



I. Appenzeller  
D. Dubbers  
H.-G. Siebig  
A. Winnacker  
(Hrsg.)

# HEIDELBERGER PHYSIKER BERICHTEN 3

Rückblicke auf Forschung  
in der Physik und Astronomie

**Mikrokosmos  
und Makrokosmos**



UNIVERSITÄTS-  
BIBLIOTHEK  
HEIDELBERG



Heidelberger Physiker berichten

**3**

Mikrokosmos und Makrokosmos



# Heidelberger Physiker berichten

Rückblicke auf Forschung  
in der Physik und Astronomie

Herausgegeben von

Immo Appenzeller, Dirk Dubbers, Hans-Georg Siebig  
und Albrecht Winnacker

Band 3

Mikrokosmos und Makrokosmos



UNIVERSITÄTS-  
BIBLIOTHEK  
HEIDELBERG

### **Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie, detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.



Dieses Werk ist unter der Creative Commons-Lizenz 4.0 (CC BY-SA 4.0) veröffentlicht.

Texte © 2017. Das Copyright der Texte liegt beim jeweiligen Verfasser.

Die Online-Version dieser Publikation ist auf heiBOOKS, der E-Book-Plattform der Universitätsbibliothek Heidelberg, <http://books.ub.uni-heidelberg.de/heibooks>, dauerhaft frei verfügbar (Open Access).

URN: [urn:nbn:de:bsz:16-heibooks-book-253-9](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:16-heibooks-book-253-9)

DOI: <https://doi.org/10.11588/heibooks.253.399>

Umschlagbild: Die Spiralgalaxie NGC 1232.

Aufgenommen mit der FORS1-Kamera am "Very Large Telescope" (VLT) des European Southern Observatory (ESO) in Paranal, Chile (siehe Text Seite 20). Foto: ESO/FORS Team.

ISBN 978-3-946531-66-1 (PDF)

ISBN 978-3-946531-67-8 (Softcover)

# Inhaltsverzeichnis

|   |     |
|---|-----|
| Vorwort .....   | 1   |
| Immo Appenzeller<br><i>Astrophysik im Goldenen Zeitalter</i> .....                      | 3   |
| Ulrich Haeberlen<br><i>Von der Kerninduktion zur MRT</i> .....                          | 25  |
| Siegfried Hunklinger<br><i>Mein Weg nach Heidelberg</i> .....                           | 51  |
| Gerd Schatz<br><i>Zwischen Kernphysik und Kerntechnik</i> .....                         | 75  |
| Hans Joachim Specht<br><i>60 Jahre Physik - Faszination der Vielfalt</i> .....          | 97  |
| Franz Wegner<br><i>Phasenübergänge, Renormierung und Flussgleichung</i> .....           | 151 |
| Roland Wielen<br><i>Als Astronom in Berlin und Heidelberg, und das je zweimal</i> ..... | 173 |





# Vorwort

In diesem dritten Band der Reihe „Heidelberger Physiker berichten“ sind erstmals Vorträge zusammengestellt, die in der aktuellen Phase der Vortragsreihe gehalten wurden. Der vorhergehende zweite Band enthält Vorträge aus der Zeit 2006 – 2008, die Vorträge dieses dritten Bandes hingegen datieren aus den Jahren 2015 – 2016. Dazwischen liegen fast 10 Jahre, das ist heute im Leben einer Fakultät eine beträchtlich lange Zeit. Der von den Herausgebern gewählte Titel „Mikrokosmos und Makrokosmos“ deutet es an: Die Fakultät ist heterogener geworden, zum Teil einfach deshalb, weil sie größer geworden ist, zum Teil aber auch deshalb, weil die Wissenschaft selbst sich ausdifferenziert.

So ist neben den inzwischen traditionellen Gebieten der Physik der Atomkerne und der Elementarteilchen auch die Festkörperphysik prominent vertreten, anwendungsorientierte Physik nimmt einen größeren Raum ein, und in der Astrophysik werden die Erforschung der Galaxien, die großräumige Struktur des Kosmos und die zeitliche Entwicklung des Universums Forschungsschwerpunkte. Der Anspruch aber an eine grundlagenorientierte, erstklassige Wissenschaft ist geblieben, und es gelten weiter die grundsätzlichen Ziele und das Format der Vortragsreihe, so wie sie im Vorwort zu Band 1 der Serie beschrieben sind, welcher die Vorträge aus der Zeit 1991 – 1992 wiedergibt, einzusehen unter den Nachnamen der Autoren als Suchbegriff oder unter

<https://books.ub.uni-heidelberg.de/heibooks/catalog/book/192>

Heidelberg, im Oktober 2017

*Die Herausgeber*



Immo Appenzeller



# Immo Appenzeller

Immo Appenzeller wurde 1940 in Bad Urach, Württemberg, geboren. Er studierte Physik und Astronomie in Tübingen und Göttingen und promovierte dort 1966. Anschließend arbeitete er als Postdoc an der University of Chicago und als wissenschaftlicher Assistent in Göttingen. Dort habilitierte er sich 1970 mit einer theoretischen Arbeit aus dem Bereich der stellaren Astrophysik. Von 1975 bis zu seiner Emeritierung 2005 war er Ordinarius für Astronomie an der Universität Heidelberg und Leiter der Landessternwarte Heidelberg-Königstuhl. Ab 1979 war er Auswärtiges Wissenschaftliches Mitglied des Max-Planck-Instituts für Astronomie, das er 1998 bis 2000 kommissarisch leitete. Von 1994 bis 1997 war Appenzeller der Generalsekretär der Internationalen Astronomischen Union (IAU). Seit 2004 ist er Mitglied der Heidelberger Akademie der Wissenschaften. Seine wissenschaftlichen Interessen umfassten insbesondere die Erforschung des interstellaren Magnetfelds, die Entstehung, den Aufbau und die zeitliche Entwicklung von Sternen, die kosmischen Röntgenquellen, aktive galaktische Kerne, Galaxien im frühen Universum sowie den Bau innovativer astronomischer Instrumente. Seine Arbeit wurde unter anderem mit dem französischen Gay-Lussac-Humboldt-Preis und der Karl-Schwarzschild-Medaille der Astronomischen Gesellschaft ausgezeichnet.



*Immo Appenzeller*

## **Astrophysik im Goldenen Zeitalter**

Von einem "Goldenes Zeitalter" reden die Astronomen seit einem Artikel in der New York Times vom 8. Mai 1984. Dort wurde der amerikanische Astrophysiker Robert Charles Bless (1927 – 2015) mit den Worten zitiert: "There is no question that astronomers will look back on this period as a Golden Age". Der durchaus nachvollziehbare Grund für diese Bezeichnung ist der fundamentale Fortschritt unseres Wissens über den Kosmos in den letzten fünf Jahrzehnten. In diesem Zeitraum gelang es zum ersten Mal, den Bereich des Kosmos, von dem wir Licht empfangen können, räumlich und zeitlich vollständig zu überschauen. Außerdem gelang es, den gesamten Wellenlängenbereich der elektromagnetischen Strahlung, in dem Beobachtungen prinzipiell möglich sind, für die Astronomie nutzbar zu machen. Als Folge davon wurde eine Vielzahl neuer Objekte und Phänomene (wie die Schwarzen Löcher, Neutronensterne, Gravitationslinsen, die Dunkle Energie, der kosmische Mikrowellenhintergrund, Planeten außerhalb des Sonnensystems und die Gravitationswellen) entdeckt, und Spekulationen konnten durch Messungen ersetzt werden.

Mein erster Kontakt mit der Astrophysik fiel zufällig in den Beginn dieser Epoche. Das wusste ich damals aber nicht. Genauer gesagt, ich wusste überhaupt nichts von Astrophysik, und es war zunächst keineswegs meine Absicht, in diesem Arbeitsgebiet Karriere zu machen.

### **Wie ich zur Astrophysik kam**

Begonnen hat alles mit dem Buch "Einstein und das Universum" von Lincoln Barnett, das mir etwa 1954 in die Hände fiel, als ich Schüler an einem Gymnasium in Frankfurt am Main war. Das englische Original "The Universe and Dr. Einstein" war 1949 erschienen, und Einstein selbst hatte noch das Vorwort dazu geschrieben. Ich war von Barnetts Buch fasziniert, verstand aber vieles nicht. Mit meinen offenen Fragen wandte ich mich an meinen Physiklehrer. Der erklärte mir, um Einstein zu verstehen, müsste ich zur Universität gehen und Physik studieren. Das tat ich dann auch, und zwar (nach dem Abitur in Stuttgart) zunächst in Tübingen. Damals war Kernphysik die große Mode. Nach dem Vordiplom ging ich daher nach Göttingen, um mich um eine Diplomarbeit bei der Gruppe von Arnold Flammersfeld (der dort einen kleinen Beschleuniger betrieb) zu bewerben. Leider hatten viele meiner Kommilitonen die gleiche Idee. Flammersfelds Institut war von Studenten überlaufen, und man sagte mir, dass ich mindestens einige Monate warten müsste, ehe ich mit einer Diplomarbeit beginnen könnte. Warten wollte ich aber nicht. Ich hatte im Krieg meinen Vater verloren und lebte von einer bescheidenen Waisenrente. Deshalb war ich sehr daran interessiert, das Studium zügig zu beenden, und ich fand, dass man in dem wenig beliebten Fach Astrophysik sofort mit einer Diplomarbeit beginnen konnte. Auf diese Weise landete ich 1962 statt in Flammersfelds Beschleuniger-Gruppe in der historischen (unter Carl Friedrich Gauß erbauten) Göttinger Sternwarte. Meine Absicht war dabei, möglichst schnell ein Diplom zu erwerben und dann zu "richtiger" Physik zurückzukehren.

### **Göttingen und Chicago (1962 – 1967)**

Mein Betreuer an der Sternwarte war Alfred Behr (1913–2008), der für seine Beiträge zur astronomischen Technologie und zur Kosmologie bekannt war. Thema meiner Arbeit war die Bestimmung der Struktur des interstellaren Magnetfelds in der Sonnenumgebung mit Hilfe von Polarisationsmessungen des Lichtes von



Hintergrundsternen. Man benutzt dabei, dass Staubteilchen im interstellaren Raum durch das Magnetfeld partiell ausgerichtet werden. Licht, das durch interstellare Staubwolken geht, wird daher sowohl abgeschwächt als auch linear polarisiert. Aus dem Positionswinkel der Polarisation kann man die Projektion der Magnetfeldvektoren bestimmen, und aus dem Verhältnis von Abschwächung und Polarisation erhält man den Winkel zwischen dem Feld und dem Sehstrahl. Wenn man die Entfernung der Sterne kennt, kann man damit das Feld dreidimensional kartieren. Für die Arbeit standen mir ein kleines Teleskop auf dem Hainberg östlich von Göttingen und ein Sternpolarimeter zur Verfügung, das Behr entwickelt hatte und das damals weltweit das genaueste Gerät dieser Art war.

Dank Behrs vorzüglichem Instrument lieferten die Messungen interessante Ergebnisse. Aber der Fortschritt war langsam, denn, wie man in den Statistiken des deutschen Wetterdienstes nachlesen kann, gehört Göttingen zu den Orten mit dem geringsten Anteil an klarem Himmel in Deutschland. Nach einem Jahr Kampf mit den Wolken suchte ich nach Möglichkeiten, Behrs Polarimeter an einem günstigeren Standort zu betreiben, und ich erhielt ein entsprechendes Angebot von einer Sternwarte in Südfrankreich. Um mit dem Polarimeter dorthin umzuziehen, benötigte ich Behrs Genehmigung. Der war aber gerade in den USA. Daher schrieb ich ihm einen Luftpostbrief und erklärte meine Pläne. Behr schrieb zurück, dass er einen besseren Vorschlag hätte: Er hatte in den USA William Albert Hiltner (1914-1991) getroffen, der einer der Entdecker der interstellaren Polarisation war, und der damals das Yerkes-Observatorium der University of Chicago leitete. Hiltner hatte gerade ein neues, speziell für Polarisationsmessungen konstruiertes Teleskop installiert, und er suchte jemanden, der ihm bei der Inbetriebnahme half. Er bot mir dafür eine temporäre technische Stelle und soviel Beobachtungszeit an, wie ich brauchen würde, um mein Programm zu beenden.

Wie ich später erfuhr, war der Grund für Hiltners großzügiges Angebot, dass Behr ihm von einem Computerprogramm zur

Berechnung der Polarisation aus den Rohdaten berichtet hatte, das ich in Göttingen geschrieben hatte. In Göttingen waren diese Rechnungen vorher mit mechanischen Rechenmaschinen durchgeführt worden, während man in Chicago graphische Verfahren benutzte. Beides war aufwändig und nicht sehr genau. Software sollte für mich auch in der Folgezeit immer wieder eine wichtige Rolle spielen.

Nachdem ich mir die notwendigen Papiere und ein Reisestipendium für ein Flugticket beschafft hatte, traf ich im Sommer 1964 am Yerkes-Observatorium ein, das sich etwa 100 km nördlich des Zentrums von Chicago befindet und wo damals die Astronomie-Abteilung der University of Chicago residierte. Verbunden mit dem Yerkes-Observatorium war das McDonald-Observatorium im Westen von Texas, etwa 300 km östlich von El Paso. McDonald Observatory hat nichts mit Fast Food zu tun, sondern verdankt seine Existenz dem Vermächtnis eines texanischen Bankers gleichen Namens zum Bau eines Observatoriums für die University of Texas. Da diese noch keine Astronomieabteilung hatte, wurden die Kollegen in Chicago beauftragt, die Sternwarte zu gründen. Sie wurde deshalb während der ersten Jahrzehnte gemeinsam mit dem Yerkes-Observatorium betrieben.

Hiltners neues Polarimeter war noch genauer als Behrs Instrument. Die Messungen waren aber zeitaufwändig. In beiden Instrumenten wurde das einfallende Licht mit einem Wollaston-Prisma in zwei senkrecht zu einander polarisierte Komponenten aufgespalten. In Göttingen wurde zur Messung das Polarimeter um die optische Achse des Teleskops gedreht. Einfallendes linear polarisiertes Licht ergab dann eine periodische Modulation des Verhältnisses der beiden Komponenten. Aus der Amplitude der Modulation folgte der Polarisationsgrad, und aus der Phasenwinkel erhielt man den Positionswinkel der Polarisation. Um die Eigenpolarisation der Teleskopoptik zu eliminieren, wurde in Chicago nicht nur das Polarimeter, sondern der ganze Teleskoptrubus, samt Optik gedreht. Die Bewegung der schweren Teile und die Notwendigkeit, die Kollimation exakt zu erhalten, kosteten aber Zeit.

Deshalb schlug ich Hiltner vor, Teleskop und Polarimeter stationär zu halten und die Schwingungsrichtung des Lichts mit Hilfe einer achromatischen  $\lambda/2$ -Platte zu rotieren. Hiltner fragte mich, ob ich ein solches Polarimeter für sein Institut bauen könnte. Das ging aber nicht sofort, denn ich war ja noch Student in Göttingen. Im Frühjahr 1965 kehrte ich daher zunächst nach Deutschland zurück, beendete mein Studium mit einer Promotion in Astronomie und war dann ein Jahr später wieder in Chicago (jetzt auf einer wissenschaftlichen Stelle) und baute das neue Polarimeter.

Das neue Instrument enthielt nicht nur die  $\lambda/2$ -Platte, sondern auch eine verbesserte Elektronik und eine programmierbare automatische Steuerung. Es war um Faktoren zwischen fünf und zehn schneller (und noch genauer) als sein Vorgänger. Beobachtungen, die vorher eine Woche benötigten, konnte man nun in einer Nacht durchziehen. Das Instrument wurde schnell bekannt und an verschiedenen amerikanischen Forschungseinrichtungen (und später auch in Europa) nachgebaut. Ein Vorteil war auch, dass das neue Polarimeter transportabel war und an den größeren Teleskopen des McDonald-Observatoriums eingesetzt werden konnte. Dort erreichte man damit auch schwächere Objekte, insbesondere die neu entdeckten Quasare, die mich damals besonders interessierten.

Neben Polarisationsmessungen und Spektroskopie gehörte zu meinen Aktivitäten in Chicago auch etwas Sonnenphysik. Dazu war ich zweimal Gast am Sacramento-Peak-Sonnenobservatorium bei Alamogordo in New Mexico. Nach dort hatte mich Egon-Horst Schröter (der späterer Leiter des Kiepenheuer-Instituts für Sonnenphysik in Freiburg) eingeladen, mit dem ich damals an einer Analyse der turbulenten Bewegungen in der Sonnenatmosphäre arbeitete, die viel Rechenzeit benötigte. Sacramento Peak wurde von der amerikanischen Luftwaffe betrieben, war daher sehr gut ausgerüstet und besaß besonders leistungsfähige Rechner, mit denen die Arbeit wesentlich schneller ging als in Chicago oder Göttingen.

### **Theoretisches Intermezzo (1967–1975)**

Trotz eines attraktiven Angebots der nationalen Kitt-Peak-Sternwarte in Tucson in Arizona (für die ich eine Kopie des Yerkes-Polarimeters gebaut hatte) kehrte ich in der zweiten Hälfte 1967 aus verschiedenen Gründen wieder nach Göttingen zurück, allerdings zu einer anderen Abteilung, nämlich in die Theoriegruppe von Rudolf Kippenhahn.

Kippenhahn war Anfang 1965 auf eine neue Professur für theoretische Astrophysik nach Göttingen berufen worden. Er hatte vorher in Erlangen, Bamberg, Berkeley und am Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik in München gearbeitet. Dort hatte er ein umfangreiches Computerprogramm zur Modellierung des Aufbaus und der zeitlichen Evolution von Sternen entwickelt. Ich lernte Kippenhahn und seine Gruppe kennen, als ich im Sommer 1965, um etwas Geld zu verdienen, für ihn Programmierarbeiten übernahm. Zu meiner Überraschung fragte mich Kippenhahn, ob ich nach meiner Promotion bei ihm als Assistent arbeiten wollte. Ich hatte aber bereits die Vereinbarung mit Hiltner. Kippenhahn hatte Verständnis dafür, dass ich Chicago vorzog, sagte mir aber, dass ich mich gerne wieder bei ihm melden könnte, falls ich nach Deutschland zurück käme und er noch oder wieder eine freie Stelle hätte. Dieser Fall trat dann 1967 ein.

Wie bereits erwähnt, interessierten mich damals ganz besonders die noch rätselhaften Quasare. Wir wissen heute, dass es sich dabei um massereiche Schwarze Löcher in den Zentren von Galaxien handelt, in deren Umgebung besonders effizient Masse in Strahlung umgesetzt wird. 1967 war lediglich klar, dass relativistische Effekte eine Rolle spielen mussten. William Alfred Fowler (der spätere Nobelpreisträger) hatte 1966 als Ursache des Quasarphänomens Relaxationsschwingungen von instabilen "Supersternen" mit mehr als 100 000 Sonnenmassen vorgeschlagen. Dieses Modell wollte ich mit Kippenhahns Code testen. Dazu musste allerdings die newtonsche hydrostatische Gleichung durch die sphärisch symmetrische, relativistische Bewegungsgleichung (die Misner-Sharp-Gleichung) ersetzt werden. Zusammen mit

meinem Kollegen Klaus Fricke gelang es, das entsprechende Programm zum Laufen zu bringen. Wir konnten damit aber lediglich nachweisen, dass Fowlers Idee nicht funktioniert. Je nach Masse kollabieren oder explodieren die Supersterne. Immerhin konnten wir einen Weg aufzeigen, wie man schwarze Löcher großer Masse erzeugen konnte.

Kippenhahn, von dem ich damals vieles lernte, hatte mir den guten Rat gegeben, in das Programm zuerst die einfachere newtonsche Bewegungsgleichung einzubauen, um den Übergang zum dynamischen Fall ohne die Komplikationen der relativistischen Terme studieren zu können. Ich erhielt daher als Nebenprodukt auch einen Code zur Lösung der newtonschen hydrodynamischen Sternaufbaugleichungen. Damit untersuchte ich zwei weitere damals aktuelle Fragen. Zum einen modellierte ich die Entwicklung von Sternen von über 100 Sonnenmassen mit zentralem Wasserstoffbrennen, von denen bekannt war, dass sie vibrationell instabil sind. Ich konnte dabei zeigen, dass nichtlineare Effekte das Anwachsen der durch die Instabilität getriebenen Schwingungen bei moderaten Amplituden stoppen, und dass solche Sterne daher nicht, wie vorher angenommen, durch die Instabilität zerstört werden. Die zweite Anwendung des newtonschen Programms war eine Modellierung der Sternentstehung durch den gravitativen Kollaps interstellarer Gaswolken. Diese Rechnungen führte ich zusammen mit Werner Tscharnuter durch, der dann später hier in Heidelberg am Institut für Theoretische Astrophysik tätig war.

In die Zeit in Kippenhahns Gruppe fiel auch mein erster Kontakt mit dem European Southern Observatory (ESO). Diese Organisation war 1962 von zunächst sechs europäischen Ländern gegründet worden und eröffnete 1969 auf dem Berg La Silla, etwa 500 km nördlich von Santiago de Chile, am Südrand der Atacama-Wüste, ihre erste (von inzwischen drei) Beobachtungsstationen. Mein erster Besuch dort erfolgte 1971 und diente Messungen, mit denen ich die Ergebnisse meiner theoretischen Rechnungen überprüfen wollte.

Diese Beobachtungen waren der Beginn einer langen und engen Zusammenarbeit mit ESO, die sich über meine Emeritierung hinaus fortsetzte. Die erste Reise nach La Silla war aber ein kleines Abenteuer – und eine gute Einführung in die Unwägbarkeiten und Überraschungen, die das Leben in Südamerika interessant machen. Bis Santiago ging die Reise nach Plan. Von dort sollte ich zusammen mit einem jungen Kollegen aus Bochum zur Provinzstadt La Serena fliegen, wo uns ein Auto abholen sollte. Am Regionalflugplatz von Santiago angekommen, mussten wir aber feststellen, dass alle Flüge nach Norden storniert waren. Chile hatte gerade Staatsbesuch von Fidel Castro aus Kuba, und zum Transport seiner Delegation waren kurzerhand die Flugzeuge der staatlichen Flugesellschaft requiriert worden. Nach Rücksprache mit ESO fuhren wir daher mit einem Linienbus nach La Serena, wo wir nach neun Stunden am Abend ankamen. Das dortige ESO-Büro, wo wir uns melden sollten, hatte inzwischen geschlossen, und auf der Notfallnummer, die man uns gegeben hatte, meldete sich niemand. Wir fragten daher den Taxifahrer, der uns zum ESO-Büro gebracht hatte, ob er uns nach dem 160 km entfernten La Silla fahren könnte. Nachdem wir versprochen, ihn in US-Dollar zu bezahlen, war er bereit, das zu tun. Etwa um Mitternacht erreichten wir Camp Pelicano, das Bau- und Versorgungslager am Fuße von La Silla. Bauarbeiter, die bei Scheinwerferlicht noch Fußball spielten, öffneten uns das Tor. Der Taxifahrer musste aber umkehren. Natürlich wollten wir weiter auf den Berg. Die Arbeiter sagten uns, dass ihre Fahrer alle schon schlafen würden, dass wir aber, wenn wir einen Führerschein hätten, gerne ein Auto aus ihren Fuhrpark nehmen könnten. Autos hätten sie genug, und die Schlüssel würden stecken. Folglich fand ich mich für die letzten fünfzehn horizontalen (und zwei vertikalen) Kilometer am Steuer eines etwas sperrigen Vehikels auf einer nächtlichen Gebirgsstraße. Der interessanteste Moment kam am nächsten Morgen, als wir uns beim Berg-Chef vorstellten. Der sah uns an, als ob wir Geister wären, denn er hatte gerade am Telefon erfahren, dass wir uns noch in Santiago befinden würden.

Später legte ESO einen Landeplatz nahe Camp Pelicano an, der mit kleinen Chartermaschinen direkt von Santiago aus angefliegen werden konnte. Das machte den Zugang nach La Silla wesentlich komfortabler, aber auch da gab es manchmal interessante Zwischenfälle.

Ein anderer, längerer Abstecher aus Göttingen war 1972 ein Sommersemester als Gastdozent an der Universität Tokyo. Dieser Aufenthalt war der Beginn langjähriger Freundschaften mit japanischen Kollegen, und er half mir, nicht nur Japan schätzen zu lernen, sondern auch die Besonderheiten unsere europäischen Kultur und Denkweise besser zu verstehen. Von Vorteil erwies es sich dabei, dass wir unseren etwa ein Jahr alten Sohn dabei hatten. Ein Kleinkind mit blonden Haaren war damals in Japan noch recht ungewohnt und zog überall die Aufmerksamkeit auf sich. Das war sehr effizient, Kontakte mit den gegenüber Fremden sonst eher zurückhaltenden Japanern herzustellen. Wissenschaftlich beschäftigte ich mich auch in Japan weiter mit Theorie und Sonnenphysik.

### **Heidelberg (1975–2005)**

Das theoretische Zwischenspiel endete, als ich 1975 die Heidelberger Professur für Astronomie und die Leitung der Landessternwarte (LSW) auf dem Königstuhl übernahm. Mein Vorgänger, Hans Elsässer (1929–2003), war 1968 zum ersten Direktor des neuen Max-Planck-Instituts für Astronomie (MPIA) ernannt worden. Dieses nahm 1969 seinen Betrieb in den Räumen der Landessternwarte auf und bezog im Juni 1975 die jetzigen Gebäude auf dem Königstuhl, südlich der LSW. Zum gleichen Zeitpunkt kam ich nach Heidelberg und übernahm Elsässers Schreibtisch in der Sternwarte.

Ein paar Worte zu diesem Institut: Formal war die LSW die Nachfolgeorganisation der kurfürstlich-pfälzischen (und später großherzoglich-badischen) Hofsternwarte, die 1898 auf den Königstuhl verlegt worden war. Bis zum Ersten Weltkrieg war das Institut unter Max Wolf eine sehr angesehene Forschungs-

einrichtung, die für die Entwicklung neuer Methoden und Instrumente weltweit bekannt war. Danach ging es aus verschiedenen Gründen bergab. In einem offiziellen Bericht vom 16.06.1954 beschrieb Hans Kienle (der die LSW 1950-1962 leitete) das Institut bei seiner Amtsübernahme als "ein auf dem Stand von 1932 (bei Max Wolfs Tod) stehen gebliebenes, schlecht gepflegtes Museum und eher eine Sozialversorgungsanstalt für beschäftigungslose Beamte und Angestellte als eine produktives Forschungsinstitut".

Als ich 1975 nach Heidelberg kam, war die Sternwarte kein Museum mehr. Kienle und Elsässer hatten die Infrastruktur des Instituts wieder aufgebaut und wieder wissenschaftliche Forschung etabliert. Ein "produktives Forschungsinstitut" war die Sternwarte aber immer noch nicht. Relativ zum Personalstand war der wissenschaftliche Ertrag nicht befriedigend. Hauptaufgabe war es daher zunächst, mit zeitgemäßen Hilfsmitteln (Computern, Bildverarbeitungssystemen und modernen Fokalinstrumenten), neuen Mitarbeitern mit zusätzlichem Fachwissen und einer Einbindung in internationale Kooperationen die Produktivität zu verbessern. Dass dies gelang, ist auch dem Heidelberger Umfeld mit der guten Zusammenarbeit der verschiedenen astronomischen Institute – unter anderem im Rahmen mehrerer gemeinsamer Sonderforschungsbereiche – zuzuschreiben.

Die wissenschaftlichen Themen, die wir an der LSW aufgriffen, waren zum Teil Fortsetzungen der Arbeit in Göttingen, wobei nun aber das Schwergewicht auf der Beobachtung lag. So halfen Claude Bertout, Bernhard Wolf, Joachim Krautter, Reinhard Mundt, Ulrich Bastian, Istvan Jankovics, Max Camenzind und andere mit Beobachtungen und theoretischen Studien das Modell für die Entstehung und frühe Entwicklung von sonnenähnlichen Sternen weiter zu entwickeln. Dieses Modell wurde dann von anderen Gruppen ausgebaut und ist heute ein Standardmodell. Die hellen Sterne großer Masse wurden von Bernhard Wolf, Otmar Stahl, Gerhard Klare, Franz-Josef Zickgraf und vielen anderen mit Beobachtungen vom UV bis zum Radiobereich sehr erfolgreich weiter untersucht. Hierbei spielten, neben ESO, der 1978 gestarteten



"International Ultraviolet Explorer" (IUE)-Satellit und später das Hubble Space Telescope wichtige Rollen. Das Problem der Quasare und der aktiven galaktischen Kerne bearbeiteten neben anderen Claus Möllenhoff, Max Camenzind, Stefan Wagner, Jochen Heidt und Mathias Dietrich sowohl mit Beobachtungen als auch mit neuen theoretischen Ansätzen.

Ein neues Thema waren die kosmischen Röntgenquellen und insbesondere die optische Identifikation von Röntgenquellen, die das Weltraumobservatorium ROSAT entdeckt hatte. ROSAT war am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik (MPE) in Garching entwickelt worden und suchte ab 1990 den ganzen Himmel nach Emittlern von Röntgenstrahlung ab. Das Resultat waren Röntgenkoordinaten für mehr als 100 000 neue Quellen. Um die physikalische Natur dieser Quellen abzuleiten, führten wir für repräsentative Stichproben optische spektroskopische Nachbeobachtungen aller Objekte durch, die innerhalb der Fehlerkreise der Röntgenkoordinaten lagen. Dieses Programm, das Joachim Krautter koordinierte, war ein Gemeinschaftsunternehmen des MPE (das die Koordinaten und deren Fehlerbalken lieferte), des "Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica" (INAOE) in Puebla, Mexiko und der LSW. Das INAOE stellte für das Projekt den Großteil der Beobachtungszeit an einem 2,15-m-Teleskop bei Cananea in Nordmexiko zur Verfügung. Die Landessternwarte installierte dort das speziell für das Programm konzipierte Multiobjektspektrometer LFOSC. Die Beobachter kamen aus Mexiko und Heidelberg.

Nachdem bei ESO und anderswo zunehmend größere Teleskope verfügbar wurden, verlagerte sich der Forschungsschwerpunkt der Sternwarte zu fernen Galaxien. Claus Möllenhoff, Ralf Bender, Roberto Saglia, und Dörte Mehlert untersuchten, im Rahmen nationaler und internationaler Kooperationen, grundlegende Eigenschaften dieser Objekte. Später wurden dann (im Rahmen eines Sonderforschungsbereichs) die Galaxien im ganz frühen Universum das zentrale Thema.

Neben den erwähnten (und anderen) wissenschaftlichen Arbeiten gehörte – in der Tradition von Max Wolf – auch die Entwicklung innovativer Instrumente zu den Aktivitäten der Sternwarte. Als Beispiel habe ich bereits LFOSC genannt. Ein anderes internationales instrumentelles Projekt war das "Orbiting and Retrievable Far and Extreme Ultraviolet Spectrometer" (ORFEUS). Hinter dem komplizierten Namen verbirgt sich ein kleines, wieder verwendbares Satellitenobservatorium mit einem 1 m Teleskop und Spektrometern für den bis dahin wenig untersuchten Spektralbereich 39-140 nm. ORFEUS wurde im Rahmen einer Kooperation der Universität Tübingen, der UC Berkeley, der Princeton University und der LSW entwickelt und in zwei Missionen (1993 und 1996) mit dem Space Shuttle in eine Umlaufbahn gebracht und später wieder eingefangen. Die Hoffnung der beteiligten Weltraumagenturen, mit solchen wieder verwendbaren Satelliten Kosten zu sparen, erfüllte sich nicht, aber wissenschaftlich waren die beiden Flüge recht erfolgreich.

Die meisten Instrumente bauten wir für auswärtige Observatorien, wo wir im Gegenzug garantierte Beobachtungszeit für unsere Forschungsarbeit erhielten. Eine wichtige Rolle spielte auch hier wieder die ESO-Organisation und insbesondere unsere Beteiligung am "Very Large Telescope" (VLT), das ESO zwischen 1998 und 2000 in Betrieb nahm. Das VLT gehörte zu einer neuen Generation von optischen Teleskopen, die statt starrer Spiegel kontrolliert verformbare "aktive" Reflexionsoptiken verwenden. Mit dieser Technik können die optischen Flächen unabhängig von äußeren Einflüssen immer in der optimalen Form gehalten werden. Man erreicht damit nicht nur eine bessere Bildqualität, sondern man kann auch wesentlich größere Instrumente bauen. Außerdem spart man Kosten. So waren die Baukosten von ESOs erstem aktivem Teleskop (einem 3,5-m-Instrument, das 1989 fertig gestellt wurde) weniger als halb so hoch wie die des etwa gleich großen, konventionellen 3,6-m-Teleskops aus dem Jahre 1976.

Beim "Very Large Telescope" war ich hauptsächlich bei drei Teilspekten beteiligt: Zunächst half ich im Rahmen einer

Arbeitsgruppe das optisch-mechanische Konzept festzulegen. Dann war ich Mitglied mehrerer Expertenteams, die einen optimalen Standort für das neue Teleskop finden sollten. Und schließlich bauten wir in Heidelberg Fokalinstrumente für das VLT.

Entsprechend unserem Vorschlag wurde das VLT als ein System aus vier ortsfesten Teleskopen mit dünnen, aktiv kontrollierten Spiegeln von jeweils 8,2 m Durchmesser, sowie vier beweglichen, konventionellen Teleskopen von jeweils 1,8 m Öffnung realisiert. Die 8-m-Teleskope können einzeln oder mit einem gemeinsamen Fokus betrieben werden und haben zusammen die Lichtsammelleistung eines 16-m-Spiegels. Die kleinen Teleskope können auf Schienen über maximal 200 m verfahren werden. Sie können entweder zusammen mit den großen Teleskopen oder auch nur untereinander als Interferometer betrieben werden. In diesem Fall kann das VLT mit Hilfe der Technik der Apertursynthese Bilder mit einer Winkelauflösung bis herunter zu einer Millibogensekunde erzeugen.

