

Geschichte der Hochfrequenztechnik an der Universität Karlsruhe (TH)

M. Thumm, W. Freude, G. Grau, J. Leuthold, W. Wiesbeck, T. Zwick

Abstract – Die Hochfrequenztechnik an der Universität Karlsruhe (TH) hat in den Jahren 1887/88 mit Heinrich Hertz, der hier seine klassischen Experimente zu den Eigenschaften von elektromagnetischen Wellen im Frequenzbereich von 50–500 MHz durchführte, ihren Ursprung. Das Institut für Hochfrequenztechnik und Hochfrequenzphysik (heute Institut für Hochfrequenztechnik und Quantenelektronik (IHQ)) wurde 70 Jahre später, im Jahr 1958, unter der Leitung von Prof. H. Rothe (Buchreihe "Rothe-Kleen: Elektronenröhren") gegründet. Kurz darauf wurde das Institut für Höchstfrequenztechnik und Elektronik (IHE) aufgebaut. Das erste Forschungsgebiet beider Institute war das Rauschen von Röhren und Maser-Verstärkern, sie wurden später von parametrischen Hochfrequenzverstärkern mit Varaktor-Dioden abgelöst.

Die aktuellen Forschungsgebiete im IHQ sind: Photonische Kommunikationstechnik von 10 Gbits/s bis 160 Gbits/s, Entwurf linearer und nichtlinearer Komponenten der hochintegrierten Optik, optische Halbleiter-Verstärker (SOA), photonische Kristalle, optische WDM-Kanalfilter und energie-autarke (über optische Signale versorgte) Systeme. Die Forschungsschwerpunkte am IHE sind: Wellenausbreitung/Kommunikation (MIMO, UWB), Antennen, Radartechnik & Sensorik, Hochleistungs-Mikro- und Millimeterwellentechnik, Gyrotronoszillatordröhren, Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) und hochintegrierte Millimeterwellensysteme. Die im Verlauf der letzten Jahrzehnte erreichten Spitzenergebnisse am IHQ wie Einrichtung des deutschlandweit ersten Studiengangs "Optische Nachrichtentechnik" (1975), optische Hochgeschwindigkeitstelekommunikation im Bereich 160 Gbit/s, über das Glasfasernetz mit Energie versorgte Kamera und optischer Kerr-Effekt in einem nur 6 mm langen speziell strukturierten Wellenleiter und im IHE wie international eingesetzte Wellenausbreitungsmodelle, Mehrantennensystem, Polarimetrie und Fernerkundung, Radarsensorik sowie Kurzpuls- und Langpuls-Weltrekordleistungen bei 170 GHz und 140 GHz Gyrotronröhren haben den hervorragenden Ruf von Karlsruhe als Hochfrequenzhochburg gefestigt.

Index Terms – Hochfrequenz, Mikro- und Millimeterwellentechnik, Photonische Kommunikationstechnik

1. Gründung der Hochfrequenztechnik-Institute

Nach dem 2. Weltkrieg und bis zum Wintersemester 1965/1966 war in Karlsruhe die Elektrotechnik noch als Abteilung in die Fakultät für Maschinenwesen eingebettet. Ab dem Sommersemester 1966 war dann die Fakultät für Elektrotechnik arbeitsfähig. Erste Aktivitäten auf dem Gebiet der Hochfrequenztechnik an der TH Karlsruhe (ab 1967 Universität Karlsruhe (TH)) wurden von Prof. Dr.-Ing. Friedrich Stier und von Prof. Dr. phil. Hermann Backhaus initiiert, der das Institut für Theoretische Elektrotechnik und Schwachstromtechnik leitete. Für das Fach "Elektronenröhren" habilitierten sich im Jahre 1944 Dr.-Ing. G. Wegmann, der zum Dozenten ernannt wurde, aber aus dem 2. Weltkrieg nicht wieder zurückgekehrte, und im Jahre 1946 Dr.-Ing. Joachim Scheel. Außerdem wurde im Jahre 1947 Dr.-Ing. Friedrich W. Gundlach von der Fa. Pintsch-Electro für das Fach "Elektrische Nachrichtentechnik" habilitiert und erhielt eine Diätendozentur für das Fach "Hochfrequenztechnik". Er wurde im Sommer 1949 an das neue Institut für Fernmeldetechnische Geräte und Anlagen der TH Darmstadt berufen. An seiner Stelle wurden dann 1949 Dr.-Ing. Johannes Labus und 1951 Dr.-Ing. Emil Löb habilitiert, die auch Lehraufträge auf dem Gebiet der Hochfrequenztechnik erhielten. Probleme der Hochfrequenztechnik wurden in Arbeiten über die dielektrischen Eigenschaften von keramischen Werkstoffen und des Erdreichs bei cm-Wellen behandelt. Im Jahre 1954 wurde eine Professur für "Elektrische Nachrichtentechnik" eingerichtet, auf die schließlich am 1.4.1956 Prof. Dr.-Ing. Horst Rothe berufen wurde. Die erste namentliche Erwähnung eines "Instituts für Hochfrequenztechnik und Hochfrequenzphysik" unter der Leitung von Herrn Prof. Dr. H. Rothe ist im Wintersemester 1958/1959 zu verzeichnen. Das erste Hochfrequenztechnik-Institut der Universität Karlsruhe (TH) wurde also genau 70 Jahre nach den klassischen Experimen-

ten von Heinrich Hertz zur Natur der elektromagnetischen Wellen gegründet, Experimente, die dieser als Ordinarius für Physik in Karlsruhe durchführte. Prof. Rothe (Bild 1) hat sich als Mitautor der damals als internationales Standardwerk anerkannten Buchreihe "Rothe-Kleen, Elektronenröhren" intensiv mit dem Verstärkerrauschen beschäftigt. Im Gegensatz zu manchen seiner Fachkollegen, die wegen des hohen Rauschpegels und der beschränkten Frequenzbandbreite des Transistors an der Röhre festhalten wollten, hatte er die grundsätzlichen technischen Vorteile des Transistors frühzeitig erkannt und als Entwicklungsleiter bei Telefunken den für einige Zeit weltweit rauschärmsten NF-Transistor auf den Markt gebracht.



