatte mit dem fehlerbehafteten \mathcal{E}'_w zurückzuführen.

16. Experimentelle Ausführung

a) Technische Probleme

Im zweiten Teil dieser Arbeit sollen nun die zur Messung notwendigen Einrichtungen und Geräte kritisch untersucht, entwickelt und gebaut werden.

Auf einen wesentlichen technischen Nachteil der Mikrowellen-Meßtechnik sei gleich zu Anfang hingewiesen. In der Koaxialtechnik stehen Generatoren und Leitungen zur Verfügung, die sich ohne weiteres über einen Bereich von annähernd zwei Zehnerpotenzen in der Wellenlänge variieren lassen. Diese Tatsache gestattet die Aufnahme des Verlaufs der Materialkonstanten über der Frequenz in einem zusammenhängenden Kurvenzug. Mit derartigen Ergebnissen ist der Praxis natürlich mehr gedient als mit einzelnen diskreten Werten, deren Zusammenhang nicht immer zu übersehen ist. In der Natur der hier Verwendung findenden Reflexklystrons ist aber eine nur in sehr kleinen Grenzen gehaltene Frequenzänderung möglich. Selbst wenn man durch Überlagerung zweier sehr hochfrequenter Klystrons (z.B. 50 000 MHz) eine in größeren Grenzen veränderliche Betriebsfrequenz schaffen würde, wäre doch die Schmalbandigkeit der Leitung nicht zu übersehen. Einen Begriff dieser Abhängigkeit möge der Vergleich der Leiterquerschnitte für zwei Wellenlängen geben:

Zu 10 000 MHz gehört ein Hohlleiterquerschnitt von $1 \times 1/2$ Zoll.
Zu 30 000 MHz gehört ein Hohlleiterquerschnitt von $7/16 \times 1/4$ Zoll.

Insgesamt sind zur Fortleitung der Wellenlängen von 1 bis 3 cm vier genormte verschiedene Leiterquerschnitte notwendig, wenn man nicht Vieldeutigkeiten des Wellentyps und große Leitungsdämpfung in Kauf nehmen will.

Vorgenannte Gründe und die starke Frequenzabhängigkeit einzelner Leitungselemente, wie Richtkoppler und vor allem Anpassungsblenden, lassen von vornherein eine Frequenzvariation nicht zu. Deshalb sind die Meßeinrichtungen nur für zwei die Technik besonders interessierende Wellenlängen ausgelegt worden.

Schon bei ersten Stichversuchen zeigt sich die Empfindlichkeit der Klystrons gegenüber kleinen Änderungen der Betriebsdaten. Geringste Schwankungen der Umgebungstemperatur der Generatorröhren, die schon im Öffnen der Labortüre bzw. Fenster begründet sind, bedingen Amplitudenänderungen bis zu 90 %. Das erscheint auf den ersten Blick kaum möglich, erklärt sich aber aus der hohen Güte der angeregten Hohlraumresonatoren. Wenn die für die Resonanzfrequenz am wesentlichsten verantwortliche Größe, die mechanische Dimension des Resonators, sich über die äußere oder innere Temperatur verändert, fällt die Amplitude über die steile Flanke der Resonanzkurve gleich ab. Negativ wirkt sich zusätzlich noch ein zu

beobachtender thermischer Hysterese-Effekt aus, der das Erreichen der Ausgangsverhältnisse erschwert. Deshalb ist ein Festhalten der Klystrontemperaturen auf ca. $1/10^\circ\text{C}$ in einem Thermostaten mit großer Wärmekapazität durch ein Kontaktthermometer erste Voraussetzung.

b) Gesamtübersicht im Blockschaltbild

Abbildung 26 zeigt das Blockschaltbild des Meßplatzes für beide Frequenzen. Aus finanziellen Gründen sind einige Geräte nur einmal vorhanden, so daß nicht beide Anlagen gleichzeitig benutzt werden können. Zur Umschaltung sind aber nur wenige Handgriffe notwendig.

Ausgehend von einem Quarzgenerator, dessen sinusförmige Amplitude in Rechteckimpulse mit der Folgefrequenz des Quarzes umgewandelt und an Oszillographen überprüft wird, wird die Tastmodulation den beiden Netzteilen zugeführt. Mit den hier erzeugten Betriebsspannungen werden die beiden in einem Thermostaten befindlichen Klystrons (QK 290 für $\lambda_0 = 9$ mm und 723 A/B für $\lambda_0 = 3,2$ cm) gespeist.

Die Auskopplung der HF-Welle erfolgt durch zwei rechteckige Hohlleiter, in deren Verlauf eine sinnvolle Einrichtung die Amplituden auf konstanten Wert regelt. Im weiteren wird über einen Richtkoppler ein Teil der HF-Amplitude auf eine jeweilige kurzgeschlossene Leitung abgezweigt, von welcher über eine Diode ein frequenzabhängiges Signal entnommen und einem Resonanzverstärker zugeführt wird. Mittels dieses Signals wird dann in einer folgenden Schaltung eine die Klystronfrequenz bestimmende Gleichspannung geregelt und über das Netzteil dem Klystron zugeführt.

Der Hauptanteil der auf diese Weise frequenzstabilisierten Mikrowelle läuft jedoch zu einem Hohlleiter-Leistungsteiler, der die Energie 1:1 aufspaltet. Die eine Hälfte liefert über eine Diode ein amplitudenabhängiges Signal zur Steuerung der Einrichtung der Amplitudenregelung. An einem Röhrenvoltmeter kann eine der Amplitude proportionale Spannung abgelesen werden. Die zweite Hälfte wird über eine Uniline mit einer Vorwärtsdämpfung von 3 db und einer Rückwärtsdämpfung von ca. 20 db von der Generator- und Stabilisierungsanlage entkoppelt und der jeweiligen Meßleitung mit dem Prüfobjekt zugeführt. Über die Sonden der Meßleitungen gelangen die Meßsignale wiederum über Vorverstärker, Eichleitung und Quarzfilter zu einem Anzeigegalvanometer.

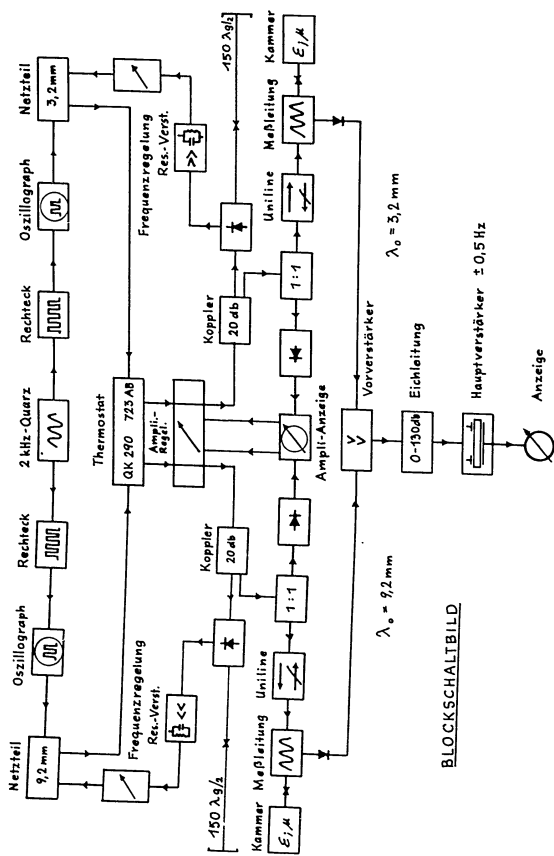


Abbildung 26
Blockschaltbild

c) Klystron-Netzteile

Da auf die zeitliche Konstanz der Einrichtung der allergrößte Wert gelegt werden muß, ist es notwendig, bei der Stromversorgung mit relativ großem Aufwand zu beginnen. Die erste Maßnahme wird bereits netzseitig durch magnetische Spannungskonstanthalter ergriffen, um die in den Laborräumen auftretenden Netzspannungsschwankungen von 190 bis 250 V auf etwa $220 \text{ V} \pm 1\%$ herabzumindern. Alle Betriebsgleichspannungen, wie Anoden-, Reflektor- und Gitterspannungen, werden aus elektronisch-geregelten Hochkonstant-Netzgeräten entnommen, die mit einer Genauigkeit von $\pm 0,1\%$ arbeiten.

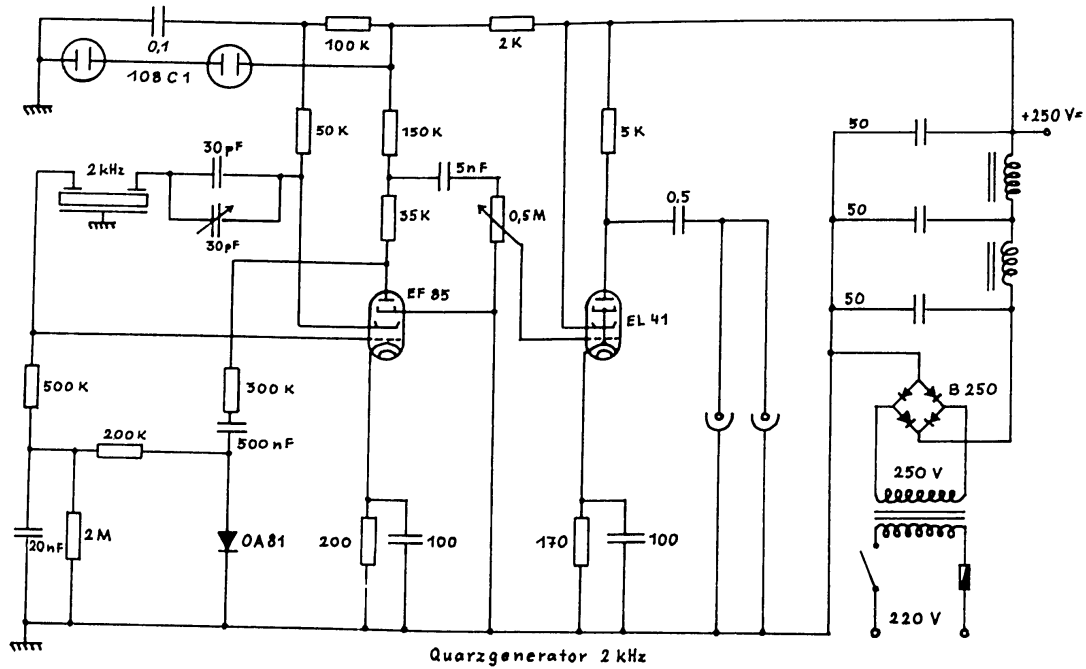
Da aus konstruktiven Gründen der äußere Metallmantel des 9-mm-Klystrons und damit auch der Hohlleiter auf Anodenpotential liegt, muß die Anodenspannung mit dem positiven Pol auf Masse liegen. Die Kathode der QK 290 liegt dann bei normaler Anodenspannung um 2250 V hoch gegen Masse. Die Gitterspannung liegt zwischen -100 V bis -200 V, die Reflektorspannung zwischen -400 V und -700 V. Die beiden letztgenannten Netzgeräte liegen somit bis 5000 V hoch, was einen netzseitigen Anschluß über einen gut isolierten Trenntransformator notwendig macht, da die Gerätetransformatoren diese Spannungsfestigkeit nicht aufweisen. Zur Sicherheit sind alle hochliegenden Geräte zu einer Einheit in Pertinax-Isolierung zusammengefaßt und die Bedienungsknöpfe über Isolierachsen verlängert.

d) Modulation

Um die auf der Meßleitung gewonnenen Signale verstärken zu können, ist für beide Klystrons eine 2-kHz-Modulation eingeführt worden. Die Modulationsfrequenz ist von vorhandenen Quarzen und Filtern bestimmt. Vom Standpunkt der Verstärkertechnik wäre eine höhere Frequenz angebrachter.