Als Standort wurde zunächst die Umgebung von La Silla ins Auge gefasst, was die Mitnutzung der dort vorhandenen Infrastruktur ermöglicht hätte. Andererseits war bekannt, dass weiter im Norden von Chile, im völlig trockenen Zentrum der Atacamawüste, die Atmosphäre noch durchsichtiger und stabiler ist. Die Suche wurde daher auf den ganzen Norden ausgedehnt, einschließlich des Grenzgebiets zu Bolivien und Argentinien, wo inzwischen das ALMA-Observatorium für den Wellenlängenbereich 0,3 – 9 mm installiert wurde. Für das VLT zeigten sich aber Berge nahe der Pazifikküste, etwa 100 km südlich von Antofagasta (und rund 1000 km nördlich von Santiago) als besser geeignet. Unsere erste Wahl war der 3064 m hohe Berg Cerro Armazones. Wegen Problemen mit den Besitzverhältnissen wurde das Teleskop dann aber auf dem etwas niedrigeren Cerro Paranal (unserer zweiten Wahl) errichtet. (Inzwischen verfügt ESO auch über den Cerro Armazones, wo nun unter der Bezeichnung "ESO Extremely Large Telescope" (E-ELT) ein 39-m-Teleskop im Bau ist, das im

nächsten Jahrzehnt fertig werden soll.) Paranal erwies sich auch im praktischen Betrieb als ausgezeichnete Standort. (Sonst hätten sich die Mitglieder unseres Komitees auch nicht mehr bei ESO blicken lassen dürfen ...)

Am Bau von Fokalinstrumenten für das VLT beteiligten sich in Heidelberg sowohl das MPIA als auch die LSW. Ein wichtiges Instrument, das vom MPIA zusammen mit dem Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik (MPE) und ESO realisiert wurde, war CONICA, eine Kamera-, Spektrometer-, Polarimeter-Kombination für den Wellenlängenbereich 1–5  $\mu$ . Zusammen mit einer adaptiven Optik ermöglicht CONICA beugungsbegrenzte Beobachtungen, die im genannten Spektralbereich ziemlich genau die gleiche Winkelauflösung besitzen, wie die visuellen Bilder des Hubble Space Telescope.

Mit CONICA hatte ich persönlich nur am Rande während meiner Tätigkeit am MPIA zu tun. Intensiver war ich bei den beiden Universalinstrumenten FORS1 und 2 für den Wellenlängenbereich 330 – 1100 nm involviert, die von der LSW in Zusammenarbeit mit den Universitätssternwarten in Göttingen und München für ESO gebaut wurden. Bei den ESO-Technikern erhielten sie wegen ihrer Form und ihrer gelben Lackierung die Bezeichnung "the Yellow Submarines". Sie wurden speziell für die Beobachtung extrem lichtschwacher Objekte ausgelegt. FORS1 wurde 1998 als erstes wissenschaftliches Fokalinstrument am VLT installiert; FORS2 folgte ein Jahr später. Für beide Instrumente war eine Nutzungsdauer von 10 Jahren geplant. FORS2 ist aber immer noch im Betrieb und nach wie vor das gefragteste und produktivste von inzwischen 16 VLT-Fokalinstrumenten. Zusammen führten die beiden FORS-Instrumente bis jetzt zu etwa 2000 Veröffentlichungen in unseren führenden Fachzeitschriften (einer Rate von etwa zwei pro Woche).

Das VLT war ein entscheidender Fortschritt für die europäische Astronomie. Es kann aber nur die Südhälfte des Himmels erfassen. Deshalb gab es in Europa ab 1980 auch Pläne für ein modernes Großteleskop auf der Nordhalbkugel. In Deutschland bildete sich

dazu 1985 ein Konsortium, das zusammen mit spanischen und englischen Instituten ein 12-m-Teleskop auf der Kanareninsel La Palma plante. Dieses Projekt musste aufgegeben werden, als nach der deutschen Wiedervereinigung die erhofften Bundesmittel für den Wiederaufbau im Osten benötigt wurden. Der Bedarf an Beobachtungszeit an einem großen Nordhimmelteleskop bestand aber weiterhin. Einige deutsche Institute schlossen sich daher bestehenden Teleskopprojekten (hauptsächlich) in den USA an. Aus Heidelberg beteiligten sich das MPIA und die LSW am "Large Binocular Telescope" (LBT) in Arizona, einem innovativen Teleskop mit zwei 8,4 m Spiegeln in einer gemeinsamen Montierung. Auch für das LBT bauten wir wieder Fokalinstrumente, darunter die beiden NIR-Universalinstrumente LUCI 1 & 2. Dieses Projekt, bei dem die LSW, das MPIA und das MPE zusammen arbeiteten, leitete mein Kollege Holger Mandel, der auch schon bei ORFEUS und anderen Spektrometerprojekten wichtige Funktionen hatte. Entscheidend für das Gelingen der LUCI-Instrumente war Walter Seifert, der (wie auch bereits bei FORS) das komplexe optische System entwickelte und realisierte.

Ein weiteres internationales Großprojekt, das hier erwähnt werden muss, ist das TeV Gamma-Observatorium H.E.S.S., das unter der Leitung unseres Kollegen Werner Hofmann vom MPI für Kernphysik in Namibia betrieben wird. Die LSW leistete auch hier einen Hardwarebeitrag und ist in diesem Projekt durch die Gruppe von Stefan Wagner vertreten.

### **IAU und MPIA**

Wie wir alle, verbrachte auch ich einen signifikanten Teil meiner aktiven Zeit mit Nebentätigkeiten, die nicht unmittelbar mit meinen Dienstaufgaben zu tun hatten. Davon möchte ich hier nur kurz meine Arbeit für die Internationalen Astronomischen Union (IAU) und am Max-Planck-Institut für Astronomie erwähnen.

Bei der IAU, die die astronomische Forschung und insbesondere die internationale Zusammenarbeit global koordiniert, war ich neun Jahre Mitglied im Executive Committee, und drei Jahre war

ich Generalsekretär und damit Leiter des zentralen IAU Büros in Paris. Naturgemäß ging dies auf Kosten der Zeit, die mir für meine Aufgaben in Heidelberg zur Verfügung stand. Andererseits profitierte die deutsche – und die Heidelberger – Astronomie aber auch von den weltweiten Kontakten, die mit den IAU-Funktionen verbunden waren.

Beim MPIA war ich seit 1979 auswärtiges wissenschaftliches Mitglied, und zwei Jahre (1998-2000) leitete ich das Institut vorübergehend. Wie erwähnt, war ab 1968 Hans Elsässer Direktor des MPIA. Er baute das Institut auf und führte es bis 1994. Abgelöst wurde er von Steven Beckwith, der seit 1991 zweiter Direktor am Institut war. Beckwith brachte mit großem Elan neue Ideen und einen neuen Arbeitsstil an das MPIA. Aber bereits 1997 erhielt er den Ruf zum Leiter des "Space Telescope Science Institute" in Baltimore. Er verließ daher im März 1998 Heidelberg. Hans Elsässer war inzwischen emeritiert und schwer erkrankt. Für seine Nachfolge lief ein Berufungsverfahren, allerdings zunächst wenig erfolgreich. Das Institut war daher ohne regulären Direktor, und innerhalb der MPG wurde die Frage gestellt, ob es überhaupt weiter betrieben werden sollte. Dies insbesondere, weil der ursprüngliche Zweck des Instituts der Betrieb eines Observatoriums außerhalb Deutschlands gewesen war. Dieses war zwischen 1975 und 1984 in Zusammenarbeit mit spanischen Institutionen als "Deutsch-Spanisches Astronomisches Zentrum" (DSAZ) auf dem Berg Calar Alto in Südspanien in Betrieb gegangen. Für einige Zeit spielte diese Sternwarte eine wichtige Rolle für die deutsche und die spanische Astronomie. Insgesamt stand sie aber unter keinem glücklichen Stern. Ihre beiden wichtigsten Teleskope entsprachen bereits bei ihrer Installation nicht mehr dem Stand der Technik, und am gewählten Standort erwiesen sich weniger als die Hälfte der Nächte als astronomisch brauchbar. Das machte den Betrieb, so wie er ursprünglich organisiert war, unwirtschaftlich.

Zu meine Aufgaben gehörte es daher, das offene Berufungsverfahren zum Erfolg zu bringen, mit unseren spanischen Partnern einen neuen Vertrag auszuhandeln, der einen wissenschaftlich und

finanziell vertretbaren Weiterbetrieb des Calar-Alto-Observatoriums ermöglichte, und die MPG davon zu überzeugen, dass das MPIA auch unabhängig vom DSAZ eine für die deutsche und europäische Astronomie wichtige Forschungseinrichtung geworden war. Entscheidend für den Erfolg war, dass Ende 1998 Hans Walter Rix, der damals an der University of Arizona in Tucson arbeitete, den Ruf für die Nachfolge Elsässer annahm. Wie vorher Beckwith brachte Rix neue wissenschaftliche Impulse mit, und er übernahm dann im Sommer 2000 die Geschäftsleitung. Zusammen mit Hans Walter Rix gelang es auch, die zweite Direktorenstelle (Nachfolge Beckwith) durch die Berufung von Thomas Henning erfolgreich wieder zu besetzen und damit das Institut in ein ruhigeres Fahrwasser zurück zu bringen.

### **Lehre und wissenschaftlicher Nachwuchs**

Mein primärer Auftrag in Heidelberg war die Leitung einer Forschungseinrichtung. Die akademische Lehre und die Arbeit mit Studenten waren für mich aber keineswegs weniger wichtig. Auch in den Jahren, in denen ich in Paris das IAU-Büro leitete, hielt ich regelmäßig in Heidelberg Vorlesungen, obwohl man mir angeboten hatte, mich für diese Zeit von akademischen Verpflichtungen frei zu stellen. Zu den besonderen "Highlights" gehörten für mich immer die erfolgreichen Promotionsprüfungen. Persönlich betreute ich im Laufe der Zeit etwa zwanzig Doktoranden, von denen (bis jetzt) etwa ein Drittel ebenfalls Hochschullehrer geworden sind und Doktoranden ausbildeten. Deshalb treffe ich immer häufiger junge Wissenschaftler, die sich mir als "akademische Nachfahren" vorstellen, weil sie bei meinen früheren Doktorandinnen oder Doktoranden (oder deren Schüler, usw.) promoviert haben. In diesem Zusammenhang erhielt ich kürzlich ein interessantes Foto. Es zeigt acht Kolleginnen und Kollegen, die sich im Oktober 2015 bei einer Tagung in den Niederlanden getroffen hatten und feststellten, dass sie – in dem genannten Sinne – alle zu meinen "akademischen Nachfahren" zählen. Sie machten daher das erwähnte Foto und schickten es mir mit freund-

lichen Grüßen. Die Aufnahme hatte zwei interessante Aspekte. Zunächst die Verteilung der Heimatinstitute der Gruppe: Drei arbeiteten in England, zwei in Frankreich, ein Kollege in Deutschland, und je eine Kollegin in Irland und in den Niederlanden. Es ist ein gutes Beispiel für die in der Astronomie besonders ausgeprägte internationale Verflechtung. Auch bemerkenswert – und erfreulich – fand ich, dass die Kolleginnen eine Mehrheit der Gruppe bildeten.

Das Foto erinnerte mich an einen oft zitierten Absatz einer Rede, die der 26. Präsident der USA, Theodore Roosevelt, 1910 in der ländlichen Kleinstadt Osawatomie in Kansas gehalten hat. Roosevelt bezeichnete damals solche Farmer als "gute Farmer", die, nachdem es ihnen gelang, sich von ihrem Land zu ernähren und für die Ausbildung ihrer Kinder zu sorgen, das Land ihnen in einem besseren Zustand hinterlassen, als sie es selbst vorgefunden haben. Er fügte hinzu, dass das sinngemäß auch für eine Nation gilt. Man kann den Satz offensichtlich auch auf die Wissenschaften übertragen. Die jungen Kollegen von heute, unsere akademischen Nachfahren, finden in Europa deutlich bessere Voraussetzungen vor, als wir vor 50 Jahren. Offensichtlich haben wir nicht alles falsch gemacht. Allerdings sollten wir daraus nicht schließen, dass wir besonders gute Forscher und Lehrer waren. Im Vergleich zu der Generation vor uns hatten wir einfach mehr Glück, insbesondere das Glück, dass es (vermutlich zum ersten Mal in der dokumentierten Geschichte) 70 Jahre lang keinen Krieg in Mitteleuropa gab. Und die Astronomen hatten zusätzlich das Glück, in einem Goldenen Zeitalter zu arbeiten.

Vortrag gehalten an der Fakultät für Physik und Astronomie der Universität Heidelberg am 19. Mai 2016.



Ulrich Haerberlen



# Ulrich Haeberlen

Ulrich Haeberlen wurde 1934 in Blaubeuren in Württemberg geboren. Nach mittlerer Reife und einer Lehre als Feinmechaniker in der Waagenfabrik Bizerba in Balingen machte er 1955 das Abitur am Gymnasium Ebingen, heute Albstadt. Er studierte Physik an der Technischen Hochschule Stuttgart und promovierte dort 1966. In den Jahren 1967 bis 1969 war er erst Postdoc, dann Research Associate am Massachusetts Institute of Technology (MIT). Danach arbeitete er am Max Planck Institut für Medizinische Forschung in Heidelberg, wo er sich 1975 auf dem Gebiet der Hochauflösenden Kernresonanz in Festkörpern habilitierte. Seit 1987 war er dort Leiter der Arbeitsgruppe Molekülkristalle. In einem vielbeachteten Buch "High Resolution NMR in Solids" lieferte er die Grundlagen der Multipulsanregung, die heute z.B. auch die Basis der Versuche zum Quantencomputing bilden. Viele seiner Doktoranden waren später begehrte Entwickler in der aufkommenden NMR- und MRT-Industrie.



*Ulrich Haeberlen*

## **Von der Kerninduktion zur MRT**

Das Phänomen Kerninduktion wurde 1946 von Bloch, Hansen und Packard in Stanford entdeckt. Praktisch gleichzeitig erschlossen Purcell und seine Leute an Harvard die Kernresonanz als einen Zweig der Spektroskopie. Bloch und Purcell erhielten dafür den Physik-Nobelpreis 1952 und Packard gründete mit Hewlett die Firma Hewlett-Packard, die 50 Jahre später von Carly Fiorina abgewickelt wurde. Sie wollte dieses Jahr über das Ticket der Republikaner Präsidentin der USA werden. Hat nicht geklappt.

MRT steht in der Medizin für Magnet Resonanz Tomographie. Es ist heute ein Milliarden \$ und € Geschäft, in dem Siemens und General Electric dominieren. Beachten Sie, dass bei MRT jede Anspielung zu dem anrühigen Wort Kern sorgsam vermieden wird.

Zu mir:

Nachdem ich in 3 1/2 jähriger Lehrzeit einen ordentlichen Beruf erlernt hatte – Feinmechaniker – und einem weiteren Jahr Schulbankdrücken begann ich 1956 an der damaligen Technischen Hochschule Stuttgart Physik zu studieren. Experimentalphysiker war H.O. Kneser (Gerthsen, Kneser, Vogel, Meschede), die Theorie wurde vertreten durch Ulrich Dehlinger, einem großen Thermodynamiker, und Erwin Fues, der zur Generation Schrödinger und Dirac gehörte und an Solvay-Konferenzen teilgenommen hatte. Später kam noch Hermann Haken dazu, von dessen QM Vorlesungen ich viel profitierte. Mathematik lernte ich bei den Professoren Schulz, Pfeiffer und Lösch. Pfeiffer, damals schon über 80 Jahre alt, hielt eine Spezialvorlesung über Zylinderfunktionen. Einmal wandte er sich von der Tafel zum Häuflein Hörer und sagte leise: David Hilbert war wohl der größte

Mathematiker meiner Generation. Daran muß ich immer denken wenn mir das Hilbert-Zitat von Einstein und den Göttinger Schulbuben über den Weg läuft. Im nächsten Semester bot Herr Pfeiffer keine Vorlesung mehr an. Er war bereits verstorben. Prof. Lösch-Jahnke-Emde – Lösch kannte mich als einen treuen Hörer seiner Vorlesungen über Funktionentheorie und mathematische Funktionen der Physik. Wenn ich ihm auf der Straße begegnete, was öfters vorkam, hielt ich es für ein Gebot der Höflichkeit, ihn zu grüßen. Und er hielt es für ein Gebot der Höflichkeit, meinen Gruß zu erwidern – indem er vor mir den Hut zog. Das war mir jedes Mal peinlich. Aber was sollte ich tun?

Als es Zeit für eine Diplomarbeit war – damals machte man Diplom- und keine Bachelor- Arbeiten, bewarb ich mich dazu am Institut von Prof. Kneser. Als Feinmechaniker dachte ich, Experimentalphysik läge mir eher als Theorie. Ich wurde angenommen und der Kernresonanz Gruppe zugewiesen. So lief das. Die Stuttgarter Kernresonanz Gruppe wurde damals von Günther Laukien geleitet. Der war allerdings schon auf dem Absprung nach Karlsruhe, wo er die Firma Bruker gründete. Diese stellte und stellt Kernresonanzspektrometer und die zugehörigen Magnete her. Die Anfänge dieser Firma waren krumm und schwierig, aber heute beherrscht sie den Weltmarkt was Spitzengeräte für die Forschung angeht. Nach Garching hat sie im letzten Herbst ein 1.2 GHz Spektrometer verkauft. Das beinhaltet einen supraleitenden Magnet mit einer Feldstärke von 28 Tesla und einer Homogenität über das Probenvolumen – einer Kugel mit einem Durchmesser von 4 mm – von besser als  $10^{-9}$ . Er wird bei 1.9 K betrieben.

Für mich bedeutete der Weggang von Herrn Laukien, dass ich meine Diplom- und anschließend auch meine Doktorarbeit in einer Gruppe machte, der ein Kopf von Rang fehlte. Wir Diplomanden und Doktoranden waren weitestgehend auf uns selbst gestellt. Noch als Doktorand wurde ich Beamter auf Zeit und wurde als solcher vereidigt. Dabei fiel, mit ausdrücklichem Verweis auf Hitler und das 3. Reich, der Satz: Wes Brot ich ess, des Lied ich sing. Das wühlt mich noch heute auf.

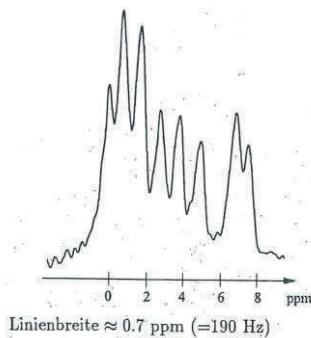
Nach der Promotion suchte ich Rat bei dem damals noch jungen Prof. Wolf. Der sagte mir: "Sie müssen so schnell wie möglich aus Stuttgart verschwinden". Wörtlich so, das habe ich behalten. Das war – so empfand ich es – brutal ausgedrückt, ich hatte mir in Stuttgart doch nichts zuschulden kommen lassen, aber Herr Wolf hatte recht. Das verstand ich schon damals und machte mich auf die Suche nach einer geeigneten Stelle als Postdoc. Die fand ich, ausgestattet mit einem Stipendium der DFG, am MIT in Cambridge/ Massachusetts bei John Waugh. Das war jemand, der innerhalb der Kernresonanz Gemeinde ganz vorne mitmischte. Er war Herausgeber der Serie *Advances in Magnetic Resonance*. Und er hatte wenige Monate vor meinem Eintreffen am MIT im Herbst 1967 DIE Idee seines Lebens. Er starb 2014.

Jetzt muß ich ein wenig ausholen. Damals, 1967, war die Kernresonanzspektroskopie weitgehend von den Physikern, die sie entdeckt hatten, auf Chemiker übergegangen. Die Chemiker nutzten, wie man sagte, hochauflösende Kernresonanzspektroskopie an Flüssigkeiten und Lösungen höchst erfolgreich für ihre Analysen.

Die Spektren, in der Regel bei einer Arbeitsfrequenz von 60 MHz aufgenommen, waren beherrscht von zwei Wechselwirkungen (WW), genannt isotrope chemische Verschiebung und indirekte, skalare Spin-Spin WW. Die erreichten Linienbreiten waren unter 1 Hz, weil die im Grund viel stärkere direkte Spin-Spin WW, die dipolare WW der Kerne, in isotropen Flüssigkeiten durch schnelle molekulare Bewegungen herausgemittelt wird.

Die in der Kernresonanz verbliebenen Physiker, auch wir in Stuttgart, wandten Impulsmethoden an, um Relaxationszeiten zu messen und damit molekulare Bewegungen in Festkörpern, häufig Polymeren, zu studieren. Mein Probenmaterial für Diplom- und Doktorarbeit war ein lineares Polyäthylen. Wir hatten gelernt, im rotierenden Koordinaten System der Kernspins zu denken, rotierend nicht mit der Larmorfrequenz der Kerne, sondern mit der Frequenz des eingestrahlten HF-Feldes. In Festkörpern wird die Dipol-Dipol WW (DDWW) der Kernspins nicht durch molekulare

Bewegungen weggemittelt, und deshalb sind die Resonanzlinien breit, 30-50 kHz. Allerdings: Bei hohen Magnetfeldern schon ab Bruchteilen eines Tesla und damit Larmorfrequenzen im Bereich von mehreren zig MHz bleibt von den fünf Tensorkomponenten der DDWW nur eine übrig. Der Quantenmechaniker sagt: nur eine ist säkular, nur eine führt in 1. Ordnung Störungstheorie zu einer Linienverbreiterung. Nun hatte John Waugh erkannt, dass man mit HF-Impulsen geeigneter Phase und geeigneter Zeitabfolge vom rotierenden zu einem rotierend-kippenden Koordinaten-System übergehen kann und dass in diesem Koordinaten-System der noch störende Term der DDWW sich im Mittel heraushebt. Der entscheidende Punkt ist, dass die tensoriellen Anteile der chemischen Verschiebung sich dabei nicht auch wegmitteln und so der Messung zugänglich werden. Das sollte den Chemikern, die so erfolgreich den isotropen Teil der chemischen Verschiebung nutzen, eine Fülle zusätzlicher Information in die Hand geben. Das wurde, vor allem in theoretischen Arbeiten, immer und immer wieder propagiert. Aus heutiger Sicht: Welch ein Irrtum!



**Abbildung 1.** Was hochauflösende NMR und Multipuls-NMR wirklich leisten.

Zur Umsetzung von John Waugh's Idee kam ich im Herbst 1967 gerade recht: Sowohl in meiner Diplom- als auch in meiner



Doktorarbeit hatte ich Kernresonanz-Impulsspektrometer gebaut und ich konnte mich rühmen, dass meine Spektrometer es erlaubten, so schnell wie kein anderes, insbesondere kein kommerzielles Gerät, nach einem Impuls von 400-500 Volt Spitze das Kernsignal auf einem Pegel von einigen wenigen Mikrovolt zu registrieren. Ich rede von Volt und nicht von Watt, weil es um die Messung einer HF-Spannung samt ihrer Phase und nicht um die einer HF-Leistung ging. Genau das erforderte die Umsetzung der Idee von John Waugh.

Die Multipulstechnik war der Anfang eines neuen Aufschwungs der Festkörperkernresonanz und war ein Teil von vielen technologischen Neuerungen in dieser Zeit. Überhaupt waren die späten 60er und frühen 70er Jahre eine Zeit dramatischen Technologiewandels, auch wenn es die Worte smartphone und hacken noch nicht gab. Im Herbst 1967 war ich mit der Bremen, einem regelmäßig verkehrenden Passagierschiff, über den Atlantik gekommen. Zwei Jahre später, bei meiner Rückkehr nach Deutschland, gab es keine Passagierschiffe mehr. In der Kernresonanzspektroskopie beherrschten bis etwa 1970 kontinuierliche Methoden das Feld. Noch 1966 erschien eine Arbeit mit dem späteren Nobelpreisträger Richard Ernst als Koautor, in der Fourierspektroskopie angewandt und analysiert wurde und deren Vorteile herausgestellt wurden. Dabei wird das Spinsystem mit einem kurzen HF-Impuls angeregt und das darauf folgende freie Induktionssignal Fourier-transformiert. In den 1970er Jahren verdrängte die Fourier Methode die kontinuierlichen Verfahren vollständig.

Bis in die 1970er Jahre wurden für Kernresonanzexperimente fast ausschließlich tonnenschwere, Strom- und Kühlwasser fressende Elektromagnete eingesetzt. Sie erzeugten Felder von 1.5 bzw. 2 Tesla. Ab 1970 begann ihre Ablösung durch supraleitende Magnete, die zunächst Felder von etwa 6 und 8 Tesla erzeugten und bald im "persistent mode" betrieben wurden. D. h. sie wurden von der Stromquelle vollständig getrennt. Die heutigen Spitzengeräte werden mit gepumptem Helium betrieben. Sollte die Temperatur

auf 4.2 K steigen wäre ein katastrophaler "Quench" die Folge. Aber so etwas passiert halt nicht. Das höchste Magnetfeld in meinem Labor hatte eine Stärke von 11 Tesla. Eigentlich war der betreffende Magnet für 11.7 Tesla entsprechend 500 MHz Protonenfrequenz gebaut worden, aber bei verschiedenen Versuchen des Herstellers (Bruker), ihn mit dem entsprechenden Strom zu laden, brach jedes Mal die Supraleitung zusammen. Bis 11 Tesla hielt sie und wir bekamen das gute Stück für etwa ein Viertel des regulären Preises. Bei uns wurde dieser Magnet nur ein einziges Mal mit Strom beladen und er hielt diesen Strom bis zu meiner Pensionierung. Der Drift nahm auf einer logarithmischen Skala gleichmäßig ab und war zuletzt unter  $10^{-9}$  pro Woche.

Ein weiterer Technologiewandel Ende der 60er Jahre: Bei unseren ersten Experimenten am MIT stanzte ein beteiligter Student die "Zeitdaten" Wert um Wert auf Lochkarten, dann trug er den Stapel Karten zum Zentralrechner des Departments und ließ von dem die Fourier Transformation ausführen. Als ich im Herbst 1969 das MIT verließ, hatte John Waugh den ersten Minicomputer, eine PDP 12, angeschafft. Und als ich in Heidelberg im Max-Planck-Institut für Medizinische Forschung eintraf – der dortige Direktor der Abteilung für Molekulare Physik, Karl Hausser, hatte mir eine Stelle als wissenschaftlicher Mitarbeiter angeboten – hatte dieser ebenfalls einen Minicomputer gekauft, einen französischen "Ordinateur" mit Namen CII 10010. Der hatte den Gegenwert eines Einfamilienhauses gekostet. Er hatte ein "Memory" von 16 kbyte, die Grundversion hatte nur 4. Jedes bit wurde von einem etwa 1 mm großen Ferritringchen realisiert, durch das vier hauchdünne Drähte gefädelt waren. Ich bewundere noch heute die Leute, vermutlich mäßig bezahlte Frauen, die diese Memoryboards hergestellt hatten. Sie durften kein einziges der zigtausend Drähtchen abreißen. Der "Ordinateur" kam ohne jegliche Software. Keinerlei Betriebssystem. Wir haben ihn in Maschinen-Sprache programmiert. Der Zugang erfolgte über eine Teletype die 10 Bytes pro Sekunde in Lochbänder stanzen oder von solchen lesen konnte.

Wir haben die 10010 mindestens 10 Jahre genutzt. Ich kann an sie nur mit Nostalgie zurückdenken.

Zum Punkt Technologiewandel in den frühen 70er Jahren gehört auch MRT. Bei einer eher kleinen Konferenz in Krakau im Herbst 71 berichtete Peter Mansfield, heute Sir Peter und Nobelpreisträger, über das Prinzip einer Methode zur Bildgebung mit Kernresonanz. Seine experimentellen Resultate waren alles andere als überzeugend. Schon einige Wochen zuvor hatte Paul Lauterbur, Mit-Nobelpreisträger, in den USA eine andere Version von MRT vorgestellt, die er Zeugmatography nannte und die ebenfalls als Kuriosum aufgenommen wurde. Das waren die Anfänge von MRT. Kleine Zwiebeln waren die ersten Objekte, die zu Demonstrationszwecken gerne abgebildet wurden. Nach 1971 war es lange offen, ob aus MRT je eine lebensfähige Technologie werden würde. Es muß Mitte der 80er Jahre gewesen sein, bei einer Tagung der deutschen Hochfrequenzphysiker in Hirschegg im Kleinwalsertal, als Herr Oppelt von der Siemens AG sagte: Erwarten Sie nicht, dass Siemens mit jedem verkauften MRT Gerät eine Stelle für einen Physiker mitverkauft. Wenn Siemens ein solches Gerät verkauft, dann wird es von einer MTA betrieben werden können. Und um dieselbe Zeit mahnte der von mir sehr geschätzte Geoffry Bodenhausen, damals noch ein junger Mann, bei einer Tagung in Zürich, man möge doch bitte auch an den Menschen denken, in dessen Kopf im MRT-Bild ein so schöner Tumor zu sehen sei. So drückten sich die Leute damals aus. Herr Bodenhausen wurde danach von älteren Herren wegen seiner "unangemessenen" Bemerkung streng gerüffelt.

Ich sah mich damals der Frage gegenüber, ob ich bei MRT mitmischen sollte. Ich verneinte sie, weil ich erkannt hatte, dass diese Sache auf Firmen und in die Hände von Ingenieuren übergehen würde, mit denen ich auf Dauer nicht würde konkurrieren können. Aber eine ganze Reihe meiner Doktoranden hat bei der Entwicklung von MRT "mitgemischt", bei Philips, bei Siemens und vor allem bei Bruker.

Ganz habe aber auch ich mich nicht von MRT verabschiedet. In den frühen 90er Jahren war am DKFZ ein Doktorand, den ich gegenüber der Fakultät vertrat. Er systematisierte und automatisierte an einem Siemens-Tomograph die heiklen Einstellungen der sogenannten Pre-Emphasis Impulse. Kurz vor seinem Rigorosum erzählte er in unserem Seminar von seiner Arbeit. Am Ende fragte ich ihn: "Wie stark interessieren sich die Siemens-Ingenieure für Ihre Resultate?" Seine entwaffnende Antwort. "Gar nicht, bei der Nachfolgeneration des Tomographen gibt es keine Pre-Emphasis Impulse mehr".

Später hatte ich einen Doktoranden, dessen Projekt es war, mittels MAFIA sogenannte Birdcage Resonatoren zu optimieren. Solche Resonatoren wurden von der Firma Bruker gebaut und für MRT Untersuchungen der Hirne von Affen verkauft. MAFIA war, und ist vermutlich immer noch, eine raffinierte, sehr teure Software zur Lösung der Maxwell Gleichungen bei gegebenen Randbedingungen. Das Ma in Mafia steht für Maxwell und das fi für finite Elemente. Für Firmen kostete damals eine 1-Jahres Lizenz rund 100 000 DM. Ich als Max-Planckler bekam die Lizenz für einen kleinen Bruchteil dieser Summe obwohl ich klar gesagt hatte, dass das Programm für eine Entwicklung bei Bruker eingesetzt werden sollte. Nachdem der Doktorand gelernt hatte, damit umzugehen, erzeugte es nicht nur schöne sondern auch nützliche Bilder von der Verteilung der Stärke des Hochfrequenz Feldes in Birdcage Resonatoren. Letztendlich war seine Arbeit erfolgreich, denn Bruker stellte ihn nach seiner Promotion ein und er ist heute noch dort und leitet eine eigene Gruppe.

Unvergesslich ist mir das kleine, offensichtlich schwer kranke Kind, von dem im DKFZ eine MRT Aufnahme gemacht werden sollte. Ich war ganz zufällig dabei. Der ganze Körper, das Gesicht, die Augen des Kindes drückten nur eines aus: hilflose ANGST.

Mitte der 70er Jahre brachte ich einen, den Kernresonanzversuch in das Praktikum für Fortgeschrittene ein und habe ihn selbstverständlich in der Anfangszeit auch betreut. Diesen Versuch gibt es immer noch, allerdings ist er mindestens 4 mal modernisiert

worden. Herr Schicker, der ihn derzeit betreut, versicherte mir mehrfach, dass er bei den Studenten sehr beliebt sei. Später war ich eine Reihe von Jahren einer der Leiter des Praktikums. Aus dieser Zeit habe ich neben anderen besonders diese Episoden in lebhafter Erinnerung:

Zum Praktikum gehörte es, dass jede Woche eine der Gruppen über "ihren" Versuch in einem Seminarvortrag referierte, begleitet vom Betreuer des Versuchs. Bei einem dieser Vorträge war nun ich der Betreuer. Der Student, der referierte, setzte sich vorne auf das Pult und zwar barfußig. Herr Sörgel, ich weiß nicht mehr in welcher Funktion, setzte sich in die erste Reihe, die staubigen baumelnden Füße des Studenten direkt vor dem Gesicht. Er sagte kein Wort zu den Füßen, mir aber trat der kalte Schweiß auf die Stirn. Erst nach dem Vortrag, unter vier Augen, konnte ich dem jungen Mann klarmachen, dass er sich unmöglich benommen hatte und dass das nie wieder vorkommen dürfe.

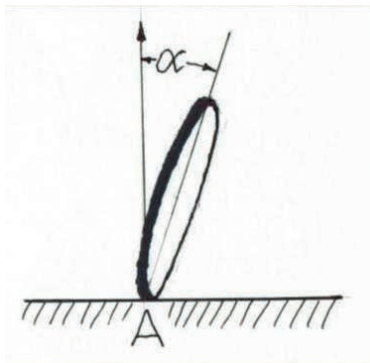
Zu den Aufgaben eines Praktikumsleiters gehörte es, die Versuchsprotokolle der Studenten durchzusehen und schließlich mit seiner Unterschrift zu testieren. Erst dann galt der Versuch als erfolgreich durchgeführt. Eines Tages meinte ich, einer Studentin das Testat verweigern zu müssen. Warum, das habe ich völlig vergessen. Sie reagierte mit einem Wutanfall, zerknüllte ihr Protokoll und schmiss es in eine Zimmerecke. Herr Ludwig, der Praktikumsassistent,klärte mich auf: Das ist nicht irgendeine Studentin, das ist die Schönheitskönigin von Ludwigshafen. Die hat beim letzten Fasching vor dem Kohl getanzt.