Bild. 1: Prof. H. Rothe in seiner berühmten "Röhrenvorlesung", SS 1959

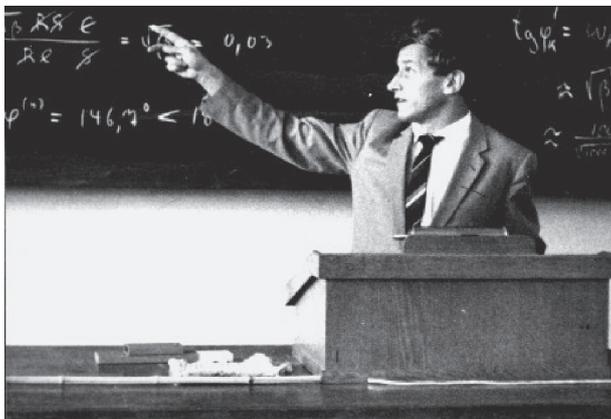


Fig. 2: Prof. H. Friedburg in der Vorlesung, WS 1959/60

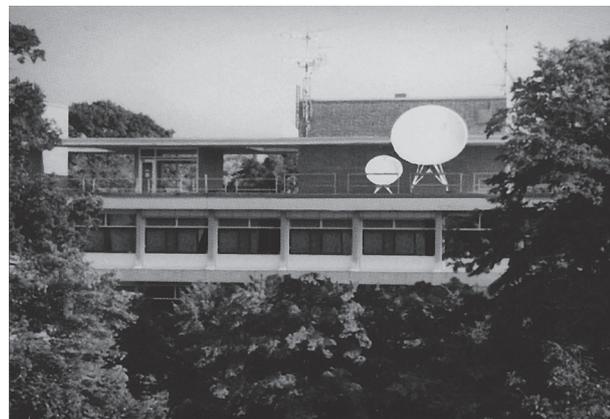


Fig. 3: Gebäude des Nachrichten-Technischen-Institute (NTI), Engeserstr. 5 (Fertigstellung 1961)

Als Mitte der fünfziger Jahre in den USA von Townes und Mitarbeitern und in der UdSSR von Basov und Prokhorov der "Maser" erfunden wurde, ein quantenmechanischer Verstärker mit einer Rauschtemperatur von wenigen Kelvingraden, fühlte Prof. Rothe sich auf seinem Spezialgebiet, dem Rauschen, angesprochen und beschloss, sich auch auf dem Gebiet der Maser zu engagieren und einen jüngeren Physiker als Mitarbeiter hierfür zu gewinnen. Die Zeit war günstig, die technischen Hochschulen und Universitäten wurden ausgebaut, und es gab sogenannte Parallel-Lehrstühle. Also wurde ein Extraordinariat für "Höchstfrequenztechnik und Elektronik (IHE)" beantragt und 1958 von der Landesregierung genehmigt.

Prof. Dr. rer. nat. Helmut Friedburg, der gegen Ende 1958 auf diesen Lehrstuhl berufen wurde, hatte an der Universität Heidelberg auf dem Gebiet der UHF-Spektroskopie experimentell gearbeitet und als Privatdozent für Physik im SS 1958 und im WS 58/59 vertretungsweise die Vorlesung "Angewandte Physik" gehalten. Hierbei hatte er sich auf nicht explizit physikalische Gebiete der Nachrichtentechnik beschränkt, u. a. auf die Darstellung von elektrischen Netzwerken durch komplexe Matrizen sowie Hochfrequenz- und Hohlleitertechnik. Prof. Friedburg (Bild 2) wurde zum Beginn des SS 1959 zum außerordentlichen Professor und im SS 1964 zum ordentlichen Professor ernannt. Bild 3 zeigt das 1961 fertiggestellte Gebäude in dem das IHQ und das IHE untergebracht sind.

2. Das Institut für Hochfrequenztechnik und Quantenelektronik (IHQ)

Prof. Rothe forschte auf dem Gebiet des Masers als Hochfrequenzverstärker. Neben Gas-Masern mit festen Frequenzen, die für die Hochfrequenztechnik noch nicht interessant waren, gab es Kristall-Maser auf der Grundlage der paramagnetischen Resonanzen von Störstellen in Einkristallen, die mit Hilfe eines homogenen äußeren Magnetfeldes in weiten Grenzen abstimmbare sind. Die Versuche wurden mit Rubin-kristallen durchgeführt und anschließend die Richtungsabhängigkeit des quantenmechanischen Resonanzmischeffekts untersucht. Diese Arbeiten und die folgenden (z. B. zur „Bestimmung der spektralen Verteilung der inneren Rauschtemperatur eines breitbandigen Wanderfeldmasers“) wurden von der DFG unterstützt.

Parametrische Hochfrequenzverstärker mit Varaktor-Dioden benötigten weitaus geringeren technischer Aufwand und ließen das Interesse am Maser als Hochfrequenzverstärker erlöschen. Nach seiner Berufung im Jahre 1967 entwickelte Prof. Dr. techn. Gerhard K. Grau (Bild 4) zusammen mit zwei Dissertanten (darunter Robert Maurer, späterer

Inhaber einer C3-Profsur in Hannover, danach einer C4-Profsur in Saarbrücken) entsprechende parametrische Verstärker, die bei Temperaturen des flüssigen Heliums betrieben wurden. In diesem Zusammenhang wurden auch supraleitende Niob-Resonatoren untersucht.