Der nach Abbildung 27 gebaute Quarzgenerator liefert eine sinusförmige Ausgangsspannung von ca. 100 V mit einer Mittengenaugigkeit von $2 \text{ kHz} \pm 2 \times 10^{-5} \text{ Hz}$. Mit dieser Spannung wird eine Röhre derart übersteuert, daß die positiven und negativen Halbwellen begrenzt werden und am Außenwiderstand eine für Tastzwecke gut brauchbare Rechteckspannung von ca. 20 V_{SS} abfällt (siehe Abb. 28 und 29, linker Teil). Mit Hilfe einer anschließenden Diodenkombination wird eine der Rechteckhalbwellen abgeschnitten und die verbleibende auf eine zugeführte Reflektorgleich-

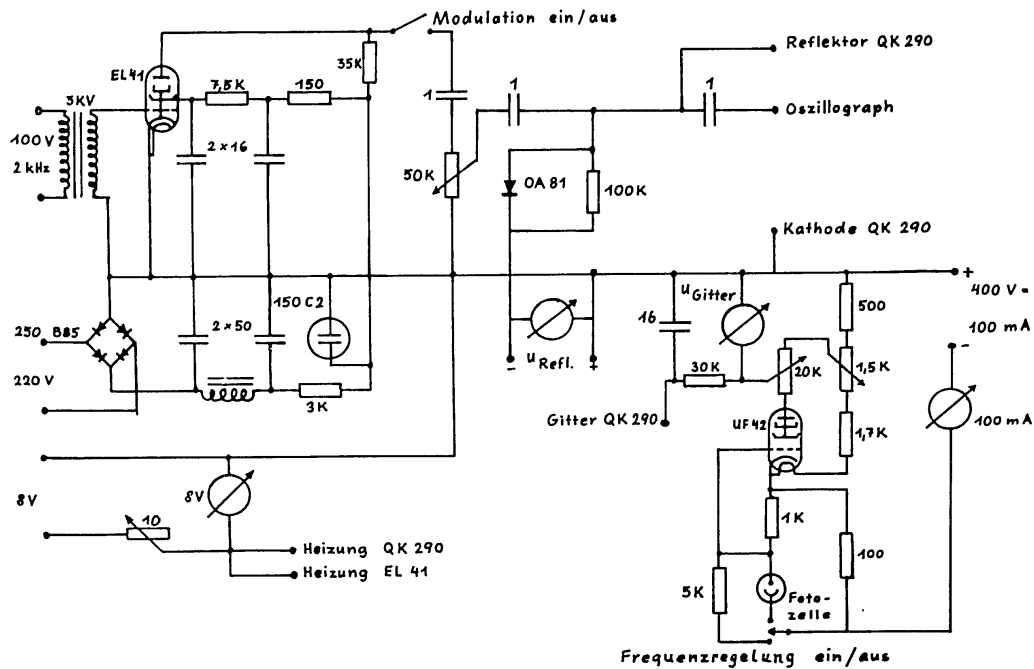
Seite 92



Quarzgenerator 2 kHz

Abbildung 27
Quarzgenerator 2 kHz

Seite 93



Frequenzregelung ein/aus

Abbildung 28
Stromversorgung, Modulation und Regelung für Klystron QK 290, 9,2 mm

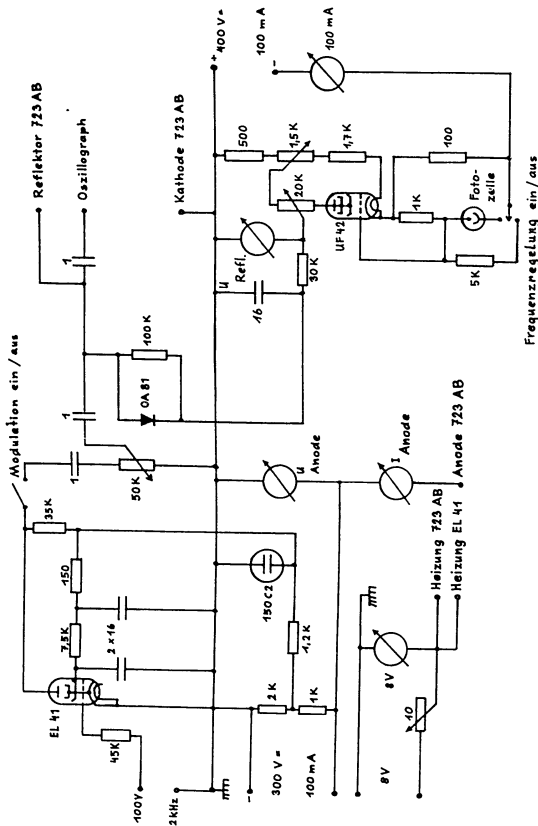


Abbildung 29
Stromversorgung, Modulation und Regelung für Klystron 723 AB, 3,2 cm

spannung aufgesetzt. Diese Gleichspannung wird auf die günstigste Spannung für einen Schwingbereich des Klystrons eingestellt. Im Takt der 2 kHz erhöht sie sich auf einen Wert, der außerhalb des Schwingbereiches liegt, und das Klystron damit abschaltet.

Der Vorteil dieser Tastmodulation liegt darin, daß einmal die frequenzbestimmende Reflektorgleichspannung besser konstant gehalten werden kann als eine additive Modulationsspannung, zum zweiten bei genügender Flankensteilheit der Rechteckimpulse keine Frequenzmodulation auftreten kann, da nur ein bestimmtes schwingungsfähiges Reflektorpotential anliegt.

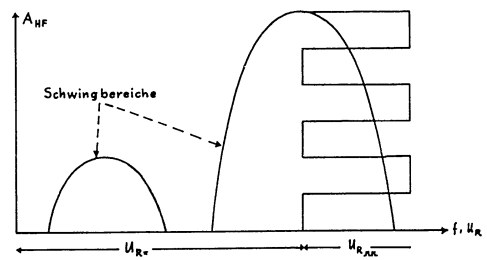


Abbildung 30

An die Rechteckamplitude wird lediglich die Forderung gestellt, einen minimalen Wert nicht zu unterschreiten, nämlich nicht innerhalb des Schwingbereiches zu bleiben (siehe Abb. 30).

Als Nachteil der Modulation allgemein sei angeführt, daß bei einem Tastverhältnis 1:1 die vom Klystron abgegebene Leistung über der Zeit auf die Hälfte erniedrigt wird.

e) Frequenzregelung

Um konkrete Angaben über die Frequenz- und Amplitudenkonstanz zu bekommen, sind diese Größen in Abhängigkeit von den einzelnen Betriebsspannungen

untersucht worden. Eine Darstellung der Verhältnisse für die QK 290 findet sich in Abbildung 31. Man erkennt die starke Amplitudenabhängigkeit der Anodenspannung und die unerwartet hohe Frequenzverschiebung mit der Gitterspannung. Eine Frequenzregelung erfolgt also am besten über die Gitterspannung, zumal da auch die kleinste Amplitudenabhängigkeit vorhanden ist. Beim Klystron für die 3,2-cm-Welle liegen die Verhältnisse bis auf das Fehlen eines Gitters ähnlich. In diesem Falle bleibt keine Wahl; es muß die Reflektorspannung trotz der großen Amplitudenbeeinflussung geregelt werden.

Zur praktischen Durchführung der Frequenzregelung sind neue Gedanken entwickelt worden, die mit einfachen Mitteln schöne Resultate zeigen. Aus der Hauptleitung wird über einen Richtkoppler von 20 db auf eine kurzgeschlossene Leitung ausgekoppelt, so daß sich hier eine stehende Welle ausbildet. Auf der etwa 150sten Flanke einer solchen stehenden Halbwelle ist eine Diode angebracht, die ein moduliertes Signal ganz bestimmter Größe abgibt. Eine Änderung der Wellenlänge um einen gewissen Prozentsatz bedingt ein Verschieben der 150sten Flanke um das 75fache und damit ein stark verändertes Signal an der Diode. Durch eine geeignete Einrichtung wird nun dafür Sorge getragen, daß eine Signaländerung eine Regelung der Gitter- bzw. Reflektorspannung bewirkt, und dadurch die ursprünglichen Verhältnisse an der Diode wieder hergestellt werden. Mit der Länge der Leitung hat man die Möglichkeit, die Empfindlichkeit der Frequenzanzeige und damit des Steuersignals beliebig zu steigern.

Im vorliegenden Falle wird die an der Diode auftretende Steuerspannung über einen Resonanzverstärker auf ein Meßwerk mit einem Lanzenzeiger gegeben, hinter dessen mit einer kleinen Bohrung versehenen Skala eine niederohmige Fotozelle mit ca. 1 mm^2 großer empfindlicher Schicht angebracht ist. Beleuchtet wird diese Zelle durch eine 6-V-Birne mit ca. 25 W, deren Glühfaden mit einer kleinen Linse durch die Bohrung auf die Zelle projiziert wird. Die Betriebsspannung wird, um Störmodulationen zu vermeiden, aus einer gepufferten Batterie entnommen, welche auch noch anderen Zwecken dient. Der Lanzenzeiger deckt entsprechend der Steuerspannung die Bohrung der Skala mehr oder weniger ab und steuert somit über die Helligkeit der Zelle deren Innenwiderstand.