Und schließlich: Im Praktikum gab es auch einen Compton-Versuch. Da sollten die Ergebnisse mit der berühmten Klein-Nishina Formel verglichen werden. Mich hat die ganze Zeit geärgert, dass ich nicht imstande war, diese Formel herzuleiten, auch nicht mit Hilfe der Bücher, die ich damals zu Rate zog, z. B. den Bjorken-Drell. Natürlich unterstellte ich, dass auch keiner der Studenten in der Lage war, diese Formel, die bereits 1929 publiziert worden war, wirklich zu verstehen. Ob ich den Studenten damit unrecht tat, weiß ich bis heute nicht. Ich jedenfalls mußte fast 80

Jahre alt werden, bis ich im Greiner eine Behandlung der Compton Streuung und der Klein-Nishina Formel fand, die ich nachvollziehen konnte. Heute zählt die Herleitung dieser Formel zu den von mir bewunderten Ganzleistungen der sehr frühen Quantenphysiker.

Neben der Betreuung des Praktikums hielt ich einige Spezialvorlesungen, z. B. über Supraleitung – in meinem Labor nutzten wir ja ab den frühen 70er Jahren supraleitende Magnete und wir hatten zwischenzeitlich die höchsten Magnetfelder in Deutschland zur Verfügung. Oder über Raumgruppen, die bei unserer Forschung eine wesentliche Rolle spielten. Über die Diplomanden und Doktoranden meiner Arbeitsgruppe hinaus erreichte ich mit diesen Vorlesungen allerdings nur sehr wenige andere Studenten. Sie dienten vor allem der eigenen Weiterbildung. Besser konnte ich mich in die Ausbildung der Studenten einbringen mit meiner über viele Semester dauernden Beteiligung am Gruppenunterricht zu den Vorlesungen Physik I bis IV. Die Sammlung an Aufgaben bereicherte ich unter anderem mit einer Aufgabe zum "Füllen" einer supraleitenden Magnetspule mit Strom. Der Magnet sollte, wie in der Kernresonanz üblich, als Permanentmagnet betrieben werden, das heißt, er besteht aus einer geschlossenen supraleitenden Schleife mit einer Induktivität von z.B. 100 Henry, und in die sollen nun 60 Ampere hineingebracht werden. Wie das geht, das haben Ingenieure der Hersteller der Magnete herausgefunden und sich vermutlich patentieren lassen. Sie haben dabei konsequent die Kirchhoffschen Gesetze genutzt sowie das Vertrauen in das Wissen, dass der elektrische Widerstand der kalten Spule wirklich Null ist. Den Ladevorgang sollten die Studenten beim Lösen der Aufgabe gedanklich nachvollziehen. Ich habe ihn mehrfach praktisch durchgeführt und mir haben dabei jedesmal die Knie geschlottert aus Sorge, dass irgendwann der Strom sich sprunghaft ändert mit der Konsequenz, dass die Supraleitung des Magneten zusammenbricht. Ich denke, CERN-Leute können mir nachempfinden.

Einer anderen Aufgabe, die von einem auf einer Kreisbahn rollenden Reifen, s. Abbildung 2, habe ich meinen Stempel aufgedrückt. Leider muß ich befürchten, dass es keiner gemerkt hat. Jeder Student lernt im 1. Semester, dass er, wenn er oder sie zur Beschreibung eines dynamischen Vorgangs ein rotierendes Koordinatensystem benutzt, Scheinkräfte in Form von Fliehkraft und Corioliskraft einführen muß. Aber in keinem mir bekannten Buch ist zu finden, dass man zusätzlich Scheinmomente einführen muß, wenn bei dem zu analysierenden Vorgang "spinnende" Objekte beteiligt sind. Das ist bei der Kernresonanz und eben auch bei dem rollenden Reifen der Fall. Ich habe nun die Reifenaufgabe sowohl in einem Inertialsystem als auch in einem rotierenden Koordinatensystem ausgearbeitet und sie (fiktiv) von zwei Studentinnen mit Namen Ines und Rosy vortragen lassen, wobei Ines natürlich ein Inertialsystem und Rosy ein rotierendes System verwendet. Beide preisen ihre Wahl als einfach und spotten über die Umständlichkeit der jeweils anderen. In meiner Gruppe waren damals zwei Studentinnen, die tatsächlich die Rolle von Ines und Rosy übernommen haben. Sie waren aber bessere Physikerinnen als Schauspielerinnen – das ist gut so – und haben das mit dem gegenseitigen Spott nicht wirklich rübergebracht.



**Abbildung 2.** Auf einer Kreisbahn rollender Reifen.

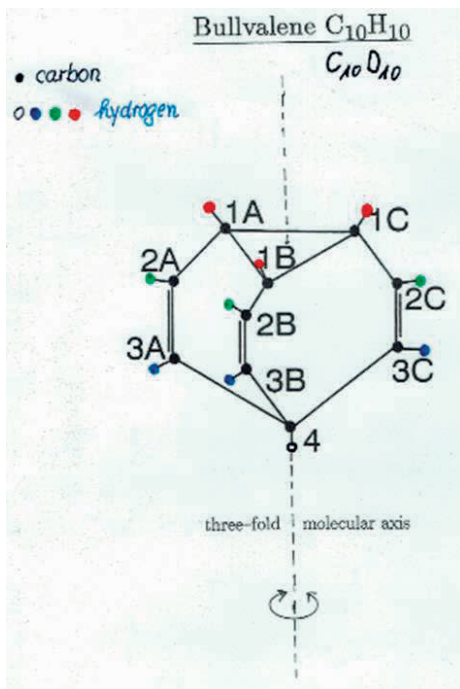
So viel zu meinem Beitrag zum Grundstudium. Vor etwa zwei Jahren hatte ich im Haus der Astronomie oben auf dem Königstuhl die Freude, nach einer sehr herzlichen Begrüßung zusammen mit meiner Frau dem Vortrag eines ehemaligen Teilnehmers an meinem Gruppenunterricht, Herrn Koch, zuhören zu können.

Nun etwas zu unserer Forschungsarbeit: Nach meiner Rückkehr vom MIT habe ich am MPI die Multipulstechnik etabliert. Dafür erhielt ich von der DFG einen dicken Batzen Geld und Herr Laukien gab mir einen Beratervertrag. Ich stellte schnell fest, dass seine Firma an einer Beratung meinerseits nur ganz wenig interessiert war und dass der wesentliche Zweck des Vertrags war, sicherzustellen, dass das Geld der DFG in die Kassen von Bruker fließt. Der Vertrag wurde dann auch ganz schnell wieder beendet. Wir waren nach einiger Zeit die einzigen, die die Multipulstechnik erfolgreich dafür einsetzten, wofür sie "erfunden" worden war: Zum Messen der Tensoren der chemischen Verschiebung von Protonen. John Waugh hatte das Gebiet aufgegeben, nachdem er gemerkt hatte, dass andere, auch wir Heidelberger, das besser können. Wir hatten insbesondere einen Chemiker-Künstler, den Herbert Zimmermann, der von geeignet befundenen Substanzen große Kristalle züchten konnte. Der potenteste Amerikaner im Feld, Robert Vaughan, saß ausgerechnet in dem Flugzeug, das über Chicago eine Tür verlor und abstürzte. In späteren Jahren hatte ich zweimal die Freude, diesen Satz zu hören: You are the only one who does it right. Einer, von dem ich diesen Satz hörte, war der schon erwähnte Richard Ernst.

Herbert Zimmermann war nicht nur ein Künstler im Züchten von Kristallen, er konnte auch Deuteronen in fast beliebigen Wasserstoffpositionen von Molekülen einbauen. Ebenso C-13, N-15 oder O-17 Isotope in spezifischen Kohlenstoff-, Stickstoff oder Sauerstoffpositionen. Das war für einen anderen Schwerpunkt unserer Arbeit essentiell: Dem Studium molekularer Bewegungen in Festkörpern. Beispiele dazu sind: dynamische Vorgänge in inkommensurablen Kristallen, die Bewegungen gefangener Moleküle in Einschlussverbindungen und das Rotationstunneln



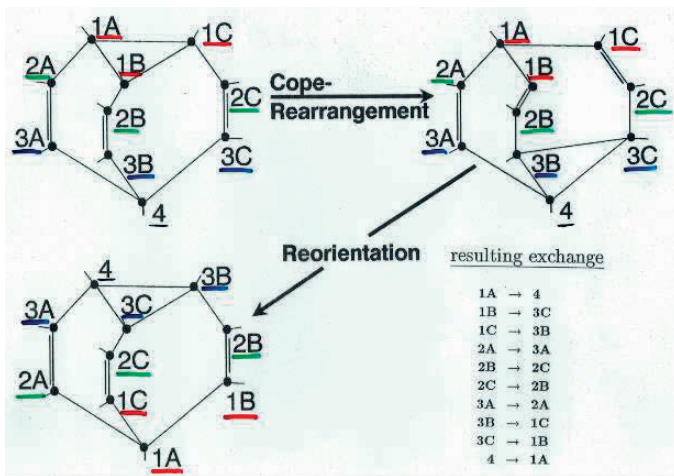
von protonierten und deuterierten Methylgruppen und Ammoniumionen. Diese Dinger tunneln bei Temperaturen unter etwa 20 K wegen der Permutationssymmetrie und verhalten sich deswegen ganz anders wenn diese Symmetrie durch andere Isotope gebrochen ist. Weil wir in aller Regel unsere Messungen an Einkristallen durchführten, brachten wir in den 90er Jahren etlichen frischen Wind in das Feld des Rotationstunnels in dem auch Neutronenstreuer mitmischten.



**Abbildung 3.** Das Bullvalen-Molekül.

Einen besonderen Spass hatten wir an Bullvalen und deswegen will ich dieser Substanz ein paar Minuten widmen. H. Zimmermann hat Bullvalen deuteriert und davon zwei Kristalle geeigneter Größe –

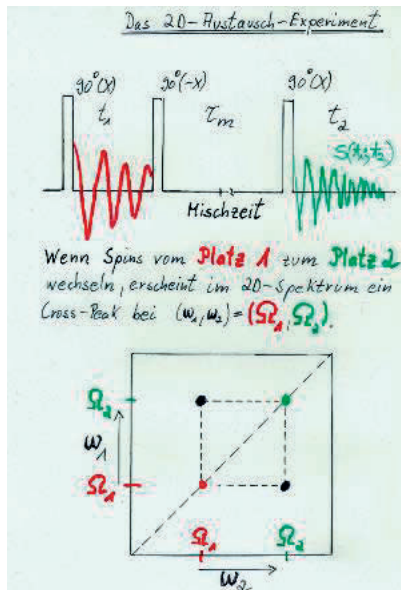
etwa 3 mm in jeder Dimension – gezüchtet. Das waren die einzigen Kristalle von deuteriertem Bullvalen, die es je im Universum gab. Das Molekül, Abbildung 3, hat eine dreizählige Achse – ein Dreieck mit Einfachbindungen zwischen den Kohlenstoffen und drei Flügel, Einfach-, Doppel-, Einfachbindung zum Apex Nr. 4. Deshalb war uns von vornherein klar, dass Bullvalen im Kristallverband Sprünge um diese Achse machen würde. Die Frage war, wie häufig bei welcher Temperatur? Aber das ist nicht alles: Im Kristall – Bullvalen bildet geordnete Kristalle in einer monoklinen Raumgruppe – im Kristall kommt von Zeit zu Zeit ein kleines Teufelchen, ein Vetter vom Loschmidt- und vom Maxwelldämon und schraubt den Balken von 1B nach 1C ab und schraubt ihn zwischen 3B und 3C wieder an, s. Abbildung 4.



**Abbildung 4.** Was das Teufelchen im Bullvalen-Kristall tut.

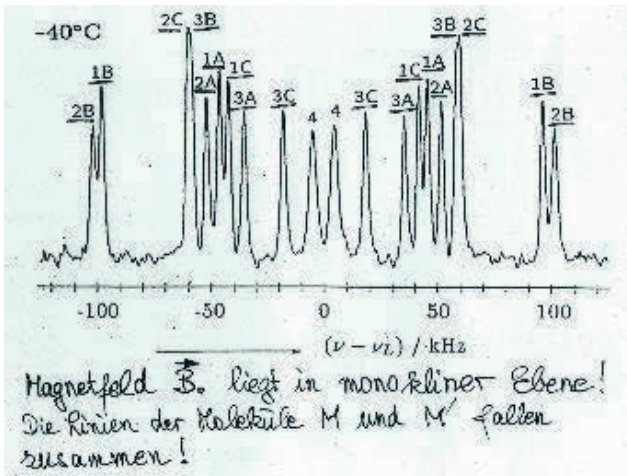
Gleichzeitig versetzt es die Doppelbindungen zwischen 2B, 3B und 2C, 3C nach 2B, 1B bzw. 2C, 1C. Das Resultat ist wieder ein ganz normales Bullvalen Molekül – aber es ist falsch orientiert. Also muß das Teufelchen das Molekül noch in die richtige Orientierung

drehen, damit sein Tun nicht offenbar wird. Das tut es. Im Endeffekt hat ein Austausch der C-D Gruppen stattgefunden. Nun hat das Teufelchen eine dreifache Wahl, einen Balken abzuschrauben und es hat gleichermaßen eine dreifache Wahl, ihn wieder anzuschrauben, es gibt also insgesamt 9 Varianten für den Austausch der C-D Gruppen.



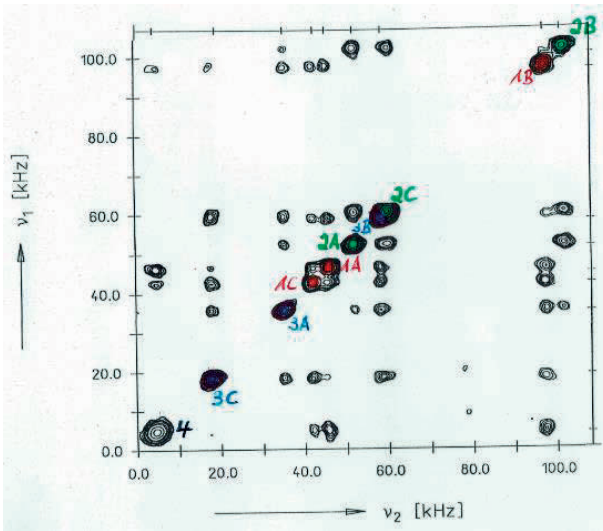
**Abbildung 5.** Prinzip der 2d-Austauschspektroskopie mit Deuteronen.

Die Frage, welcher Herr Müller mit 2-dimensionaler Austauschspektroskopie nachgegangen ist, ist also: welche dieser Varianten nutzt das Teufelchen tatsächlich und wie häufig tut es das. Abbildung 5 zeigt das Prinzip der 2d-Austauschspektroskopie und die folgende, Abbildung 6, das Spektrum von einem unserer beiden Bullvalen Kristalle. Die Linienpaare sind gekennzeichnet. Der Aufwand, der dahinter steckt, ist eine Diplomarbeit.



**Abbildung 6.** Deuterionenspektrum von Bullvalen in spezieller Orientierung des Kristalls mit Zuordnung der Linienpaare (Bernd Tesche).

In dieser Orientierung des Kristalls – Magnetfeld  $B$  in der monoklinen Ebene – hat Herr Müller bei verschiedenen Temperaturen 2d-Austauschspektren aufgenommen. Abbildung 7 zeigt eines davon. Man erkennt, dass die C-D-Gruppe in der Position 4 während der Mischzeit von 300 ms teilweise nach den Positionen 1A, 1B, 1C gewandert ist, nicht aber z. B. nach 2A, 2B und 2C. Die quantitative Analyse solcher Spektren geschieht mittels Simulationen. Sie ergab, dass das Teufelchen von den 9 möglichen Varianten seines Tuns tatsächlich nur 4 wirklich ausführt, dass diese 4 aber ausreichen, um im Laufe der Zeit jede C-D Gruppe in jede der 10 möglichen Positionen im Molekül zu bringen, und zwar ganz unabhängig von allen anderen. Das heißt, im Laufe der Zeit wandelt sich das Molekül – im Kristall – in alle seine 10! Isomere um. Wie schnell das geht, das hat Herr Müller auch bestimmt. Diese Arbeit hat ihm bei einer Konferenz in Portoroz Mitte der 90er Jahre einen Preis für das beste präsentierte Poster eingebracht.



**Abbildung 7.** 2d-Austauschspektrum von Bullvalen in der Orientierung von Abbildung 5. (Andreas Müller). Nur eine Hälfte des Spektrums ist gezeigt.

Es muß wohl 1990 gewesen sein, als mich Herr zu Putlitz anrief und fragte ob ich Lust hätte, bei dem Brookhaven-(g-2)-Myonen Experiment mitzuarbeiten. Es ging darum, bei diesem Experiment das Magnetfeld zu messen und zwar mit Kernresonanz. Darauf hatte sich die Kollaboration schon festgelegt. Die Myonen sollten in einem ringförmigen Magnet, Umfang über 40 Meter, bei genau festgelegter Feldstärke umlaufen. Der mit supraleitenden Spulen erregte Magnet, Stromstärke 5177 Ampere, mußte zuerst geschimmt, d. h. homogenisiert werden. Dazu sollte ein System, genannt Shim-Trolley, gebaut werden, das ein ganzes Kernresonanzspektrometer sowie eine Matrix von Sonden enthält. Später sollte ein weiteres System, ich nannte es Katze, gebaut werden, das im fertigen Aufbau, innerhalb der Vakuumkammer, in der die Myonen ihre Runden ziehen, das Magnetfeld messen sollte. Ich erbat etwas Bedenkzeit, die ich auch nutzte, um mit meinen

Mitarbeitern über den Vorschlag zu reden. Die stimmten zu. Einer brachte dieses Argument vor: Bei einem so großen Experiment muß es einen großen Topf mit viel Geld geben. Wenn wir da mitmachen, können auch wir da hinein greifen. Das war ein großer Irrtum. Die Idee war vielmehr, wenn wir da mitmachen, dann steuern wir aus unserem eigenen Etat zu dem großen Topf bei. Jedenfalls gab ich Herrn zu Putlitz eine zustimmende Antwort, stellte aber gleich eine Bedingung: Wenn ich da mitmache, dann ernsthaft und das bedeutet, dass wir eine Person brauchen, die sich ganz diesem Projekt widmet. Das sah Herr zu Putlitz genau so und so engagierten wir Ralf Prigl, der eben bei mir seine Diplomarbeit abgeschlossen hatte, für dieses Projekt. Es wurde Thema seiner Doktorarbeit. Ich setzte mich hin und brachte zügig eine Konzeption für den Shimtrolley zu Papier. Da rief Herr zu Putlitz wieder an und sagte, dass wir am nächsten Sonntag nach Bad Godesberg zu einem Treffen mit Vernon Hughes fahren sollten. Vernon Hughes war einer der geistigen Väter und einer der Mandarine des Projekts. Dieses wurde von einem Soziologen der Yale-University begleitet, der eine Studie über Kollaborationen in der Hochenergiephysik schrieb. Der meinte, jedes große Projekt brauche Mandarine.

Das Treffen war auf 9 Uhr angesetzt. Dementsprechend legte Herr zu Putlitz fest, dass wir um 7 Uhr im Hof des MPI losfahren sollten. Alle waren pünktlich da: Herr Prigl kam 2 Minuten vor sieben, Herr Jungmann, der Adjutant von Herr zu Putlitz, 1 ½ Minuten vor sieben, ich 1 Minute vor sieben und Herr zu Putlitz 25 Sekunden vor sieben. Alle pünktlich, alle knapp in der Zeit und dennoch alle in genau der richtigen hierarchischen Reihenfolge. Während der Fahrt gab es nur einmal Ärger: Der Tacho des Mercedes von Herrn zu Putlitz stand auf 200, ich hatte ihn im Auge. Da überholte uns ein Opel. Das gefiel unserem Fahrer zu Putlitz gar nicht und trübte vorübergehend die Stimmung. Herr Prigl, der jetzt auf Long Island lebt, besuchte mich letztes Jahr. Er erinnerte mich daran, wie sich in Bad Godesberg die Pünktlichkeit fortsetzte: Wir saßen 2 Minuten vor 9 im Konferenzraum, Vernon

Hughes gegenüber. Dort erläuterten Herr Prigl und ich Herrn Hughes unser Konzept. Herr Jungmann saß schweigend dabei, auch Herr zu Putlitz sagte so gut wie nichts, aber er versorgte vor allem Ralf Prigl mit Keksen. Wir wußten gar nicht, dass wir uns in einer Prüfungssituation befanden, aber es war eine. Wir scheinen die Prüfung bestanden zu haben, jedenfalls bezahlte anschließend Herr zu Putlitz das Mittagessen von Ralf Prigl und ich erhielt wenig später eine Einladung zu einem Meeting der Kollaboration in Brookhaven. Als ich von diesem zurück kam, erzählte ich meinen Leuten, dass wir gut daran täten, uns zu beeilen, denn die wichtigen Leute des Projekts, neben Vernon Hughes der Engländer Farley, der Holländer Krienen und weitere – eben die Mandarine – seien alle schon sehr alt und die wollten doch sicher noch die Ergebnisse von Messungen erleben. In der Tat, beim Final Report, 2006, wird Vernon Hughes als verstorben geführt.

Außerdem erfuhr ich bei dem Meeting, dass wir in Heidelberg keineswegs die Einzigen waren, die an einem Kernresonanz System zur Messung des Magnetfeldes arbeiteten. Insbesondere an der Yale University in New Haven gab es jemanden, einen ebenfalls sehr alten Herrn, der schon ein Modell für die Katze aufgebaut hatte, eine Art Spielzeug-Eisenbahn, die im Kreis herumfuhr. Also gab ich die Devise aus: Wir müssen schnell klarstellen, dass es unser System ist, das schließlich zum Einsatz kommt. Das gelang uns sehr bald und "die anderen" gaben auf. Die Kollaboration hatte sich zum Ziel gesetzt und dies mindestens ein dutzend Mal in Publikationen verkündet, dass der beste bisherige Wert für  $(g-2)$ , der von CERN stammte und eine Unsicherheit von 7 ppm aufwies, um den Faktor 20 übertroffen werden würde. Das heißt, eine Unsicherheit nicht größer als 0.35 ppm für  $(g-2)$  Myon wurde propagiert. Bei dieser Genauigkeit würde unser Ergebnis einen signifikanten Test für die Renormierbarkeit der Theorie der schwachen WW erlauben. Die Standard-Modell Rechnungen für  $(g-2)$  Myon beinhalten einen 1.5 ppm Beitrag von Feynman Diagrammen der schwachen WW. Außerdem wurde als Ziel genannt, Grenzen für die Massen hypothetischer Teilchen

sogenannter Neuer Physik zu setzen. Ehrlich gesagt, diese Fragen ließen mich ziemlich kalt. Wir sorgten uns mehr um die Katze, die im Vakuum das Magnetfeld messen sollte. Sie durfte keinerlei magnetische Bauteile enthalten, die ganze Kernresonanzeinheit mußte mit 1 Watt elektrische Leistung auskommen, weil die Katze im Vakuum zwischen polierten Aluminiumwänden so gut wie nicht gekühlt werden konnte und ihre Position in dem 40 m langen Tunnel sollte auf 2 mm genau bestimmt werden können. Elektromotoren zur Bewegung der Katze kamen nicht in Frage; wir testeten Piezomotoren, verwarfen aber auch diese Idee wieder und sagten schließlich: Wenn die Leute in San Franzisko ihren Cable Car über ihre Hügel ziehen können, dann können auch wir unsere Katze mit einem Kabel durch den Tunnel ziehen. Es bestanden zunächst große Bedenken, dass wir wegen der unvermeidbaren Elastizität der Kabel nie die Position der Katze mit ausreichender Genauigkeit würden erfahren können. Die räumte Ralf Prigl dadurch aus, dass er im Treppenhaus vom Phys. Institut HF-Kabel aufhängte, die er unten mit Gewichten beschwerte. Über Monate hinweg kontrollierte er den Abstand der Gewichte vom Kellerboden und siehe da, der blieb konstant. Auch die Vakuumleute hatten Vorbehalte gegen die Kabel. Sie fürchteten, dass sie endlos ausgasen würden. Auch diese Bedenken konnte Ralf Prigl ausräumen und letztendlich wurde die Katze mit ihrem HF-Kabel durch den Tunnel gezogen. 1997 liefen die Messungen an, zunächst mit positiven, später auch mit negativen Myonen und sie wurden fortgeführt bis 2001.

Der Final Report erschien 2006 in Phys. Rev. D. In diesem wurde die ursprünglich angestrebte Unsicherheit von 0.35 ppm nicht mehr erwähnt. Erreicht wurde – nach quadratischer Vereinigung der  $\mu^+$  und  $\mu^-$  Werte – eine Unsicherheit von 0.54 ppm. Der Standardmodell-Theorie Wert war auch nicht mehr derselbe wie zur Zeit der Planung des Experiments. Es gibt derzeit zwei die man bzgl. ihrer Zuverlässigkeit nicht unterscheiden kann. Der eine weicht vom experimentellen Wert um 2.2 ppm, der andere um 2.7 ppm ab. Ich würde sagen: Das ist eine phantastisch gute



Übereinstimmung, aber das sehen nicht alle so. Jedenfalls soll das Experiment fortgeführt werden, nicht in Brookhaven, sondern am Fermi-Lab in Chicago. Der Ringmagnet wurde bereits 2013 per Schwerlastler und Schiff – runter den Atlantik, in den Golf von Mexiko, rauf den Mississippi und den Illinois – und wieder per Schwerlastler auf das Fermi-Lab Gelände gebracht. Dort hofft man, die Genauigkeit nochmals um einen Faktor 4 verbessern zu können.

Ich achtete bis zu meiner Pensionierung 1999 darauf, dass immer mindestens ein Diplomand oder Doktorand an bzw. mit der Multipulsmethode arbeitete und dabei die Tensoranteile der chemischen Verschiebung von Protonen maß. Vier Jahre nach meiner Pensionierung und langer intensiver Kooperation mit theoretischen Chemikern in Dresden schrieb ich die letzte Arbeit über eine Anwendung der Multipulstechnik. Einer meiner letzten Diplomanden, Frank Schönborn, hatte die Tensoren der Chemischen Verschiebung der Protonen in Biphenyl gemessen. Eigentlich ging es nicht um Biphenyl, sondern um das Benzolmolekül. In diesem sind die Hauptachsen des in Rede stehenden Tensors durch die Molekülsymmetrie festgelegt, aber es war eine offen gebliebene Frage, welcher der drei Hauptwerte zu welcher Achse gehört. An Benzol selber konnten wir nicht messen – der Kristall ist orthorhombisch und damit kompliziert, er schmilzt zu schnell, zudem reorientieren die Moleküle bis herunter zur Temperatur des flüssigen Stickstoffs, deshalb hatten wir Biphenyl als nächsten Verwandten des Benzols gewählt.

Die ursprünglich gestellte Frage der Zuordnung von Hauptwerten zu Hauptrichtungen konnten wir sicher beantworten und darüber hinaus demonstrieren, dass in Kristallen der Tensor der Chemischen Verschiebung von Protonen keine dominant molekulare Eigenschaft ist, sondern dass es signifikante intermolekulare Beiträge gibt, die allerdings von Quantenchemikern zuverlässig berechnet werden können. Aber für die analytisch arbeitenden Chemiker und Biologen war das Ergebnis kaum interessant. Was vor 30 Jahren groß propagiert worden war, hatte

sich als Illusion herausgestellt. Die Biphenyl-Arbeit war nicht nur meine, sondern die letzte Arbeit zur Multipulstechnik überhaupt.

Auch die Kernresonanz als solche hat als Forschungs- und Arbeitsgebiet für Physiker, und nicht nur für Physiker, weitestgehend aufgehört zu existieren. Die Zeitschriften *Advances in Magnetic Resonance* und *NMR, Basic Principles and Progress*, die beide in den 1980er Jahren ihre Blütezeit erlebt hatten, haben schon vor der Jahrhundertwende ihr Erscheinen eingestellt. Aber die NMR lebt weiter als MRT und ist jetzt ein Arbeitsfeld für Ingenieure. Dass sie sich dahin entwickelt hat, ist gut. Und sie ist weiterhin ein unentbehrliches Werkzeug in Chemie und Biologie.

Nicht nur Menschen und Forschungszweige durchlaufen Lebenszyklen. Das trifft auch für ganze Kulturen, die gesamte Menschheit und das Leben auf dieser Erde überhaupt zu. Es gilt auch für Sterne. Auch Galaxien altern, in unserer Milchstraße bildeten sich früher, vor 10 Milliarden Jahren, viel mehr neue und vor allem viel mehr massereiche, kurzlebige Sterne als jetzt und deswegen traten früher auch viel mehr Supernovae auf als jetzt. Sie waren für die Entwicklung des Lebens auf der Erde essentiell. Auch der gesamte Kosmos altert. Das Verklumpen der sichtbaren und der dunklen Materie schreitet fort, die Galaxienhaufen rücken durch das Entstehen von neuem Raum zwischen ihnen immer weiter auseinander. Immer mehr Galaxien überschreiten unseren Ereignis-Horizont und werden für unsere und Merkels SMS nicht mehr erreichbar. Es wird einsam um uns und es wird einsam um mich herum. Viele der einstigen Kollegen, Mitarbeiter, Mitfußballspieler und Freunde aus Schweden, Polen, Frankreich, Russland, Israel usw. usw. sind nicht mehr am Leben. Viele von ihnen waren deutlich jünger als ich. Ich will damit enden, dass ich, ohne Namen zu nennen, mich ihrer erinnere.

Vortrag gehalten an der Fakultät für Physik und Astronomie der Universität Heidelberg am 28. April 2016.

Siegfried Hunklinger



# Siegfried Hunklinger

Siegfried Hunklinger wurde am 25.8.1939 in Hochberg in Oberbayern geboren. Er studierte Physik an der TU München und promovierte dort 1969 bei Prof. K. Dransfeld. Seine Doktorarbeit "Van-der Waals-Kräfte zwischen makroskopischen Körpern", fand ein weit über das übliche Maß hinausgehendes Interesse. In den folgenden Jahren griff er auf Anregung von Dransfeld das Thema der Zwei-Niveau-Systeme in Festkörpern auf, das zu einem Schwerpunkt seiner wissenschaftlichen Arbeit werden sollte. Als Wissenschaftlicher Mitarbeiter des MPI für Festkörperforschung in Stuttgart, wohin Dransfeld berufen worden war, ging Hunklinger von 1973 – 76 an das Hochfeld-Magnet-Labor in Grenoble und habilitierte sich, nach Stuttgart zurückgekehrt, 1977 an der TU München. Danach erhielt er eine permanente C3-Stelle am MPI. 1982 folgte er einem Ruf auf eine Professur für Angewandte Physik an der Universität Heidelberg. Aus seiner Zusammenarbeit mit Josef Bille, mit Siegfried Kalbitzer, Reinhard Männer und Roel Wijnands vom EMBL ging die Firma Heidelberg Instruments hervor, die heute, aufgespalten in drei Firmen, weiterhin existiert und gedeiht. Hunklinger brachte in diese erfolgreiche Firmen-gründung seine Arbeiten auf dem Gebiet der Laser-Lithographie und der konfokalen Mikroskopie ein. Er war maßgeblich beteiligt an der Zusammenführung der Institute für Hochenergiephysik und für Angewandte Physik zum Kirchhoff-Institut, dessen Neubau in seiner aktiven Zeit entstand. 2004 wurde er emeritiert, zu seinen Aufgaben im "Ruhestand" gehörte die Tätigkeit eines "Ombudsmans für die Wissenschaft" von 2005–2011 als Mitglied eines Dreiergremiums der DFG, das sich um die Vermittlung von Streitigkeiten in der Wissenschaft bemüht. Für seine Arbeiten auf dem Gebiet der Eigenschaften amorpher Festkörper bei tiefen Temperaturen erhielt er 1977 den Walter-Schottky-Preis und 1999

*Siegfried Hunklinger*

die Stern-Gerlach-Medaille der DPG. Sein Lehrbuch "Festkörperphysik" ist zu einem Klassiker geworden.

*Siegfried Hunklinger*

## **Mein Weg nach Heidelberg**

In meinem Vortrag möchte ich zunächst über meine Jugend berichten und schildern wie ich zum Physikstudium kam. Anschließend werde ich kurz auf meine ersten wissenschaftlichen Arbeiten eingehen und meinen Weg nach Heidelberg schildern. Zum Schluss möchte ich noch mit wenigen Worten auf meine Aktivitäten hier in Heidelberg zu sprechen kommen.

Ich komme aus einer großen, achtköpfigen Handwerkerfamilie, die in einem abgelegenen Haus wohnte. Das nächste Dorf war etwa zwei Kilometer, die Autobahn München-Salzburg aber nur fünfzig Meter entfernt. Obwohl ich noch keine sechs Jahre alt war, kann ich mich noch sehr gut an den Tag im Mai 1945 erinnern, an dem mit großem Lärm auf der Autobahn eine Panzerkolonne der Amerikaner vorrückte. Sie waren auf dem Weg zu Hitlers Domizil am Obersalzberg bei Berchtesgaden. Meine Geschwister und ich liefen zur Autobahn und bewunderten die riesigen Panzer.

Die geflohenen deutschen Truppen hatten bei ihrem Rückzug größere Mengen Kriegsmaterial in der Nachbarschaft hinterlassen. Wir, also auch die Kinder aus der Umgebung, verfügten über viel Munition und Panzerfäuste, aus denen wir das Pulver entfernten und für unsere Zwecke nutzten. Eine besondere Attraktion war eine liegengebliebene 8,8 cm Flugabwehrkanone mit einem Drehteller. Wir nutzten alle diese Gegenstände und hatten großes Glück, dass dabei niemand ernsthaft verletzt wurde.

Im September 1945 wurde ich in Siegsdorf eingeschult. Für den Schulweg nutzte ich die Autobahn, die damals kaum befahren wurde. Diese Strecke war wesentlich kürzer als der Weg über die Landstraße und im Winter – damals gab es noch sehr viel

Schnee – wurde die Autobahn gut geräumt. Auf Anraten meines Lehrers wechselte ich nach der 5. Klasse auf das Gymnasium in Traunstein (Abbildung 1). Ich plante mit der mittleren Reife abzuschließen um dann eine Ausbildung als Chemielaborant anzustreben. Ein mir bekannter Chemiker empfahl, mich bei der Firma "Anorgana", einem Werk der Farbwerke Höchst, zu bewerben, das von meinem Wohnort ungefähr 50 km entfernt war.