Die Umbenennung des "Instituts für Hochfrequenztechnik und Hochfrequenzphysik" in "Institut für Hochfrequenztechnik und Quantenelektronik" im Wintersemester 1971/1972 dokumentierte eine Neuausrichtung der Forschungsaktivitäten in Richtung optischer Verstärker und Oszillatoren: Man war vom Maser zum Laser gekommen. Untersucht wurden gekoppelte optische Resonatoren, Frequenzverdopplung in nichtlinearen Kristallen und schließlich eine hocheffiziente Frequenzvervierfachung in den ultravioletten Spektralbereich.

Das Aufkommen von Doppelheterostruktur-Laserdioden und verlustarmen Glasfasern Mitte der 1970er-Jahre verschob den Fokus auf das Gebiet der optischen Nachrichtentechnik. Förderungen der DFG und Arbeiten von G. Grau und W. Freude (Bild 5) (seit 1986 Privatdozent und seit 1996 Außerplanmäßiger Professor am IHQ) etablierten dieses neue Gebiet seit 1975 in Forschung und Lehre, was seinen Niederschlag in der Einrichtung des deutschlandweit ersten Studiengangs „Optische Nachrichtentechnik“ fand, dessen experimentell-praktischer Teil von Geldern der Stiftung Volkswagenwerk sowie durch eine Förderung des Landes Baden-Württemberg finanziert wurde.

Seit 1985 wurden am IHQ Heterodyn-Verfahren aus dem Gebiet der Hochfrequenztechnik in den optischen Frequenzbereich übertragen. In den Jahren 1985–1992 wurden Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet der sogenannten „kohärenten optischen Nachrichtentechnik“ von den Firmen SEL Stuttgart (heute Alcatel-Lucent) und Siemens München durch Kooperationsverträge gefördert. Die Entwicklung der Erbium-dotierten optischen Faser-Verstärker (EDFA, Erbium-doped fibre amplifier) seit 1987 und ihre rasche technische Entwicklung zu hohen Bandbreiten und hohen Verstärkungen hin ließ die Vorteile der technisch komplexen optischen Heterodyn-Technik zurücktreten. Förderungen durch das Bundesministerium für Forschung und Technologie (BMFT, heute BMBF) in den Jahren 1991–1992 führten zu Fortschritten beim Verständnis und beim Entwurf rauscharmer EDFA. Neben den EDFA wurden am IHQ auch Halbleiterlaser-Verstärker (SOA, semiconductor optical amplifier) in den Jahren 1985–1989 auf ihre Verstärkungs- und Rauscheigenschaften hin untersucht. Zu dieser Zeit musste festgestellt werden, dass SOA für lineare breitbandige Verstärkung wegen der raschen Reaktion des Gewinns auf ein sättigendes Signal weniger geeignet als EDFA waren.

Parallel hierzu liefen in den Jahren 1978–1998 Untersuchungen an im Gbit/s-Bereich direkt modulierten Laserdioden



Bild 4: Prof. G. Grau



Bild 5: Prof. W. Freude



Bild 6: Prof. J. Leuthold

den, an rauscharmen Photodioden, an multi- und einmodigen Lichtleitfasern, und es wurden Verfahren entwickelt zur Modenanalyse mit optimierten synthetischen Hologrammen und zur Speckle-Interferometrie.

Mit der Emeritierung von Prof. Dr. techn. Gerhard K. Grau im Jahre 1998 und der kommissarischen Institutsleitung durch Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Wolfgang Freude näherte sich das Arbeitsgebiet in den Jahren bis 2003 wieder der Hochfrequenztechnik, allerdings in der speziellen Ausprägung der Mikrowellen-Photonik mit der Zielrichtung, Mikrowellensignale mit optischen Mitteln zu erzeugen und zu übertragen. Ein Anwendungsgebiet waren mit optischen Signalen betriebene Antennenfelder im Bereich 3,5...26 GHz. Ab 1999 wurden erste elektrische Anordnungen nach Art photonischer Kristalle untersucht und dienten der Optimierung der Abstrahlcharakteristik von Phased-Array-Antennen. Aber auch die nichtlineare Optik kam wieder zu ihrem Recht. Mit der Glasfaser-Übertragung zahlreicher optischer Träger im Wellenlängen-Multiplex stiegen die Leistungsdichten, sodass Nichtlinearitäten bei der Übertragung beachtet werden mußten. In den Jahren bis 2002 wurden zeitaufwändige Simulationsprogramme für die nichtlineare Übertragung in Glasfasern mit Wavelet-Methoden in der Geschwindigkeit bedeutend verbessert.

Im April 1999 wurde Prof. Dr. Franz X. Kärtner als neuer Institutsleiter berufen. Drei neue Forschungsschwerpunkte etablierten sich damit: Ultrakurzzeit-Lasertechnik (Femtosekunden-Optik, das spezielle und am IHQ neu eingeführte Arbeitsgebiet von Prof. Kärtner), Nanophotonik (photonische Kristalle und hoch-integrierte Optik, betreut von Prof. Freude), sowie elektrochemische Nanostrukturierung. Das Gebiet der Nanotechnologie wurde durch die Mitgliedschaft im Centrum für Funktionelle Nanostrukturen (CFN) maßgeblich gefördert. Allerdings ließ sich Prof. Kärtner bereits im August 2001 ans Massachusetts Institute of Technology (MIT, USA) beurlauben, um im August 2002 endgültig ans MIT zu wechseln.