Diese Zelle wiederum sitzt als variabler Widerstand in einem Spannungsteiler (siehe Abb. 28 und 29); der den Anodengleichstrom einer Röhre und

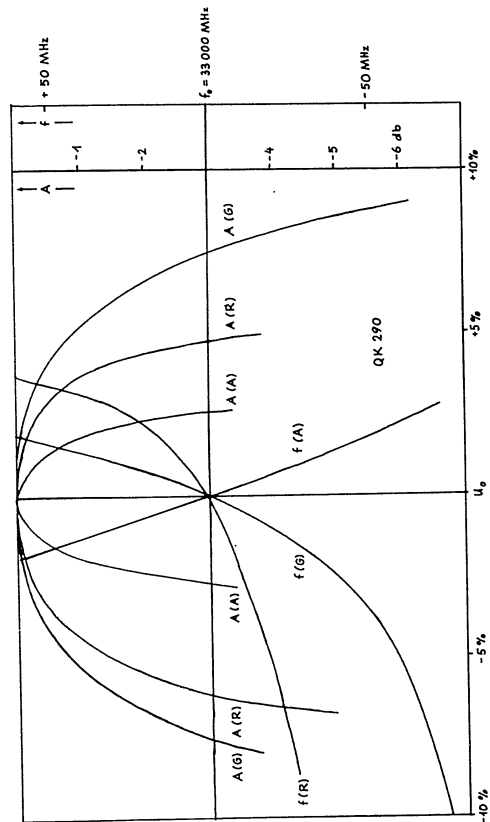


Abbildung 31
 f = Frequenz, A = Amplitude, (R) = Refl.-Spannung, (G) = Gitterspannung, (A) = Anodenspannung

damit die Spannung am Außenwiderstand regelt. Diese dort auftretende Spannung addiert sich zu einer von Hand einzustellenden festen Spannung und liefert die Gitter- bzw. Reflektorspannung für die Klystrons. Mit Hilfe des als Potentiometer ausgebildeten Außenwiderstandes läßt sich die Größe des geregelten Anteils der Frequenzbestimmenden Spannung vorgeben und somit die Regelfähigkeit einstellen.

Eine genaue Angabe der mit dieser Anlage erreichten Frequenzkonstanz stößt auf einige Schwierigkeiten. Die mit der Meßleitung über mehrere Stunden gemessene Leitungswellenlänge variierte um weniger als $\pm 0,0009$ cm bei einem Mittel von $\lambda_g = 4,650$ cm. Daraus abgeleitet erhält man eine Konstanz von besser oder gleich 0,2 pro mille. Da bei der 9-mm-Anlage die Ablesegenauigkeit der Rohrwellenlänge in Längeneinheiten maximal gleich groß ist, kann der mögliche Frequenzfehler entsprechend des Absolutwertes größer sein.

f) Amplitudenregelung

Aus den vorherigen Betrachtungen geht die große Amplitudenabhängigkeit von Schwankungen der Betriebsspannungen hervor. Es besteht die Möglichkeit, durch Verwendung besserer Stabilisatoren und thermischer Sicherung dieser Bezugsspannungsquellen die Spannungskonstanz der elektronisch geregelten Netzgeräte zu verbessern. Versuche haben eine Konstanz von maximal 0,05 % ergeben. Bei Verwendung von guten Batterien läßt sich der Fehler auf 0,01 % verringern.

Es hat aber keinen Sinn, auf dieser Basis etwas für die Konstanz der HF-Amplitude erreichen zu wollen, weil die eingeführte Frequenzregelung doch sehr starke Amplitudenschwankungen mit sich bringt. Außerdem ist für das Funktionieren der Frequenzregelung eine konstante Amplitude Voraussetzung, da die Diode in der Leitung nicht zwischen Potentialschwankungen durch Frequenz oder Amplitude unterscheiden kann. Sie faßt jede Änderung des Normalzustandes als Frequenzänderung auf und handelt dementsprechend. Grundsätzlich muß also eine eingeführte Amplitudenregelung mit kleinerer Zeitkonstante erfolgen als die Frequenzregelung.

Zur Verhinderung gegenseitiger Beeinflussung der beiden Regelvorgänge muß als zweite Forderung ein frequenzunabhängiger Regelauftrag für die Amplitude gefunden werden. Eine weitere Bedingung für die mindestens notwendige einseitige Trennung der beiden Regelungen ist die Konstanzhaltung der

Amplitude, ohne dabei eine Frequenzverschiebung zu bewirken. Wie aus Abbildung 31 hervorgeht, haben aber alle Amplitudenänderungen über irgendwelche Betriebsspannungsvariationen immer Einfluß auf die Wellenlänge, teils direkt, teils aus thermischen Gründen. Deshalb muß auch für diesen Fall eine neue Technik entwickelt werden.

Ein in der Literatur angegebenes Verfahren zu diesem Zweck beruht auf dem FARADAY-Effekt. In den Hohlleiter wird ein zylindrischer Körper aus einem geeigneten Ferrit eingebracht und der dadurch für die durchlaufende Welle bedingte Dämpfungsfaktor wird durch die Feldstärke eines äußeren magnetischen Feldes in weiten Grenzen variiert. Eine nähere Beschreibung des Vorganges möge unterbleiben, da hierauf ausreichend in der Theorie der Uniline-Elemente Bezug genommen wird. Zur Zeitspanne der Arbeit sind derartige gesteuerte Dämpfungsglieder nicht zu beschaffen gewesen, und der Selbstbau scheiterte am Fehlen geeigneter Ferrite. Deshalb ist vom Verfasser ein neuer Weg beschritten worden.

Der lange Zeiger eines sehr empfindlichen Meßwerks ist mit einer etwa 1 mm breiten und 10 mm langen Fahne aus Staniolpapier rechtwinkelig zum Zeiger und parallel zur Skala versehen worden. Diese in der Nähe der Zeigerspitze angebrachte Fahne taucht bei Ausschlag des Meßwerks durch einen Spalt in den jeweilig zu regelnden Hohlleiterquerschnitt in der Mitte der Breitseite ein und stellt einen reinen Blindwiderstand für die Leitung dar. Durch genügende Eintauchtiefe kann er nötigenfalls Kurzschlußcharakter annehmen. Praktisch durchläuft dieser Blindwiderstand über dem Zeigerausschlag auf einer stetigen Kurve alle Werte von Unendlich bis Null. Gesteuert wird dieses Meßwerk mit $10 \mu A$ Vollausschlag bei 5 k Ω Innenwiderstand direkt von einer Diode, die im letzten Maximum vor einem Kurzschluß auf einer Leitung angeordnet ist, welche auf der einen Seite des im Blockschalbild verzeichneten Leistungsteilers 1:1 zu finden ist. Um die Empfindlichkeit der Regelung zu steigern, ist das Meßwerk mit einer Batterie-Gegenspannung kompensiert, ähnlich wie bei Schaltungen zur Gleichspannungsmessung mit unterdrücktem Nullpunkt. Mit Hilfe der Größe dieser Gegenspannung ist auch die Grunddämpfung, d.h. die Eintauchtiefe in der Ruhelage, einstellbar. In der Praxis liegt sie bei 15 db, womit der Regelbereich nach kleinerer Amplitude hin gegeben ist. Eine Amplitudenerhöhung des Klystrons kann die Regelung unbegrenzt abfangen.

Die Forderung nach frequenzunabhängigem Steuersignal für das Meßwerk wird

einmal dadurch schon angenähert erfüllt, daß die Diode im letzten Spannungsmaximum der Leitung angeordnet ist, welches naturgemäß auf Wellenlängenänderungen kaum reagiert. Nahezu völlige Unabhängigkeit ist aber durch die Verwendung eines eigens hierfür entwickelten breitbandigen Kurzschluschiebers erreicht. Durch eine Bohrung in der Mitte der Kurzschlußplatte wird ein dielektrisches Stäbchen parallel zur Ausbreitungsrichtung in den Hohlleiter eingeschoben. Dadurch wird für die Verschiebung der Spannungsminima ein anderer Maßstab erzielt, als er mit metallischem Schieber vorhanden wäre.

Der Vorgang beruht auf der WEISSFLOCHSchen Knotenverschiebungskurve. Wenn hinter einem Vierpol ein Kurzschluß über die Leitungslänge verschoben wird, wandern die Spannungsminima vor dem Vierpol auf einer stufenförmigen Funktion, wie in Abbildung 32 angedeutet.

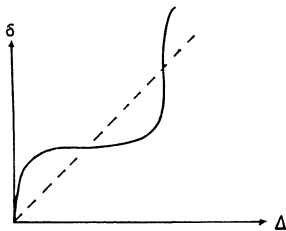


Abbildung 32

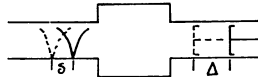


Abbildung 33

Für verlustlose Vierpole lautet sie:

$$\operatorname{tg} \frac{2\pi\delta}{\lambda_g} = k \operatorname{tg} \frac{2\pi\Delta}{\lambda_g}$$

Dadurch wird im Falle des eingeschobenen dielektrischen Stäbchens als Vierpol eine gewisse Breitbandigkeit des Kurzschlusses erreicht, d.h., der Einfluß der Stellung des Schiebers auf die Kurzschlußebene ist in diskreten Bereichen kleiner geworden. Durch die Verluste des Dielektrikums

wird außerdem noch eine Verringerung des Stehwellenverhältnisses erreicht und damit ebenfalls eine größere Frequenzunabhängigkeit. Ein direkter idealer Abschluß dieser Leitung mit dem Wellenwiderstand ist für vorliegenden Fall nicht möglich, da die verringerte Amplitude ein empfindlicheres Meßwerk notwendig machte.

Konstanzmessungen ergeben bei einer Grunddämpfung von 15 db folgendes Bild:

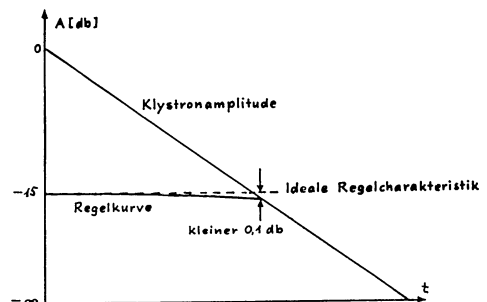


Abbildung 34

Aus der Darstellung ersieht man, daß die Regelkurve von der idealen Form mit steigendem Fehler zum Ende des Regelbereiches hin abweicht. Mit Hilfe einer Eichleitung bestimmt sich ein größter Fehler kleiner als 0,1 db, entsprechend ca. 1 %. Da in der Praxis aber die auftretenden Amplitudenänderungen zumindest über den Ablauf einer Messung wesentlich kleiner als 15 db sind, die Anlage also im linken Teil der Regelkurve arbeitet, dürfte der in Rechnung zu stellende Fehler in der Größenordnung von 0,1 % liegen. Eine genaue Bestimmung dieser kleinen Differenzspannungen bedürfte eines meßtechnisch großen Aufwandes und ist nur schwer möglich.

g) Inbetriebnahme

Beim Einschalten dieser umfangreichen Anlage sind verschiedene Dinge zu beachten. Durch zwei Hauptschalter werden netzseitig zwei magnetische

Spannungskonstanthalter eingeschaltet, die wegen ihrer magnetischen Störfelder von der Anlage örtlich getrennt angeordnet sind. Damit sind alle einzelnen Geräte und die Klystrons fadenmäßig an das geregelte Netz angeschlossen und werden vorgeheizt. Die im Bereich der Anlage befindliche Batterie für die Lichtquellen der Fotozellen und die Kompensationsspannungen wird im gleichen Sinne gepuffert, wie sie belastet wird. Die Oszillographen und der Quarzgenerator sind in Betrieb, und im Thermostaten sorgt ein Heizkörper für schnelles Erreichen der als günstig erkannten Raumtemperatur von 55°C . Schaltrelais und Kontaktthermometer arbeiten ebenfalls.