**Abbildung 1.** Kreisstadt Traunstein.

Zum Bewerbungsgespräch gehörten umfangreiche Tests, bei denen das mathematische Verständnis und die handwerkliche Geschicklichkeit untersucht wurden. Ich war überzeugt die Prüfung bestanden zu haben, insbesondere da die Konkurrenten Volksschul-Abschluss hatten. Nach einigen Tagen erhielt ich aber einen Brief, in dem stand der lapidare Satz: "Sie haben unseren Anforderungen nicht entsprochen". Ich war zu tiefst schockiert. Einige Tage später traf ich "meinen" Chemiker, der meinte: Das kann nicht sein! Er erkundigte sich und erfuhr, dass ich *zu gut* abgeschnitten hatte und die potentiellen Arbeitgeber meinten, dass ich nicht längerfristig bleiben würde. Die Absage wurde zurückgenommen und ich unterzog mich einer medizinischen



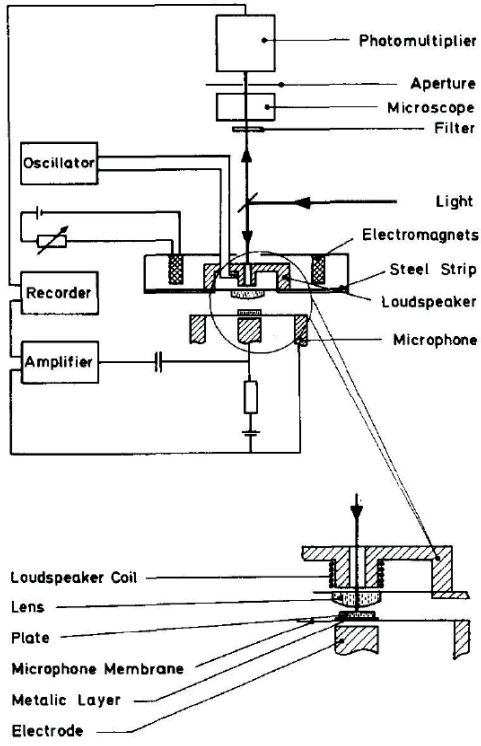
Untersuchung. Anschließend stelle ich mich beim Laborleiter vor. Er überzeugt mich, dass es für mich viel besser wäre erst das Abitur zu machen und dann Chemie zu studieren. Ich bin ihm noch heute für diesen Rat dankbar.

Nach dem Abitur stellte sich natürlich die Frage, wie es weitergehen sollte. Ich wollte studieren, wobei ich die Fächer Chemie, Physik und Elektrotechnik in die engere Wahl gezogen hatte. Kurz vor dem Ablauf der Anmeldefrist entschloss ich mich für das Physikstudium, aber nebenher hörte ich noch drei Semester lang alle Chemievorlesungen. Erst der Besuch der Vorlesung über Organische Chemie, gehalten von einem berühmten Chemiker, bewirkte, dass ich einen Wechsel zur Chemie endgültig ausschloss.

Nach dem damaligen Studienplan wurde die Diplomarbeit vor der Diplomprüfung durchgeführt. Ich arbeitete in der Gruppe von Nikolaus Riehl, der am sowjetischen Atombomben-Projekt mitgearbeitet hatte und Stalin- und Lenin-Preisträger war. Der Titel meiner Diplomarbeit lautete "Untersuchung des elektrischen Durchschlags durch dünne Kunststoff-Folien". Nach Abschluss des Studiums stellte sich die Frage: Industrie oder Universität? Sollte ich mich bei Siemens oder der AEG bewerben, oder eine Doktorarbeit anstreben?

Mit der Berufung von Rudolf Mößbauer war an der TH München das Department-System mit zehn Professor-Stellen eingeführt worden. Einer von den neuen Professoren war Klaus Dransfeld, der von Berkeley kam. Er bot mir eine Arbeit mit dem Titel "Van-der-Waals-Kräfte zwischen makroskopischen Körpern" an, die sich mit dem Casimir-Effekt beschäftigten sollte. Zu dieser Thematik gab es bereits Messungen von verschiedenen Gruppen, die allerdings äußerst ungenau und mit sehr großen Fehlern behaftet waren. Ein wesentlicher Grund hierfür war das Auftreten von Oberflächenladungen, welche den Einfluss der Van-der-Waals-Kräfte überdeckten. Mein Plan war die Apparatur des renommierten russischen Chemikers B.V. Derjaguin zu kopieren und zunächst dessen Ergebnisse zu reproduzieren. Diese Messungen wurden mit einer äußerst sensiblen, rückgekoppelten

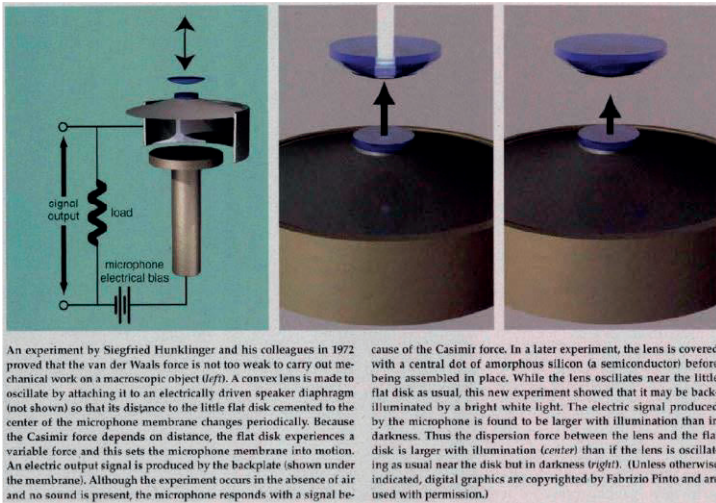
Balkenwaage durchgeführt, die allerdings bei mir nie stabil arbeitete.



**Abbildung 2.** Anordnung zur dynamischen Messung von Van-der-Waals-Kräften.

Nach einem Jahr warf ich die Apparatur, bildlich gesprochen, in den "Papierkorb" und entwickelte ein völlig neues Konzept, nämlich eine "Lautsprecher - Mikrophon - Anordnung", die im Vakuum arbeitete. Die Kopplung zwischen Lautsprecher und Mikrophon erfolgte über die van der Waals-Kräfte, die bei Abständen unter einem Mikrometer messbar wurden (Abbildung 2).

Heute werden Van-der-Waals-Kräfte mit Rastermikroskopen untersucht, allerdings erfolgt die Messung erst bei sehr kleinen Abständen im Piko- und Nanometer-Bereich. Überraschenderweise besteht immer noch Interesse an meiner Doktorarbeit. Im letzten Jahr erschien ein Artikel im *American Scientist*, in dem ausführlich auf meine Arbeit eingegangen wurde (Abbildung 3).



**Abbildung 3.** Darstellung der Apparatur im *American Scientist* (F. Pinto, *American Scientist* 102, 280 (2014)).

Im Anschluss an die Promotion blieb ich in der Arbeitsgruppe von Klaus Dransfeld und beschäftigte mich mit festem Helium. Bekanntlich bleibt Helium bis zum absoluten Nullpunkt flüssig, doch unter Druck lassen sich Kristalle ziehen. Gemeinsam mit Paul Leiderer und Paul Berberich untersuchte ich die elastischen Eigenschaften dieses exotischen Festkörpers. Mit Hilfe der stimulierten Brillouin-Streuung wurden in den Heliumkristallen Phononen erzeugt und über die Frequenzverschiebung des rückgestreuten Lichts die Schallgeschwindigkeit bestimmt. Mit Hilfe eines zweiten

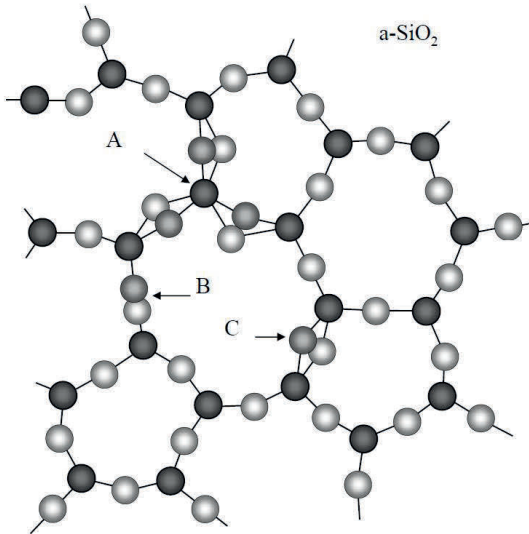
Lasers, dessen Puls zeitlich verzögert war, wurde die Dämpfung gemessen. Das "traurige" Ergebnis war, dass sich festes Helium, trotz der extrem großen Schwingungsamplituden der Atome wie ein klassischer Kristall verhält.

1971 wurde ich zu einem Vortrag bei einer Konferenz in Banff, Kanada eingeladen. Dies war meine erste Reise nach USA, über die ich etwas ausführlicher berichten möchte. Der Reisezuschuss der Universität war äußerst gering, so dass der Hauptbeitrag aus meiner Kasse kommen musste. Ich buchte einen Charterflug nach New York und zurück und kaufte mir für 300 DM das Ticket "Visit USA". Damit konnte man nach Belieben mit allen inner-amerikanischen Fluglinien fliegen. Weiter kaufte ich mir einige amerikanische Travellerschecks und, auf Anraten der Deutschen Bank, vor allem deren Reiseschecks. Die letzteren stellten sich als Flop heraus, da sie in USA niemand akzeptierte. Damit war meine Planung des Reisebudgets bereits bei der Ankunft in USA zusammengebrochen.

Zunächst besuchte ich die Bell-Labs in Murray Hill, hielt einen Vortrag und bekam ein kleines Honorar. Meine Reise führte mich dann nach Ithaca zur Cornell University. Dort besorgte ich mir ein kleines Büchlein, das die Start- und Landezeiten aller inner-amerikanischen Flüge enthielt und zusätzlich noch Angaben über die Bordverpflegung machte. Meine Reiseroute passte ich entsprechend an. Weiter ging der Weg nach Chicago um die Argonne-Labs zu besuchen. Anschließend flog ich nach Great Falls, das nahe an der kanadischen Grenze liegt. Den Flug von Great Falls nach Calgary musste ich wieder bezahlen, da für diese Strecke mein Ticket keine Gültigkeit besaß. Am Flughafen von Calgary traf ich Tagungsteilnehmer und konnte mit einem von ihnen nach Banff, zur Tagungsstätte fahren. Dort erhielt ich meinen Reisekostenzuschuss, sodass mein restlicher Aufenthalt in USA finanziert war. Die weitere Reise führte mich dann nach San José, da ich einen Postdoc-Aufenthalt an der University of California plante, der dann allerdings wegen gesundheitlicher Probleme ausfallen musste. Auf

der Rückreise besuchte ich noch Kollegen in Salt Lake City und in Columbus Ohio.

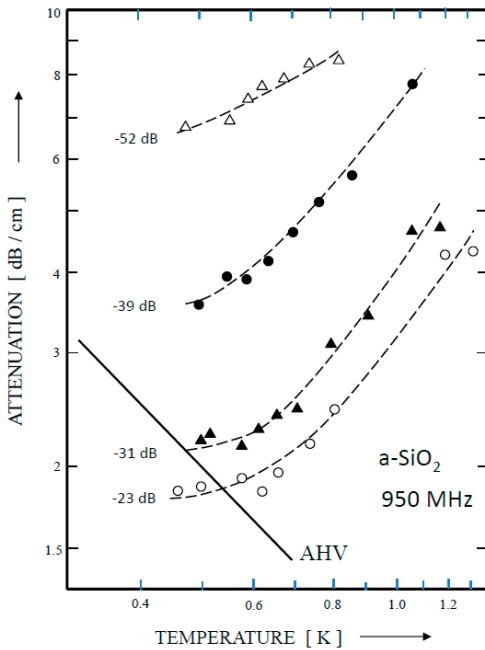
1970 kam Klaus Dransfeld von einem Freisemester mit der Idee zurück, Gläser bei tiefen Temperaturen mit Hilfe von Ultraschallexperimenten zu untersuchen. Der Grund hierfür war die erstaunliche Entdeckung, dass sich Kristalle und Gläser bei tiefen Temperaturen entgegen der Erwartung völlig unterschiedlich verhalten. Bekanntlich gilt bei Kristallen im Fall tiefer Temperaturen  $C_V \approx T^3$  und  $\Lambda \approx T^3$  für die spezifische Wärme bzw. der Wärmeleitfähigkeit. Überraschenderweise hatte man bei Gläser  $C_V \approx T$  und  $\Lambda \approx T^2$  gefunden.



**Abbildung 4.** Anschauliche Darstellung von Tunnelsystemen.

Die vorgeschlagene Erklärung beruhte auf der Annahme, dass in amorphen Materialien, im Gegensatz zu Kristallen, selbst bei tiefen Temperaturen noch *lokale* Bewegungen von Atomgruppen auftreten können (Abbildung 4). Die Bewegung von einer Mulde

zur anderen erfolgt jedoch nicht thermisch aktiviert über die Barriere sondern beruht auf einem Tunnelprozess zwischen den Gleichgewichtslagen, der zu einer Aufspaltung des Grundzustands führt und somit zur Bildung von Zwei-Niveau-Systemen Anlass gibt. Sie tragen zur spezifischen Wärme bei und verändern die Schallausbreitung und damit die thermische Leitfähigkeit.

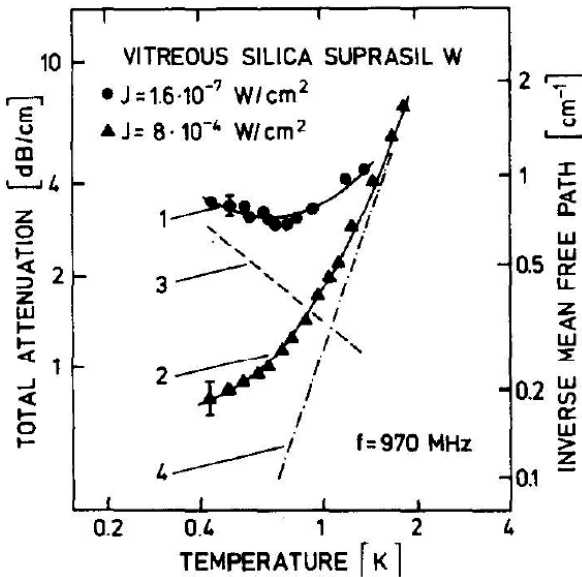


**Abbildung 5.** Temperaturabhängigkeit der Ultraschalldämpfung . (Nach S. Hunklinger et al. Phys. Lett. 42A, 253 (1972)). AHV (Anderson, Halperin, Varma) gibt die theoretische Vorhersage wieder. Die akustische Intensität ist in dB unter 5 mW/cm<sup>2</sup> angegeben.

Die resonante Anregung dieser Zwei-Niveau-Systeme verursacht eine zusätzliche Dämpfung der Schallwellen, die bei höheren Schalleistungen verschwinden sollte, da dann die beiden Niveaus

gleichbesetzt werden. Wir führten erfolgreich derartige Ultraschallexperimente durch und beobachteten den erwarteten Effekt vor unserer amerikanischen Konkurrenz. Die Messdaten (Abbildung 5) zeigen deutlich, dass die Dämpfung der Schallwelle von der eingestrahltten Leistung abhängt, doch der Temperaturverlauf der Dämpfung passte überhaupt nicht. Ein Freund, Josef Jäckle, Theoretiker in Konstanz, überlegte sich, dass es neben der resonanten Absorption noch einen zweiten Dämpfungsmechanismus geben sollte, nämlich die Relaxationsabsorption. Sie beruht darauf, dass Schallwellen die Aufspaltung der Zwei-Niveau-Systeme verändern und somit das thermische Gleichgewicht stören. Unter Berücksichtigung dieses Effekts war die Übereinstimmung zwischen Experiment und Theorie ausgezeichnet (Abbildung 6). Der Beitrag der resonanten Wechselwirkung nimmt mit der Temperatur ab, der Relaxationsbeitrag nimmt dagegen mit der Temperatur zu.

1973 verließ Klaus Dransfeld die TU München und wurde Direktor am MPI für Festkörperforschung in Stuttgart und übernahm, gemeinsam mit einem französischen Kollegen, die Leitung des Hochfeld-Magnetlabors in Grenoble. Er nahm drei Mitarbeiter aus München mit, die im Centre de Recherches sur les Très Basses Temperatures untergebracht wurden. Ich bildete die "Vorhut" und sollte technische und organisatorische Probleme lösen, die mit unserem Umzug verbunden waren. Da die Apparaturen noch in München benutzt wurden, konnte ich die Messungen der Ultraschalldämpfung nicht weiter fortführen. Glücklicherweise hatten wir ausreichend Mittel, sodass ich einen Hochfrequenzpulsgenerator kaufen konnte, der für Ultraschallarbeiten geeignet war.



**Abbildung 6.** Temperaturverlauf der Ultraschalldämpfung in Quarzglas bei zwei verschiedenen Intensitäten. (Nach S. Hunklinger et al. Phys. Lett. 45A, 311 (1973)).

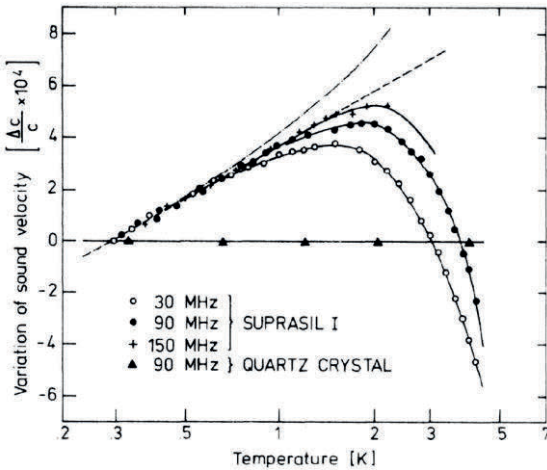
Im Labor lernte ich Luc Piché, einen kanadischen Doktoranden kennen, der sich ebenfalls mit der Sättigung der Ultraschall-dämpfung in Gläser beschäftigte. Seine Apparatur war jedoch für die Beobachtung des Effekts nicht genügend empfindlich. Ich schlug daher vor, in einem gemeinsamen Experiment, die Schallgeschwindigkeit bei tiefen Temperaturen zu untersuchen. Nach den theoretischen Überlegungen von Josef Jäckle sollte in amorphen Materialien bei tiefen Temperaturen die Geschwindigkeit proportional zu  $T^6$  abfallen, in dielektrischen Kristallen dagegen temperaturunabhängig verlaufen.

Wir kühlten unsere Probe in Pichés Kryostaten bis zur tiefsten erreichbaren Temperatur von 0,28 K ab und maßen anschließend die Änderung der Schallgeschwindigkeit während der Aufwärmphase. Entgegen unserer Erwartung nahm die



Schallgeschwindigkeit mit steigender Temperatur zu! Wir studierten die Gebrauchsanleitung der neuen Apparatur und führten eine neue Messung durch. Die Geschwindigkeit stieg wieder an. Am nächsten Tag starteten wir bei 4,2 K und maßen die Geschwindigkeit während des Kühlens. Auch in diesem Fall stieg die Geschwindigkeit zunächst an.

Die Erklärung (Abbildung 7) war für uns überraschend: Die resonante Wechselwirkung zwischen den Schallwellen und den Zwei-Niveau-Systemen trägt auch bei niedrigen Frequenzen zu einem logarithmischen Temperaturanstieg der Geschwindigkeit bei. Bei höheren Temperaturen überwiegt der Relaxationseffekt und bewirkt eine Abnahme, wie von Josef Jäckle vorhergesagt. Nachträglich gesehen ist das Ergebnis nicht wirklich überraschend.



**Abbildung 7.** Temperaturverlauf der Schallgeschwindigkeit. (Nach L. Piché et al. Phys. Rev. Lett. 32, 1426 (1974)).

Nun noch ein paar Schlagworte zu unseren weiteren Arbeiten in Grenoble: Zusammen mit Walter Arnold, der ebenfalls von München kam, bestimmten wir mit zwei frequenzverschobenen

Ultraschallpulsen die Linienbreite der Zwei-Niveau-Systeme. Weiter konnte Manfred von Schickfus zeigen, dass Zwei-Niveau-Systeme ein elektrisches Dipolmoment tragen und so die dielektrischen Eigenschaften von Gläsern bei tiefen Temperaturen bestimmen. Im sogenannten Cross-Experiment konnten wir nachweisen, dass bei elastischen und elektrischen Feldern die gleichen Tunnelsysteme angesprochen werden.

Nach dreieinhalb Jahren war der Aufenthalt in Grenoble zu Ende und die Rückkehr der Arbeitsgruppe nach Deutschland zum neu erbauten Max-Planck-Institut für Festkörperforschung erfolgte. Drei Monate später wurde ich auf der Frühjahrstagung der Deutschen Physikalischen Gesellschaft in Münster mit dem Walter-Schottky-Preis für Festkörperphysik ausgezeichnet, der für jüngere Wissenschaftler ausgeschrieben ist.

Nun möchte ich noch kurz auf meine erste Chinareise eingehen. 1980 besuchte der damalige Bundesminister für Forschung und Technologie Volker Hauff die Tongji-Universität in Shanghai. Bei dieser Gelegenheit übergab er einen Scheck in Höhe von einer Million Mark, die für die instrumentelle Ausrüstung des Physik Instituts vorgesehen waren. Klaus Dransfeld und ich sollten mit diesem Geld einige Experimente ausstatten. Wir überlegten uns, in Rücksprache mit der chinesischen Seite, geeignete Experimente und bestellten die erforderlichen Geräte. Um die Versuchsanordnungen aufzubauen arbeitete ich im folgenden Jahr drei Monate in Shanghai. Zusätzlich hielt ich noch passende Vorlesungen. Im Bild ist einer meiner beiden Dolmetscher zu sehen, die auf mich aufpassen mussten (Abbildung 8).



Abbildung 8. "Empfang in Shanghai".



Abbildung 9. Tischtennis-Mannschaft der Fakultät.



**Abbildung 10.** Gemeinsame Feiern.

Meine Arbeitszeiten wurden den Institutsangehörigen angepasst. Überraschenderweise sollte ich mich von 10 – 12 Uhr und von 14 – 17 Uhr im Labor aufhalten. Eigentlich wollte ich länger arbeiten um den Aufbau voranzutreiben, aber außerhalb dieser Zeiten war niemand anzutreffen. Am Freitagnachmittag war für die Institutsangehörigen (und auch für meine Dolmetscher) politische Weiterbildung vorgesehen und ich konnte ungehindert mit dem Bus ins Stadtzentrum fahren. Daneben waren für mich das Tischtennistraining und die Spiele mit der Dozentenmannschaft von großem Interesse, da ich diesen Sport seit meiner Jugend intensiv betrieben habe (Abbildung 9). Natürlich gab aber auch andere Gelegenheiten zum Feiern (Abbildung 10). Ein Jahr später verbrachte ich noch einen weiteren Aufenthalt von sechs Wochen an der Tongji-Universität um den Aufbau der Experimente weiter voranzutreiben.

Nun möchte ich kurz auf meine Berufung hier in Heidelberg eingehen. Vorausschicken möchte ich, dass ich am Max-Planck-Institut bereits eine permanente C3-Stelle hatte, so dass ich nicht unter Zeitdruck stand. Professor Ludwig Genzel, einer der Direktoren, ließ mir immer Stellenausschreibungen zukommen, die

mich aber im Allgemeinen nicht interessierten, weil ich eigentlich eine Stelle südlich der Donaulinie anstrebte. 1979 wurde an der Universität Konstanz eine Stelle ausgeschrieben, die für mich sehr attraktiv war. Ich kam dort zwar auf die Liste, aber zu meiner Überraschung nahm mein Chef Klaus Dransfeld den Platz Eins ein. Er hat damals tatsächlich die renommierte MPI-Stelle gegen eine Professur in Konstanz getauscht.

Als mir Professor Genzel die Ausschreibung eine C4-Stelle für Angewandte Physik in Heidelberg zukommen ließ, war ich eigentlich nicht an dieser Stelle interessiert, befürchtete aber, dass er ob meiner ständigen Untätigkeit ernsthaft verärgert sein könnte. Bewerbungsschluss war Ende September 1979. Zu diesem Zeitpunkt hielt ich mich für längere Zeit als Gast im Forschungslabor von Siemens in Neuperlach bei München auf. Meine sehr kurze Bewerbung habe ich im Laufe des Oktobers etwas widerwillig abgeschickt, denn mein Ziel war eigentlich die erwähnte Professorenstelle in Konstanz, die zur gleichen Zeit ausgeschrieben war. Tatsächlich wurde meine verspätete Bewerbung von der Fakultät in Heidelberg noch akzeptiert. Da aber im Rahmen der normalen Kolloquiumsvorträge kein Platz mehr für einen Vortrag war, wurde ich eingeladen Ende Januar im Teekolloquium am MPI für Kernphysik vorzutragen.

Nach meinem Vortrag hörte ich lange nichts mehr. Eigentlich hatte ich meine Bewerbung schon vergessen, da teilte mir im Juli 1981, also fast zwei Jahre nach meiner Bewerbung Dekan Klaus Tittel mit, dass ich Platz Eins der Liste einnehme. Mir wurde vom Ministerium und vom Kanzler der Universität im August eine entsprechende Mitteilung geschickt, aber da war ich bereits für drei Monate in Shanghai. Danach konnten wir alles besprechen und ich erhielt ein Angebot, das ich akzeptierte. Im Herbst 1982 ging ich nochmals für längere Zeit nach China, doch am 1. Oktober, also drei Jahre nach meiner Bewerbung, begann dann mein Wirken hier in Heidelberg.

Mein Kollege Josef Bille war Leiter des Instituts für Angewandte Physik I. Er plante seit einiger Zeit die Gründung

eines neuen Instituts um mehr Freiraum für seine Aktivitäten auf dem Gebiet der Augenheilkunde zu bekommen. Er schlug vor das "Institut für Mikrostruktur- und Rechner-technik, Heidelberg" (IMRH) zu gründen, an dem neben uns beiden Siegfried Kalbitzer (MPI für Kernphysik) und Reinhard Männer (Physikalisches Institut) mitwirken sollten. Dabei war die Schaffung eines Reiraums vorgesehen, der mir besonders am Herzen lag und im Neuenheimer Feld tatsächlich verwirklicht werden konnte.

Da das geplante IMRH nicht zustande kam und Technologie-Transfer damals ein beliebtes Schlagwort war, gründeten wir 1984 *Heidelberg Instruments*. Daran beteiligt war neben den oben erwähnten Personen auch Roel Wijnaendts vom EMBL. Wir mieteten uns im "Technologie-Park" im Neuenheimer Feld ein und versuchten unsere Ideen in die Tat umzusetzen. Ein wesentlicher Mangel unserer Firma war, dass zu viele Projekte verfolgt wurden und die Führungsstruktur ungeeignet war. Die Investoren erwarteten aber, dass in kurzer Zeit markttaugliche Produkte entwickelt wurden, mit denen Gewinne erwirtschaften werden können. Die Konsequenz war eine Aufspaltung der Firma. *Leica* übernahm die konfokale Mikroskopie, *Heidelberg Instruments Mikrotechnik* konzentrierte sich auf die direkt-schreibende Lithographie und *Heidelberg Instruments Engineering* auf die Augenheilkunde.

In vielen Gesprächen hatte ich betont, dass das Institutsgebäude an der Albert-Überle-Straße, das im Bauhaus-Stil errichtet ist, für experimentelle Physik eigentlich nicht geeignet ist. Im Gegensatz zu der Mehrzahl meiner Kollegen, habe ich mich immer für einen Neubau im Neuenheimer Feld ausgesprochen. Tatsächlich ergab sich Ende der neunziger Jahre die Gelegenheit für einen Neubau in dem die Institute für Angewandte Physik und Hochenergiephysik untergebracht werden sollten. Nach einer längeren Vorbereitungszeit, bedingt durch Ausschreibung, Architekten-Wettbewerb und Planung, wurde am 2.11.1999 der Grundstein gelegt (Abbildung 11). Der Umzug in das neue Gebäude erfolgte dann im Jahr 2002.



**Abbildung 11.** Grundsteinlegung des Gebäudes Im Neuenheimer Feld 227.

Noch ein kurzer Blick zurück: Anfang 1999 stand wieder einmal eine Stellenkürzung an. Um diese zu diskutieren traf ich mich während der Weihnachtsferien 1998 mit Karlheinz Meier. Ausgehend vom gemeinsamen Neubau erarbeiteten wir einen Plan, wie die Personalressourcen durch eine Institutszusammenlegung optimaler genutzt werden könnten. Die Professoren der Hochenergiephysik und der Angewandten Physik stimmten unserem Vorschlag zu und wir baten das Ministerium die erforderliche Genehmigung für eine Zusammenlegung der Institute und somit zur Schaffung des Kirchhoff-Instituts für Physik zu erteilen. Wir verbanden den offiziellen Termin mit der Zeremonie der Grundsteinlegung des neuen Gebäudes. In dem hier gezeigten Bild (Abbildung 12) unterschreibt Rektor Jürgen Siebke gerade die entsprechende Urkunde.



**Abbildung 12.** Gründung des Kirchhoff-Instituts für Physik. Unterzeichnung der Gründungsurkunde durch Rektor Jürgen Siebe.

Noch einige Worte zu den wissenschaftlichen Arbeiten. Was die Anwendung betrifft so habe ich mich hier in Heidelberg mit der Laser-Lithographie und der konfokalen Mikroskopie auseinandergesetzt. Beide Themen sind, wie bereits erwähnt, von Firmen aufgegriffen worden. Ein weiteres Gebiet war die Nutzung von Oberflächenwellen in der Sensorik. Die meiste Zeit beschäftigte ich mich jedoch mit den dielektrischen und elastischen Eigenschaften von amorphen Materialien bei tiefen Temperaturen. Für diese Arbeiten wurde ich 1999 von der Deutschen Physikalischen Gesellschaft mit dem Stern-Gerlach-Preis ausgezeichnet.

Am Ende meines Vortrags möchte ich noch drei Personen besonders erwähnen. Dies ist zunächst Stefan Hell, der in meiner Gruppe seine Diplom- und Doktorarbeit durchgeführt hat. Im Anschluss an seine Promotion hat er sich weiter mit der Konfokalen Mikroskopie beschäftigt und an verschiedenen Orten an ihrer Weiterentwicklung gearbeitet. 2014 wurde er für diese Arbeiten mit dem Nobel-Preis ausgezeichnet. Des Weiteren möchte ich Manfred von Schickfus erwähnen, den ich an der



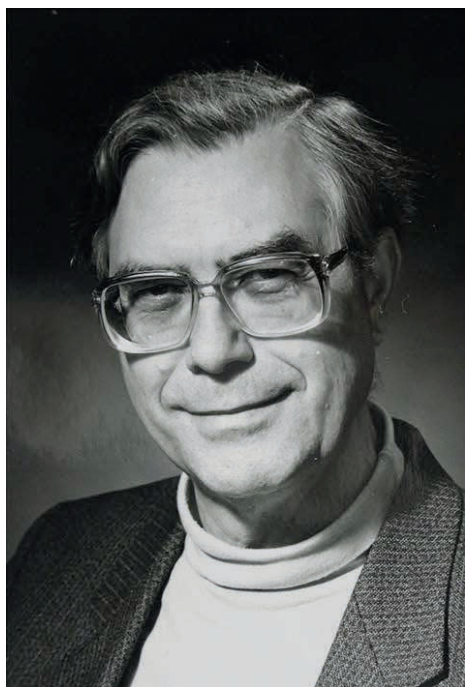
TU München kennenlernte. Er begleitete mich über Grenoble und Stuttgart nach Heidelberg. Sehr lange kenne ich auch schon Christian Enns. Als ich am MPI FKF in Stuttgart tätig war, wohnte ich in Weil der Stadt und lernte dort Christian beim Tischtennis-Training kennen. Er besuchte damals mit seinen Klassenkameraden das MPI. Dieser Besuch war für ihn ein wichtiger Anstoß späterer das Physikstudium aufzunehmen.

Zum Schluss möchte ich noch erwähnen, dass ich nach meinem Ausscheiden aus dem Lehr- und Institutsbetrieb noch sechs Jahre als Ombudsman für die Wissenschaft tätig war. Dieses Gremium, das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft initiiert wurde, besteht aus drei Personen und versucht bei Streitigkeiten im Wissenschaftsbetrieb zu vermitteln.

Vortrag gehalten an der Fakultät für Physik und Astronomie der Universität Heidelberg am 10. Dezember 2015.



Gerd Schatz



# Gerd Schatz

Gerd Schatz, Jahrgang 1934, studierte von 1954 bis 1959 Physik an der Technischen Hochschule Hannover und an der Universität Heidelberg. Dort promovierte er 1963 mit einer Arbeit zum Einfluss der Kernstruktur auf die schwache Wechselwirkung. 1965 wechselte er in das Kernforschungszentrum Karlsruhe, um dort das Zyklotronlabor zu leiten. Mit seinen dortigen Arbeiten zu Themen aus der Beschleunigerphysik habilitierte er sich 1971 an der Fakultät für Physik und Astronomie in Heidelberg. 1974 wurde er Institutsleiter am Institut für Angewandte Kernphysik des Kernforschungszentrums (später Institut für Kernphysik). 1975 folgte die Ernennung zum außerplanmäßigen Professor in Heidelberg. Ab Mitte der achtziger Jahre betrieb er die Neuausrichtung seiner großen Arbeitsgruppe auf das Gebiet der Teilchen-Astrophysik. Er baute und betrieb das Höhenstrahlungs-experiment KASKADE zur Vermessung des Energie- und Masse-Spektrums der kosmischen Strahlen im Bereich allerhöchster Energien. Hierzu war die genaue Rekonstruktion der Teilchen-schauer wichtig, insbesondere die Kenntnis der Hadron-Photo-produktion. 1991 wurde Gerd Schatz zum Vorsitzenden des Wissenschaftlich-Technischen Rates des Kernforschungszentrums Karlsruhe gewählt. Seit seinem Eintritt in den Ruhestand 1999 hat sich Herr Schatz weiter intensiv mit den Ergebnissen der Höhenstrahlungsexperimente befasst.