Im Juli 2004 wurde Prof. Dr. sc. nat. Jürg Leuthold (Bild 6) von Bell Labs, Lucent Technologies (USA) als Nachfolger von Prof. Kärtner berufen. Mit seinem Amtsantritt wurde die Institutsarbeit erneut auf die kommunikativen Aspekte der Photonik ausgerichtet: Optische Hochgeschwindigkeitstelekommunikation in den Bereichen 10, 40 und 160 Gbit/s, 100 Gbit/s-Ethernet, nichtlineare optische Kommunikation und

Wellenlängenkonversion mit nichtlinearen Halbleiterverstärkern (SOA) und silizium-basierten Strukturen sowie photonische Kristalle und nanophotonische Bauelemente mit linearen oder nichtlinearen Eigenschaften rückten in den Vordergrund. Förderungen durch EU-Projekte im Bereich der Metro-Netze und durch das BMBF im Bereich Zugangnetze sowie durch das CFN der Universität Karlsruhe trieben die Arbeiten voran. Im Jahr 2005 wurden erste Pionierarbeiten auf dem Gebiet der Übertragung von Betriebsenergie auf optischem Wege geleistet („Power over Fiber“). Bereits im Jahr 2007 wurde dann die am IHQ entwickelte Kamera, die über das Glasfasernetz mit Energie versorgt wurde, vom VDI als eine der fünf Spitzen-Innovationen auf dem Gebiet der Optik gekürt. Einen weiteren Weltrekord konnte das IHQ-Team im Frühjahr 2008 auf der prestigeträchtigen Postdeadline-Session der Optical Fiber Communications Conference in San Diego präsentieren. Der Gruppe gelang es erstmals, den optischen Kerr-Effekt in einem nur 6 mm langen speziell strukturierten Wellenleiter zu nutzen. Der Wellenleiter war in einer hybriden Technik aufgebaut, welche die Vorteile von Silizium und von organischen nichtlinearen Materialien kombinierte. Der erzielte Effekt war so groß, dass damit optische Signale bei einer Bitrate von 120 Gbit/s prozessiert werden konnten.

Aufgrund der neuen Forschungsschwerpunkte im Bereich der Photonik, steht am 1. Januar 2009 eine erneute Namensänderung an: Aus dem „Institut für Hochfrequenztechnik und Quantenelektronik (IHQ)“ wird ein „Institut für Photonik und Quantenelektronik (IPQ)“.

Die aktuellen Forschungsgebiete des IHQ sind:

Photonische Kommunikationstechnik

Das IHQ forscht schwerpunktmässig auf dem Gebiet der photonischen Kommunikation. Damit stehen dann alle Anwendungen der optischen Daten- und Telekommunikation im Fokus des IHQ. Dazu zählt die Erzeugung von Laserlicht, die Übertragung von optischen Signalen, die Kodierung und Modulation dieser Signale sowie die Verstärkung, die Detektion und optische Signalprozessierung.

Das Thema wird sowohl theoretisch als auch numerisch und experimentell bearbeitet. Zur numerischen Simulation von ganzen Kommunikationssystemen steht dem IHQ ein kommerzieller Simulator zur Verfügung, der die Einbindung von Komponenten in optische Kommunikationssysteme sowie die Simulation komplexer Systeme ermöglicht. Zur praktischen Realisierung hat sich das IHQ ein Systemlabor aufgebaut, welches die Generation und Transmission von Bitraten im Bereich von 0 Gbits/s bis 160 Gbits/s ermöglicht. Dank eines 280 km langen, selbst aufgebauten Glasferrings, in dem optische Signale mehrfach umlaufen, können Systemtests über mehrere 1 000 km durchgeführt werden. Gegenwärtig dient dieses System den 100 Gbit/s-Experimenten, die im Rahmen des europäischen Projektes TRIUMPH durchgeführt werden.

Entwurf linearer und nichtlinearer Komponenten

Ein weiterer Schwerpunkt des IHQ liegt in der Entwicklung von integriert optischen Komponenten. Dabei werden Berechnungen und Design bis hinunter zur Ebene der Maskengenerierung am Institut durchgeführt. Das Wachstum der Wafer erfolgt an externen Institutionen. So werden beispielsweise Quantenpunkt-Verstärker am CFN Karlsruhe gewachsen, Halbleiterverstärker bei einem schottischen Partner, oder Silizium Wafer in einem anderen europäischen Labor. Die extern fabrizierten Wafer werden am IHQ nachbearbeitet, im eigenen Montagelabor poliert, zersägt und montiert, bevor sie im Charakterisierungslabor ausgetestet werden.

Ein besonderes Augenmerk liegt gegenwärtig auf der Entwicklung von ultra-kompakten nanophotonischen Strukturen für die optische Kommunikation. Besonders vielver-

sprechend ist dabei das Gebiet der Silizium-Photonik. Dazu zählt die Herstellung von schnellen Modulatoren auf Silizium-Basis; Modulationsraten bis zu 100 Gb/s sind möglich oder, wie kürzlich am IHQ gezeigt, organo-hybride Silizium-Wellenleiter, welche voll-optische Signalprozessierung bis zu 100 Gbit/s ermöglichen.

Optisch versorgte Netzwerke

Ziel des Forschungsschwerpunktes „Optisch versorgte Netzwerke“ ist es, die Installationskosten für die Energieversorgung einzusparen und sowohl die Betriebsenergie als auch den Informationstransport über die ohnehin benötigte optische Faser abzuwickeln. Damit löst man dann auf einfache Art verschiedene Probleme der Sicherheitstechnik, wie z. B. durch galvanische Kopplung auftreten kann. Eine von elektromagnetischen Störungen entkoppelte Energieversorgung ermöglicht Kommunikation mit großer Bandbreite über lange Distanzen hin zu Orten ohne geeignete Energieversorgung.

Lehre am IHQ:

Das IHQ ist in alle Studiengänge der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Universität Karlsruhe (TH) mit Pflicht- und Wahlfachvorlesungen eingebunden, als da sind:

Diplom Studiengang

Bachelor Studiengang

Master Studiengang (deutsch)

Master Studiengang (englisch)

Das IHQ bietet hierbei das Studienmodell (Vertiefungsrichtung) Photonische Kommunikation an (teils in Zusammenarbeit mit anderen Instituten unserer Fakultät).

Außerdem werden für das International Department der Universität Karlsruhe (TH) mehrere englischsprachige Vorlesungen in dem Bereich „Optical Communications“ gehalten.