Nach dieser Netzschalterbetätigung werden an drei Netzgeräten die Gitter- und Reflektorspannungen eingeschaltet und anschließend die beiden Anodenspannungen. Mit Hilfe der vorhandenen insgesamt 20 Meßwerke können die richtigen Betriebsbedingungen überprüft bzw. eingestellt werden. Eine Veränderung der Amplitude des Quarzgenerators gestattet am Oszillographen eine Einstellung des Tastrechteckes 1:1 und nimmt Einfluß auf die Flankensteilheit.

Durch zwei gekennzeichnete Schalter bestimmt sich im folgenden die Inbetriebnahme der 9,3-mm- bzw. 3,2-cm-Anlage. Zuerst wird durch Vergrößern der Kompensationsspannung des Meßwerkes zur Amplitudenregelung der Zeiger mit der daran befindlichen Fahne aus dem jeweiligen Hohlleiter herausgedreht und damit die Regelung ausgeschaltet. Durch Variation der Betriebsspannungen unter Berücksichtigung der Klystron-Grenzdaten kann die am Röhrenvoltmeter sichtbare Amplitude auf ein Maximum eingeregelt werden, alles bei ausgeschalteter Frequenzregelung. Daß die minimale Rechteckamplitude der Modulation nicht unterschritten ist, läßt sich durch Vergrößern der Amplitude feststellen. Es darf dabei keine Änderung der Klystronamplitude auftreten. Durch Verkleinern der Kompensationsspannung und dadurch bedingtes tieferes Eintauchen der Fahne in den Hohlleiter wird die Grunddämpfung eingestellt und ebenfalls am Röhrenvoltmeter an der db-Skala abgelesen.

Vor dem Einschalten der Frequenzregelung ist folgendes zu beachten. Durch den an Stelle der Fotozelle angeordneten Festwiderstand im Spannungsteiler des Steuergitters der Regelröhre fließt in diesem Kreis ein mittlerer Strom, und damit liegt am Klystron die vorher eingestellte optimale Reflektor- bzw. Gitterspannung. An der Diode in der kurzgeschlossenen Leitung

entsteht eine Regelspannung, die vorerst eine nicht näher zu definierende Größe hat. Durch geeignete Einstellung des Verstärkungsgrades des Resonanzverstärkers wird der Lanzaerzeiger des Regelmeßwerkes auf eine Stellung gebracht, daß etwa die Hälfte des kleinen Skalendurchbruches abgedeckt ist.

Bei Betätigung des Schalters zur Frequenzregelung können zwei Fälle auftreten. Entweder rastet der Regelvorgang ein, bzw. man kann ihn durch kleine Änderung des Verstärkungsfaktors eingreifen lassen, oder aber das Meßwerk läuft in eine Extremlage, verbunden mit einer großen Änderung der gesamten Reflektor- oder Gitterspannung. In diesem Fall steht die Diode auf einer falschen Flanke des Stehwellenbildes, und die Regelung wirkt entgegengesetzt. Durch Verändern der Stellung des Kurzschlußschiebers der Leitung müssen dann richtige Bedingungen hergestellt und der Einschaltvorgang muß wiederholt werden.

h) Verstärker mit Quarzfilter

Die Verstärkung der an den Abtastdioden der Meßleitungen anfallenden kleinen Spannungen ist ein recht schwieriges Problem. Von einzelnen Verfassern ist für diese Zwecke sogar ein Überlagerungsempfänger gebaut worden, der natürlich in diesem Fall für den Oszillator praktisch den gleichen Aufwand benötigte, wie er schon einmal für die ganze Anlage vorhanden ist. Aus finanziellen Gründen scheidet diese Möglichkeit von vornherein aus.

Der zweite gangbare Weg ist ein sehr schmaler Filterverstärker^{*)}, der dann auch entsprechend angefertigt worden ist. Da er mit einer Eichleitung von 0 bis 150 db zusammenarbeiten soll, ist der Verstärker in zwei Bauelementen ausgelegt worden. Der Vorverstärker hat den Zweck, eine Anpassung zwischen der Diodenimpedanz und der Eingangsimpedanz der Eichleitung herbeizuführen. Die Größe des Diodenwiderstandes ist von mehreren Faktoren abhängig. Einmal ist er von Diode zu Diode im gleichen Typ recht verschieden, eine Tatsache, die aus dem komplizierten Mechanismus der Halbleiter und der Halbleiterkontakte heraus erklärlich ist. Außerdem ist die Impedanz eine nicht über den ganzen Bereich geklärte Funktion des Diodenstromes. Messungen und Abschätzungen im interessierenden Bereich lassen Werte zwischen maximal 4 k Ω und minimal 1 k Ω erwarten. Die minimal zu erwartenden Spannungen liegen etwa bei 10^{-6} V.

^{*)} Der Vorschlag stammt aus unveröffentlichten Arbeiten über eine Ausbreitungsstrecke von Dr. W. FOYG

Aus dem Schaltbild des Vor- und Hauptverstärkers nach Abbildung 35 geht hervor, daß die wahlweisen Eingänge für die beiden Meßleitungen auf einen Eingangstransformator mit dem Übersetzungsverhältnis 1:25 geschaltet sind. Bei einer Widerstandsübersetzung von entsprechend 1:625 liegt das Gitter des ersten Triodensystems über maximal 2,5 MΩ an Masse. Die erste Stufe liefert in vorliegender Schaltung eine Spannungsverstärkung von $g = 29$. Im zweiten Triodensystem wird ein Kathodenverstärker wirksam, der einen Ausgangswiderstand von ca. 600 Ω hat und damit dem Eingangswiderstand der Eichleitung angepaßt ist. Zur Berechnung dienen folgende eingestellte bzw. den Röhrenkennlinien entnommene Werte:

1. Stufe:

- $\mu = 66$
- $R_a = 10 \text{ k}\Omega$
- $R_i = 11 \text{ k}\Omega$

Die Verstärkung:

$$g = \mu \frac{R_o}{R_i + R_o} = 29$$

2. Stufe:

- $\mu = 46$
- $U_R = 200 \text{ V}$
- $I_a = 1,45 \text{ mA}$
- $-U_g = 3,55 \text{ V}$
- $R_i = 29 \text{ k}\Omega$
- $S = 1,55 \text{ mA/V}$
- $R_k = 10 \text{ k}\Omega$

Daraus erhält man für den Ausgangswiderstand:

$$R_{aus} = \frac{R_k}{1 + S R_k \left[\frac{\mu + 1}{\mu} \right]} = 596 \Omega$$

Die Verstärkung:

$$g = \frac{R_k \cdot S}{1 + S R_k \left[\frac{\mu + 1}{\mu} \right]} = 0,87$$

Die gesamte Spannungsverstärkung des Vorverstärkers ist damit:

$$29 \cdot 0,87 = 25,33$$

Aus zu erwartenden Spannungen der Größenordnung $U_{min} = 10^{-8} \text{ V}$ und $U_{max} = 10^{-4} \text{ V}$ werden somit Spannungen zwischen $6 \times 10^{-6} \text{ V}$ und $6 \times 10^{-2} \text{ V}$. Diese Spannungen werden nun über die nachfolgende Eichleitung auf den 600-Ω-Eingang des Hauptverstärkers übertragen. Dieser 600-Ω-Eingang ist notwendig, um die Genauigkeitsbedingung der unsymmetrischen Eichleitung zu erfüllen. In der ersten Pentodenstufe erfolgt eine weitere 180fache Verstärkung des Signals. Wie aus dem Schaltbild hervorgeht, ist nun anschließend das Quarzfilter mit einer Bandbreite von 0,5 Hz

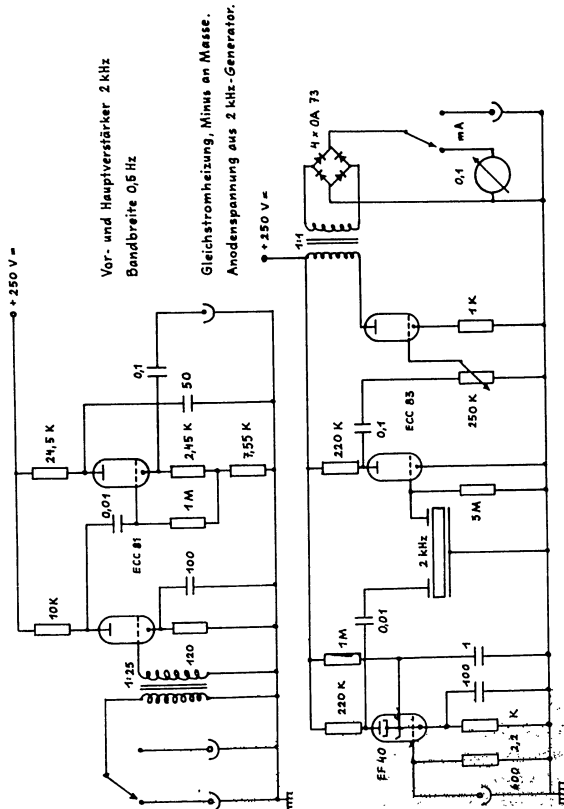


Abbildung 35

eingeschaltet. Anschließend folgen noch zwei Triodenstufen. Ursprünglich war vorgesehen, das Filter mit einer Grunddämpfung in Bandmitte von ca. 15 db vor die letzte Stufe zu setzen, um möglichst brummfrei arbeiten zu können. Da die maximal verträgliche Eingangsspannung aber mit 5 V angegeben ist, und bei einer Gesamtverstärkung von $7,5 \times 10^6$ der ersten vier Stufen dem Filter durchaus gefährliche Brummspannungen auftreten können, ist es eine Stufe vorgesetzt worden.