Gerd Schatz

## Zwischen Kernphysik und Kerntechnik

Ich möchte mich zunächst sehr herzlich für die Ehre bedanken, im Rahmen dieser Reihe vortragen zu dürfen. Als Herr Appenzeller mit dem Vorschlag an mich herantrat, wusste ich nur von den Vorträgen *Emeriti erinnern sich*, und daher habe ich gleich gesagt, ich bin doch gar kein Emeritus. Dann erfuhr ich, dass es jetzt heißt *Heidelberger Physiker erinnern sich*, und damit ist mir natürlich eine Ausrede verloren gegangen. Aber ich bin wohl der erste Nicht-Emeritus, der in diesem Rahmen vortragen darf, und das ehrt mich natürlich ganz besonders. Auf der Internet-Seite der Fakultät habe ich festgestellt, dass es zur Zeit Leute meines Status, *außerplanmäßige Professoren, die nicht an der Universität beschäftigt sind*, etwa so viele gibt wie hauptamtliche Professoren, die entpflichteten nicht mitgerechnet, und deshalb ist es wohl nicht schlecht, wenn auch mal einer von denen im kollektiven Gedächtnis der Fakultät auftaucht.

Ich möchte anfangen im Jahre des Heils 1954, als ich frisch nach dem Abitur mit dem Physikstudium anfang, an der Technischen Hochschule meiner Heimatstadt Hannover. Heute heißt sie natürlich Leibniz-Universität, obwohl Leibniz, anders als Kurfürst Ruprecht oder Markgraf Karl Friedrich von Baden mit der nach ihm benannten Universität nie etwas zu tun hatte. Aber er war ja nicht nur Philosoph, sondern auch Mathematiker und hat sogar mechanische Rechenmaschinen entworfen, die wahrscheinlich zu seinen Lebzeiten nie gebaut wurden, aber moderne Nachbauten zeigen, dass sie durchaus funktioniert hätten. Aber der Hauptgrund für die Benennung ist wohl, dass Leibniz eine der wenigen

Geistesgrößen ist, die es längere Zeit in Hannover ausgehalten haben.

Die Studienbedingungen waren damals geradezu idyllisch verglichen mit den heutigen. Wir waren fünf Physikstudenten im Semester, dazu kamen noch ein oder zwei angehende Studienräte mit Physik im Haupt- oder Nebenfach. Erwähnenswert ist vielleicht, dass einer von uns Fünfen fast zehn Jahre älter war als wir anderen, weil er erst vor kurzem aus russische Kriegsgefangenschaft zurückgekommen war. Für die paar Männeken lohnten sich natürlich keine gesonderten Grundvorlesungen in Physik oder Mathematik, die hörten wir zusammen mit 200 oder 300 angehenden Ingenieuren jeglicher Couleur. Natürlich mussten wir noch einiges Zusätzliches lernen, im Anfängerpraktikum, das jeden Samstagvormittag von 8 bis 12 Uhr stattfand, hieß das, dass wir bis zum Vordiplom 60 Versuche absolvieren mussten, den Ingenieuren genügten 15, und es war nicht ungewöhnlich, dass der zuständige Ordinarius auftauchte, sich bei der Laborantin, die die Listen führte, erkundigte, wo denn seine Physiker saßen unter den vielen andern, und denen dann persönlich auf den Zahn fühlte. Die Mathematikvorlesungen waren völlig auf die Bedürfnisse der Ingenieure abgestellt. Zwar wurde gelegentlich erwähnt, dass es auch Existenzsätze für Lösungen gibt, wichtiger aber war, wie man Lösungen findet. Zum Vorexamen mussten wir zwei Klausuren schreiben, eine in reiner und eine in praktischer Mathematik, wieder zusammen mit ein paar hundert Ingenieuren, und ein interessanter Zug dabei war, dass man so viele Bücher mitbringen konnte, wie man zu tragen bereit oder imstande war, weil sich die Prüfer sagten, wenn die später ein mathematisches Problem haben, gucken sie ja auch in einem Lehrbuch nach. Als ich dann später in Heidelberg war, merkte ich, dass mich das auf die Bedürfnisse des Physikstudiums besser vorbereitet hatte als es meinen Kollegen erging, die von Anfang an in Heidelberg studiert hatten. Das betraf nicht nur die Theorie, sondern auch Fehlerrechnung, die über Mittelwert und Streuung hinausging.



Nach dem Vordiplom kam ich dann nach Heidelberg, und da waren die Verhältnisse nicht drastisch anders. Wir waren vielleicht ein Dutzend Studenten im Semester, der Lehrkörper bestand aus drei ordentlichen Professoren, den Herren Haxel, Jensen und Kopfermann, sowie drei Privatdozenten, Herrn Brix, der ja in der ersten Reihe dieser Vorträge selbst vorgetragen hat, Herrn Krüger, später Professor in Tübingen, und in der Theorie Herr Koppe, später Professor in Kiel. Ein Fortgeschrittenenpraktikum gab es noch nicht, stattdessen machte man eine sogenannte Großpraktikumsarbeit, die dauerte ein Semester, wurde im Rahmen einer Arbeitsgruppe angefertigt und musste zum Schluss schriftlich ausgearbeitet werden. So ähnlich stelle ich mir eine heutige Bachelor-Arbeit vor. Dazu versammelten sich die interessierten Studenten am Semesteranfang mit Vertretern der drei beteiligten Institute – neben dem ersten und zweiten physikalischen Institut die Physikabteilung des MPI für Medizinische Forschung – und wurden irgendwie verteilt, eine Veranstaltung, die bei uns Studenten den farbigen Namen *Sklavenmarkt* hatte. Gelegentlich hörte ich auch Astronomie-Vorlesungen, und bei den Astronomen waren die Verhältnisse noch idyllischer. Ich erinnere mich an eine Vorlesung über interstellare Materie bei Herrn Bohrmann, Observator an der Landessternwarte. Da saßen wir zu viert im kleinen Hörsaal des Physikalischen Institutes in Erwartung der ersten Stunde, Herr Bohrmann kam herein, stutzte an der Tür und fragte freudig erregt "Wollen Sie alle meine Vorlesung hören?"

In die Zeit zwischen Vordiplom und Diplom fielen zwei wichtige physikalische Entdeckungen mit besonderem Bezug zu Heidelberg. Die erste war der Mößbauereffekt, der ja hier entdeckt wurde, in den Räumen des MPI für Medizinische Forschung, dessen Physikabteilung etwa zu derselben Zeit als MPI für Kernphysik verselbständigt wurde. Ich weiß nicht, ob irgendetwas an dem Gebäude heute darauf hinweist, würde das aber für angemessen halten. In Karlsruhe befindet sich an dem Bau, in dem Heinrich Hertz erstmals die Existenz elektromagnetischer Wellen nachgewiesen hat, sogar eine Büste von ihm. Ich habe das nicht aus der

Nähe beobachten können, ich war im Zweiten Physikalischen Institut gelandet, aber es wurde natürlich eine Menge herumerzählt von Leuten, die näher dran waren. Danach war es ja zunächst eine Zufallsentdeckung. Herr Mößbauer sollte oder wollte die Lebensdauer eines angeregten Zustandes in  $^{191}\text{Ir}$  bestimmen, nach einem wohlbekannten Verfahren. Dazu hatte er ein Präparat von  $^{191}\text{Os}$ , bei dessen Betazerfall der Zustand besetzt wurde, eine dünne Iridiumfolie und einen Szintillationszähler zum Nachweis der Gammas. Die Messung bestand dann darin, dass man die Absorption der Gammas in der Iridiumfolie bestimmte, zuerst bei Zimmertemperatur, und dann, indem man Quelle oder Folie mit flüssiger Luft abkühlte. Dabei nahm die Absorption etwas ab, und aus dem Unterschied konnte man die Lebensdauer bestimmen. Die Messung war nicht ganz einfach, denn der Unterschied war klein. Das hatte er beides gemacht und beides Mal dasselbe herausbekommen, und damit war er eigentlich fertig. Leider ist mir nicht bekannt, wie er auf die Idee kam, auch einmal Quelle *und* Folie abzukühlen, dabei erwartete man keine große Änderung mehr. Stattdessen wurde die Absorption riesengroß verglichen mit der kleinen Änderung vorher. Das Verdienst von Herrn Mößbauer lag darin, dass er den Grund dafür erkannte und bewies, obwohl ihm von allerhöchster theoretischer Seite sehr abgeraten wurde. Was mich besonders beeindruckte war die Tatsache, dass man für diese weitreichende Entdeckung keinen ungewöhnlichen Aufwand benötigte. Die erforderlichen Dinge – ein  $^{191}\text{Os}$ -Präparat, eine Iridiumfolie, ein Szintillationszähler und flüssige Luft – waren sicher in Dutzenden Physik-Instituten in der ganzen Welt verfügbar, von daher hätte man die Entdeckung fast überall machen können.

Die zweite Entdeckung, die ich meine, ist die Paritätsverletzung. Die wurde natürlich nicht in Heidelberg entdeckt, aber Herr Heintze war einer der ersten, die mit Experimenten dazu begann. Er baute in sehr kurzer Zeit eine einfache Doppelstreuapparatatur dazu auf, die aus einer Betaquelle, zwei Streufolien (eine davon war eher ein Blech) und zwei Betadetektoren bestand, die

sich nach der zweiten Streuung gegenüberstanden. Das Ganze befand sich natürlich im Vakuum. Die Zählraten der beiden Detektoren wurden letztlich auf mechanische Zählwerke geleitet, und dann konnte man mit bloßen Ohren hören, dass der eine etwas schneller tickte als der andere. Dann konnte man die Detektoranordnung unter Vakuum drehen, so dass die Detektoren vertauscht wurden, und siehe da, dann tickte der ursprünglich schnellere Zähler langsamer als der andere, und so konnte man sich mit eigenen Ohren davon überzeugen, dass die Welt nicht immer spiegelsymmetrisch ist. Dieses Experiment hätte man schon 20 Jahre früher machen können, und Herr Heintze erzählte von einem Herrn Kavanagh in England, der tatsächlich in den dreißiger Jahren ein ähnliches Doppelstreuexperiment gemacht hatte und dabei eine Asymmetrie fand, die er sich nicht erklären konnte, diesem Effekt aber nicht weiter nachging. In seiner charakteristischen Art fügte Herr Heintze dann hinzu: *Wenn er das gemerkt hätte, das wäre mal ein Nobelpreis gewesen, der verdient gewesen wäre.* Beide Beispiele haben sich mir tief eingepägt, weil sie zeigen, dass große physikalische Entdeckungen nicht immer an unseren begrenzten technischen Möglichkeiten scheitern, sondern an Barrieren in unserem Gehirn.

Mit dieser Apparatur von Herrn Heintze habe ich dann später meine Doktorarbeit gemacht. Dabei ging es natürlich nicht mehr um den Nachweis der Paritätsverletzung, die war inzwischen über jeden Zweifel erhaben, sondern um die Frage, ob die Kernstruktur Einfluss auf den Polarisationsgrad der Elektronen hat. Im allgemeinen ist das kaum der Fall, aber bei dem Kern, den ich untersucht habe,  $^{210}\text{Bi}$  alias RaE, konspirieren die Matricelemente so, dass die Polarisation deutlich kleiner ist als das übliche  $v/c$ . Danach war ich noch anderthalb Jahre Assistent am Zweiten Physikalischen Institut. Eine meiner Aufgaben in dieser Zeit war, das Institut in einem Ausschuss zu vertreten, der den Neubau des Physikalischen Institutes im Neuenheimer Feld planen sollte. Es ist doch schön, zu sehen, dass wir uns heute, etwas über 50 Jahre später, tatsächlich in diesem Neubau versammeln können, wenn ich auch nicht

glaube, dass von unseren damaligen Überlegungen etwas in den Bau eingeflossen ist.

Anfang 1965 wechselte ich dann in das Kernforschungszentrum Karlsruhe, wo ich den Rest meines Arbeitslebens zugebracht habe, und das war eine deutlich andere Welt. Das Zentrum war knapp zehn Jahre vorher gegründet worden um, wie es ein früherer Vorstandsvorsitzender ausgedrückt hat, Kernenergie in Deutschland möglich zu machen. Im Jahre 1955 hatte es in Genf eine große, von der UNO initiierte Konferenz unter dem Titel *Atome für den Frieden* gegeben, und danach herrschte weltweit eine große Euphorie bezüglich der Kernenergie, die so etwas wie das energetische Schlaraffenland versprach. Kurz danach wurde dann das Kernforschungszentrum gegründet. Das erste Projekt des Zentrums, sozusagen das Gesellenstück, waren der Entwurf und der Bau eines Forschungsreaktors, der unter dem Namen FR 2 wenige Jahre vor meinem Eintritt in Betrieb gegangen war und viele Jahre für sehr unterschiedliche Untersuchungen genutzt wurde. An der großen Zukunft der Kernenergie wollten natürlich auch die einschlägigen deutschen Firmen Siemens und AEG teilhaben. Sie hatten sich mit jeweils einer amerikanischen Firma zusammengetan, die schon viel Erfahrungen hatten, und begannen bald damit, Kernkraftwerke in Deutschland zu bauen. Für ein öffentliches Forschungszentrum gab daher dafür nicht viel zu tun. Das große Thema des Zentrums war stattdessen die Entwicklung eines Schellen Brutreaktors.

Bei aller Euphorie gab es aber weltweit doch auch Bedenken der Art, wie lange die Uranvorräte der Erde denn reichen würden, wenn alle Welt Kernkraftwerke bauen würde, Uran ist nicht so schrecklich häufig in der Erdkruste, zumal ja nur der kleine Anteil  $^{235}\text{U}$  von 0,7 % unmittelbar als Kernbrennstoff geeignet ist. Schon während des Weltkrieges hatten die Amerikaner jedoch gemerkt, dass man das viel häufigere  $^{238}\text{U}$  durch Neutroneneinfang und nachfolgende Betazerfälle in das thermisch spaltbare  $^{239}\text{Pu}$  umwandeln und so in Kernbrennstoff verwandeln kann. Bei der Uranspaltung werden im Mittel 2,4 Neutronen frei. Davon benötigt

man eines, um die Kettenreaktion aufrechtzuerhalten. Wenn es einem dann gelingt, ein weiteres Neutron von  $^{238}\text{U}$  einfangen zu lassen, erhält man einen Reaktor, der effektiv  $^{238}\text{U}$  verbrennt. Auf diese Weise kann man die Vorräte an Kernbrennstoff um einen Faktor 50 bis 60 steigern. (Nicht um einen Faktor  $140=1/0,007$ , wie man vermuten könnte, da dieser Konversionsprozess auch in jedem Reaktor abläuft und ein Leistungsreaktor auch heute schon knapp die Hälfte seiner Energie indirekt aus  $^{238}\text{U}$  bezieht.) Das dies im Prinzip funktioniert, hatten die Amerikaner mit einem Prototypreaktor Anfang der 1950er Jahre gezeigt. Dieser Prototyp war übrigens auch der erste Reaktor, mit dem elektrischer Strom erzeugt wurde. Diese Entwicklung eines Brutreaktors wurde deshalb in den verschiedensten Ländern in Angriff genommen, USA, der Sowjetunion, Frankreich, Japan, später auch China und Indien, und das war das große Thema des Kernforschungszentrum in den 1960er Jahren. Es war bald klar, dass ein solcher Reaktor deutlich anders aussehen musste als die üblichen Leistungsreaktoren und dafür eine ganze Reihe spezifischer Probleme zu lösen sind. Der Brutprozess funktioniert bei etwas höheren Neutronenenergien wesentlich besser, deshalb sollte man die Spaltneutronen nur bis in den keV-Bereich abbremsen und nicht bis zu thermischen Energien – daher der Name *Schneller* Brüter. Dies bedingt ein anderes Kühlmittel als leichtes oder schweres Wasser, die beide sehr stark moderieren. Nach ersten Versuchen mit Quecksilber erwies sich flüssiges Natrium als am besten geeignet. Dies ist aber bei den erforderlichen Temperaturen sehr korrosiv gegenüber Metallen, die höhere Energie der Neutronen führt zu wesentlich stärkeren Strahlenschäden in allen möglichen Materialien, flüssiges radioaktives Natrium stellt ein beträchtliches Sicherheitsproblem dar – die Zahl der Entwicklungsprobleme war lang. Hinzu kommt, dass es für ein solches Konzept unerlässlich ist, den gebrauchten Kernbrennstoff chemisch wieder aufzuarbeiten, um die verbliebenen Wertstoffe Uran und Plutonium von den erzeugten Spaltprodukten zu trennen, und das ist ein ungewöhnliches chemisch-technisches Problem, da unter den Spalt-

produkten der größere Teil des periodischen Systems der Elemente vertreten ist, extrem hohe Dekontaminationsfaktoren gefordert werden und organische Reagenzien, auf die man nicht verzichten kann, sich unter Strahlung schnell zersetzen.

Ich selber landete allerdings in dem kleinen Teil des Forschungszentrums, geschätzt etwa 20 %, der sich nicht mit Kerntechnik befasste. Und auch später habe ich mit Kerntechnik nur ganz am Rande zu tun bekommen. Aber als neugieriger Mensch interessiert man sich doch für die Dinge, von denen alle andern dauernd reden, und so habe ich mich mehr als nötig in die Kerntechnik eingearbeitet und später, nach meiner Habilitation in Heidelberg, gelegentlich Vorlesungen über Reaktoren gehalten. Die erste Aufgabe, die mir übertragen wurde, war der Betrieb eines Zyklotrons, das die Firma AEG gebaut und wenige Monate vor meinem Wechsel nach Karlsruhe an das Forschungszentrum übergeben hatte. Und so wurde ich unversehens auf einmal Häuptling von 50 oder 60 Indianern, eine Aufgabe, auf die man durch das Physikstudium nicht eigentlich optimal vorbereitet wird. Da half mir etwas, was ich so noch nicht kennengelernt hatte: Es gab eine effiziente Verwaltung. Für Dinge, die in Heidelberg von Assistenten oder Laboranten mit viel Einsatz, aber nicht immer ganz professionell erledigt wurden, gab es hier Leute, die ihr Geschäft von Grund auf gelernt hatten und völlig damit zufrieden waren, den Wissenschaftlern diese Sachen abzunehmen. Das war vor allem in Personaldingen eine wichtige Hilfe, denn bei 50 oder 60 Leuten ist es nicht ungewöhnlich, dass einer oder eine meint, aus der Reihe tanzen zu sollen.

Das Zyklotron lieferte Deuteronen von 50 und Alphateilchen von 100 MeV. Es war die erste Maschine ihrer Art, die die AEG gebaut hatte, und litt daher zu Anfang noch unter einigen Kinderkrankheiten, die wir nacheinander beheben mussten. Es wurde von sehr verschiedenen Gruppen genutzt. Mehrere kamen aus dem Institut für Kernphysik, einem gemeinsamen Institut des Forschungszentrums und der Universität Karlsruhe mit Herrn Schopper als Gründungsdirektor. Wenn man Deuteronen von

50 MeV auf irgendeine Art von Materie schießt, ist ein sehr häufiger Prozess der Aufbruch in die beiden Bestandteile. Dadurch erhält man Neutronen mit einem breiten Spektrum bis etwa 25 MeV. Der untere Teil dieses Bereiches war noch für die Kerntechnik interessant. Häufige Kunden waren auch die Radiochemiker des Zentrums, die sich sehr für den Bau des Beschleunigers eingesetzt hatten und damit alle möglichen radioaktiven Kerne erzeugten. Ein beträchtlicher Teil der Strahlzeit, etwa ein Drittel, ging auch an externe Gruppen, vor allem von Universitäten. Hier in Heidelberg war Herr Schmidt-Rohr vom MPI für Kernphysik ein regelmäßiger Besucher, der die Streuung von Deuteronen an Kernen systematisch untersuchte, auch Herr Otten aus Mainz kam eine Zeit lang zu Experimenten herüber. Und dann stellten wir viele radioaktive Präparate her, die an Universitätsgruppen geschickt wurden zu Zwecken, die uns meist verborgen blieben. Last not least waren die Spitzen des Zentrums so weise, sich an das Sprichwort zu erinnern, dass man dem Ochsen, der da drischt, nicht das Maul verbinden soll, und so konnten wir den Beschleuniger auch für eigene Forschung nutzen nach dem Motto: Wenn der Laden läuft und es nicht viel Strahlzeit kostet, dürft ihr auch, und das taten wir dann.

Eine besondere Anwendung ist noch erwähnenswert: An der Universität Karlsruhe gab es eine kleine Gruppe von Ingenieuren, die sehr früh gemerkt hatten, dass man mit radioaktiver Markierung sehr geringe Materiemengen empfindlich verfolgen kann, und dies auf die Untersuchung von Abrieb und Verschleiß von Maschinenteilen anwendeten. Und so war es nicht ungewöhnlich, wenn in der Experimentierhalle Kolbenringe oder Kurbelwellen auftauchten, um an wohldefinierten Stellen mit dem Zyklotronstrahl aktiviert zu werden; einmal war es sogar das Rad eines ICE, der damals entwickelt wurde. Ein regelmäßiger Kunde auf diesem Gebiet war auch die Entwicklungsabteilung von Mercedes-Benz. Aus diesen Dingen ist dann viel später eine kleine Firma hervorgegangen, die vor wenigen Jahren bei guter Gesundheit ihr zehnjähriges Jubiläum gefeiert hat.

Während wir mit diesen Dingen beschäftigt waren, wandelte sich der kerntechnische Bereich langsam, aber nachdrücklich. Irgendwann war die Entwicklung abgeschlossen, und es stand der Bau des Schnellen Brütters an. Der wurde natürlich von der Industrie übernommen, der Reaktor entstand dann auch in Kalkar am Niederrhein. Im Zentrum hatte das eine Reihe von auch organisatorischen Konsequenzen, die zum Teil auch mich erreichten. Neben dem Institut für Kernphysik von Herrn Schopper gab es auch noch ein Institut für Angewandte Kernphysik mit Herrn Beckurts als Gründungsdirektor. Eine der Aufgaben dieses Institutes war die Messung von Wirkungsquerschnitten neutroneninduzierter Reaktionen, die für den Schnellen Brüter wichtig waren, in dem wichtigen keV-Bereich. Nachdem Herr Beckurts Karlsruhe verlassen hatte, um den Vorstandsvorsitz am Forschungszentrum Jülich zu übernehmen, landete diese Gruppe bei mir. Nun hatte uns Herr Zeh vom Theoretischen Institut hier in Heidelberg schon längere Zeit vorher darauf aufmerksam gemacht, dass dieselben Wirkungsquerschnitte für die Astrophysik von Interesse sind. Astrophysiker und Geochemiker hatten ja schon lange aus den beobachteten Häufigkeiten von Elementen und Isotopen geschlossen, dass alle Kerne schwerer als Eisen durch Neutroneneinfang gebildet wurden. Dabei musste es zwei verschiedene Prozesse gegeben haben, einen bei sehr hohem Fluss, bei dem die Kerne mehrere oder sogar viele Neutronen einfangen, bevor sie Zeit zu einem Betazerfall haben, und eine viel gemächlicheren, bei dem sich Neutroneneinfang und Betazerfall mehr oder weniger abwechseln. Der letztere Prozess, s-Prozess genannt (s für slow), findet wahrscheinlich in Riesensternen bei thermischen Energien statt, wie sie die Neutronen im Schnellen Brüter haben. Und so haben wir die Aktivitäten dieser Gruppe allmählich von der Kerntechnik in die nukleare Astrophysik umwidmet. Das hatte in der Übergangszeit auch den Vorteil, dass die Kerntechnik noch für den Betrieb zahlte. Die Kerntechniker waren auch sonst sehr großzügig. Für derartige Messungen braucht man ja größere Proben getrennter Isotope, die bei der Messung nicht merklich



verändert werden. Davon gab es in Oak Ridge in den USA einen Pool, zu dem die Kerntechniker Zugriff hatten, und sie waren so nett, auf unseren Wunsch hin auch mal eine Probe auszuleihen, deren Bedeutung für die Kerntechnik ziemlich marginal war, ganz anders aber für die Astrophysik. Später haben wir diese Arbeiten dann als reine Grundlagenforschung noch einige Jahrzehnte weitergeführt. Mein Nachfolger hat sie dann beendet, als die wichtigsten Leute in der Gruppe kurz nacheinander in den Ruhestand gingen. Aber jüngere Kollegen aus der Gruppe führen die Arbeiten in Frankfurt, bei der GSI, in Canada und den USA fort. Die in der Gruppe entwickelte Datenbank KADoNiS – das K steht für Karlsruhe – ist weiter Standard auf dem Gebiet und wird jetzt von einer Dame in Vancouver gepflegt, die das Geschäft als Postdoc in Karlsruhe gelernt hat. Das Knowhow ist also nicht verloren gegangen. Dies Beispiel zeigt übrigens, dass die Beziehung zwischen Grundlagenforschung und Anwendungen nicht die Einbahnstraße ist, die wir meistens unterstellen.

Während wir weiter unserer Arbeit am Zyklotron nachgingen, wandelte sich die ursprüngliche Begeisterung über die Kerntechnik immer mehr in Ablehnung. Die Kerntechniker reagierten darauf verständlicherweise mit einem Forschungsprogramm zur Verbesserung der Sicherheit von Leistungsreaktoren. Ich bin davon überzeugt, dass die betroffenen Ingenieure gute Arbeit geleistet haben, und ihre Ergebnisse sind auch in den Entwurf neuerer Reaktoren eingegangen, es kam mir aber auch vor als ein Versuch, ein psychologisches Problem mit technischen Mitteln zu lösen, und das hat dann ja auch nicht geklappt. Erschwerend kamen dann noch zwei größere Reaktorunfälle hinzu, 1979 in Three Mile Island in den USA und 1986 in Tschernobyl. Der erste davon ist in der Öffentlichkeit nicht so bekannt, aber für die Sicherheit deutscher Reaktoren von allen drei schweren Unfällen – später kam ja noch Fukushima dazu – der relevanteste, da es sich dabei um einen Reaktor desselben Bauprinzips handelte, wie es auch den deutschen Kernkraftwerken zugrunde liegt, und der Unfall nicht wie in Fukushima auf einer Einwirkung von außen beruhte,

sondern auf Bedienungsfehlern. Der Reaktor in Tschernobyl war von ganz anderer Bauart, und bei ihm geriet die Kettenreaktion für kurze Zeit außer Kontrolle, er wurde prompt überkritisch, wie die Fachleute sagen. So etwas kann man bei einem der heute überall in der Welt üblichen Leistungsreaktoren nicht erreichen, selbst wenn man möchte und beim Umgang damit freie Hand hat. Die Öffentlichkeit wandte sich immer mehr gegen die Kernenergie, 1980 wurde die Partei der Grünen gegründet, und wenige Jahre später entdeckte auch die SPD ihre Abneigung gegen die Kernenergie, kurz nachdem Herr Schmidt als Bundeskanzler abgewählt worden war. Der Schnelle Brüter in Kalkar wurde zwar gebaut, aber nie eingeschaltet. Es kam hinzu, dass man im Laufe der Jahre immer mehr Uranlagerstätten entdeckt hatte, dieser Reaktortyp also nicht benötigt wurde. Selbst wenn man, wie ich, der Kernenergie wohlwollend gegenüber steht, muss man konstatieren, dass der Schnelle Brüter viele Jahrzehnte früher entwickelt wurde, als vom Bedarf her nötig. Überall in der Welt wurden die Arbeiten an diesem Reaktortyp daher nach und nach eingestellt, obwohl sie unzweifelhaft funktionieren, wie zwei Reaktoren diese Typs zeigen, die in Russland auch heute noch jeweils mehrere hundert MW elektrische Energie erzeugen. Nur in China und Indien gehen verwandte Entwicklungen weiter mit dem Ziel, Thorium als Kernbrennstoff zu nutzen. Thorium hat nur ein quasistabiles Isotop mit der Massenzahl 232, das wie  $^{238}\text{U}$  thermisch nicht spaltbar ist, es kann aber ganz analog durch Neutroneneinfang und zwei nachfolgende Betazerfälle in  $^{233}\text{U}$  umgewandelt werden, das wiederum thermisch spaltbar ist. Thorium ist in der Erdkruste mindestens doppelt so häufig wie Uran, so dass noch Kernbrennstoff für viele Generationen vorhanden ist.

Der Niedergang der Kerntechnik stellte für das Forschungszentrum natürlich eine große Herausforderung dar, da viele qualifizierte Wissenschaftler in neue Arbeitsgebiete überführt werden mussten. Aber wir Kernphysiker am Zyklotron standen vor einer ganz ähnlichen Situation. Die wissenschaftlichen Möglichkeiten des Beschleunigers waren weitgehend ausgereizt,

und es waren an vielen Stellen größere und vielseitigere Anlagen entstanden. Deshalb stellte sich für uns die Frage, welchen Problemen wir uns in Zukunft zuwenden sollten. Dabei gab es wichtige Randbedingungen. Viele Kernphysiker an den Hochschulen, die vor ähnlichen Problemen standen, wandten sich häufig der Teilchenphysik zu. Diese Möglichkeit war uns verwehrt, unser Hauptgeldgeber, das Bundesministerium damals noch in Bonn, hatte deutlich erklärt, dass es seiner Meinung viele gute Teilchenphysik in Deutschland gebe, da müsste Karlsruhe nicht auch noch aktiv werden. Außerdem wäre ein Experiment an einem anderen Beschleuniger weit weg von Karlsruhe bei unseren Kollegen im Zentrum nicht auf viel Wohlwollen gestoßen. Und so begannen wir einen längeren Diskussionsprozess, bei dem viele z. T. wilde Ideen aufkamen und wieder verschwanden, und am Ende beschlossen wir, ein Experiment zur Höhenstrahlung im Kernforschungszentrum aufzubauen. Bemerkenswert war daran wohl, dass niemand von uns jemals auf diesem Gebiet gearbeitet hatte.

Die Höhenstrahlung war ja kurz vor dem ersten Weltkrieg von Viktor Hess entdeckt worden. Zwischen den beiden Kriegen hatte das Gebiet wichtige Fortschritte gemacht. Es wurde klar, dass die primäre Strahlung positiv geladen ist, also wohl aus Atomkernen besteht. Zu der astrophysikalischen Fragestellung – was sind das für Teilchen und wo kommen sie her – kam neu die Erzeugung neuer Teilchen. Die Höhenstrahlungsforschung ist ja die Mutter der Teilchenphysik, Positron, Myon und Pion wurden in der Höhenstrahlung entdeckt. Nach dem zweiten Weltkrieg entwickelten sich diese Teilgebiete dann auseinander. Die an Teilchenphysik Interessierten fanden an den immer größeren Beschleunigern bessere Experimentiermöglichkeiten, höhere Intensitäten und nicht zuletzt wohldefinierte Anfangsbedingungen. Für die astrophysikalisch Interessierten boten Raketen und später Satelliten die Möglichkeit, die primären Teilchen ohne die störenden Komplikationen durch die Erdatmosphäre zu untersuchen, dies aber aus Intensitätsgründen nur bei ziemlich kleinen Energien. Und so schrumpfte die

Zahl der Leute, die die Höhenstrahlung vom Erdboden aus erforschten, beträchtlich, und die Verbleibenden wurden insbesondere von Teilchenphysikern als Menschen betrachtet, die die Zeichen der Zeit nicht erkannt hatten. Dabei ist es bis heute unmöglich, die höchsten Energien in der Höhenstrahlung anders als vom Boden aus zu untersuchen. Das Spektrum der Höhenstrahlung erstreckt sich ja über mindestens 10 Größenordnungen, und die Intensität nimmt über diesen Bereich um über 25 Größenordnungen ab. Bei den höchsten Energien, die man nachgewiesen hat, beträgt der Fluss gerade noch ein Teilchen pro  $\text{km}^2$  und Jahrhundert. In Ländern wie USA, England, Russland und Japan wurden daher weiter große Experimente mit dieser Fragestellung gebaut, aber in Deutschland war diese Art von Höhenstrahlungsforschung fast ausgestorben.

Es ist deshalb eine gewisse Ironie des Schicksals, dass von den letzten beiden deutschen Kämpen auf diesem Gebiet, den Herren Samorski und Stamm in Kiel, ein wichtiger Anstoß für das Gebiet ausging. Sie waren immer noch dabei, die Daten eines Experimentes auszuwerten, dass die Herren Trümper und Bagge nach dem Kriege in Kiel aufgebaut und betrieben hatten. Dabei stießen sie auf eine Merkwürdigkeit. Sie untersuchten die Intensität an einer Stelle am Himmel, an der eine bekannte Röntgenquelle sitzt, Cygnus X3, deren Intensität mit einer Periode von mehreren Stunden schwankt. Bei einer Fourier-Analyse fanden sie eine Komponente mit derselben Periode, und zwar mit einer statistischen Signifikanz von 4,5 Sigma, also nicht weit von den kanonischen 5 Sigma entfernt, bei denen man im allgemeinen anfängt, an eine Entdeckung zu glauben. Das konnte dann nur durch Gammastrahlung erklärt werden. Das allein wäre schon bemerkenswert gewesen, denn die Energie dieser Gammas hätte etwa 10 Größenordnungen höher sein müssen als die der Röntgenquanten, bei denen man die Quelle vorher beobachtet hatte. Ganz merkwürdig wurde die Sache aber, als sie sich die Signale genauer ansahen, denn die Zahl der beobachteten Myonen in der Erdatmosphäre ließ nur den Schluss zu, dass es sich bei den Teilchen

um Hadronen handelte. Es sah also so aus, als ob sich Gammas sehr hoher Energie in der Erdatmosphäre wie Hadronen verhielten. Das war natürlich für Teilchenphysiker sehr aufregend. Gammaquanten so hoher Energie können auch heute noch in keinem Labor auf der Erde erzeugt werden. Herr Cronin in den USA, einer der Entdecker der CP-Verletzung, baute deshalb in Utah ein großes Experiment auf (das den Effekt nicht reproduzieren konnte), und hier in Heidelberg interessierte sich Herr Heintze sehr dafür, entwarf geeignete Detektoren, baute sogar einen Prototyp und reiste in der Welt umher, um einen geeigneten Standort zu suchen. Zu einem großen Experiment kam es dann doch nicht, aber das regte Leute am MPI für Kernphysik an, sich mit solchen Fragestellungen zu beschäftigen, und daraus entwickelte sich dann die sehr erfolgreiche Hochenergiegammaastronomie, die Herr Hofmann und seine Kollegen heute sehr erfolgreich betreiben.