3. Das Institut für Höchstfrequenztechnik und Elektronik (IHE)

Die Raumausstattung von Prof. Friedburg innerhalb der TH Karlsruhe war zunächst äußerst spärlich, ein einfenstriges Arbeitszimmer, gleichzeitig Sekretariat, sowie ein Experimentierraum, geteilt mit einem Assistenten von Prof. Rothe. Das heutige Institutsgebäude für Nachrichtentechnik existierte zwar schon auf dem Papier, für die Realisierung konnte man aber mit einigen Jahren für die endgültige Genehmigung und die Bauzeit rechnen. In diesen Neubau waren für den neuen Lehrstuhl ca. 300 m² vorgesehen. Diese Situation war Herrn Prof. Dr. Otto Haxel bekannt, Ordinarius in Heidelberg und damals einer der drei Geschäftsführer des Kernforschungszentrums Karlsruhe, der Prof. Friedburg aus Göttingen und Heidelberg kannte. Im Kernforschungszentrum sollte ein „Labor für Elektronik“ gegründet werden, der Neubau war fast fertig. Prof. Friedburg erhielt vom Kernforschungszentrum das Angebot, dieses Labor einzurichten und dessen Räume bis zur Fertigstellung des Hochschulneubaus auch zum Aufbau seines Lehrstuhls zu nutzen. Für die gleichzeitige Mitgliedschaft in der Hochschule und dem Kernforschungszentrum gab es Vorbilder. Die wichtigsten Institutsleiter des Kernforschungszentrums waren gleichzeitig Fakultätsmitglieder und Ordinarien an der Hochschule mit einem vollständigen Institut im Kernforschungszentrum, und einer Dependence im Hochschulgelände, aber mit Mitarbeitern und Sachmitteln aus beiden Quellen. Für diese lag der Schwerpunkt ihrer Arbeit räumlich wie sachlich im Kernforschungszentrum. Im Gegensatz hierzu hatten Prof. Rothe und Prof. Haxel diese Doppelmemberschaft von Prof. Friedburg



Bild 7:
Prof. i.R. W. Wiesbeck



Bild 8:
Prof. M. Thumm



Bild 9: Prof. T. Zwick



Bild 10: Prof. A. Moreira

nur als Provisorium vorgesehen, Prof. Haxel allerdings mit der Option oder Hoffnung, ihn später auch schwerpunktmäßig ins Kernforschungszentrum zu übernehmen.

Prof. Friedburg hat dieses Angebot angenommen und konnte in den folgenden zwei Jahren die ihm an der Hochschule zugewiesenen Personalstellen besetzen: 1 Sekretärin, 1 Ingenieur, 2 Wiss. Assistenten, 1 Feinmechanikermeister, 1 Mechanikergehilfe, 2 Lehrlinge.

Sein zunächst gutes Verhältnis zur Geschäftsführung des Kernforschungszentrums verschlechterte sich allerdings bald. Der zweite Geschäftsführer, Herr Dr. G. Ritter, mit dem er gut zusammengearbeitet hatte, ging an ein internationales Institut für Kernforschung und wurde 1960 durch Herrn Dr. W. Schnurr vom Atomministerium ersetzt, von dem Prof. Friedburg keine weitere Hilfe für die Zielrichtung, Arbeit und Struktur des Labors für Elektronik bekam; zudem schied Prof. Haxel ebenfalls aus. Der erste Geschäftsführer, Herr Dr. R. Greiffeld, blieb und erwartete von Prof. Friedburg eine voll auf das Kernforschungszentrum ausgerichtete Tätigkeit. Das führte dazu, dass dieser 1962 nach Fertigstellung des großzügigen Institutsgebäudes im Uni-Campus (Bild 3) mit seinen aus dem Uni-Etat bezahlten Mitarbeitern das Kernforschungszentrum verließ.

Das Forschungsgebiet war zunächst der Maser als Hochfrequenzverstärker. Kristall-Maser auf der Grundlage der paramagnetischen Resonanzen von Störstellen in Einkristallen sind mit Hilfe eines homogenen äußeren Magnetfeldes in weiten Grenzen abstimmbare. Rubinkristalle und andere Maserkristalle wurden hierbei untersucht. Diese Forschungsaktivitäten wurden aufgrund der rasanten Entwicklung der parametrischen Verstärker, deren technischer Aufwand weit aus geringer war und deren Rauschverhalten die technisch sinnvollen Grenzen erreichte oder sogar übertraf, abgeschlossen und durch Arbeiten auf diesem neuen Forschungsgebiet ersetzt. Im SS 1980 übernahm Prof. Dr.-Ing. Hans Joachim Blasberg am IHE den Bereich „Angewandte Elektronik und Nachrichtentechnik“. Dazu kam 1981 die Eingliederung des Fachgebiets Akustik (FGA) unter der nebenberuflichen Leitung von apl. Prof. Dr. rer.nat. Günther Kurtze (G&H Ludwigshafen). Er verstarb 1986. Seither leitet Dr.-Ing. Rainer Riedlinger das FGA im IHE. Nach der Emeritierung von Prof. Friedburg Anfang WS 1981 (†21.01.2007) übernahm Prof. Blasberg bis zur Berufung von Prof. Dr.-Ing. Werner Wiesbeck (Bild 7) zum WS 83 die Leitung des IHE. Wellenausbreitung für Rundfunk und Mobilfunk, Radartechnik und Fernerkundung, Elektromagnetische Feldtheorie,