Über den vorgeschriebenen Abschluß von $3 \text{ M}\Omega$ geht es nun auf eine Doppeltriode, deren erstes System eine Verstärkung von $g = 66$ bringt. Die Endstufe arbeitet über einen Regler auf einen Ausgangsübertrager 1:1 mit nachfolgender Dioden-Grätz-Gleichrichtung. Der Verstärkerausgang kann wahlweise zur Groborientierung auf ein Meßwerk $0,1 \text{ mA}$ oder zur Messung auf ein Galvanometer mit der Empfindlichkeit $4 \times 10^{-9} \text{ A/Skt.}$ bei $9,5 \text{ k}\Omega$ Innenwiderstand geschaltet werden.

Um ein möglichst störungsfreies Arbeiten bei einer Gesamtverstärkung von $0,5 \times 10^8$ zu erreichen, ist neben der allerbesten Siebung der Betriebsspannungen und Heizung der Röhren aus einer sowieso vorhandenen Batterie vor allem der Eingangsübertrager zu beachten. Im vorliegenden Fall handelt es sich um einen Mikrofontransformator mit 5facher Abschirmung aus je drei geschachtelten Kästen aus 1 mm starkem Hyperm 766 und je zwei Kupferschirmungen. Wesentlichen Einfluß auf die Größe der Brummspannung haben auch die Erdungsverhältnisse. Die Erdung einer Sammelleitung an einem Punkt bringt die besten Erfolge. Mit diesen Maßnahmen ist es gelungen, die Ausgangsbrumm- und Rauschspannung bei offenem Eingang auf ca. $1/2 \text{ mV}$ herabzusetzen. Wichtig zum Schutz des Filters vor Überspannungen ist die Anzeige einer maximalen Eingangsspannung des Hauptverstärkers. Eine passende Markierung des Ausgangsmeßwerkes kann dafür Sorge tragen.

Zum praktischen Meßbetrieb wird wie folgt verfahren: Durch den Eingangsschalter wird die Diode der gewünschten Meßleitung angeschlossen, wobei die Eichleitung vorsichtshalber auf großen Werten steht. Durch langsames Verkleinern der Leitungsdämpfung und Verschieben des Schlittens der Meßleitung wird der Ort des Feldstärkeminimums gesucht. Die Größe U_{min} soll durch geeignete Einstellung mindestens noch einige Skalenteile betragen. Bei anschließender Einstellung der Meßleitung auf U_{max} und Einregeln des Skalenausschlags auf den alten Wert ergibt die Differenz der

beiden Dämpfungswerte das Stehwellenverhältnis in Dezibel. In der erstellten Anordnung läßt sich ein maximales Stehwellenverhältnis von $m = 80 \text{ db} = 10^4$ gerade noch auflösen.

i) Meßleitungen und Meßkammern

Bei den zur Verfügung stehenden Meßleitungen handelt es sich um amerikanische Fabrikate. Die Leitung für das 3-cm-Band stammt von der Firma Sperry Gyroscope Company, derweil die 1-cm-Leitung von der Polytechnic Research and Development Company geliefert ist. Beide Leitungen hatten zur Ablesung der Maxima und Minima lediglich einen einfachen Nonius, der jeweils durch eine Meßuhr von 50 mm bzw. 30 mm Länge mit einer Feineinteilung von $1/100 \text{ mm}$ ersetzt worden ist. Damit ist die Möglichkeit zur sauberen Schätzung auf $0,0003 \text{ cm}$ geschaffen.

Prinzipielle Untersuchungen an einer schlechten Meßleitung im X-Band, die wegen ihrer ausgeprägten Fehler eine besonders deutliche Abhängigkeit von den Betriebsbedingungen zeigte, sind in ihrem Ergebnis in Abbildung 36 dargestellt. Als Fehler definiert ist die Abweichung von einer sinusförmigen Feldverteilung, insofern, als innerhalb einer Halbwelle der Quotient aus erster und zweiter Viertelwellenlänge sich von 1 unterscheidet. Als Parameter sind die Eintauchtiefe der Sonde, die Entkopplung der Meßleitung vom Generator und der Meßort auf der Leitung eingeführt. Als Ergebnis erhält man schließlich, daß die Eintauchtiefe möglichst klein, die Entkopplung möglichst groß sein sollte.

Gemessen würde außerdem von diesem Standpunkt besser auf der Generatorseite der Leitung, trotzdem ist die Lastseite günstiger. Die Erklärung zu dieser Behauptung liegt darin begründet, daß jede Längenmessung mit einem gewissen Fehler behaftet ist, der sich bei Messungen in größerem Abstand vom Meßobjekt mit der Anzahl der dazwischen liegenden Halbwellen multipliziert. Deshalb empfiehlt sich zur Messung das letzte Spannungsminimum der Leitung vor der Eingangsfläche des Abschlußwiderstandes.

Die Präzision der käuflichen Hohlleiterrohre und Flansche für die 3-cm-Welle, die in eigener Regie zu den benötigten Einzelelementen zusammengebaut sind, ist entsprechend der Meßgenauigkeit allgemein genügend. Es muß zwar für genaues Einpassen der Hohlleiter in die Flansche gesorgt werden, damit sich trotz gleichmäßiger in Lehren gehobelter und gestoßener Flansche an den Übergangsstellen keine Blendwirkung durch dezentrischen Sitz einstellt.

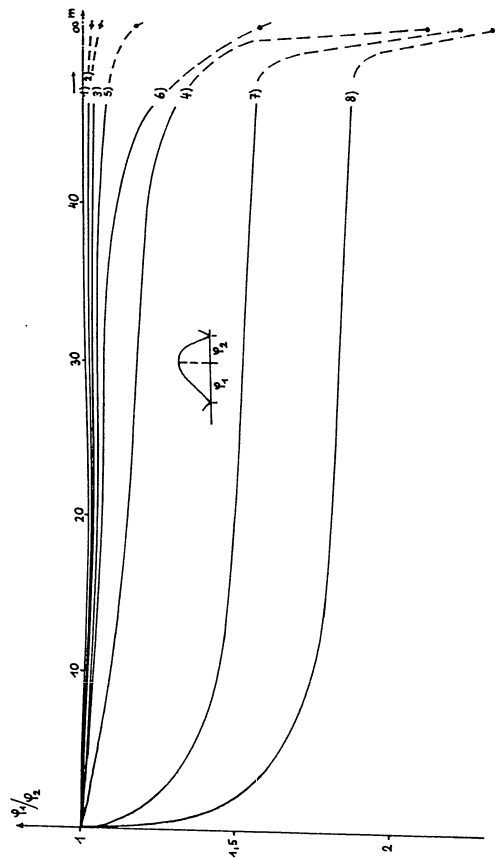


Abbildung 36

Parameter: Eintauchtiefe A = 2,5 mm B = 7 mm
 Entkopplung C = 40 db D = 0 db
 Meßort E = Senderseite F = Lastseite
 1) ACE 5) BGE
 2) ACF 6) BGF
 3) ADE 7) BDE
 4) ADF 8) BDF

Unter Beachtung dieser Gesichtspunkte ist es gelungen, das Zusammenarbeiten aller einzelnen angefertigten Bauelemente aus den 3-cm-Hohlleitern mit Fehlern zu ermöglichen, die unterhalb der Meßgenauigkeit liegen, zumal wirkliche Präzision nur verlangt wird von der Meßleitung und den Meßkammern bzw. der Leitung, die die Probe aufnimmt und den Abschlußwiderstand darstellt.

Wesentlich schlechter liegen die Verhältnisse bei der 1-cm-Leitung. Hier sind die Querschnittsschwankungen relativ zum kleineren Querschnitt und auch absolut betrachtet viel größer. Die üblichen genormten amerikanischen Flansche gestatten es nicht, reproduzierbare Verhältnisse an den Übergangsstellen zu realisieren, geschweige denn einen stoßstellenfreien Übergang zu schaffen. Aus diesem Grunde mußten die Hohlleiter und Flansche nach eigener Konstruktion hergestellt werden. Ausgehend von massivem Rundmaterial aus Messing, welches der Länge nach aufgeschnitten und vorgefräst wurde, entstanden die rechteckigen Leitungsquerschnitte. Nun wurden die beiden Teile hart aufeinander gelötet, abgedreht und in ein genau zentriertes Stahlrohr eingepaßt. Der endgültige Leitungsquerschnitt wurde durch Stoßen mit drei gestuften Räumahlen aus gehärtetem Stahl eingestellt. Die neuen Flansche mit wesentlich größeren Zentrierzapfen gestatten jetzt ein recht genaues Arbeiten. Trotz Nachbehandlung der Meßleitung mit den Räumahlen und Verkürzen des Leitungstückes zwischen Sonde und Abschluß, bestehen bleibt immer noch ein Meßabstand von ca. 1 1/2 Wellenlängen, und es existieren immer noch Schwankungen des Wellenwiderstandes über der Meßleitungslänge. Da im rechteckigen Hohlleiter die Wellenlänge nach Gleichung (114) vom Wellenwiderstand abhängt, sind also die Ergebnisse der Wellenlängenmessung eine Funktion des Ortes, ein untragbarer Zustand. Zurückzuführen ist das auf die sehr ungeeignete Ausführung des Schlitzes, der wegen seiner Breite allein einer Berücksichtigung bedarf. Schon erste Übersichtsmessungen forderten das Einführen eines geeigneten Korrekturfaktors für alle Längenmessungen.

In der Praxis ist diese Korrekturkurve gefunden worden durch eine systematische Meßreihe. An die Meßleitung, deren Meßlänge etwa 15 mm beträgt, wurde ein Stück erstklassigen Hohlleiters angeflanscht und hinten kurzgeschlossen. Der Kurzschluß wurde durch das konstante Haftvermögen eines geschliffenen Magneten reproduzierbar dargestellt. Durch halbmillimeterweises Abschleifen der Leitungslänge und genauer Längenkontrolle mittels

Meßuhr wurde der Gang des Spannungsextremums über den ganzen Meßbereich verfolgt und graphisch aufgetragen (siehe Abb. 37).

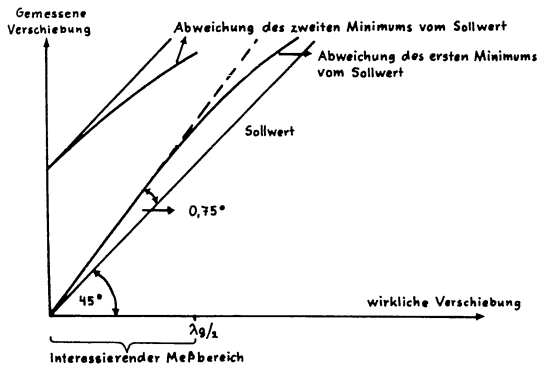


Abbildung 37

Aus Maßstabsschwierigkeiten sei hier nur eine Skizze der Verhältnisse gebracht, aus der man aber die unbedingte Notwendigkeit der Korrektur erkennt, die in größerem Maßstab gezeichnet annehmbare Ergebnisse bringt. Zur Auswertung einer Messung wird also der Ort des gemessenen Minimums über die Kurve auf den wirklichen Ort gespiegelt und dieser neue Wert der Rechnung zugrunde gelegt.