Wir erkannten sehr bald, dass wir den Zeitvorsprung von Herrn Cronin nicht einholen konnten, und wandten uns daher von Anfang an der alten astrophysikalischen Frage zu, welche Art von Teilchen, d. h. Atomkernen, da von oben in die Atmosphäre einfällt. Wesentlich für unseren Entschluss war auch gewesen, dass wir sehr schnell sahen, dass uns die erforderlichen Detektoren von der Kernphysik sehr vertraut waren. Und so machten wir den Vorschlag zum Bau einer großen Detektoranordnung auf dem Gelände des Forschungszentrums. Etwas überrascht hat uns dann doch, dass wir innerhalb des Zentrums damit auf viel Wohlwollen stießen. Wahrscheinlich hing das mit der besonderen Situation zusammen, in der sich das Zentrum befand. Infolge der Diversifizierung nach dem Zurückfahren der Kerntechnik mussten viele Wissenschaftler ihr Arbeitsgebiet wechseln, und gegen so etwas gibt es immer Widerstände, und zwar nicht nur von denen, die aus Bequemlichkeit bis zu ihrer Pensionierung immer dasselbe machen möchten, sondern nicht zuletzt auch von denen, die von ihren bisherigen Aufgaben überzeugt waren und sich voll dafür eingesetzt hatten. Da stieß es auf Sympathie, dass hier ein halbes Institut von sich aus, ohne äußeren Zwang, einen solchen Wandel vollzog.

Das KASCADE-Experiment konnte dann nach einer externen Begutachtung gebaut werden und wurde einige Jahre lang betrieben. Was ist dabei herausgekommen? Ich möchte zwei Dinge herausheben. Der lange und steile Abfall der Intensität der Höhenstrahlung folgt über weite Strecken einem Potenzgesetz, und in dem ganzen Bereich von 10 Größenordnungen gibt es nur eine kleine Anomalie: Bei einigen  $10^{15}$  eV steigt der Exponent des Abfalls von etwa 2,7 auf etwa 3,0. Man hatte lange vermutet, dass dies darauf zurückzuführen ist, dass der Fluss der leichtesten Kerne, also der Protonen dort stark abnimmt. Ich glaube, dass wir als erste dafür wirkliche Evidenz vorlegen konnten. Der andere Punkt ist mehr methodischer Art. Wenn sie aus den vielen Millionen Teilchen, die am Erdboden gemessen werden, auf die Eigenschaften des einen Teilchens zurückschließen wollen, das oben in die Atmosphäre eingefallen ist, müssen Sie den Prozess dazwischen sehr gut verstehen. Dazu benötigen Sie ein umfangreiches Rechenprogramm. Als wir mit unserer Arbeit anfangen, gab es mehrere solcher Programme, aber die waren fast alle von Einzelkämpfern geschrieben, die gar nicht imstande waren, alle wichtigen Aspekte gleich sorgfältig zu behandeln, und oft war die Dokumentation nur für den Autor selbst verständlich. Wir sahen daher sehr schnell, dass wir selbst etwas tun mussten, und begannen sehr früh damit, ein derartiges Programm zu erstellen, mit wichtiger Starthilfe zweier der zitierten Einzelkämpfer. Von Anfang an haben wir dabei die Politik verfolgt, das Programm allen Interessenten zur Verfügung zu stellen. Das hatte natürlich zur Folge, dass uns öfter mal Fehler nachgewiesen wurden, aber wichtig ist ja, dass man Fehler findet und eliminiert, und dabei kann man alle Hilfe gebrauchen. Dieses Programm CORSIKA – KA steht hier wieder für Karlsruhe – wurde sehr schnell populär, es wird heute noch weiterentwickelt und ist so etwas wie ein Standard geworden.

Damit nähere ich mich dem Zeitpunkt meiner Pensionierung, und das ist ein guter Punkt aufzuhören. Gibt es ein persönliches Fazit? Ich würde sagen: Es hat oft Spaß gemacht, manchmal war es

auch ganz schön mühsam, und, wenn man ehrlich ist, manches hätte man auch besser machen können. Aber ähnlich würden es wohl die anderen Redner in dieser Reihe auch ausdrücken.

Vortrag gehalten an der Fakultät für Physik und Astronomie der Universität Heidelberg am 12. November 2015.

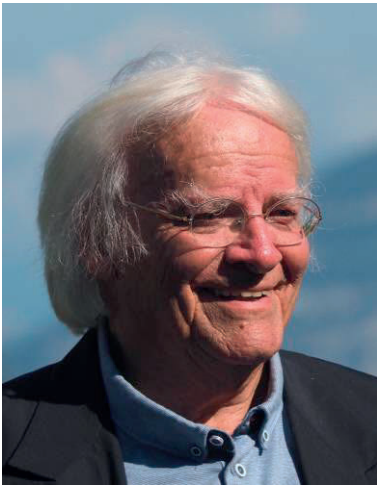




Hans Joachim Specht



**1965**



**2017**

# Hans Joachim Specht

Hans Joachim Specht, 1936 in Unna geboren, studierte Physik an der TU München und der Universität München, sowie an der ETH Zürich. Nach der Diplomarbeit bei Maier-Leibnitz am Forschungsreaktor München promovierte er 1964 mit dem Nachweis der Bildung von "Quasimolekülen" im elektrischen Feld der vereinigten Kernladungen zweier kollidierender schwerer Ionen. In seiner Assistentenzeit erregte seine Entdeckung der riesigen 2:1 Deformation der "Formisomere" im zweiten Potenzialminimum eines spaltbaren Atomkerns weltweites Aufsehen. Nach der Habilitation 1970 an der Universität München folgte er 1973 einem Ruf nach Heidelberg. Ab 1980 trieb er am europäischen Forschungszentrum CERN in Genf die Entwicklung der hochrelativistischen Schwerionenphysik voran. Eine internationale Kollaboration mit Specht als Sprecher fand 1995 ein erstes klares Signal zur Bildung eines Quark-Gluon Plasmas, eines neuen Zustandes der Materie, der für die Entwicklung des frühen Universums von Bedeutung ist. Im Jahr 2000 wurde dieser Materiezustand vom CERN offiziell als Neuentdeckung bekannt gegeben. Anfang der 80iger, 90iger und 2000er Jahre war Specht für jeweils ein Jahr am CERN, um diese Entwicklungen vor Ort zu forcieren.

Von 1992 bis 1999 war Specht wissenschaftlicher Direktor der Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) in Darmstadt. Dort initiierte er unter anderem die Tumorthherapie durch Bestrahlung mit Kohlenstoff-Ionen. An dem daraus hervorgegangenen Heidelberger Ionenstrahl-Therapiezentrum wurden seit 2009 mehrere Tausend Patienten behandelt. Daneben erschloss er, auch in Vorbereitung auf die Zeit nach seiner Emeritierung im Jahre 2004, ein neues Arbeitsgebiet, die Physik und Neurophysiologie musikalischer Wahrnehmung, in Zusammenarbeit mit H.G. Dosch (s. Band 2), mit klinischen Praktikern sowie einer großen Anzahl internationaler Musiker. Die Aufdeckung der Parallelität zwischen

musikalischem Talent und der mitwachsenden Größe des zuständigen Hirnareals erregte erst Unglauben, dann Begeisterung. Darüber berichteten Specht und Dosch, auch mit experimentellen Demonstrationen, unter anderem im Rahmen der Loeb Lectures in Harvard. Für seine Verdienste um die Förderung der internationalen wissenschaftlichen Zusammenarbeit wurde Specht von der Alexander von Humboldt-Stiftung mit der Werner-Heisenberg-Medaille geehrt. Seit 2000 ist Specht Mitglied der Heidelberger Akademie der Wissenschaften.

*Hans Joachim Specht*

## **60 Jahre Physik – Faszination der Vielfalt**

Der vorliegende Abdruck ist die schriftliche Fassung eines Vortrags am 28. Januar 2016 in Heidelberg in der Reihe "Heidelberger Physiker berichten: Emeriti blicken zurück auf erlebte Wissenschaft". Dabei wurden mehr als 60 slides (in englischer Sprache) gezeigt, mit Bildern besonders interessanter physikalischer Ergebnisse zusammen mit den entsprechenden Aufbauten, aber auch mit vielen Photos von meinen Lehrern, Schülern und anderen wichtigen Begegnungen in meinem Leben. Dazu existiert auch eine Videofassung. Es würde jeden Rahmen sprengen, diese Vielfalt in Papierform zu bringen. Die vorliegende schriftliche Form sollte daher eher als komplementär denn als getreues Abbild des Vortrags gesehen werden, auch durch viele ergänzende Anmerkungen, die in dieser Form weder auf den slides noch mündlich enthalten waren. Ich empfand den Vortrag durchaus als ein Vergnügen, trotz der Mühe, lange Verdrängtes und nur schlecht Dokumentiertes im Detail aufzubereiten. Es war mir aber wichtig, dabei auch meinen Dank auszusprechen an die zahlreichen Älteren, von denen ich gelernt habe, aber auch an die noch zahlreicheren Studenten, die zunächst von mir gelernt haben, dann aber sehr viel mehr an mich zurückgebracht haben.

Zu meiner Jugend: Geboren 1936 in einem kleinen Nest in Westfalen, wuchs ich relativ ungestört von den Wirren der Kriegs- und unmittelbaren Nachkriegszeit in ländlicher Umgebung auf. Auch die Gymnasialzeit in Kamen änderte wenig an dieser Provinzialität. Wie ich zur Physik kam, liegt eher im Dunkeln. Meine elterliche Umgebung war durch eine Firma geprägt, die

mein Grossvater 1905 gegründet hatte und die bis heute in 4. Generation fortbesteht. Unter den Geschwistern und zahlreichen Anverwandten in der Generation meiner Eltern gab es Mediziner und Juristen, auch Lehrer in der Generation davor, aber keinen Naturwissenschaftler. In meiner Jugend interessierte mich vieles: Astronomie mit selbstgebauten Fernrohren, Elektronik mit Selbstbau von Radios u.a., aber auch Chemie. Einiges hat frühe Wurzeln: bei Kriegsende 1945 sammelten wir Kinder, dabei auch etwas ältere als ich, körbeweise elektronisches Material, selbst Feldtelefone, aus einem zerstörten Heereszeugamt in der Nähe, gefolgt 1946 von Schiesspulver aus US Munition nach dem Abzug der lokalen Kommandatur aus unserem Hause. Später verschlang ich dann Bücher aller Art über physikalisch-technische Anwendungen, aber auch über Atom- und Kernphysik. Die führende Rolle vom Zeitaufwand her spielte jedoch die Musik. In der Generation meiner Eltern, entsprechend der bürgerlichen Tradition in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts, spielten fast alle ein Instrument, in der Mehrheit Klavier so wie ich selbst. Im Gymnasium waren dementsprechend meine besonderen Stärken Mathematik, Physik und Musik. Da ich nicht auf den Mund gefallen war und durchaus zu Widerspruch neigte (den gab es in der Familie auch gegenüber dem Nazi-Regime, angeführt vom Grossvater), wurde ich für die letzten 3 Jahre zum Klassensprecher gewählt. Ich war dann auch Klassenbesten.

Nach dem Abitur 1956 schrieb ich mich an der Ludwig-Maximilian-Universität München im Fach Physik ein mit dem Gefühl, in der Physik am ehesten eine gemeinsame Klammer für alle meine Interessen zu finden. Restliche Zweifel verschwanden vollends im Laufe dieses ersten Semesters, das ich mit regelmäßigem Herumschnuppern in Vorlesungen anderer Fakultäten (insbesondere der medizinischen) eher als Studium Generale ansah. Ich habe die Wahl nie bereut: die Faszination der grundlegenden wie der reichen anwendungsorientierten Aspekte des Fachs hält bis heute fast unvermindert an. Zugleich bot München intellektuell,

soziologisch und (zugegeben) auch touristisch ein Umfeld, das den jungen Studenten aus der Provinz nachhaltig beeinflusste.

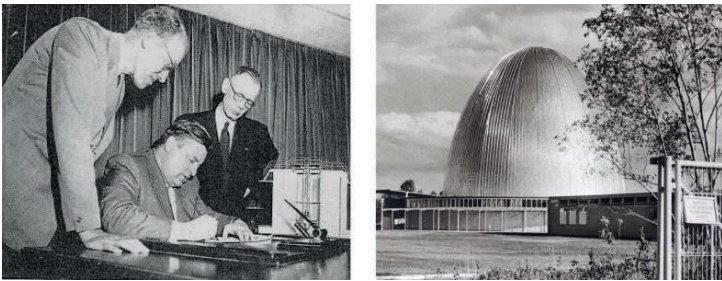
Die weiteren äußeren Daten sind schnell berichtet. Zunächst wechselte ich an die Technische Hochschule München, motiviert durch die weniger abgehobene Mathematik (bei J. Lense), aber insbesondere durch ein grosses Angebot an Zusatz-Fächern jenseits der Experimentalphysik (bei G. Joos) wie Darstellende Geometrie, Technische Thermodynamik und insbesondere Technische Elektrizitätslehre (bei W.O. Schumann). Die notwendigen Industriepraktika von 1/2 Jahr verbrachte ich je zur Hälfte in einer Reparaturwerkstatt für Dampflokomotiven, wo ich auch die wichtigsten Elemente für Metallbearbeitung lernte, und im Chemielabor eines mittelständischen Stahlwerks im Ruhrgebiet, das einem eingeheirateten Onkel gehörte. Nach dem Vordiplom 1959 wechselte ich an die ETH Zürich, scheiterte aber mit dem Versuch, die in München eher schwache theoretische Physik auf hohem Niveau zu lernen: W. Pauli, dessen Skripten selbst in München zirkulierten, starb unerwartet vor Beginn des ersten Zürcher Semesters. Stattdessen konzentrierte ich mich dann auf weitergehende Experimentalphysik-Vorlesungen und besonders Hochfrequenztechnik mit Gross-Praktikum, mein späteres Wahlfach im Hauptdiplom (bei H.H. Meinke). Unter dem erheblichen Einfluss der Lindauer Nobelpreisträger-Tagung 1959 mit M. Born, P. Dirac, O. Hahn, W. Heisenberg, M. von Laue, W. Lamb und anderen Grössen sowie Münchner Kommilitonen, die dort Spannendes zur hochaktuellen modernen Physik in Garching erzählten, kehrte ich dann doch an die TH München zurück und machte dort bei H. Maier-Leibnitz am ersten deutschen Kernreaktor FRM meine Diplomarbeit (Diplom 1962) und Doktorarbeit (Abschluss 1964), beides *summa cum laude*. Es folgte eine Postdoc Zeit von einem weiteren Jahr in München.

Was hat mich in der Rückschau von heute in meiner wissenschaftlichen Entwicklung bis zum Beginn meiner CERN Ära am meisten geprägt? Ich denke, es war die überragende Persönlichkeit von H. Maier-Leibnitz und des zugehörigen Umfelds in München.

Der Zeitgeist für die Kernphysik war ungleich positiver als heute. Der Kaufvertrag für den Kernreaktor in Garching ("Atomei") wurde 1956 durch den Atom-Minister F.J. Strauss in Anwesenheit von ML unterzeichnet. Im gleichen Jahr war Baubeginn, und nur 11 Monate später ging der Reaktor in Betrieb, unfassbar im Vergleich zur heutigen überreglementierten Situation in unserem Land. In der Grundlagenforschung galt das Gebiet als jung mit vielen offenen Fragen, qualitativ und quantitativ. In der Nutzung von Neutronen für Strukturanalysen in der Festkörperphysik, der Chemie und der Biologie steckte man noch in den Kinderschuhen, mit immer neuen Ideen und einer daher hohen Erwartungshaltung für die Zukunft. In den technischen Anwendungen gab es zwar den Sündenfall von Hiroshima und Nagasaki und das globale Problem des Wettrüstens, aber auch eine sehr große Euphorie für breite friedliche Anwendungen als Folge der ersten großen Genfer Konferenz "Peaceful Uses of Atomic Energy" 1955. Es wimmelte von Studenten, die von all dem Neuen von weither angezogen wurden, so wie ich von der ETH. In einer Momentaufnahme zu einem beliebigen Zeitpunkt gab es "gleichzeitig 100 Diplomanden und 100 Doktoranden", wohlgemerkt in der Verantwortung von ML und einer Handvoll Assistenten, mit den Prinzipien "jeder ist für seine Arbeit verantwortlich", "jeder hilft jedem" (alles Original-Zitate aus dem veröffentlichten Emeritus Vortrag von ML in Heidelberg 1992). Ich lernte zweierlei. Ich lernte zum einen die überragende Bedeutung der Entwicklung neuer Methoden für den Gewinn immer neuer Erkenntnisse in den experimentellen Naturwissenschaften (ML nach Lichtenberg: "etwas Neues machen, um etwas Neues zu sehen"), und ich lernte dies so gründlich über einige Jahre hinweg, dass mein eigener wissenschaftlicher Ansatz davon bis heute dominiert ist. Ich lernte zum anderen Teamarbeit, und zwar in beiden Richtungen: als junger Diplomand im täglichen Gespräch von den Erfahreneren lernend, und als Doktorand ein halbes Jahr vor dem Abschluss einer ohnehin nur 1.5 Jahre dauernden Arbeit selbst 4 jüngere Doktoranden betreuend. Nur mit solchen Substrukturen konnte das System von Maier-Leibnitz



erfolgreich überleben. Mühen zur radikalen Verbesserung der Lage waren denn auch erfolgreich: 1963 wurde auf Betreiben von ML und einiger Kollegen, unterstützt vom Schüler und frisch gebackenen Nobelpreisträger (1961) R. Mössbauer, den man unbedingt nach Deutschland zurückhaben wollte, eine Department-Struktur genehmigt. Das Department nahm seine Arbeit 1965 auf, noch bevor ich München verliess. Es gab eine Zunahme der Lehrstühle von 9 auf 16 und insgesamt 240 Planstellen.



**Abbildung 1.** Vertragsunterzeichnung FRM 1956.

Dann folgte eine Post-Doc Zeit in den Chalk River Nuclear Laboratories in Kanada 1965-1968 auf Einladung von J.C.D. Milton und J.S. Fraser auf der Basis eines NRC Fellowships, hinter der vermutlich ML steckte. Bereits wegberufene Größen wie A. Bromley and T. Litherland kamen häufig zu Besuch. Weitere Post-Docs waren D. Pelte und O. Häusser, letzterer ein hochbegabter Cellist, mit dem ich viel musizierte (auch öffentlich, aber nur dort, fern aller Kultur). Ein persönlicher Höhepunkt war auch ein 1-wöchiger Besuch von H. Maier-Leibnitz zu dieser Zeit. Bei der täglichen Arbeit und den häufigen Strahlzeiten an den EN bzw. MP Tandem Beschleunigern war ich weitgehend auf mich selbst gestellt. Die Universitäten lagen zu weit entfernt, um mit Studenten beizutragen, und meine menschlich wunderbaren Senior Bosse hatten ihre eigenen Regeln, abgesehen von ihrer Überlastung

mit Pionierarbeiten für die erste Spallations-Neutronen-Quelle weltweit, das kanadische ING Projekt, das dann aber leider nie genehmigt wurde.

In jedem Fall – drei tiefe Winter in Kanada reichten. Unter Ignorierung aller Mühen meiner Gastgeber, mich zu halten, endete ich 1969 erneut in München, diesmal an der LMU mit ihren grossen Entwicklungschancen in der frisch gegründeten Sektion Physik im Bereich von S. Skorka. Dieser ermöglichte mir dann mit seinen Kollegen J. de Boer, U. Meyer-Berkhout und C. Zupancic 1970 die Habilitation auf der Basis der kanadischen Forschungsarbeiten, gefolgt 1971 von einer Dauerstelle als HS2/3-Professor. Meine erkennbare Mit-wirkung am Aufbau des gemeinsamen Münchner Beschleuniger-Laboratoriums erneuerte alte Bande zur TUM, ganz besonders zu P. Kienle und E. Konecny, so dass ich mich in beiden (sichtbar konkurrierenden) Lagern der LMU und der TUM wie zu Hause fühlte, mit ungeahnten Vorteilen. Weitere Forschungserfolge machten mich dann rasch bekannt, auch in Heidelberg, das ich erstmals im Leben durch eine Einladung zum Kolloquium im SS 1972 kennenlernte.

Als nächstes folgte ein Gastsemester 1972/73 in Heidelberg mit der Aufgabe, die in der Tradition von O. Haxel stehende große Anfängervorlesung für Physik zu halten. Herr zu Putlitz, den ich kaum kannte, lud mich seinerzeit in einem ganz und gar unvergesslichen Telefongespräch dazu ein. Nur wenig später, 1973, folgten gleich mehrere Rufe, und natürlich nahm ich den Ruf an das (damals II.) Physikalische Institut als Nachfolger von O. Haxel in Heidelberg an, nicht ganz ohne wehmütige Erinnerungen an das geliebte bayrische Umfeld. Dennoch freute ich mich sehr. Die spätere Vereinigung der beiden Institute zu einer Department-ähnlichen Struktur mit Kollegen wie J. Heintze, G. zu Putlitz und V. Soergel schuf eine ganz einzigartige Atmosphäre von harmonischer Kommunikation und Zusammenarbeit, die auch den Privatbereich einschloss. Hinzu kam die völlig freie Wahl der Forschungsschwerpunkte und mein Vergnügen daran, Vorlesungen zu halten: durchaus mit Lücken, aber 5 von den 6 experi-

mentellen Pflichtvorlesungen im Wechsel (was immer wieder mit ausgezeichneten Diplomanden belohnt wurde). So habe ich Heidelberg voller Überzeugung auch bis heute die Treue gehalten, trotz einiger Abwerbungsversuche: 1983 ein offizieller Ruf nach Mainz mit der Verantwortung für den Aufbau von MAMI, den ich ablehnte, wenige Jahre später halb-offizielle Vorgespräche zu einem Ruf nach Columbia, die ich nach einem dortigen Besuch mit Kolloquium rechtzeitig abbrach, um meine Gesprächspartner T.D. Lee und B. Willis am Ende nicht über Gebühr zu enttäuschen. Davon unberührt sind wiederholte, insgesamt 3 Sabbaticals beim CERN von 1983 bis 2003, sowie eine 7-jährige Beurlaubung für meine Aufgabe als Wissenschaftlich-Technischer Direktor der GSI Darmstadt von 1992-1999.

### **Forschung am FRM und an Beschleunigern 1961-1983**

Meine wissenschaftlichen Interessen bis etwa 1983 lassen sich in 3 Teilgebiete mit der gemeinsamen Klammer "Niedrige Energien" im Vergleich zur Hochenergiephysik zusammenfassen: Atomphysik im Bereich innerer Elektronenschalen (auch Inhalt meiner Dissertation) –, Kernphysik mit dem Hauptthema Kernspaltung über den gesamten Zeitraum –, und Schwerionenreaktionen nach Verfügbarkeit der ersten Uran-Strahlen 1976 am UNILAC der GSI.

### **Atomphysik**

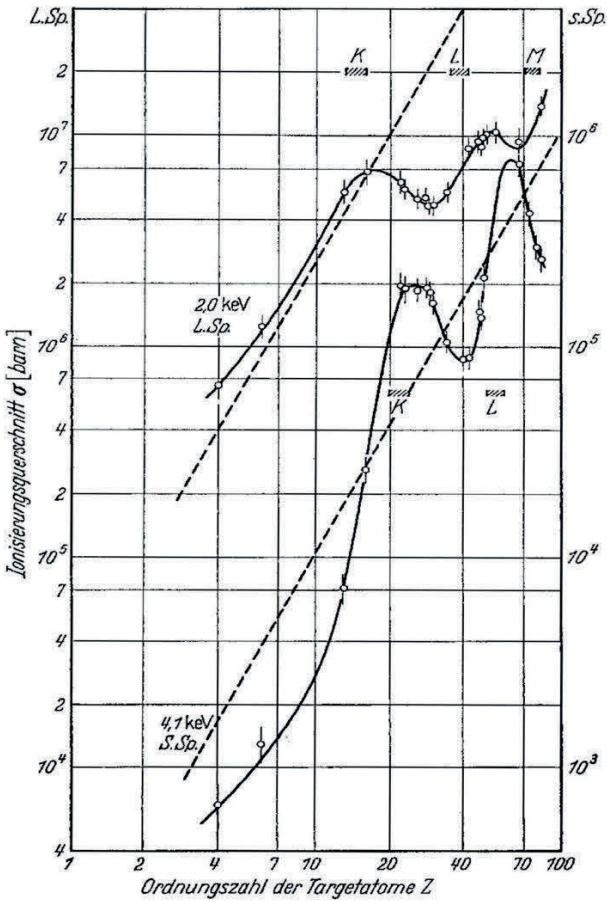
Das erste Teilgebiet, die Atomphysik, wurde eher zufällig am FRM eröffnet. In München war P. Armbruster mein Betreuer seit meiner Diplomarbeit. Ich war wohl der erste, für den er noch vor seiner Promotion die Verantwortung trug. Unsere von wissenschaftlicher Achtung und menschlicher Wärme geprägte Beziehung, bis heute andauernd und fast einzigartig in meinem Berufsleben, entwickelte sich bereits in den ersten Monaten. Er hatte am Reaktor einen gasgefüllten Massenseparator mit zwei beim CERN PS 1959 übrig gebliebenen Magneten gebaut. In diesem wurden Spaltfragmente, erzeugt durch neutroneninduzierte Spaltung in einem  $^{235}\text{U}$  Target in der Nähe des Reaktorkerns und durch ein evakuiertes Rohr nach

aussen geführt, mit einer Massenauflösung von ca. 4% separiert und standen dann für Experimente zur Verfügung. Es war der Welt erster "Beschleuniger" für wirklich "Schwere Ionen" (nach einem Vormodell in Oak Ridge), mit Beschleunigung durch die Coulomb-abstossung der beiden Spaltfragmente auf Energien von 1.0 bzw. 0.5 MeV/u für die Massenschwerpunkte  $\langle A \rangle$  von 100 bzw. 140 der beiden Gruppen der asymmetrischen Massenverteilung. Die Kehrseite waren Intensitäten von nur 300/s, um Zehnerpotenzen zu gering für Kernreaktionen, aber ausreichend für atomare Reaktionen. Das Forschungsprogramm war daher fast ausschliesslich auf Kernspektroskopie der auf einer dünnen Folie gestoppten hochaktiven Spaltfragmente ausgerichtet, was mehrere Dissertationen füllte.

Meine eigene Rolle in der Zeit der Diplomarbeit war die Entwicklung extrem dünner Fensterfolien für den Separator sowie die Entwicklung und der Bau von Methan-gefüllten Transmissions-Proportionalzählern mit mehreren Drähten, die sowohl für  $\beta$ -Strahlung in Koinzidenz mit Plastik-Szintillationszählern wie für durchlaufende Spaltfragmente benutzt wurden, im letzteren Fall bis zu Drucken von nur 0.3 Torr (eine meiner ersten Publikationen). Diese kamen auch anderen Doktoranden zugute. Insgesamt gab es in der Münchner Zeit 7 Publikationen mit meiner Beteiligung, dabei zu meiner Freude auch ein Beitrag zur ersten IAEA Konferenz über "Physics und Chemistry of Fission" in Salzburg 1965 mit den Autoren H. Maier-Leibnitz, P. Armbruster und HJS. Die frühe Berührung mit der Entwicklung von Detektoren prägte mein gesamtes späteres Berufsleben als Experimentalphysiker.

Meine Dissertation fusste auf der Spektroskopie von charakteristischer Röntgenstrahlung, die bei atomaren Stössen schwerer Ionen nach Ionisation innerer Elektronenschalen emittiert wird. P. Armbruster hatte dazu erste Resultate in seiner Dissertation beschrieben, die auf rätselhaft hohe Wirkungsquerschnitte hinwiesen. Meine Aufgabe bestand darin, dies systematisch anzu-gehen. Mit einem selbstgebauten 1/2 m grossen, mit Ar/Methan

betriebenen Zählrohr wurden dazu Röntgen-spektren bei Stößen der leichten und schweren Spaltfragment-gruppen ( $\langle Z \rangle$  von 38 bzw. 54) auf ca 20 Targets von Be bis Pb ( $Z = 4-82$ ) gemessen und daraus die Ionisationsquerschnitte von K-, L- und M-Schalen getrennt für die beiden Stosspartner bestimmt. Dabei ergab sich etwas völlig Unerwartetes: eine enorme Erhöhung der Wirkungsquerschnitte immer dann, wenn die Bindungsenergien der Elektronen in irgendwelchen inneren Schalen wie L/K, L/L oder L/M übereinstimmten, d.h. bei Energie-Entartung der zugehörigen Zustände. Bis zum Zeitpunkt der Doktorprüfung 1964 (P. Armbruster hatte derweil einen Ruf nach Jülich angenommen), trotz vieler Diskussionen auch mit Theoretikern, blieb der Befund ein grosses Rätsel, und die Diskussionen darüber machten deshalb auch den grössten Teil der Prüfungszeit aus. Erst Monate später, während der Niederschrift für die Veröffentlichung und durch sorgfältiges Studium des berühmten Lehrbuchs von G. Herzberg in Ottawa über Molekülphysik, kam die Erleuchtung. Die Stösse waren quasi-adiabatisch, d.h. die Kernbewegung langsam im Vergleich zur Geschwindigkeit der Elektronen in den inneren Schalen. Dies erlaubte, die Stosspartner wie quasi-statische Moleküle anzusehen, mit den entsprechenden Molekülzuständen nach Lehrbuch bis zum Grenzfall der Atomzustände des vereinigten "Quasi-Atoms"  $Z_1+Z_2$ . Die Maxima der Ionisationsquerschnitte erklären sich dann dabei durch Lochtransfer an den Kreuzungstellen der entsprechenden Zustände. Diese Deutung mit Korrelationsdiagrammen und MO Schemata findet sich nur in der publizierten Fassung meiner Dissertation, eingegangen 2 Monate vor der analogen, wenn auch sehr viel tiefer schürfenden theoretischen Arbeit von Fano und Lichten in PRL 1965 (angeregt durch Daten für leichte Ionen wie Ar-Ar im Energiebereich von keV/u ohne Z-Abhängigkeiten).



**Abbildung 2.** Ionisation der L-Schale leichter (L.Sp.  $\langle Z \rangle = 38$ ) und schwerer (S.Sp.  $\langle Z \rangle = 54$ ) Spaltfragmente vs.  $Z$  der Targetatome. Gestrichelt: Bornsche Näherung [Z. Physik 185 (1965) 301].

Leider wünschte sich ML als Ko-Editor eine Publikation in Zeitschrift für Physik in deutscher Sprache. Dadurch wurde meine Arbeit erst Anfang 1970 in einem PRL von R. Brand et al. entdeckt und erstmalig zitiert, wohl weil die westliche Welt deutsche

Journale längst ignorierte. Heute gilt die Arbeit als Entdeckung des "Level-Matching Effekts". Damals war ich sehr betroffen, trotz einer gewissen Kompensation in den Jahren danach (die auch die korrekte Interpretation einschloss), und ich beschloss, nie wieder in Deutsch zu publizieren. J. Heintze kommentierte im Video-Mitschnitt seines Emeritus Vortrags 1992 die gleiche, bereits in 1957 gemachte Erfahrung mit seinen frischen Daten zur Paritätsverletzung (mit Jensen als Editor) mit den Worten "damals war die Zeitschrift für Physik auch noch ein Begräbnis erster Klasse".

Erst Anfang der 70iger Jahre entwickelte sich an vielen Beschleunigern eine grosse Aktivität auf diesem Gebiet: z.B. mit P. Armbrusters Gruppe am Kölner Tandem und ab 1976 am UNILAC der GSI, einige Jahre später dann mit R. Schuch zusammen auch bei mir in Heidelberg, mit Publikationen von 1976-1984. Hier gab es neben vielen Studenten auch auswärtige Mitarbeiter, insbesondere H. Schmidt-Böcking aus Frankfurt und zeitweilig I. Tserruya vom Weizmann Institut in Rehovot. Die Messungen fanden am MP Tandem Beschleuniger des MPIK in Heidelberg statt. Im Mittelpunkt standen Stossparameterabhängigkeiten, die von ortsempfindlichen Parallelplatten-Gasdetektoren profitierten, und Messungen auch der molekularen Röntgenstrahlung, die bereits während des Stosses bei dichter Annäherung der beiden Stosspartner im quasi-atomaren Zustand emittiert wird.

Der potentiell interessanteste Aspekt, die Formierung von Quasiatomen mit Ordnungszahlen von 184 (U+U) und der zugehörige Nachweis des vorhergesagten "Zusammenbruchs des neutralen Vakuums" mit der Emission von Positronen in den hier vorliegenden "überkritischen" elektrischen Feldern (W. Greiner et al.) wurde über viele Jahre hinweg unabhängig von Gruppen um E. Kankeleit, P. Kienle und D. Schwalm bei GSI verfolgt, scheiterte aber bis heute an den zu kurzen Stoss-Zeiten und dadurch zu grossen Breiten. Seit 10 Jahren gibt es eine Renaissance des Gebiets in Form der "MIMS" (Metastable Inner-shell Molecular States), d.h. der gleichen Objekte wie bisher, die sich durch Emission auch molekularer Röntgenstrahlung bemerkbar machen, aber erzeugt

bei extremer Kompression wie in Planeten Cores oder im Stern-Inneren.

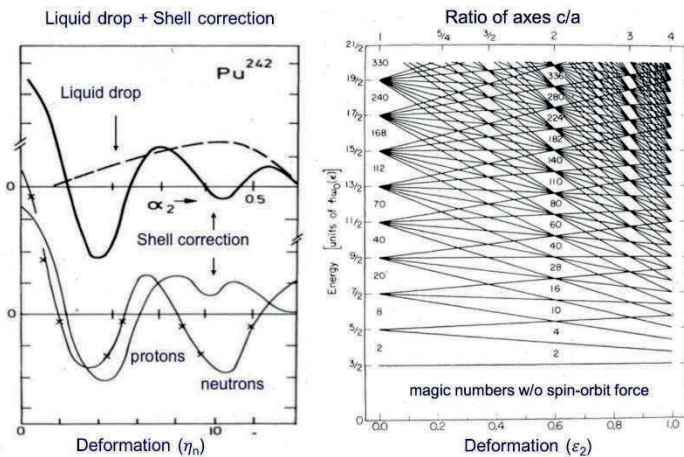
### **Kernspaltung**

Das zweite Teilgebiet handelt über Kernphysik, speziell die Physik der Spaltung von Atomkernen. Entdeckt 1938, stellte sich die Kernspaltung im Lichte der Kernstruktur-Erkenntnisse der fünfziger und sechziger Jahre als höchst komplizierter Prozeß heraus. Mit meinen Publikationen auf diesem Gebiet bis 1965 galt ich für meine Gastgeber D. Milton und J. Fraser in Kanada (ab 1965) als dafür ausgewiesen; die Atomphysik interessierte sie weniger. Sie selbst galten nach ihren Arbeiten zur Kernspaltung am dortigen Reaktor weltweit als eine der Spitzengruppen, hielten aber die Zeit für reif, nun modernere Werkzeuge wie den Chalk River EN Tandem Beschleuniger zu nutzen. Von A. Bromley et al. über HVEC initiiert und seit 1959 als #1 in Betrieb, hatte er inzwischen die internationale Kernphysik erobert, mit #7 auch das MPI für Kernphysik in Heidelberg (seit 1962). So fiel mir als Neuling die Rolle als treibende Kraft zu, die damit möglichen Präzisionsmessungen auch auf Probleme der Kernspaltung anzuwenden, was 1965 in der Luft lag.