Antennen und Elektromagnetische Verträglichkeit sind seit her die Schwerpunkte in Forschung und Lehre des IHE. Im Jahre 1990 wurde am IHE eine Professur für Mikrowellenmesstechnik mit Prof. Dr. rer.nat. Manfred Thumm (Bild 8) besetzt der im Bereich Hochleistungsmillimeterwellentechnik arbeitet. Prof. Thumm war gleichzeitig Leiter der Abteilung für Gyrotron-Entwicklung und Mikrowellentechnik am Institut für Technische Physik des Forschungszentrums Karlsruhe (FZK) und ist seit 1999 Leiter des Instituts für Hochleistungsimpuls- und Mikrowellentechnik (IHM) am FZK. Dort werden Hochleistungsgyrotronröhren, dielektrische Vakuumfenster, vielwellige Übertragungsleitungen und Antennen für die Kernfusionsplasmaheizung und die industrielle Materialprozessentechnik entwickelt. 1997 ging Prof. Blasberg in den Ruhestand. Im WS 2002 wurde Prof. Dr.-Ing. Alberto Moreira (Bild 10) auf eine Professur für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme des IHE berufen, die mit der Leitung des Instituts für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme des DLR in Oberpfaffenhofen verbunden ist. Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Krank (†20.09.1996), Technischer Direktor des Südwestfunks Baden-Baden, war von 1988–1996 als Honorarprofessor im Bereich Hochfrequenzleistungs- und Übertragungstechnik im IHE tätig und Prof. Dr.-Ing. Peter Erdmann, Technischer Geschäftsführer des CTDI Nethouse Services, ist seit dem SS 1968 als Honorarprofessor mit dem Fachgebiet Breitbandübertragungssysteme dem IHE angeschlossen. Mit Beginn des WS 2007/08 ging Prof. Wiesbeck in den Ruhestand und Prof. Dr.-Ing. Thomas Zwick (Bild 9) übernahm die Leitung des IHE. Der Institutsname wird am 1. Januar 2009 leicht geändert werden: Aus dem "Institut für Höchsthochfrequenztechnik und Elektronik" wird das "Institut für Hochfrequenztechnik und Elektronik".

Die aktuellen Forschungsgebiete des IHE sind:

Wellenausbreitung/Kommunikation

Aufbauend auf bekannten Wellenausbreitungsmodellen werden am IHE seit 1985 neue Wellenausbreitungsmodelle entwickelt. Berücksichtigt werden dabei Mehrwegeausbreitung durch Reflexion und Beugung am realen Gelände. Die Geländedaten werden mit Topographie und, soweit verfügbar, mit Morphographie eingegeben. Die Berechnung erfolgt mittels der geometrischen Beugungstheorie in ihrer verallgemeinerten Form (UTD, "Uniform Theory of Diffraction"). Die Berechnungen arbeiten quasi kohärent, so dass Überlagerungen und Signalverzerrungen durch die Mehrwegeausbreitung bestimmt werden können. Die wissenschaftlichen Ergebnisse sind in einer Vielzahl von Veröffentlichungen niedergelegt, die Wellenausbreitungsmodelle sind national und international im Einsatz. Modelle für folgende Bereiche wurden entwickelt:

- 2-D Wellenausbreitungsmodell,
- 3-D Wellenausbreitungsmodell,
- Nahbereichsmodell "Urban",
- Nahbereichsmodell "Wald",
- Wellenausbreitungsmodell "Urban"
- Wellenausbreitung "Tunnel"
- PEM Ausbreitungsmodell

Die obengenannten Wellenausbreitungsmodelle sind messtechnisch verifiziert. Sie arbeiten ohne heuristische Parameter über einen großen Frequenzbereich von ca. 50 MHz bis in den GHz Bereich. Sie sind somit für Ausbreitungsberechnungen bei Rundfunk, Fernsehen, Mobilfunk, Richtfunk sowie für die Netzplanung im Mobilfunk z.B. GSM, UMTS, WLAN, WIMAX, LTE geeignet.

Aktuelle Forschungsprojekte sind unter anderem die Modellierung der Wellenausbreitung zwischen Fahrzeugen, die Entwicklung von Strategien zur dynamischen Frequenzzuweisung in Rund- und Mobilfunk, die Untersuchung von

"Multiple-Input-Multiple-Out" (MIMO) Kanälen zur Steigerung der Übertragungskapazität und Ultrabreitband-(UWB)-Systeme.

Antennen

Die Schwerpunkte der Arbeiten lagen und liegen in der Entwicklung planarer und konformer Antennenstrukturen für Sensorik und Kommunikation.

Für planare Antennenstrukturen in Streifenleitungstechnik wurde ein komplettes CAD Design-Paket entwickelt. Mit ihm kann die Analyse und Synthese planarer Antennen im Frequenzbereich 0.5 GHz bis 90 GHz für lineare oder zirkuläre Polarisation ausgeführt werden. Neben quadratischen, rechteckigen oder runden Patchelementen werden auch Streifenleitungs-Stub-Elemente, Microstrip-Schlitzstrahler und aperturgekoppelte Elemente verwendet. Zur geeigneten Formung der Strahlungsdiagramme und Optimierung der Strahlungseigenschaften liegt ein Schwerpunkt der Arbeiten auf der Entwicklung mehrlagiger Strukturen zur Trennung von Strahleraperturen und Speisernetzwerk. Die für einen satelliten-gestützten Einsatz entwickelten dual polarisierten Arrays im L-, C- und X-Band auf der Basis planarer, aperturgekoppelter Patches zeichnen sich durch eine große Bandbreite, gute Entkopplung sowie eine hohe Polarisationsreinheit aus.

Neue Einsatzgebiete von Antennen erfordern zunehmend die Anpassung der Antennengeometrie an beliebige Oberflächen. Speziell für diese Anwendungsfälle wurden zwei CAD-Pakete entwickelt, die die Analyse von konformen Patchantennen auf zylindrischen und nahezu beliebigen Oberflächen ermöglichen.