In den Diodenmounts der beiden Meßleitungen finden als Dioden die Silizium-Typen DS 35 für die 3-cm-Welle und die Type IN 26 für 1-cm-Wellenlänge Verwendung. Die Temperaturkoeffizienten der Dioden finden wegen der Kürze der Messung keine Berücksichtigung.

17. Fehlerrechnungen

Die Fehlerrechnung erfolgt auf dem Wege der Bildung des vollständigen Differentials. Die Funktion sei:

$$f = f(x + \Delta x; y + \Delta y; z + \Delta z)$$

Dann ist der Fehler:

$$(343) \quad \Delta f = \left| \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial y} \Delta y \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial z} \Delta z \right|$$

Die Fehler der Grundgrößen müssen aus Genauigkeitsüberlegungen angegeben werden. Sie seien vorerst nur mit Symbolen bezeichnet.

$$(344) \quad \begin{array}{ll} 2b \rightarrow 2b + \Delta 2b & \lambda g \rightarrow \lambda g + \Delta \lambda g \\ h \rightarrow h + \Delta h & m \rightarrow m + \Delta m \\ d \rightarrow d + \Delta d & l \rightarrow l + \Delta l \end{array}$$

Es ist hier darauf verzichtet, die langen Ableitungen jeder einzelnen Fehlergleichung zu bringen. Es seien nur die Fehler der Endgleichungen und die Fehler aller in den Endgleichungen auftretenden Größen gebracht. Ein Beispiel sei der Vollständigkeit halber durchgerechnet.

Nach Gleichung (115) gilt:

$$(345) \quad \lambda_* = \sqrt{\frac{\lambda g^2 \cdot (2b)^2}{\lambda g^2 + (2b)^2}} + \Delta \lambda_*$$

Der Fehler errechnet sich zu:

$$(346) \quad \Delta \lambda_* = \left| \frac{\partial \lambda_*}{\partial \lambda g} \Delta \lambda g \right| + \left| \frac{\partial \lambda_*}{\partial (2b)} \Delta 2b \right|$$

$$(347) \quad \begin{aligned} \Delta \lambda_* &= \left| \frac{1}{2} \left(\frac{\lambda g^2 \cdot (2b)^2}{\lambda g^2 + (2b)^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \frac{[\lambda g^2 + (2b)^2] 2 \lambda g (2b)^2 - [\lambda g^2 (2b)^2] 2 \lambda g}{[\lambda g^2 + (2b)^2]^2} \right| \Delta \lambda g \\ &+ \left| \frac{1}{2} \left(\frac{\lambda g^2 \cdot (2b)^2}{\lambda g^2 + (2b)^2} \right)^{-\frac{1}{2}} \frac{[\lambda g^2 + (2b)^2] 2 \lambda g^2 (2b) - [\lambda g^2 (2b)^2] 2 (2b)}{[\lambda g^2 + (2b)^2]^2} \right| \Delta 2b \\ &= \left| \frac{\lambda g 2b [(2b)^2 \Delta \lambda g + \lambda g^2 \Delta 2b]}{\lambda_* [\lambda g^2 + (2b)^2]^2} \right| = \Delta \lambda_* \end{aligned}$$

$$(348) \quad \Delta \left(\frac{\lambda_e}{2b} \right)^2 = \left| \frac{2 \lambda_e [2b \Delta \lambda_e + \lambda_e \Delta 2b]}{(2b)^3} \right|$$

Δy_{Blind} für verlustlose Dielektrika nach Gleichung (27):

$$(349) \quad \Delta y_{\text{Blind}} = \left| \frac{\frac{2\pi}{\lambda_e} \left[\Delta l + \frac{l}{\lambda_e} \Delta \lambda_g \right]}{\cos^2 \left\{ \frac{2\pi h}{\lambda_g} \right\}} \right|$$

ΔC_0 nach Gleichung (165) und (105):

$$(350) \quad \Delta C_0 = \left| \frac{\frac{2\pi}{\lambda_e} \left[\Delta h + \frac{h}{\lambda_e} \Delta \lambda_g \right]}{\cos^2 \left\{ \frac{2\pi h}{\lambda_g} \right\}} \right|$$

Das $\Delta \mathcal{E}'$ für verlustarme feste Dielektrika nach Gleichung (177) beträgt:

$$\Delta \mathcal{E}' = \left| \frac{-[1 - (\frac{\lambda_e}{2b})^2] - [\mathcal{E}' - (\frac{\lambda_e}{2b})^2] y_e C_0}{y_e y_e C_0} \Delta y_e + \left| \frac{[1 - (\frac{\lambda_e}{2b})^2] - [\mathcal{E}' - (\frac{\lambda_e}{2b})^2] y_e C_0}{y_e y_e C_0} \right| \Delta y_e' + \right.$$

(351)

$$\left. + \left| \frac{-[1 - (\frac{\lambda_e}{2b})^2] - [\mathcal{E}' - (\frac{\lambda_e}{2b})^2] y_e y_e'}{y_e y_e' C_0} \right| \Delta C_0 + \left| 1 - \frac{\mathcal{E}' - (\frac{\lambda_e}{2b})^2}{1 - (\frac{\lambda_e}{2b})^2} \right| \Delta \left(\frac{\lambda_e}{2b} \right)^2 \right.$$

Δx und Δy allgemein nach Gleichung (25):

$$(352) \quad \Delta x = \left| \frac{[1 + y_e^2 - 2mx] \Delta m + [2y_e [x - m] \Delta y_e}{m^2 + y_e^2} \right|$$

$$(353) \quad \Delta y = \left| \frac{[2m [y_e - y] \Delta m + [1 - m^2 + 2y y_e] \Delta y_e}{m^2 + y_e^2} \right|$$

$\Delta x'$ und $\Delta y'$ folgen aus den entsprechenden Gleichungen.

Nun werde der Fehler $\Delta \mathcal{E}'$ für allgemeine verlustbehaftete Dielektrika nach Gleichung (173) und $\Delta \mathcal{E}''$ nach Gleichung (174) angegeben:

$$\Delta \mathcal{E}' = \frac{[1 - (\frac{\lambda_e}{2b})^2] \{ [x^2 + y^2] - y' [C_0 + 2y] \} - 2C_0 K' y [x^2 + y^2]}{C_0 [x^2 + y^2] [x^2 + y^2]} \Delta y_e +$$

$$+ \frac{[1 - (\frac{\lambda_e}{2b})^2] \{ -[x^2 + y^2] - y [C_0 - 2y] \} - 2C_0 K' y' [x^2 + y^2]}{\text{Nenner}} \Delta y_e' +$$

$$(354) \quad + \frac{[1 - (\frac{\lambda_e}{2b})^2] \{ -2xy' + C_0 x' \} - 2C_0 K' x [x^2 + y^2]}{\text{Nenner}} \Delta x +$$

$$+ \frac{[1 - (\frac{\lambda_e}{2b})^2] \{ 2xy + C_0 x \} - 2C_0 K' x' [x^2 + y^2]}{\text{Nenner}} \Delta x' +$$

$$+ \frac{[1 - (\frac{\lambda_e}{2b})^2] \{ [xx' - yy'] - [x^2 + y^2] [x^2 + y^2] K' \} \Delta C_0}{\text{Nenner}} + \left| 1 - \frac{K'}{1 - (\frac{\lambda_e}{2b})^2} \right| \Delta \left(\frac{\lambda_e}{2b} \right)^2$$

(355) Darin bedeutet:

$$K' = \mathcal{E}' - \left(\frac{\lambda_e}{2b} \right)^2$$

$$\Delta \mathcal{E}'' = \frac{[1 - (\frac{\lambda_e}{2b})^2] \{ C_0 + 2y \} x' - 2C_0 \mathcal{E}'' y [x^2 + y^2]}{C_0 [x^2 + y^2] [x^2 + y^2]} \Delta y_e +$$

$$+ \frac{[1 - (\frac{\lambda_e}{2b})^2] \{ C_0 - 2y \} x - 2C_0 \mathcal{E}'' y' [x^2 + y^2]}{\text{Nenner}} \Delta y_e' +$$

$$(356) \quad + \frac{[1 - (\frac{\lambda_e}{2b})^2] \{ C_0 y' + 2xx' - [x^2 + y^2] \} - 2C_0 \mathcal{E}'' x [x^2 + y^2]}{\text{Nenner}} \Delta x +$$

$$+ \frac{[1 - (\frac{\lambda_e}{2b})^2] \{ C_0 y - 2xx' + [x^2 + y^2] \} - 2C_0 \mathcal{E}'' x' [x^2 + y^2]}{\text{Nenner}} \Delta x' +$$

$$+ \frac{[1 - (\frac{\lambda_e}{2b})^2] \{ [xy' + x'y] - [x^2 + y^2] [x^2 + y^2] \mathcal{E}'' \} \Delta C_0}{\text{Nenner}} + \left| \frac{-\mathcal{E}''}{1 - (\frac{\lambda_e}{2b})^2} \right| \Delta \left(\frac{\lambda_e}{2b} \right)^2$$

Damit sind die maximalen Fehler bei der Messung von festen Dielektrika bestimmt.