Nach ersten Experimenten zur (d,pf) Reaktion an den Targetkernen  $^{235}\text{U}$  und  $^{239}\text{Pu}$  auf der zeitgemässen Basis von Si-Detektoren für die Protonen und Spaltfragmente kam uns über Nacht ein entscheidender theoretischer Hinweis zugute. V. Strutinski in Kiew arbeitete seit Jahren an einem generalisierten Schalenmodell für Atomkerne in Kombination mit dem Tröpfchenmodell. Danach führen die Schalenkorrekturen zu einem 2. Minimum in der Potentialbarriere gegenüber Kernspaltung bei einem Achsenverhältnis des elongierten Kerns von exakt 2:1. Das Minimum (hier allein vom Neutronenanteil) entspricht besonders starker Bindung, die im Schalenmodell bei Kugelgestalt mit den berühmten "magischen" Nukleonenzahlen verbunden ist (1949 von M. Göppert-Mayer und H. Jensen in Heidelberg gedeutet). Wie im rechten Teil von Abb.3 (ohne Spin-Bahn Kopplung) gezeigt,



müssen die Nukleonenzahlen für die Lücken im Niveauschema bei Kugelgestalt durch ganz andere magische Zahlen ersetzt werden, wenn die Kerngestalt 2:1 beträgt, und noch wieder andere bei 3:1, wobei sich die zugehörigen Kerne in allen Fällen durch jeweils besondere Stabilität auszeichnen. Die rätselhaften "spontan spaltenden Isomere", 1962 von S. Polikanov in Dubna entdeckt, fanden damit erstmalig eine mögliche Erklärung für ihre kurzen Halbwertszeiten im Bereich von nur  $10^{-9}$ - $10^{-3}$ s: als Kerne im Grundzustand des 2. Minimums, verglichen mit Halbwertszeiten von  $10^4$ - $10^9$  Jahren für Spontanspaltung aus dem Grundzustand des 1. Minimums. Die "magische" Neutronenzahl für die 2:1 Deformation in diesem Bereich wurde später mit 146 bestimmt.



**Abbildung 3.** Beiträge von Tröpfchenmodell und Schalenkorrekturen zur Spaltbarriere (Strutinsky 1966, links). Generalisierte Schalenstruktur in einem harmonischen Oszillator Potential (rechts).

Kernspektroskopie im 2. Minimum mit hoher Auflösung war also das Gebot der Stunde, was mich von da an bis in die 70iger (neben anderem) beschäftigen sollte. Si-Detektoren waren wegen ihrer

mangelnden Energieauflösung und kleinen Flächen ausgeschlossen. Das Labor hatte jedoch einen hochauflösenden Brown-Buechner Magnetspektrographen (so wie die Mehrheit aller Tandem Labors, HD eingeschlossen), aber alle nutzten nur Photoplatten in der Fokalebene. Hier war nun meine Münchner Erziehung gefordert.

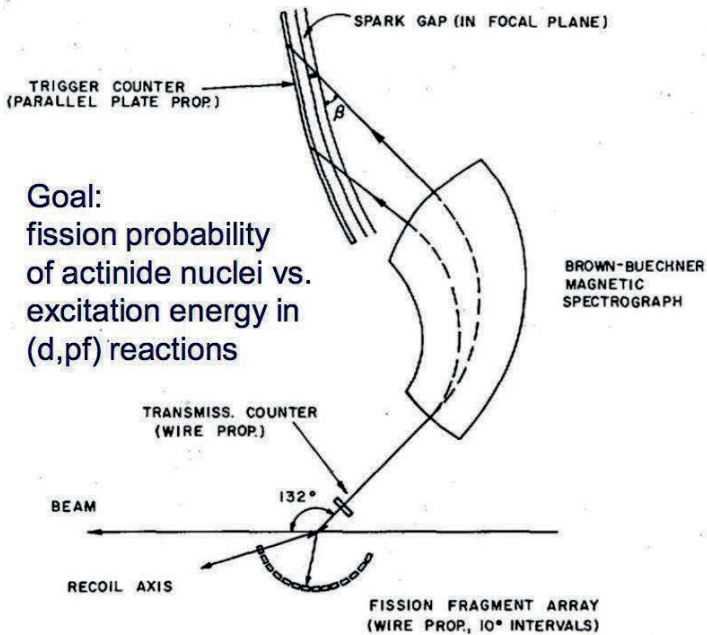


Abbildung 4. Versuchsaufbau am EN Tandem in Chalk River.

Der endgültige Aufbau bestand ausschliesslich aus Gasetektoren und wurde praktisch im Alleingang entwickelt. Die Spaltreaktion war auch hier  $^{239}\text{Pu}(d,pf)$ . Der Magnetspektrograph fokussierte die Protonen entlang der Fokalebene. Die Ortsbestimmung erfolgte in einer ca. 1m langen, wegen der Form der Fokalebene hyperbolisch

gekrümmten Draht-Funkenkammer über magnetostriktive Auslesung. Ein Aufenthalt von einer Woche in der Hochenergiephysik am BNL reichte hier für die notwendigen Lernprozesse. Die Kammer wurde von einem dahinter angeordneten schnellen Parallelplatten-Proportionalzähler getriggert, in Koinzidenz mit einem Transmissions-Proportionalzählrohr am Eingang des Spektrographen für Teilchen-Identifikation durch Flugzeit. Die Spaltfragmente wurden in einer zylindrischen "Vieldraht-Kammer" mit 14 Einzelzellen um das Target herum für die Bestimmung der Spins angeregter Zustände aus der Winkelverteilung nachgewiesen. Der Ersatz der Photoplaten blieb für viele Jahre singulär in der Kernphysik, auch am MPIK in Heidelberg. Die spektrale Energieauflösung war 7 keV rms.

Eine bemerkenswerte Anekdote: Die Drähte der Spaltfragment-Kammer waren wie schon in München lehrbuchmässig durch dünne leitende Zwischenwände für definierte Potentialverhältnisse getrennt, was bei den filigranen Dimensionen durchaus Mühe bereitete. Was mir nie bewusst wurde und was ich als grösste Dummheit meines Berufslebens ansehen muss: nur wenig später, 1968, liess G. Charpak die Wände in solchen Detektoren ohne grosse Nachteile weg und öffnete so den Weg zu grossen Drahtzahlen und grossen Drahtebenen, eine wirkliche Revolution in der Hochenergiephysik, die ihm 1992 den Nobelpreis einbrachte. Lakonischer Kommentar von H. Maier-Leibnitz zu diesem Zeitpunkt: "Darauf hätten wir auch kommen können."

Der wissenschaftliche Ertrag des Aufbaus lohnte jedoch den Aufwand: auf der IAEA Conference 1969 in Wien wimmelte es von Berichten über (d,pf) Reaktionen an verschiedenen Kernen, alle an Tandems, aber alle mit Si-Detektoren. Es gab Übereinstimmung über die Beobachtung von "Transmissions-Resonanzen", d.h. Vibrationszuständen, die in der Elongation direkt an den Spaltfreiheitsgrad koppeln. Der Wert unserer Messung bestand in der vollständigen Auflösung aller lokalen Zustände, die an diese Vibrationszustände koppeln, und der Bestimmung ihrer Spins. Dies

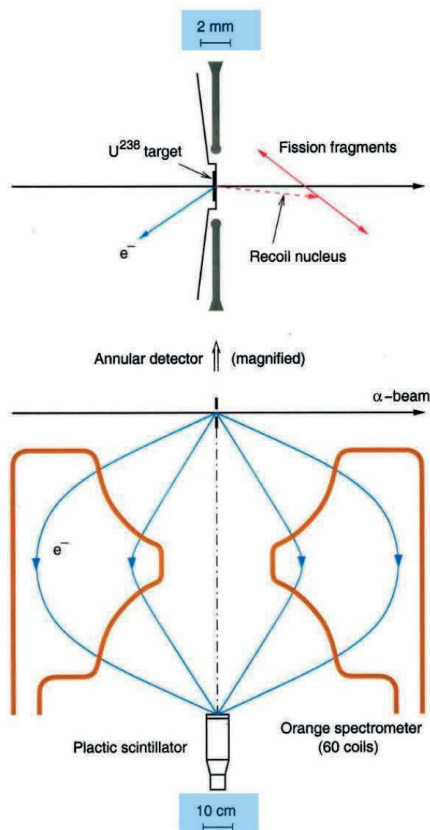
erlaubte Schlussfolgerungen, dass es sich um höchstens 2-3 MeV Anregungsenergien handeln konnte (und nicht 5-6 MeV wie im 1. Minimum), aber direkte Beweiskraft für die Existenz des 2. Minimums war das kaum, geschweige ein Hinweis auf die Grösse der Deformation.

Ab Anfang 1969 war ich zurück in München. Die Kollegen in der Sektion Physik der LMU empfanden die Ergebnisse in Kanada und die zugehörigen Detektor-Entwicklungen, eingebettet in einer Darstellung des Gesamtgebiets von 100 Seiten (nie publiziert), als ausreichend, mir damit 1970 die Habilitation zu ermöglichen. So konnte ich sehr schnell auch eigene Studenten haben und damit am neuen MP Tandem des LMU/TUM Beschleunigerlabors mehrere Fragestellungen parallel verfolgen, zum Teil in Zusammenarbeit mit E. Konecny von der TMU.

Die Themenkreise umfassten eine erheblich verbesserte Untersuchung der  $^{239}\text{Pu}(d,pf)$  Reaktion unter Nutzung des neuen Münchner Q3D Magnetspektrographen mit einer dazu gebauten 2 m langen Charpak-Kammer (Doktorarbeit P. Glässel und Diplomarbeit R. Männer, die mir später auch nach Heidelberg folgten) – , Messungen zu den dreihöckrigen Spaltfragment-Massenverteilungen im Nuklidbereich von Radium und Aktinium mit Bezug auf eine mögliche Oktupol-Deformation an der 2. Spaltbarriere (Doktorarbeit J. Weber, bis heute ein Unikat), und – ein ganz besonderer Glücksfall – die erste Messung einer Grundzustands-Rotationsbande im 2. Minimum eines Spaltisomers [PLB 41 (1972) 43, Doktorarbeit D. Heunemann]. Ich beschränke mich hier auf das letztere.

Die Grundidee war sehr einfach. Eine Kernreaktion im hier diskutierten Nuklidbereich um  $Z/N$  von 94/146 herum führt entweder zur prompten Spaltung des angeregten Compoundkerns oder zur Emission von EM Strahlung im Bereich des 1. Minimums. Mit einer Wahrscheinlichkeit von  $< 10^{-4}$  wird dabei aber auch das 2. Minimum bevölkert, in dem die Strahlung zeitlich korreliert vor der verzögerten isomeren Spaltung emittiert wird. In deformierten gg-Kernen erfolgt die Abregung am Ende über E2 Übergänge in

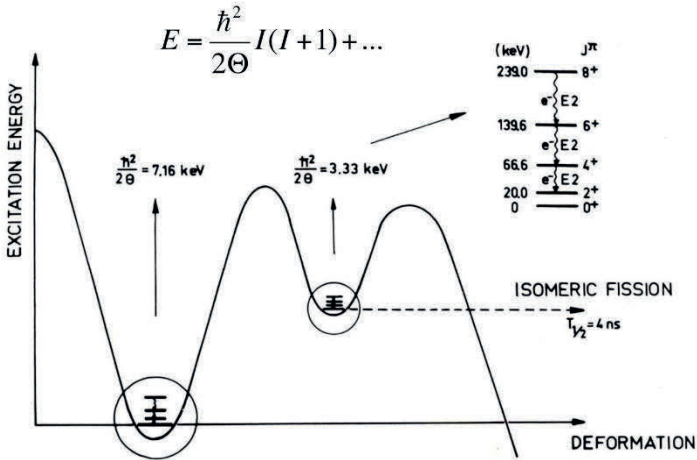
den Grundzustands-Rotationsbanden mit der Spin Sequenz  $0^+$ ,  $2^+$ ,  $4^+$ ,  $6^+$ ... Die Trägheitsmomente, die diese Banden im 1. und im 2. Minimum beschreiben, sind eine direkte Signatur für die unterschiedliche Deformation. Da die Übergangsenergien sehr niedrig sind, sind alle Übergänge voll konvertiert. Es müssen also anstatt Photonen Konversionselektronen gemessen werden.



**Abbildung 5.** Ringförmiger Si Detektor mit Target im zentralen Loch; Messung der Konversionselektronen im Orangen  $\beta$ -Spektrometer.

Die Idee hatte ich bereits 1970. Nach einem erfolglosen Vorversuch am FRM mit dem 100 ns Spaltisomer  $^{236}\text{U}$  kam der Durchbruch für solch ein Experiment 1971 am Tandem. Hier wurde mit der Reaktion  $^{238}\text{U}(\alpha,2n)$  das Spaltisomer  $^{240}\text{Pu}$  erzeugt, mit nur 4 ns Halbwertszeit ein idealer Kandidat. Das Target befindet sich im Loch eines kleinen Si Ring-Detektors. Die erzeugten Isomere zerfallen durch den Rückstoss im Flug vor dem Detektor innerhalb weniger mm durch verzögerte Spaltung. Auf diese Weise werden nur Spaltfragmente aus isomerer Spaltung detektiert, aber nicht die um einen Faktor  $> 10^4$  häufigeren Fragmente aus prompter Spaltung. Das Impulsspektrum der Elektronen wird in verzögerter Koinzidenz in einem eisenfreien  $\beta$ -Spektrometer gemessen, das in der frühen Maier-Leibnitz Zeit von E. Moll und E. Kankleit entwickelt wurde. Die nicht ausreichend bekannte Rotationsbande im 1. Minimum wurde dabei zum Vergleich ebenfalls gemessen. Ein grosses Kompliment verdient hier das Münchner Beschleuniger-Kollegium, das uns nach einem unvergesslichen öffentlichen Vortrag von mir nach ersten Messpunkten, in Anerkennung der Bedeutung, ein mehrfach höheres Strahlzeitkontingent gewährte als uns für 1971 zustand.

Das Endergebnis in Abb. 6 zeigt in der Tat einen grossen Unterschied in den Rotationsparametern der beiden Banden, der erste experimentelle Beweis für die Existenz von Formisomerie in Atomkernen. Im Rahmen der Genauigkeit der theoretischen Beschreibung dieser Parameter ist der Unterschied konsistent mit einer 2:1 Deformation im 2. Minimum. Die damit bewiesene Generalisierung des Schalenmodells mit den Symmetrien der 2:1, 3:1... Deformation gilt daher bis heute als die wichtigste Neuerung des Modells seit der Einführung der Spin-Bahn Kopplung, und so sehen viele Kollegen den ersten experimentellen Beweis dafür auch als die vielleicht wichtigste Arbeit in meinem Leben.

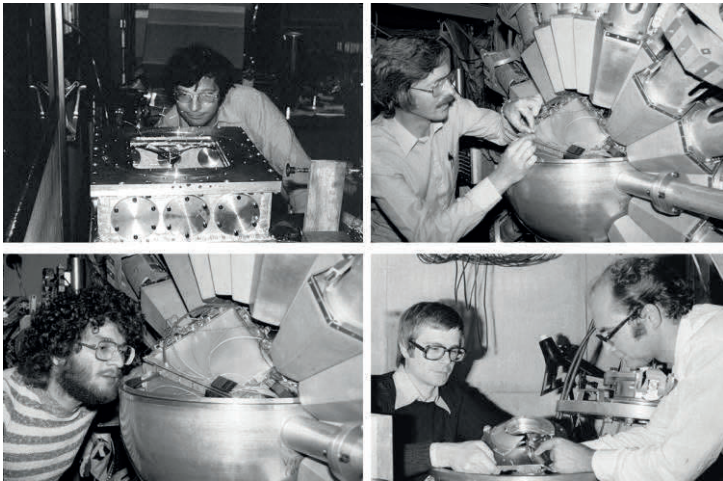


**Abbildung 6.** Rotationsbanden im ersten und zweiten Minimum.

Die öffentliche Resonanz auf diese Ergebnisse im Jahr 1972 lag weit jenseits dessen, was ich bis dahin erlebt hatte. Ein Experiment dieser Art galt im Vorfeld weitgehend als undurchführbar. Die Neugier war gross. Ich wurde zu vielen Vorträgen eingeladen, darunter nach Kopenhagen mit A. Bohr und B. Mottelson, und erstmals auch nach Dubna, wo ich G.N. Flerov, Y.T. Oganessian, aber insbesondere auch S. Polikanov kennenlernte, der hier besonders betroffen war. Mit allen gab es über die Jahre hinweg etliche weitere Treffen, aber nicht nur mit guten Erinnerungen daran angesichts der späteren erzwungenen Emigration von Polikanov (mit schliesslich gutem Ende im Raum GSI/Heidelberg). Besonders erwähnenswert ist natürlich das Heidelberger Kolloquium im SS 1972, was sicher zu meinem ziemlich rasch folgenden Ruf beitrug.

Nach der Annahme des Rufs zum WS1973/74 hatte ich einen fliegenden Start in Heidelberg. V. Metag am MPI war sehr glücklich über die Idee, nach seinen Messungen zur Lebensdauer-Systematik von Spaltisomeren in Kopenhagen nun mit mir zusammen zu

arbeiten. D. Habs, kurz vor seiner Promotion im Haxelschen Institut, was so begeistert, dass er bereits vor meinem Wechsel an mehreren Strahlzeiten in München teilnahm. P. Brix, frisch ernannter Direktor am MPIK, tat alles, mir mit einem Raumangebot für meine künftige Gruppe die Nutzung des MP Tandems und die Zusammenarbeit mit den dortigen Kollegen so leicht wie möglich zu machen. H.C. Pauli nahm nach seinen theoretischen Arbeiten zum Schalenmodell ebenfalls ein Angebot des MPIK an.



**Abbildung 7.** D. von Harrach, P. Glässel, J. Schukraft, V. Metag und D. Habs in den 1970igern.

Die folgenden Jahre entsprachen voll den Erwartungen. Im Zeitraum von 1973-1983 hatte ich insgesamt 4 Arbeitsgruppen für verschiedene Teilgebiete. Die erste, mit D. Habs und V. Metag, verfolgte ein sehr umfangreiches Programm am MPIK Tandem zu Spaltisomeren, zu Transmissions-Resonanzen unterhalb der Spaltbarrieren und später am UNILAC der GSI zur Coulombspaltung. Die zweite, mit P. Glässel und D. von Harrach, befasste sich



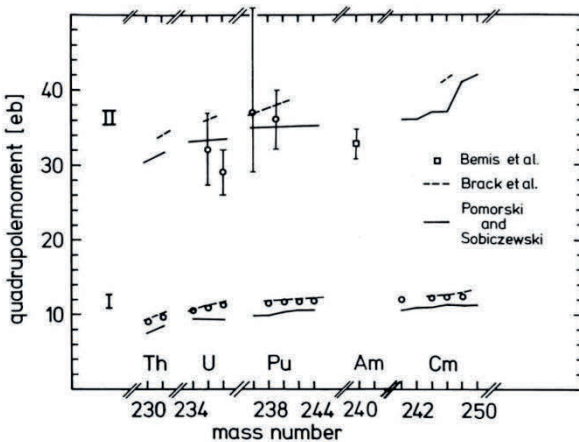
zunächst mit der Entwicklung und dem Bau von grossen ortsempfindlichen Parallelplatten Detektoren für ein späteres Gross-experiment am UNILAC (s. "Schwerionenreaktionen"). Die dritte, R. Männer et al, war auf Hardware Informatik spezialisiert und baute u.a. das Multi-Prozessor-System Polyp für den UNILAC und ein Systolic Array mit 28000 Prozessoren als Triggerprozessor für unser späteres CERES Experiment am CERN. Die vierte, R. Schuch et al., habe ich bereits im Forschungskapitel zur Atomphysik angesprochen. Alle 6 Gruppenleiter habilitierten sich in den Jahren 1974 bis 1986 an unserer Fakultät und blieben danach der Forschung treu.

Über die Jahre hinweg gab es auch etliche Gäste, z.T. als Humboldt-Awardees, in allen Fällen für ein volles Jahr und gelegentlich auch mit noch weiteren Besuchen danach: C.O. Wene, Lund Univ., J. Wilhelmy, Los Alamos, P. Paul, Stony Brook Univ., J. Pedersen, NBI Copenhagen, S. Kapoor, BARC Bombay, und schliesslich L. Grodzins, MIT Boston.

An den Arbeiten der beiden ersten Gruppen nahm ich kontinuierlich teil, weniger an der Atomphysik mit ihrem starken Anteil von aussen. Die Hardware Informatik war wichtig, aber ausserhalb meines Erfahrungs- Bereichs. Die Arbeitsatmosphäre war sehr persönlich und konstruktiv, und so schaue ich heute mit Befriedigung und Dankbarkeit auf diese Jahre zurück, die ein Geben und Nehmen in beiden Richtungen waren, auch mit den vielen Diplomanden und Doktoranden zu dieser Zeit.

Besondere Beachtung fanden die Arbeiten der Gruppe Habs/Metag zu den spektroskopischen Eigenschaften von Spaltisomeren, die erheblich über die Münchener Ergebnisse hinausgingen. Sie umfassten schliesslich die Kombination von Spin- und Spaltisomerie im gleichen Kern, Spins und magnetische Momente in ungeraden Kernen, Rotationsbanden mit Bestimmungen des Trägheitsmoments in Kernen über  $^{240}\text{Pu}$  hinaus, und sogar die Messungen von Lebensdauern der Rotationszustände mit der Bestimmung der Quadrupol-Momente. Letztere beruhten auf der "Charge Plunger Technique" (CPT), deren Grundidee D. Habs zu

verdanken ist. Die aufeinanderfolgenden hoch-konvertierten Übergänge in den Rotationsbanden führen als Folge der Füllung der vielen Leerstellen in den inneren Elektronenschalen zu Kaskaden von Augerelektronen und so zu sehr hohen Ladungszuständen der Atome, bis zu mehr als  $40^+$ . Diese Zustände können durch eine dünne Folie im Weg der Rückstoss-Spaltisomere durch Einfang von Elektronen auf die Gleichgewichtsladung zurückgesetzt werden, falls die Übergänge bereits vor Erreichen der Folie erfolgt sind. Die Messung dieses Anteils als Funktion des Target-Folien Abstands ist ein Mass für die mittlere Lebensdauer der Rotationsübergänge, hier im Zeitbereich von 0.1-1 ns.



**Abbildung 8.** Quadrupolmomente von Spaltisomeren und Grundzuständen in den Aktiniden im Vergleich zur Theorie [Phys. Reports 65 (1980) 1].

Die Messung der Ladungsverteilung erfolgt durch Ablenkung der Rückstosskerne in einem Magnetfeld in Richtung eines Makrofol Detektors, in dem die Atome gestoppt werden und die verzögerte Spaltung Spuren erzeugt. Die Quadrupolmomente der Spaltisomere (Abb. 8) liegen um einen Faktor 3 über denen der

Grundzustände. Der hier fast Modell-unabhängige Zusammenhang mit dem Achsenverhältnis der Spaltisomere ergibt als Mittelwert über die Isomere einen Wert von  $2.0 \pm 0.1$ , verglichen mit ca. 1.3 für die Grundzustände.

Die Entdeckung der Coulombspaltung ist ein weiteres bemerkenswertes Resultat der Gruppe. Dieser Prozess ist analog zu der schon über viele Jahre hinweg zuvor benutzten Coulomb-Anregung in der Kernstrukturphysik, benötigt aber wegen der ca. 6 MeV hohen Spaltbarrieren in den Aktiniden schwere Projektilen mit hohem  $Z$ , die erst am UNILAC der GSI Darmstadt ab 1976 zur Verfügung standen. Aus theoretischer Sicht ist der Prozess deshalb besonders interessant, weil die Coulomb-Wechselwirkung direkt die "doorway" Zustände anregt, die zur Spaltung führen, und wurde deshalb von der Franfurter Schule W. Greiner et al. über viele Jahre hinweg intensiv propagiert. In einem ersten Versuch mit Si Detektoren (Diplomarbeit J. Schukraft) konnte ein nuklearer Beitrag wie Transfer von Nukleonen nicht ausgeschlossen werden. Dies gelang mit der Reaktion  $^{238}\text{U} + ^{184}\text{W}$  durch saubere Erkennung der intakten rückgestreuten Projektilen  $^{184}\text{W}$  mittels Identifikation ihres niedrigsten angeregten  $2^+$  Zustands über die Messung der Zerfalls- (Konversions-) Elektronen. Die Anregungsfunktion entspricht in Form und Grösse über eine Grössenordnung hinweg den theoretischen Erwartungen.

### Schwerionenreaktionen

Die Inbetriebnahme des Schwerionenbeschleunigers UNILAC bei der Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) in Darmstadt Mitte der siebziger Jahre führte mich zu einem dritten Teilgebiet: die Physik der Wechselwirkung schwerer Atomkerne bei Energien oberhalb der Coulombbarriere. Das erste Experiment zu  $\text{U} + \text{U}$  (1976) wurde von einer kleinen GSI Gruppe unter Leitung von R. Bock mit einem einfachen Aufbau von Si-Detektoren gemacht, an dem auch D. von Harrach und ich selbst beteiligt waren. Die Hoffnung, dabei durch Transfer vieler Nukleonen in den Bereich superschwerer Elemente vorzustossen, wurde aber zutiefst

enttäuscht. Statt einer symmetrischen Verteilung der produzierten Kerne um U mit  $Z = 92$  herum fand sich ein breites Kontinuum mit um einen Faktor  $10^3$  reduzierter Ausbeute bei  $Z < 70$ , aber oberhalb von U erschien das Spektrum bereits bis  $Z = 96$  mit einem Faktor  $>10^5$  fast senkrecht abgeschnitten, offensichtlich durch die hohe Spaltbarkeit im Bereich der Aktiniden.

Die Gruppe von Harrach/Glässel stand im Mittelpunkt eines inzwischen am UNILAC aufgebauten Grosseperiments, ein Gemeinschaftsprojekt mit dem MPIK (H. Sann). Die Kombination von zwei  $1\text{ m}^2$  grossen ortsempfindlichen Parallelplatten-Gasdetektoren für Flugzeit und  $dE/dx$  und einer entsprechend grossen Ionisationskammer, alles frei beweglich innerhalb eines evakuierten Behälters von 3 m Durchmesser und 4 m Höhe ("Heidelberger Fass"), erlaubte exklusive Messungen von 3- oder 4-Körper Zerfällen in Stössen schwerer Kerne bis zu  $U+U^-$ , zu einer Zeit, als sonstwo noch immer Halbleiterzähler benutzt wurden. Das Hauptthema für die Untersuchungen hatte bereits eine jahrelange Vorgeschichte in Form der "tief-inelastischen" Stösse von leichten bis mittelschweren Kernen. Dabei hatte sich ein erstaunlich grosser Transfer von Energie und Drehimpuls zwischen den Stosspartnern gezeigt, der theoretisch mit statistischen Modellen ("Diffusion") beschrieben wurde. Der Zerfall in mehr als 2 Körper im Endzustand erlaubte Einsichten in die Grösse des Drehimpuls-Transfers durch Winkel-Korrelationen. Wir lernten auch vieles über die Kollisionsdynamik wie lokale Zeitskalen ("Proximity Effects"), d.h. Aufbruch vs. Zerfall im statistischen Gleichgewicht wie sequentielle Spaltung (Überblick in [Phys. Bl. 37, 7 (1981) 199]). All das war neu und durchaus konkurrenzlos, füllte die einschlägigen Konferenzen, ergab eine Reihe von PRLs, und dennoch – diese durchaus wichtigen und systematischen Resultate schienen eigentlich nur die engere Fachwelt zu interessieren. Der Neuzugang von Diplomanden, immer ein sehr sensibles Zeichen für Interessantes, entsprach auch nicht mehr ganz den Erwartungen. So lag für mich Änderung in der Luft, zum Leidweisen vieler Kollegen in diesem Gebiet.

### **Forschung an den Beschleunigern des CERN ab 1983**

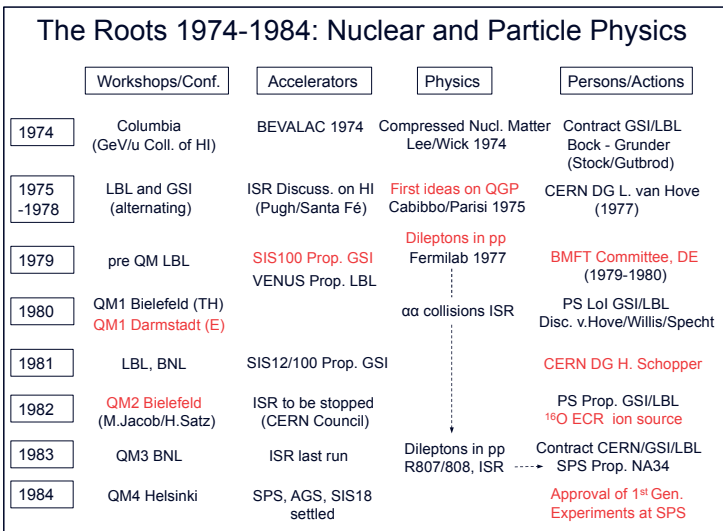
Die Änderung bot sich unmittelbar an, ein weiterer sonderbarer Zufall in meinem Leben. Zu jener Zeit kam eine Diskussion darüber auf, das aufregende neue Thema von "Quarkmaterie im Labor" an einem der Beschleuniger des CERN mit ultrarelativistischen Schwerionenstößen zu eröffnen. Ich geriet um 1979 herum selbst in diese Diskussion hinein, nahm entscheidenden Anteil daran und endete ab 1983 bis etwa 2010 mit insgesamt 4 Experimenten auf diesem Gebiet, unterstützt von insgesamt 3 jeweils 1-jährigen Scientific Associateships beim CERN.

### **Die Vorgeschichte 1974–1984**

Der über ein volles Jahrzehnt laufende Diskussionsprozess ist ein Musterbeispiel für konstruktives Zusammenspiel der unterschiedlichen Communities von Niederenergie- und Hochenergiephysik, für den Ausgleich von Laborinteressen mit eigenen Beschleunigerplänen (LBL, GSI und CERN), und für die Weisheit einiger Individuen, all das zu ihrer eigenen Sache zu machen. Die Matrix in Abb. 9 ist ein Versuch, die Hauptelemente dazu zu ordnen. Sie stammt ursprünglich aus einem Kolloquium, das ich 2014 im Rahmen der Jubiläumskolloquien zur Wissenschaftsgeschichte des CERN aus Anlass der CERN Gründung 60 Jahre zuvor über das Gebiet der Schwerionenphysik gehalten habe.

Rechtzeitig zur Inbetriebnahme des BEVALACS 1974 wurde ein Vertrag zwischen GSI Darmstadt und LBL Berkeley zur gemeinsamen Nutzung geschlossen, mit R. Bock und H. Gruner als treibende Kräfte. Die Motivation für Kernkollisionen im Energiebereich von 1 GeV/u war die Kompression von Kernmaterie, mit der Erwartung auf Zugang zur Zustandsgleichung und den Bezug zum Inneren von Neutronensternen. Die theoretische Untermauerung geschah allein auf hadronischer Basis. Im folgenden Jahr 1975 erschien erstmals eine Veröffentlichung auf partonischer Basis, die die Möglichkeit von 'deconfinement' der normalerweise in Hadronen eingesperrten Quarks und Gluonen sowohl bei hohen Temperaturen wie bei hohen (Net-)Baryondichten vorschlug. Die

dazu notwendigen viel höheren Energien als am LBL standen zumindest für pp Stöße am FermiLab sowie am SPS und insbesondere am ISR des CERN zur Verfügung. Dies wurde auch sehr bald genutzt: Daten zur Muonpaar-Produktion im invarianten Massenbereich  $1 < M < 3$  GeV vom Fermilab 1977 wurden 1978 von E. Shuryak quantitativ als thermische Strahlung aus einem in pp gebildeten Zustand interpretiert, für den erstmals in der Literatur der bis heute übliche Begriff 'Quark-Gluon Plasma' eingeführt wurde. Am ISR fand 1980 eine Strahlzeit mit  $\alpha\alpha$  Kollisionen statt, aber nur mit hadronischen Observablen, ohne auffällige Befunde. Der Vorschlag, schwere Ionen im ISR zu beschleunigen, wurde bereits 1975 erstmals gemacht und dominierte die Diskussionen beim CERN für 5-6 weitere Jahre. Die Geschichte verlief jedoch anders.



**Abbildung 9.** Die Geburt der Schwerionen-Physik am CERN.

Die GSI in Darmstadt machte 1979 einen eigenen Projektvorschlag für das SchwerIonenSynchrotron SIS100 im Energiebereich des CERN PS, mit Ionen bis zu 10 GeV/u Uran. Das Dilemma des Vorschlags war eine zu niedrige Energie für die klare Formierung eines QGP und damit eher eine Fortsetzung der hadronischen Motivation mit radikaleren Mitteln. Zudem fand sich der Rest der GSI mit ganz anders gelagerten Interessen überhaupt nicht vertreten, was zu grossen Konflikten führte. Das BMFT setzte noch 1979 unter Leitung von H. Lindenberger einen "Ad-hoc-Ausschuss Kernphysik" zur Begutachtung aller Projektvorschläge (GSI, Jülich, München, ...) für die Zukunft des Gebiets in Deutschland ein, dem ich selbst angehörte. Das Resumee im Juni 1980 war u.a. eine klare Empfehlung, "zu versuchen, ob das Arbeitsgebiet hochrelativistischer schwerer Ionen nicht an einem Beschleuniger des CERN in einer Kooperation CERN/GSI erschlossen werden kann".