Radartechnik & Sensorik

Das IHE ist auf dem Gebiet der Radartechnik seit Mitte der 80-er Jahre tätig. Die Schwerpunkte der Arbeiten liegen bei:

- Radarsystemtechnik
- Neue SAR-Systeme mit Digital Beamforming
- Detektion von Anti-Personen-Minen
- Digital Beamforming
- RCS und Antennenmesstechnik
- Polarimetrie
- Lehre (CCG Kurs SE 2.38, Vorlesung)

Das IHE entwickelt seit 1987 anwendungsorientierte Komponenten und Radar-Systeme im Frequenzbereich zwischen 2 GHz und 94 GHz. Die Entwicklung umfasst dabei Planung und Erstellung des Gesamtkonzeptes, das Design der entsprechenden Schaltungskomponenten (z. B. Oszillatoren, Mischer, Modulatoren, Antennen) sowie die Optimierung des Systems. Die Entwicklung der aktiven HF-Baugruppen wie z.B. Oszillatoren oder Verstärker in Mikrostreifenleitungstechnik erfolgt mit Hilfe modernster Mikrowellen-CAD-Software und Messgeräten bis zu Frequenzen von 110 GHz. Dies ermöglicht neben der theoretischen und messtechnischen Beschreibung der einzelnen Bauelemente auch die Charakterisierung der gesamten Baugruppe sowie die Erstellung und Fertigung des Schaltungs-Layouts.

Am IHE wurden über viele Jahre hinweg Erfahrungen im Bereich von Radar-Polarimetrie, Signaturanalyse und Radarmessungen gesammelt. Unter Verwendung eines breitbandigen polarimetrischen Radar-Labormesssystem wurden verschiedene Hardware-Kalibrationsverfahren und Programme für unterschiedliche Anwendungen und Benutzer erstellt. Insbesondere wurde ein neuartiges, polarimetrisches Kalibrationsverfahren sowie die dazu benötigte Software für ein mono- und bistatisches Instrumentationsradar entwickelt. Zusätzlich wurden verschiedene Modelle für das Streuverhalten von natürlichen und künstlichen Zielen implementiert und verifiziert.

4. Kurzdarstellung der Karlsruher HF-Institute

4.1. Institut für Hochfrequenztechnik und Quanten-elektronik (IHQ)

Das Institut wurde 1958 unter dem Namen „Institut für Hochfrequenztechnik und Hochfrequenzphysik“ von Prof. Dr. Horst Rothe gegründet, welcher der erste Institutsleiter war. Im Jahr 1967 übernahm Prof. Dr. techn. Gerhard K. Grau die Leitung und benannte 1971 das Institut um in „Institut für Hochfrequenztechnik und Quantenelektronik“. Nach seiner Emeritierung wurde im Jahr 1999 Prof. Dr. Franz X. Kärtner berufen, der 2001 ans MIT wechselte. Das IHQ wird seit 2004 von Prof. Dr. sc. nat. Jürg Leuthold geleitet. Ebenfalls am IHQ arbeiten Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Wolfgang Freude, 1 Emeritus, 1 Honorarprofessor, 2 Lehrbeauftragte, 11 Wissenschaftliche Mitarbeiter, 6 VT-Personal, 2 Auszubildender und 6 Wissenschaftliche Hilfskräfte. Die Fläche von technischen und sonstigen Räumen beträgt ca. 780 m².

Im IHQ steht ein Laboratorium für photonische Kommunikationstechnik zur Verfügung, das Übertragungsexperimente bis 160 Gbit/s gestattet (Glasfaserübertragungs-Teststrecke 300 km, Bitfehlerwahrscheinlichkeits-Testplatz bis 42,5 Gbit/s), ein Mikrowellen-Labor mit Communication Analyser 60 GHz, sowie Mikrowellen-Spektrum- und Netzwerk-Analysatoren bis 60 GHz, ein Laboratorium für Ultraschall-Lasertechnik (Piko- und Femtosekunden-Festkörperlaser mit Impulsbreiten bis hinab zu 150 fs, Abstimmbare Laser 0,67 µm–1,06 µm, 1,48 µm–1,62 µm, optischer parametrischer Oszillator 1,1 µm–1,6 µm) und ein Packaging-Labor zur teilautomatisierten Bearbeitung und Montage mikro- und nanooptischer Halbleiter-Chips. Seit Gründung des IHQ bis heute wurden ca. 110 Studienarbeiten, 780 Diplom- bzw. Masterarbeiten und 65 Dissertationen angefertigt. Die Anzahl der Publikationen des IHQ von 1990 bis heute beträgt ca. 300. Die aktuellen Forschungsgebiete des IHQ sind: Photonische Kommunikationstechnik von 10 Gbits/s bis 160 Gbits/s, Entwurf linearer und nichtlinearer Komponenten der hochintegrierten Optik, optische Halbleiter-Verstärker (SOA), photonische Kristalle, optische WDM-Kanalfilter, energie-autarke (über optische Signale versorgte) Systeme.

Folgende Hochschullehrer gingen aus dem IHQ hervor:

K.-H. Löcherer, habil. 1964, Universität Hannover
R. Maurer, prom. 1969, Universität Saarbrücken
B. G. Bosch, habil. 1969, Universität Bochum
H.-D. Kirschbaum, prom. 1970, FH Koblenz
L. Jähnig, prom. 1975, FH Villingen-Schwenningen
F. Mohr, prom. 1984, FH Pforzheim
W.-H. Rech, prom. 1991, FH Pforzheim
M. Bischoff, prom. 1993, FH Regensburg
E. G. Sauter, habil. 1982, IHQ (entpflichtet)
W. Freude, habil. 1986, IHQ
W. Schindler, habil. 2000
U. Morgner, habil. 2001, Universität Hannover

4.2. Institut für Höchsthochfrequenztechnik und Elektronik (IHE)

Der Lehrstuhl für Höchsthochfrequenztechnik und Elektronik wurde bereits Ende 1958 gegründet und erhielt ab dem Wintersemester 1972/73 die offizielle Bezeichnung „Institut für Höchsthochfrequenztechnik und Elektronik (IHE)“. Prof. Dr. rer.nat. Helmut Friedburg war der erste Leiter des Lehrstuhls bzw. Instituts. Nach der Emeritierung von Prof. Friedburg im Jahr 1981 übernahm Prof. Dr.-Ing. Hans Joachim Blasberg vorübergehend die Institutsleitung. Von 1983 bis 2007 leitete Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Dr.-Ing. E.h. Werner Wiesbeck das IHE. Seit dem Wintersemester 2007/08 ist Prof. Dr.-Ing. Thomas Zwick Institutsleiter. Mit zum IHE gehören Prof. Dr.