Zur Bestimmung des Fehlers flüssiger Dielektrika muß zuerst die Ungenauigkeit des ϵ'_w der Wandung festgelegt werden:

$$(357) \quad \epsilon'_w \rightarrow \epsilon'_w + \Delta \epsilon'_w$$

Ebenso müssen die Fehler der Konstanten C_1 und C_{42} bestimmt werden:

$$(358) \quad \Delta C_{1w} = \frac{\frac{\pi}{2} \sqrt{\epsilon'_w - \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^2} \left\{ \left| \Delta h \right| + \left| \frac{h}{x} \Delta \lambda_1 \right| \right\} + \lambda_1 \sqrt{\epsilon'_w - \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^2} \left\{ \left| \Delta \epsilon'_w \right| + \left| \Delta \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^2 \right| \right\}}{\cos^2 \left\{ \frac{\pi h}{\lambda_1} \sqrt{\epsilon'_w - \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^2} \right\}}$$

$$(359) \quad \Delta C_{42} = \left| \frac{[\epsilon'_w - 1] \Delta \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^2 + [1 - \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^2] \Delta \epsilon'_w}{2 C_{42} [1 - \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^2]^2} \right|$$

Das $\Delta \epsilon'$ und $\Delta \epsilon''$ für Flüssigkeiten folgt aus der partiellen Ableitung der Gleichung (266):

$$(360) \quad \Delta \epsilon' = \left| \frac{\partial \epsilon'}{\partial y} \Delta y \right| + \left| \frac{\partial \epsilon'}{\partial y'} \Delta y' \right| + \left| \frac{\partial \epsilon'}{\partial x} \Delta x \right| + \left| \frac{\partial \epsilon'}{\partial x'} \Delta x' \right| + \left| \frac{\partial \epsilon'}{\partial C_1} \Delta C_1 \right| + \left| \frac{\partial \epsilon'}{\partial C_{42}} \Delta C_{42} \right| + \left| \frac{\partial \epsilon'}{\partial \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^2} \Delta \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^2 \right|$$

$$(361) \quad \Delta \epsilon'' = \left| \frac{\partial \epsilon''}{\partial y} \Delta y \right| + \left| \frac{\partial \epsilon''}{\partial y'} \Delta y' \right| + \left| \frac{\partial \epsilon''}{\partial x} \Delta x \right| + \left| \frac{\partial \epsilon''}{\partial x'} \Delta x' \right| + \left| \frac{\partial \epsilon''}{\partial C_1} \Delta C_1 \right| + \left| \frac{\partial \epsilon''}{\partial C_{42}} \Delta C_{42} \right| + \left| \frac{\partial \epsilon''}{\partial \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^2} \Delta \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^2 \right|$$

Wegen der unhandlichen Länge der Gleichungen sei hier nur der Rechnungsweg angegeben. Die Erfassung des Fehlers des ersten Faktors $\left[\epsilon'_w - \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^2 \right]$ erfolge in der partiellen Ableitung nach C_{42} , weil:

$$(362) \quad \epsilon'_w - \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^2 = C_{42} [1 - \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^2]$$

Für die Fehlerrechnung zum sechsten Verfahren müssen erst die Fehler der Größen A bis Q angegeben werden.

ΔA nach Gleichung (250): Das ΔA ist bis auf das letzte Glied dem $\Delta \epsilon'$ Gleichung (354) gleich. Dieses Glied muß heißen:

$$(363) \quad + \left| \frac{-A}{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^2} \right| \Delta \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^2$$

Damit wird:

$$(364) \quad \Delta A = \left| \Delta \epsilon' (354) \right| + \left| 1 - \frac{K'}{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^2} \right| \Delta \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^2 + \left| \frac{-A}{1 - \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^2} \right| \Delta \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^2$$

$$(365) \quad \Delta B = \Delta \epsilon'' (356)$$

ΔD und ΔE erhält man aus Gleichung (289c) und (289d):

$$(366) \quad \Delta D = \frac{|C_x x' + 2[x'y - xy']| \Delta x + |C_x x + 2y[x-x'] - 2x'C_x D| \Delta x' + |C_y y' + 2[xx' + yy'] - [x^2 + y^2]| \Delta y + |C_y y + 2yy' - [x^2 - y^2] - 2y'C_x D| \Delta y' + |C_x x + 2y[x-x'] - [x^2 + y^2]| \Delta C_x}{\text{Nenner}}$$

$$(367) \quad \Delta E = \frac{|[x^2+y^2]-C_0y'-2[xx'+yy']|\Delta x + |C_0y+2xx'-[x^2-y^2]-2x'C_0E|\Delta x' + |C_0x'+2[x^2y-xy^2]|\Delta y + |2x[yy'-yy]-C_0x-2C_0y'E|\Delta y' + |[x^2y-xy^2]-[x^2+y^2]E|}{C_0[x^2+y^2]} \\ + \frac{2[x^2y-xy^2]|\Delta y + |2x[yy'-yy]-C_0x-2C_0y'E|\Delta y' + |[x^2y-xy^2]-[x^2+y^2]E|}{\text{Nenner}}$$

ΔH und ΔI folgen aus Gleichung (289 l) und (289 m) nach dem Schema:

$$(368) \quad \Delta H = \left| \frac{\partial H}{\partial D} \Delta D \right| + \left| \frac{\partial H}{\partial E} \Delta E \right|$$

$$(369) \quad \Delta(J+n\pi) = \left| \frac{\partial(J+n\pi)}{\partial D} \Delta D \right| + \left| \frac{\partial(J+n\pi)}{\partial E} \Delta E \right|$$

ΔK folgt aus Gleichung (289 p):

$$(370) \quad \Delta K = \frac{|2J\Delta H| + |2H\Delta J| + |4HJ \left\{ \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta \lambda_0}{\lambda_0} \right\}|}{\left(\frac{2\pi d}{\lambda_0} \right)^2}$$

ΔL folgt aus Gleichung (288):

$$(371) \quad \Delta L = \left| \frac{|2J\Delta J| + |2H\Delta H| + |2[H^2-J^2] \left\{ \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta \lambda_0}{\lambda_0} \right\}|}{\left(\frac{2\pi d}{\lambda_0} \right)^2} \right| + \Delta \left(\frac{\lambda_0}{2b} \right)$$

ΔQ folgt aus Gleichung (298)

$$(372) \quad \Delta Q = \left| -2[L + \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^2][\Delta L + \Delta \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^2] + |2K\Delta K| \right|$$

ΔP folgt aus Gleichung (299):

$$(373) \quad \Delta P = \left| -B\Delta K \right| + \left| A[\Delta L + \Delta \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^2] + \left| [L + \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^2] \Delta A \right| + |K\Delta B \right|$$

ΔM folgt aus Gleichung (303):

$$(374) \quad \Delta M = \frac{|2\Delta P| + |M[L + \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^2] \Delta B| + |MB[\Delta L + \Delta \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^2] + |MA\Delta K| + |MK\Delta A|}{|B[L + \left(\frac{\lambda_0}{2b}\right)^2] + KA|}$$

ΔN folgt aus Gleichung (308):

$$(375) \quad \Delta N = \left| -\frac{4}{2} + \frac{M}{4\sqrt{\left(\frac{M}{2}\right)^2 + 1}} \right| \Delta M$$

$\Delta \mu''$ folgt aus Gleichung (310):

$$(376) \quad \Delta \mu'' = \frac{|2NQ - 4\mu''NP[N^2+1]| \Delta N + |N^2-1| \Delta Q + |\mu''[N^2+1]^2| \Delta P}{|2\mu''P[N^2+1]^2|}$$

$\Delta \mu'$ folgt aus Gleichung (307):

$$(377) \quad \Delta \mu' = |N\Delta \mu''| + |\mu''\Delta N|$$

$\Delta \mathcal{E}''$ folgt aus Gleichung (292):

$$(378) \quad \Delta \mathcal{E}'' = \frac{|K - 2\mathcal{E}''\mu'| \Delta \mu' + |L - 2\mathcal{E}''\mu'' \Delta \mu'' + |\mu''\Delta L| + |\mu''\Delta K|}{\mu'^2 + \mu''^2}$$

$\Delta \epsilon'$ folgt aus Gleichung (293):

$$(379) \quad \Delta \epsilon' = \frac{|-L - 2\epsilon''\mu| \Delta \mu + |K - 2\epsilon''\mu| \Delta \mu'' + |\mu \Delta L| + |\mu'' \Delta K|}{\mu'' + \mu''^2}$$

Mit diesen angeführten Fehlergleichungen sind die maximalen Fehler aller Größen zu bestimmen.

18. Ergebnisse

Feste Dielektrika

Material	$\lambda_0 = 3,26 \text{ cm}$	$\text{tg} \delta \cdot 10^4$	$\lambda_0 = 0,93 \text{ cm}$	$\text{tg} \delta \cdot 10^4$
	ϵ'	ϵ''/ϵ'	ϵ'	ϵ''/ϵ'
Trolitul, trocken	2,542	1	2,539	1
Trolitul, naß	2,557	3	2,552	6
Polyäthylene, USA	2,260	3	2,255	4
Polyäthylene H	2,229	2	2,228	3
Polyäthylene Z	2,319	3	2,317	4
Teflon	2,081	3	2,070	8
Steatit	5,912	21	5,851	42
Mipolam	2,362	68	2,360	71
Ebonit	1,912	530	1,910	582
Pertinax	5,243	576	4,967	701
Plexiglas	2,460	660	2,454	672
E-Glas	6,101	68	6,053	72
Kunststoff Dynamit AG 31/4418/196	4,247	1019	4,241	1082
Kunststoff Dynamit AG 131,5/8001a/317 gek.	4,886	1064	4,862	1101
Kunststoff Dynamit AG R 6421b Hüls 911/13	2,687	30	2,685	42
Parafin, fest	2,220	5	2,215	9
Rohgummi	1,998	1553	1,984	1721
Kork, trocken	1,935	1015	1,932	1108
Eichenholz, trocken	1,638	5981	1,573	6213
Tannenholz, trocken	1,527	4256	1,521	4348

Flüssige Dielektrika

Probe	$\lambda_0 = 3,26 \text{ cm}$	$\text{tg} \delta \cdot 10^4$	$\lambda_0 = 0,93 \text{ cm}$	$\text{tg} \delta \cdot 10^4$
	ϵ'	ϵ''/ϵ'	ϵ'	ϵ''/ϵ'
Destilliertes Wasser 20°C	51,346	7900	28,975	3128
Leitungswasser 20°C	54,528	5131	32,918	2172
Methylalkohol 96 % 20°C	8,802	8439	6,949	9916
Äthylalkohol 96 % 20°C	6,763	2546	1,917	2378
BP-Benzin 20°C	2,436	867	2,194	751

Ferrite

Handelsname	$\lambda_0 = 3,2 \text{ cm}$	$\text{tg} \delta_\epsilon \cdot 10^4$	$\lambda_0 = 3,2 \text{ cm}$	$\text{tg} \delta_\epsilon \cdot 10^4$
	ϵ'	ϵ''/ϵ'	μ'	μ''/μ'
Ferramic	16,14	4900	0,41	4000
CII Hyperox gemahlen	4,13	1500	0,86	1500