rer.nat. Dr. h.c. Manfred Thumm, der Leiter des Institut für Hochleistungsimpuls- und Mikrowellentechnik am Forschungszentrum Karlsruhe und Prof. Dr.-Ing. Alberto Moreira, der Leiter des Institut für Hochfrequenztechnik und Radarsysteme des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Oberpfaffenhofen. Insgesamt sind am IHE zur Zeit 3 Professoren, 2 Professoren im Ruhestand, 1 Honorarprofessor im Ruhestand, 3 Privatdozenten, 1 Akademischer Direktor, 6 Lehrbeauftragte, 17 Wissenschaftliche Mitarbeiter, 8 Mitarbeiter für Verwaltung und Technik, 1 Auszubildender und ca. 30 Wissenschaftliche Hilfskräfte beschäftigt. Die Fläche von technischen und sonstigen Räumen beträgt ca. 940 m².

Am IHE steht ein großer Antennenmessraum (ca. 4x4x6 m³) zur Verfügung, wobei der Frequenzbereich von 500 MHz bis herauf zu 110 GHz abgedeckt wird. Die umfangreiche Messgeräteausrüstung umfasst mehrere Netzwerkanalysatoren mit einer oberen Grenzfrequenz von bis zu 50 GHz, Signalgeneratoren und Synthesizer bis 50 GHz, Spektralanalysatoren bis 26,5 GHz, Mischer, Powermeter, Zähler, diverse Oszilloskope sowie einen Rauschmessplatz. Im IHM des FZK werden ein Doppel-Teststand für Hochleistungsmillimeterwellen-Gyrotrons (1 MW, 105–170 GHz, 180 s), eine 30 GHz, 15 kW, CW Gyrotronanlage, drei 2,45 GHz, 24 kW Applikatoren (Volumen bis zu 12 m³) und ein 915 MHz, 30 kW System zur Materialprozessentechnik betrieben.

Seit Gründung des IHE bis heute wurden über 720 Diplom- bzw. Masterarbeiten und 130 Dissertationen angefertigt. Die Anzahl der Publikationen des IHE von 1990 bis heute beträgt über 2000. Die aktuellen Forschungsgebiete des IHE sind: Wellenausbreitung / Kommunikation, Antennen, Radartechnik und Sensorik; Hochleistungs- Mikro- und Millimeterwellentechnik; Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV), Millimeterwellen-Systeme und Ultra-Breitband-Technologie (Ultra Wide Band, UWB).

Folgende Hochschullehrer gingen aus dem IHE hervor:

Jürgen Doneit, 01.03.91,
Technische Informatik und Elektrotechnik, HS Heilbronn
Berndt Jödicke, 01.09.92,
Physik und Lichttechnik, HS Konstanz
Gerd Wanielik, 01.05.99,
Nachrichtentechnik, TU Chemnitz
Norbert Geng, 13.12.00,
Hochfrequenztechnik, HS München
Christof Hübner, 01.07.01,
Kommunikations- und Automatisierungstechnik, HS Mannheim
Alberto Moreira, 17.01.02,
Hochfrequenztechnik und Radarsysteme, DLR und Universität Karlsruhe (TH)
Jürgen v. Hagen, 17.01.02,
Angewandte Elektromagnetische Feldtheorie, Daimler Chrysler AG
Friedrich Ueberle, 01.10.02,
Medizinische Mess- und Gerätetechnik, HAW Hamburg
Thomas Kürner, 01.06.03,
Mobilfunksysteme, TU Braunschweig
Helmut Süß, 18.01.07,
Mikrowellenradiometrie, DLR-IHR, Oberpfaffenhofen
Thomas Zwick, 01.10.07,
Höchsthochfrequenztechnik und Elektronik, Universität Karlsruhe (TH)
Lambert Feher, 17.04.08,
Industrielle Mikrowellentechnik, Forschungszentrum Karlsruhe, Institut für Hochleistungsimpuls- und Mikrowellentechnik (IHM).

Manfred Thumm
Universität Karlsruhe (TH)
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
Institut für Höchstfrequenztechnik und Elektronik (IHE)
76128 Karlsruhe
Tel.: (07247) 82-2440; Fax: (07247) 82-4874
E-mail: manfred.thumm@ihm.fzk.de

Wolfgang Freude
Universität Karlsruhe (TH)
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
Institut für Hochfrequenztechnik und Quantenelektronik (IHQ)
76128 Karlsruhe
Tel.: (0721) 608-2492; Fax: (0721) 608-2786
E-mail: w.freude@ihq.uni-karlsruhe.de

Gerhard Grau
Universität Karlsruhe (TH)
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
Institut für Hochfrequenztechnik und Quantenelektronik (IHQ)
76128 Karlsruhe
Tel.: (0721) 608-2488; Fax: (0721) 608-2786
E-mail: g.grau@ihq.uni-karlsruhe.de

Jürg Leuthold
Universität Karlsruhe (TH)
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
Institut für Hochfrequenztechnik und Quantenelektronik (IHQ)
76128 Karlsruhe
Tel.: (0721) 608-2480; Fax: (0721) 608-2786
E-mail: j.leuthold@ihq.uni-karlsruhe.de

Werner Wiesbeck
Universität Karlsruhe (TH)
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
Institut für Höchstfrequenztechnik und Elektronik (IHE)
76128 Karlsruhe
Tel.: (0721) 608-2522; Fax: (0721) 691865
E-mail: werner.wiesbeck@ihe.uka.de

Thomas Zwick
Universität Karlsruhe
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
Institut für Höchstfrequenztechnik und Elektronik (IHE)
76128 Karlsruhe
Tel.: (0721) 608-2522; Fax: (0721) 691865
E-mail: thomas.zwick@ihe.uka.de

Frequenz
62 (2008)
11-12