Dr.-Ing. Klaus EBERTS, Duisburg

19. Schrifttum

- [1] BELJERS, H.G. und W.J. van de LINDT Dielectric Measurements with two Magic Tees on Shorted Wave Guides, Philips Research Rep. 6. 96 (1951)
- [2] BÖTTCHER, C.J.F. Theory of Electric Polarisation. Elsevier Publishing Company
- [3] BORGNISS, F. Messung der Dielektrizitätskonstanten und des Verlustfaktors dielektrischer Stoffe bei einer Wellenlänge von 14 cm mittels Hohlraumresonator. Phys.Zeitschrift (Aug.1942) Heft 43
- [4] DAKIN, T.W. und C.N. WORKS Microwave Dielectric Measurements. Journal of appl. Phys. 18 (Sept. 1947) No. 9
- [5] DEBYE, P. Polar Molecules. Dover Publications Inc.
- [6] Digest of the Literature on Dielectrics. National Academy of Sciences, 1952 bis 1955
- [7] Electronics. Diverse Artikel von 1948 bis 1956
- [8] FEJÉR, G. Versuche über die Anwendbarkeit des Hohlraumleiters zur Messung der dielektrischen Konstanten im Gebiet der cm-Wellen. Basel, Birkhäuser & Cie., 1943
- [9] FORST, H.J. DK-Messung. Dissertation TH Aachen 1952
- [10] GOUBAU, G. Elektromagnetische Wellenleiter und Hohlräume. Stuttgart, Wiss. Verlagsges. 1955
- [11] GRÖSSER, W. Hochfrequenzpraktikum TH Aachen
- [12] HAMILTON, D.R., J.K. KNIPP und J.B.H. KUPER Klystrons and Microwave Triodes. Radiation Laboratory Series, McGraw-Hill 1948

- [13] HERSPING, A. Die Messung von Materialkonstanten ferromagnetischer Substanzen. Frequenz 6 (Dez.1952) Nr. 12
- [14] KEBBEL, W. Absorptions- und Reflexionsmessung im Bereich der cm-Wellen. Zeitschr.f.HF-Technik und Elektroakustik. Dissertation Jena Juni 1938
- [15] KÜPFMÜLLER, K. Einführung in die theoretische Elektrotechnik. Springer-Verlag 1955
- [16] LÖSCHE, F. Siebenstellige Tafeln der elementaren transzendenten Funktionen. Springer-Verlag 1954
- [17] MEINKE, H.H. Meßgeräte und Meßverfahren für Dezimeterwellen. Manuskript der TH München
- [18] MONTGOMERY, C.G. Technique of Microwave Measurements. Radiation Laboratory Series, McGraw-Hill 1948
- [19] MURPHY, E.J. und S.O. MORGAN The Dielectric Properties of Insulating Materials. The Bell System Technical Journal 16 (Oct. 1937) No. 4
- [20] RYBNER, J. Nomograms of Complex Hyperbolic Functions. Copenhagen, Jul. Gjellerups Forlag 1947
- [21] SPARR Radio and Radar Technique. London, Sir Isaac Pitman & Sons, Ltd. 1952
- [22] WIND, M. und H. RAPAPORT Handbook of Microwave Measurements. Polytechnic Institute of Brooklyn 1954
- [23] WIJN Verschiedene Arbeiten über Ferrite. Separat 2092 und 2187, Philips, Bindhoven

VERZEICHNIS DER DVL-BERICHTEBisher sind erschienen

- Nr. 1
SÖHNGEN, H.
Schwingungsverhalten eines Schaufelkranzes im Vakuum
- Nr. 2
WEISSINGER, J.
Zur Aerodynamik des Ringflügels. I. Die Druckverteilung dünner, fast drehsymmetrischer Flügel in Unterschallströmung
- Nr. 3
KEUNE, F.
Bericht über eine Näherungstheorie der Strömung um Rotationskörper ohne Anstellung bei Machzahl Eins
- Nr. 4
LEIST, K. und W. DETTMERING
Turbinenschaufeln aus Kunststoff für Kaltluftuntersuchungen
- Nr. 5
SPENGLER, G. und K.A. SCHMID
Vergleich der Liefervorschriften der ehemaligen deutschen Luftwaffe mit den entsprechenden US- bzw. britischen Spezifikationen für Flugtrieb- und Schmierstoffe
- Nr. 6
LEIST, K., K. SCHLEIERMACHER und J. WEBER
Spannungsoptische Untersuchungen von Turbinenschaufelfüßen
- Nr. 7
LEIST, K. und K. GRAF
Kleinsturbinen insbesondere zum Fahrzeugantrieb
- Nr. 8
KEUNE, F.
Zusammenfassende Darstellung und Erweiterung des Äquivalenzsatzes für schallnahe Strömung
- Nr. 9
SCHLIPPE v., B.
Strömung von Flüssigkeiten mit temperaturabhängiger Zähigkeit (Kühlung von Ölen)
- Nr. 10
SCHMIEDEN, C. und K.H. MÜLLER
Die Strömung einer Quellstrecke im Halbraum - eine strenge Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen
- Nr. 11
SÖHNGEN, H.
Strömung vor einem Überschall-Laufrad
- Nr. 12
QUICK, A.W.
Ein Verfahren zur Untersuchung des Austauschvorganges in verwirbelten Strömungen hinter Körpern mit abgelöster Strömung

- Nr. 13
KEUNE, F.
Der gewölbte und verwundene Tragflügel ohne Dicke in Schallnähe
- Nr. 15
FIECKE, D.
Die Bestimmung der Flugzeugpolaren für Entwurfszwecke.
I. Teil: Unterlagen
- Nr. 16
THIELEMANN, W.
Über die Beulung anisotroper Plattenstreifen
- Nr. 17
THIELEMANN, W. und H.J. DREYER
Beitrag zur Frage der Beulung dünnwandiger axial gedrückter Kreiszyylinder
- Nr. 21
RUFF, S., F. KIPP, H. HANSTEEN und G. MÜLLER
Untersuchungen zur Frage der Gehörschädigung des fliegenden Personals der Propellerflugzeuge
- Nr. 23
DOMM, U.
Über eine Hypothese, die den Mechanismus der Turbulenz-Entstehung betrifft
- Nr. 24
GDANIEC, O.
Über die Randlochkarte als Hilfsmittel in der Dokumentation Die grundsätzlichen Möglichkeiten ihrer Ausnutzung und eine Anwendung für die Luftfahrtforschung
- Nr. 25
SPENGLER, G. und H. GEMPERLEIN
Untersuchungen und Entwicklungsarbeiten zur motorischen Prüfung von Schmierölen
- Nr. 26
SPENGLER, G. und H.O. HÖSSEL
Untersuchungen über künstliche und natürliche Alterung unlegierter Mineralschmieröle
- Nr. 27
BROCKS, K.
Die Messung der Reflexioneigenschaften künstlicher und natürlicher Materialien mit quasi-optischen Methoden bei Mikrowellen
- Nr. 28
OSWATITSCH, K. und I. RYHMING
Über den Kompressibilitätseinfluß bei ebenen Schaufelgittern starker Umlenkung
- Nr. 29
VOGEL, M.
Das Spektralgebiet zwischen dem langwelligen Ultrarot und der Mikrowellen
Stand der Technik und Entwicklungstendenzen

- Nr. 30
BOLLENRATH, F.
Bemerkungen zur Frage des Wärmeshocks im Flugzeugbau
- Nr. 31
SCHRAMM, K.H.
Zur Theorie stationärer Flammen in strömenden Gasen
- Nr. 32
LÜRENBaum, K.
Der Meßwagen des Instituts für Triebwerksdynamik der Deutschen Versuchsanstalt für Luftfahrt (DVL), Aachen
- Nr. 33
SCHÄFER, G.
Glutathionstoffwechsel und Sauerstoffmangel
- Nr. 35
RYHMING, J.
Die instationäre zweidimensionale Überschallströmung um eine plötzlich angestellte dünne Platte
- Nr. 37
ZETZMANN, H.J. und R.A. WENDLINGER
Bau einer -U- Adcock-Peilanlage
- Nr. 38
ZETZMANN, H.J., R.A. WENDLINGER und H. ZAUCHER
Untersuchungen über sprunghafte Peilstrahländerungen an Mittelwellen-Vierkurs-Funkfeuern
- Nr. 39
WEISSINGER, J.
Zur Aerodynamik des Ringflügels
II. Die Ruderwirkung
- Nr. 41
NAUMANN, A., A. HEYSER und W. TROMMSDORFF
Der Überdruck-Windkanal in Aachen
- Nr. 42
WEISSINGER, J.
Zur Aerodynamik des Ringflügels
III. Der Einfluß der Profildicke
- Nr. 43
WEHRMANN, O.
Hitzdrahtmessungen in einer aufgespaltenen Wirbelströmung
- Nr. 44
TROMMSDORFF, W.
Versuche an einem fertigungsgünstigen Mehrstoffdiffusor bei Überschallgeschwindigkeit
- Nr. 45
WÜNSCHE, O.
Über den Einfluß der Hyaluronidase auf die Dauer der Sauerstoff-Voratmung

Nr. 47

MÜLLER, K. H.

Strenge Lösungen der Navier-Stokes-Gleichung für
rotations-symmetrische Strömungen

Nr. 49

OSWALTSCH, K.

Der Druckrückgewinn bei Geschossen mit Rückstoßantrieb bei
höheren Überschallgeschwindigkeiten

Nr. 50

KEUNE, F.

Flügel kleiner Streckung mit kleiner Dicke bei Nullauftrieb
in Unter- und Überschallströmung

Nr. 52

EBERTS, K.

Entwicklung einiger Meßverfahren und einer frequenz- und amplituden-
stabilisierten Meßeinrichtung zur gleichzeitigen Bestimmung der
komplexen Dielektrizitäts- und Permeabilitätskonstante von festen
und flüssigen Materialien im rechteckigen Hohlleiter und im freien
Raum bei Frequenzen von 9200 und 33000 MHz

Nr. 53

BRÜNER, H. und K. DIETMANN

Ein Gerät zur fortlaufenden elektrischen Impulsfrequenzanalyse
und -integration

Nr. 54

LORENTZ, J. und K. BROCKS

Elektrische Meßverfahren in der Geodäsie

Im Druck befinden sich

Nr. 34

GÖRTLER, H.

Zahlentafeln universeller Funktionen zur neuen Reihe für die
Berechnung laminarer Grenzschichten

Nr. 46

LÜBKE, H.

Gasturbinen- und Strahlantriebe für Hubschrauber

Nr. 48

KEUNE, F.

Eine Näherungsmethode zur Berechnung der Geschwindigkeits-
verteilung nicht angestellter gepfeilter Flügel großer Streckung
bei kleiner Dicke in Unterschallströmung

Nr. 51

ZIEREP, J.

Der senkrechte Verdichtungsstoß am gekrümmten Profil

Nr. 55

HEIKE, G.

Untersuchungen zur Stabilität nichtlinearer erzwungener
Schwingungen von einem Freiheitsgrad

VERLAG DER VERBANDS DER FLUG- UND RAUMFAHRT

STAT

Page Denied