Darauf folgte eine Kettenreaktion für mich selbst. R. Bock und R. Stock veranstalteten wenige Monate später einen Workshop bei GSI, heute "Quarkmatter1" genannt, in dem neben bekannten Theoretikern wie Hagedorn erstmals Experimentalphysiker vom CERN (ca. 30%), vom BEVALAC und Interessierte aus der Niederenergiephysik miteinander diskutierten. Dabei lernte ich auch B. Willis kennen, der einen nachhaltigen Eindruck auf mich machte. Ich selbst musste am Ende den "Summary Talk" halten, eine echte Herausforderung angesichts meiner mangelnden Vorbildung, aber mein Enthusiasmus für das Neue überstrahlte alle Schwächen, und P. Brix als Zuhörer gratulierte mir danach mit der dringenden Empfehlung, das in den nächsten 24 Stunden aufzuschreiben (was dann auch gelang). Nur wenig später arrangierte B. Willis eine mehrstündige gemeinsame Diskussion mit ihm und dem amtierenden DG L. van Hove beim CERN, auch dies bis heute unvergesslich. Ich lernte sehr viel Neues zur Physik, und meine Grundhaltung "keep the ISR", der Leitfaden nur wenige Wochen zuvor, wich der in diesem Gespräch neu gewonnenen Einsicht, dass das CERN SPS als "Fixed-Target" Maschine um einen Faktor 1000 höhere Luminositäten als das ISR ermöglichte. Der

Widerstand gegen die geplante vorzeitige Abschaltung zugunsten des Baus von LEP kam von da an nur noch von der ISR Community, die z.T. gerade mit neuen pp Experimenten begonnen hatte. L. van Hove sicherte seine Unterstützung für das SPS auch weiterhin zu. Ich verliess CERN danach mit der klaren Entscheidung, nun selbst in dieses neue Gebiet einzusteigen.

Ab 1981 war H. Schopper CERN DG. Kurz zuvor hatte G. zu Putlitz, Wissenschaftlicher Direktor der GSI, grünes Licht für einen Vorschlag für zwei Experimente der GSI/LBL Gruppe am CERN PS gegeben, d.h. dem Energiebereich von SIS100, zunächst als LOI, Anfang 1982 dann als konkreten Vorschlag, der auch das Angebot einer modernen EZR+RFQ Ionenquelle für  $^{16}\text{O}/^{32}\text{S}$  enthielt. Mitte 1982 folgte "Quarkmatter2" in Bielefeld. Das Organisations-Committee war diesmal mit den Namen T. Ericson, M. Jacob, H. Satz und B. Willis voll in der Hand von Hochenergiephysikern, die ihre Rolle als Vorreiter intern bereits seit 1980 gespielt hatten. Ihr Anteil war der grösste von allen Teilnehmern, und die 6 eingesetzten Arbeitsgruppen diskutierten die Grundprinzipien von künftigen Experimenten mit schweren Ionen am SPS auf der Basis der bis dahin vorgeschlagenen Observablen. Ich war selbst Convener einer dieser Gruppen, zusammen mit S. Nagamiya, und eine hohe Aufbruchstimmung war bei uns allen unübersehbar (S.N. war später, 1996, der Festredner in der GSI Veranstaltung zu meinem 60. Geburtstag). Der GSI Vorschlag für das PS führte hier eher ein Randdasein. Die Verhandlungen darüber mit dem CERN wurden primär von R. Bock geführt. Als Mitglied des zuständigen CERN PSCC ab 1983 war ich dann ex-officio selbst dabei. Die Genehmigung für das PS erfolgte noch im gleichen Jahr, wurde aber dann geparkt, um die Reifung der Pläne der von vornherein für das SPS konzipierten Experimente abzuwarten. Ab 1984 wurden schliesslich die bis dahin vorgeschlagenen SPS Experimente formell vom CERN akzeptiert, darunter auch die GSI Vorschläge nach entsprechender Modifikation für das SPS, insgesamt 6 bis 1987. Schon nach den ersten Ergebnissen wenige Jahre später war klar, dass das Gebiet über  $^{16}\text{O}$  und  $^{32}\text{S}$  hinaus



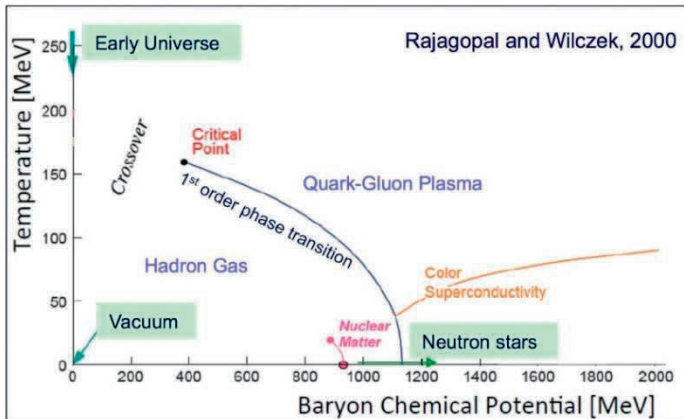
wirklich schwere Ionen wie Pb benötigte. Das Konzept dafür wurde bis 1990 von N. Angert, H. Haseroth et al. entwickelt und als "LINAC3" im Rahmen einer Internationalen Kollaboration von GSI (Federführung), CERN, GANIL, INFN Legnaro/Torino und IAP Frankfurt 1994 beim CERN in Betrieb genommen, wo er bis heute seinen Dienst tut.

Zur Rolle des DG H. Schopper seit 1981: er ist es mehr als jeder andere, dem primär die Etablierung der Schwerionenphysik beim CERN als Dauerprogramm zu verdanken ist, über das SPS hinaus bis heute zum LHC. Mit seiner Weisheit und seiner Anerkennung von Qualität auch ausserhalb des Mainstreams in der Hochenergiephysik nahm er an vielen Diskussionen selbst teil, innerhalb der Fachkomitees und auch mit Individuen. Der Schlüsselbeitrag der GSI/LBL Gruppe war nicht so sehr die Physik und die eingebrachte Erfahrung, sondern das Angebot der ursprünglichen Ionenquelle, die zusammen mit dem Strahltransport dem CERN einen fast kostenlosen Einstieg in beschleunigte schwere Ionen erlaubte. H. Schopper verband das dann mit einem Null-Summenspiel auch für Experimente: kein CERN Beitrag, nur Übernahme auslaufender Experimente oder Rekuperation grösserer Komponenten. Die endgültige positive Entscheidung auf höchster Ebene traf er dann ebenfalls persönlich, im eigenen Wortlaut: "Eine von drei Entscheidungen in meinem Leben, die ich gegen meine eigenen Komitees getroffen habe."

### **Theoretischer Hintergrund**

Im Mittelpunkt der Forschung auf diesem Gebiet steht der in Abb. 10 gezeigte Sachverhalt. Die Hauptphasen stark wechselwirkender Materie sind quasi-freie Quarks und Gluonen (die Grundelemente der Materie) bei hohen Temperaturen bzw. hohen Baryon-Dichten, sowie getrennte Hadronen wie Baryonen, z.B. Protonen, mit 3 eingeschlossenen Quarks bei niedrigen Werten. Ein Phasenübergang von vermutlich erster Ordnung trennt die beiden Phasen Quarkmaterie/Quark-Gluon-Plasma und Hadron Gas über einen gewissen Bereich hinweg. Nach dem Urknall vor

ca. 16 Milliarden Jahren durchlief das Universum sehr komplizierte Frühphasen unter ständiger Abkühlung und Expansion und erreichte schliesslich den Zustand von Quarkmaterie. Bei etwa  $10^{-5}$  s mit weiterer Abkühlung fand dann der Phasenübergang in Hadronen statt. Gleichzeitig entstand erstmals leerer Raum zwischen diesen Gebilden: das Vakuum im eigentlichen Sinne war geboren. Mit diesem Übergang ist ein weiterer unabhängiger Übergang verbunden, die Brechung der Chiralen Symmetrie. Dies gibt den Hadronen eine Masse, die die der eingesperren Quarks um das 50-fache übertrifft. Die nach kurzer Zeit einzig überlebenden Protonen dominierten die weitere Evolution des Universums und bestimmen bis heute seine beobachtbare Gesamtmasse.



**Abbildung 10.** Der Phasenübergang zwischen einem Quark-Gluon Plasma und einem Gas von Hadronen.

Experimentell ist Quarkmaterie im Labor, jedenfalls im Prinzip, durch den Zusammenstoß von schweren Atomkernen bei extrem hohen Energien (äquivalent dem Vielfachen der Ruhemasse) erzeugbar. Der dabei entstehende Feuerball, der in seiner heißesten

Phase viele tausend Quarks und Gluonen enthält, benimmt sich dann in seiner weiteren zeitlichen Evolution wie ein "Mini-Urknall im Labor": mit Expansion, Abkühlung und schließlich Phasenübergang in beobachtbare Teilchen. Dazu gehören die Hadronen wie Baryonen und Mesonen (Quark-Antiquark Paare), aber auch Photonen und Leptonpaare wie Elektron-Positron oder Myon-Antimyon Paare. All dies sind Observable für den jeweiligen Zustand des Mediums und erzwingen deshalb entweder Universal-Experimente wie heute am LHC oder eine grössere Zahl von spezialisierten Einzel-Experimenten wie in der gesamten SPS Ära.

### **Experiment R807/808 am ISR (Mitglied)**

Mein erstes Scientific Associateship beim CERN begann 1983. Ich wurde auf Einladung von B. Willis Mitglied des R807/808 (Axial-Field-Spectrometer) Experiments mit 75 Mitgliedern am ISR, des ersten und damals einzigen Hadron-Colliders weltweit, und hatte so die Chance, dessen letztes Betriebsjahr mitzuerleben und dabei Hochenergiephysik wie ein frischer Student am Experiment selbst zu lernen. Meine neue Umgebung mit Grössen wie M. Albrow, I. Manelli, R. Palmer, B. Willis u.a. bot intellektuell wie auch menschlich ideale Partner für die schnelle Eingewöhnung, und so war dieses erste Jahr beim CERN zusammen mit der für mich neuen internationalen Umgebung die zweite Periode meines Lebens (neben der Münchner Zeit bei ML), die mich auf ihre Weise nachhaltig geprägt hat.

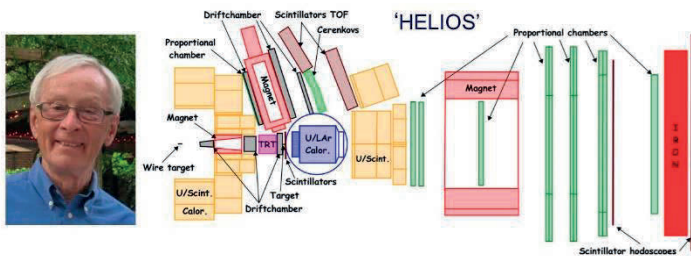
Die Hauptelemente des Experiments waren eine zentrale Driftkammer und ein (fast) hermetisches  $4\pi$  U-Kalorimeter. Jets und Photonen im GeV-Bereich standen im Mittelpunkt. Für die Zukunftsplanung fanden Messungen zu Leptonpaaren besondere Aufmerksamkeit. Hier gab es eine ganze Folge von Experimenten in der Dekade nach der Entdeckung des  $J/\psi$  durch S. Ting 1973, dem Gefühl folgend, man könne auch noch anderes verpasst haben. Bis 1983 gab es 10 Publikationen zu einzelnen Leptonen oder Leptonpaaren über die bekannten Quellen hinaus, alle im Bereich niedriger Transversalimpulse bzw. Massen ("Anomale Paare").

Quarkmatter am Horizont nährte das Interesse noch mehr. So schlug man mir als noch nicht verplantem Neuling vor, mich in dieses Gebiet einzuarbeiten und eine Ergänzung für den R808 Aufbau vorzubereiten, mit dem die Anomalien auch bei den viel höheren pp Energien des ISR (63 GeV im Schwerpunktssystem) untersucht werden sollten. Bei uns fiel die Wahl auf Elektronen. Dies bedeutete die Installation von Komponenten zur Elektron-Hadron Identifikation, hier zwei grosse "rekuperierte" Cherenkov Detektoren zwischen der Driftkammer und einem NaJ Kalorimeter innerhalb des U Kalorimeters. Die Analyse der damit genommenen Daten war Gegenstand einer Doktorarbeit in Lund, und der Hauptbetreuer dafür war J. Schukraft, der 1984 nach dem Ende seiner Heidelberger Doktorarbeit in meiner GSI Gruppe ebenfalls zum CERN wechselte. Auch hier fand sich ein Überschuss an Leptonpaaren bei niedrigen Massen, zweifelsfreier etabliert als alles andere zuvor. Physikalisch gibt es hier wohl einen Zusammenhang mit dem bis heute nicht geklärten Puzzle der "Soft Photons" in pp. J. Schukraft blieb beim CERN und war später Sprecher der ALICE Kollaboration für 20 Jahre.

### **Experiment NA34/HELIOS-2 am SPS (Sprecher)**

Noch während der laufenden Strahlzeit am ISR wurde unter B. Willis' Führung ein künftiges Experiment am SPS konzipiert: HELIOS, das High-Energy-Lepton-Ion-Spectrometer. Es verfolgte 2 Ziele zugleich: HELIOS-1, Lepton-Produktion in pBe mit einer 1000-fach grösseren Empfindlichkeit als am ISR, und HELIOS-2, globaler Überblick über die Eigenschaften nuklearer Kollisionen mit Ergänzung weiterer Komponenten. Sprecher des ersteren war N. McCubbin. Zum Sprecher des letzteren wurde ich gekürt, rechtzeitig zur ersten Antragsrunde der Schwerionen-Experimente 1984. Das war mitnichten das, was ich mir als Anfänger gewünscht hätte: mit 150 Mitgliedern aus 15 Ländern und den mir bereits vom ISR bekannten Kollegen in der Minderheit spielte das Allzumenschliche (zu) oft eine ebenso grosse Rolle wie die Physik, die uns im Prinzip doch verband. Als gemeinsame Komponenten

dienten das vom ISR Experiment übernommene U-Kalorimeter in hermetischer Anordnung sowie das frühere NA3 Myonpaar-Spektrometer. Ein Vorwärts-Spektrometer mit einem TRD, einem U/LAr Kalorimeter und Driftkammern für Elektronpaare war nur in HELIOS-1 nutzbar. Für HELIOS-2 gab es ein Magnet-spektrometer mit Teilchen-Identifizierung für Hadronen und (über externe Konversion) auch für Photonen, dessen Akzeptanz durch einen Schlitz im U-Kalorimeter bestimmt war.



**Abbildung 11.** Aufbau NA34/HELIOS-2 am CERN (with B. Willis).

HELIOS-1 war ein voller Erfolg innerhalb des gesetzten Rahmens. Die Ergebnisse für Elektronpaare und Muonpaare hatten eine sehr viel höhere Genauigkeit als alles Vorangegangene und entlarvten die "Anomalen Paare" (ausser den ISR Ergebnissen) als Artefakte von nicht vollständig verstandenen hadronischen Zerfällen von Mesonen.

HELIOS-2 war ein voller Erfolg für den Hadronen-Teil des Programms, aber nicht für die Muonpaare. Die Kalorimeterdaten lieferten wegen der vollständigen Abdeckung des Rapiditätsraums von 0-6 die genaueste Information über die Energieumsetzung in Schwerionenstößen und zeigten, dass für S-Au die erreichten Energiedichten im Feuerball mit  $2.6 \text{ GeV}/\text{fm}^3$  erheblich über dem kritischen Wert von  $1 \text{ GeV}/\text{fm}^3$  lagen, der für die Erzeugung eines Quark-Gluon-Plasmas nötig ist. Das führte dann auch (zusammen mit den NA35 Daten) zu einer entsprechenden Pressemitteilung des CERN in 1987. Die Analyse der Hadron- und Photondaten des

Magnetspektrometers lag mehrheitlich bei Heidelberger Doktoranden, ergab aber keine direkten Hinweise auf das Plasma.

Es wurde schnell klar, dass die Komplexheit des Gebiets kaum in einem einzigen Experiment wie HELIOS-2 beherrschbar war. Der notwendige Lernprozess wurde durch die Perspektive von Pb-Strahlen am Horizont noch beschleunigt. Schon nach 2 Jahren wurde einmütig der Beschluss gefasst, in Zukunft gleich drei getrennte Wege zu gehen, um die interessantesten Observablen optimal abzudecken: HELIOS-3, reduziert allein auf das Myonpaar Spektrometer (Sprecher G. London), NA44, optimiert auf Hadron Spektroskopie und HBT (Sprecher H. Boggild), und NA45/CERES, optimiert auf die Messung von Elektronpaaren.

### **Experiment NA45/CERES am SPS (Sprecher)**

Das Ziel des Experiments war die Messung von Elektronpaaren in einer Form, die auch mit künftigen Pb-Strahlen noch möglich sein würde. Die Motivation solcher Messungen für Kernkollisionen ist die folgende. Im Unterschied zu Hadronen proben Leptonen und Photonen die gesamte Raum-Zeit Entwicklung des in diesen Kollisionen gebildeten Feuerballs, und das ohne signifikante Endzustands-Wechselwirkung (weil auf EM beschränkt). Im Bereich invarianter Massen  $< 1$  GeV (und nur das war in CERES aus Luminositätsgründen zugänglich) erfolgt die Emission thermischer Dileptonen primär über das Vektor Meson  $\rho$ , dessen "in-medium" Eigenschaften sehr sensitiv vom chiralen Übergang abhängen und das deshalb als DAS Test-Teilchen dafür gilt. Die Schwierigkeiten dieser Messungen liegen zum einen in Produktionswahrscheinlichkeiten von nur  $10^{-4}$  relativ zu Hadronen, zum anderen im sehr grossen Untergrund von nicht erkannten  $\pi$ -Dalitz- und  $\gamma$ -Konversions-Paaren.

Technisch ist CERES wohl das abenteuerlichste Experiment meines Berufslebens, begleitet von grösster Skepsis der Mehrzahl der Kollegen, dass so etwas jemals funktionieren könnte (der CERN DG C. Rubbia überzeugte sich zur Genehmigung 1989 höchst persönlich über meine Zuversicht). Es basiert auf

RingImagingCherenkov (RICH) Detektoren für Identifikation und Richtungsmessung der Elektronen. Die Grundidee war bereits im Vorschlag für NA34-2 enthalten, aber in der Position auf den freien Raum vor dem Kalorimeter beschränkt. Nun konnte das Konzept optimiert werden, sehr ermutigt besonders durch B. Willis.

Das Grundprinzip der Anordnung ist "hadron-blind tracking" mit zwei RICH Detektoren und Gas-Radiatoren, einer vor, der andere nach einem kurzen supraleitenden Doppel-Solenoiden. Die Cherenkov Schwellen liegen so hoch, dass nur Elektronen Ringe erzeugen können. Der Impuls der Elektronen wird durch die azimuthale Richtungsänderung in den RICH Detektoren bestimmt. Das Magnetfeld des Solenoiden ist im ersten Radiator vernachlässigbar klein, im zweiten durch äussere Korrekturspulen so geformt, dass auch dort keine Lorentz Kraft existiert. Das gesamte Material innerhalb der Akzeptanz ist  $<1\%$  einer Strahlungslänge. Die Detektoren für den Nachweis der einzelnen Cherenkov Photonen im UV Bereich benutzen eine 3-stufige Verstärkung in 2 Parallel-Platten Ebenen und 1 Drahtebene und sind aus Gründen des Untergrunds strahlaufwärts vom Target angeordnet. Die Auslese erfolgt durch Elektroden von  $2 \times 50.000$  pads. Für die Pb-Ära wurden dann auch Si-Drift-Detektoren und eine Padkammer addiert.

Die Kollaboration bestand anfänglich nur aus 3 Partnern: dem MPI Heidelberg (P. Wurm et al.), dem Weizmann Institut Rehovot (A. Breskin, I. Tserruya et al.) und dem Physikalischen Institut Heidelberg, mit zunächst nur 22 Mitgliedern (später ca. 50). Der folgende Zulauf von Diplomanden und Doktoranden schlug an Qualität (mehrere Studienstiftler) und Quantität alle meine bisherigen Erfahrungen. Das R&D Programm für die UV Detektoren erstreckte sich über Jahre mit etlichen Publikationen, darunter auch eine gemeinsam mit G. Charpak.

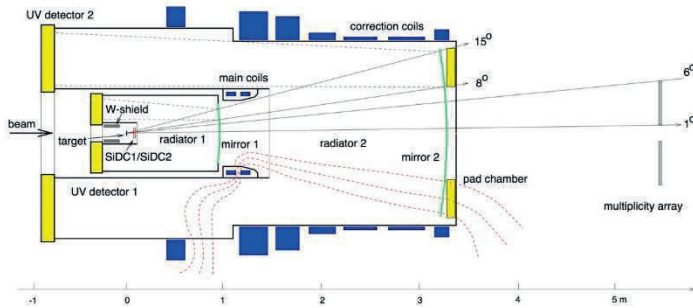


Abbildung 12. Aufbau NA45/CERES am CERN SPS.

Die erste Produktions-Strahlzeit mit 200 GeV/u S-Au fand 1992 statt. Die Daten zeigten einen starken Überschuss von Dileptonen über die bekannten mesonischen Quellen hinaus, das erste Zeichen neuer Physik im Bereich  $M < 1$  GeV. Dies war konsistent mit der Erwartung einer Regeneration des  $\rho$  (Lebensdauer nur 1.3 fm/c) durch  $\rho \leftrightarrow \pi\pi$  Prozesse, die zum ca. 5-fachen der normalen Ausbeute im langlebigen hadronischen Teil des Feuerballs nach dem QCD Phasenübergang führt. Die statistische Genauigkeit der Daten reichte aber nicht aus, die kontroversen theoretischen Szenarien für die Eigenschaften des  $\rho$  im Medium unter dem Einfluss der Nähe des chiralen Übergangs, Massenverschiebung vs. Verbreiterung, zweifelsfrei voneinander zu unterscheiden. Dies gelang auch nicht ausreichend gut mit den 1995/96 verfügbaren Pb-Strahlen und blieb schliesslich in herausragender Form meinem letzten CERN Experiment, NA60, vorbehalten. Dennoch: die erste Publikation der Daten [PRL 75 (1995) 1271, Doktorarbeit T. Ullrich] stimulierte eine Flut von Veröffentlichungen, viele theoretische, und ist bis heute nicht nur die meistzitierte Arbeit meines Berufslebens, sondern auch aller experimentellen Originalarbeiten der Schwerionenphysik am SPS überhaupt. Die Pressekonferenz des CERN 2000, mit RHIC ante portas, sah den Beitrag von CERES als einen der 5 Hauptbelege hinter der offiziellen Mitteilung "New State of Matter created at CERN".





**Abbildung 13.** Mitarbeiter vom CERN (J. Schukraft), von Heidelberg (A. Drees, P. Fischer, A. Pfeiffer, C. Schwick, T. Ullrich u.a.) und vom Weizmann Institut (A. Breskin, I. Tserruya) am CERES Aufbau in 1991. Auch diese Heidelberger blieben später der Forschung treu.

1996 wurden P. Braun-Munzinger und J. Stachel nach Darmstadt bzw. Heidelberg berufen, worauf ich als GSI Direktor zu jener Zeit einen erheblichen Einfluss hatte. Auf meine Einladung hin schlossen sich beide CERES an, um die lange Vorbereitungszeit bis zu ALICE am LHC zu überbrücken. Dies führte mit J. Stachel als neuer Sprecherin zur Addition einer radialen TPC, so dass auch Hadron-Physik möglich wurde, und zu einem erheblichen Wachstum durch neue Mitarbeiter, während meine eigene Gruppe durch meine Abwesenheit in HD auf nahezu Null dahinschmolz. Neue Strahlzeiten mit Pb Strahlen gab es dann 1999 erstmals bei einer SPS Energie von nur 40 GeV/u, gefolgt 2000 bei der vollen Energie. Abgesehen von einer neuen Doktorandin für die Analyse der Elektronenpaar-Daten bei 40 GeV/u, was ebenfalls ein vielzitatierter

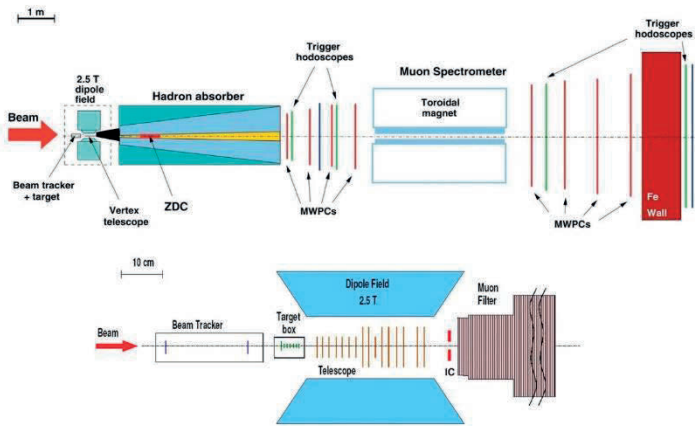
Erfolg mit einem noch grösseren Effekt in der  $\rho$  Region wurde, war ich ziemlich isoliert, und da das CERN zusätzliche CERES Strahlzeiten bei niedrigen Energien nicht genehmigte, war die Zeit reif für ein weiteres neues Abenteuer, zumal der Stand der Leptonpaar-Forschung sowohl im Massenbereich  $< 1$  GeV wie  $> 1$  GeV immer noch nicht die hohen Erwartungen widerspiegelte, die man seit dem Quarkmatter2 Workshop in Bielefeld 20 Jahre zuvor in sie gesetzt hatte.

### **Experiment NA60 am SPS (Mitglied)**

Noch einmal war das grosse Glück auf meiner Seite, und diesmal auf einem Niveau, das alles Vorangegangene beim CERN übertraf. Zwei Senior-Kollegen im Myonpaar-Experiment NA50, L. Kluberg und P. Sonderegger, aber auch C. Lourenco, bis 2005 Sprecher des Nachfolge-Experiments NA60, hatten mich bereits seit längerem bearbeitet, doch zu NA60 zu wechseln – als ideale Ergänzung mit meinen Leptonpaar-Erfahrungen bei niedrigen Massen im Vergleich zum Massenbereich  $> 1$  GeV und der J/psi Physik in NA50. Ich nahm das Angebot 2003 an, gerade noch rechtzeitig vor meiner Emeritierung 2004 und dem drohenden Stop der Förderung durch Bundesmittel (was dann durch die ersten Erfolge doch erst 2006 eintrat). So konnte ich noch mit mehreren Postdocs einige Hardware- und insbesondere Simulations-Beiträge, die hohe Erwartungen weckten, vor der ersten Strahlzeit Ende 2003 leisten.

Der grosse Schritt von NA50 auf NA60 geht auf eine wirklich genial zu nennende Idee von P. Sonderegger zurück: die Addition eines nur 0.5 m langen Präzisions-Spektrometers mit einem Si Pixel Teleskop vor dem 5 m langen Hadron-Absorber mit dem traditionellen NA50 Spektrometer danach. Die Anpassung der Spuren der beiden Spektrometer im Orts- und Impulsraum verbessert erheblich die Massenauflösung der Myonpaare und erlaubt, prompte von verzögerten Myonen (aus offenem Charm) zu unterscheiden. Das Dipolfeld am Anfang verbessert zudem die Akzeptanz des Ganzen bei kleinen  $p_T$ . Die Si Detektoren waren eine Neuentwicklung für LHC Experimente mit höchster Toleranz

gegenüber Strahlenschäden, die hier erstmalig in einem Produktions-Experiment überhaupt zum Einsatz kamen. Sie erlaubten die Beibehaltung der für die Messung von Myonpaaren typischen hohen Luminositäten, um einen Faktor 1000 grösser als die bei CERES möglichen. Ein Myonpaar-Trigger trug das seine dazu bei.



**Abbildung 14.** Aufbau NA60 am CERN SPS.

Abb. 15 zeigt die endgültigen Ergebnisse zum thermischen Myonpaar-Massenspektrum über den gesamten Bereich  $0.2 < M < 2.5$  GeV. Der kombinatorische Untergrund und alle bekannten hadronischen Zerfallsbeiträge zum Spektrum sind subtrahiert. Die Daten sind integriert über  $p_T$ , Akzeptanz-korrigiert und absolut auf die zentrale Rapiditätsdichte der geladenen Hadronen normalisiert, so dass sie mit theoretischen Rechnungen direkt verglichen werden können. Die Qualität der Daten ist überragend; die effektive Statistik übertrifft gegenwärtig alles Sonstige auf dem Markt um einen Faktor von nahezu 1000. Auch künftig sind nur "Fixed-Target" Experimente in der Lage, das weiter zu verbessern, da alle

für die Schwerionenphysik genutzten Kollider wie RHIC und LHC nicht annähernd solche Luminositäten erreichen können.

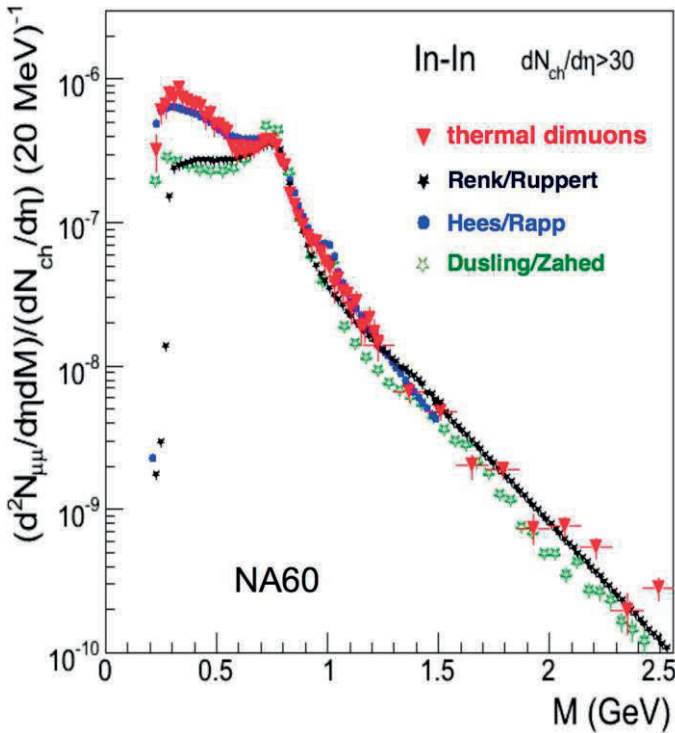


Abbildung 15. Thermisches Myonpaar-Massenspektrum in In-In.

Im Massenbereich  $< 1$  GeV erscheint das  $\rho$  als Peak in der nominalen Position. Als "in-medium" Effekt findet sich allein eine Verbreiterung, das " $\rho$  schmilzt" (nur von Hees/Rapp theoretisch korrekt beschrieben), zeigt aber keine Änderung der Masse, womit nach mehr als 20 Jahren die Hypothese des "Brown-Rho-scaling" nicht länger haltbar war.

Im Massenbereich  $> 1$  GeV folgt ein annähernd exponentieller steiler Abfall. Statt definierter Spektralfunktionen gilt hier wie seit Jahrzehnten aus der Teilchenphysik bekannt Hadron-Parton Dualität, äquivalent zu flachen Spektralfunktionen. Das Massenspektrum wird dann exakt durch  $dN/dM \propto M^{3/2} \exp(-M/T)$  [Shuryak 1978] beschrieben, wobei  $T$  die mittlere Temperatur über die Raumzeitliche Entwicklung des Systems darstellt. Da  $M$  als Lorentz-Invariante definiert ist, ist das Spektrum immun gegenüber der Expansion des Feuerballs (am Ende mit  $c/2$ ), anders als das Plancksche Gesetz für Photonen.  $T$  ist daher die rein thermische Temperatur des Systems. Der Fit der Daten mit diesem Lorentz-invarianten "Planck-ähnlichen" Gesetz oberhalb 1.1 GeV ergibt einen Temperaturwert von  $215 \pm 12$  MeV. Bei einer kritischen Temperatur von 160-170 MeV für die QCD Phasengrenze bedeutet das, dass partonische Quellen die beobachtete Strahlung dominieren. Das ist der bisher klarste Beweis dafür, bezogen direkt aus Daten ohne Modellrechnungen, dass das Quark-Gluon-Plasma tatsächlich zuerst am CERN SPS erzeugt und beobachtet worden ist, beweiskräftiger als alles, was bis zur CERN Pressekonferenz 2000 vorlag und dort die vorsichtige Sprache erzwang. Für mich persönlich ist es mehr als befriedigend, dass das in den frühen 1980igern gesetzte Ziel klarer Aussagen in einem solch komplizierten Gebiet am Ende doch noch erreicht werden konnte.

Tatsächlich sind die Myonpaar-Daten ungewöhnlich reichhaltig, mit der explizit herausprojizierten  $\rho$  Spektralfunktion, mit  $mT$  Spektren, radialer Expansion, Helizitätsverteilungen, Formfaktoren u.a., und füllen damit eine ganze Reihe von Publikationen. Ein allgemein gehaltener Artikel über alle NA60 Resultate zur thermischen Strahlung in Form von Myonpaaren findet sich in [CERN Courier, 11 (2009) 31, S. Damjanovic, R. Shahoyan und HJS]. Sprecher von NA60 war seit 2005 G. Usai.

### **Musik, Physik und Neurophysiologie**

Hier geht es um DIE Liebhaberei in meinem Berufsleben, mit einem sonderbaren Beginn vor nun schon 30 Jahren. Im 600. Jubiläums-

jahr der Universität Heidelberg, 1986, boten G. Dosch und ich eine Vorlesung für Hörer aller Fakultäten an mit dem Thema "Helmholtz und danach – Physik und Musik". Mit uns beiden gleichzeitig auf der Bühne und einer Arbeitsteilung Experimente (Specht) und Interpretation bzw. Theorie (Dosch) entstand eine unerwartet lebhafte Atmosphäre, die auch die Hörer einbezog. Die Experimente schlossen das Helmholtz-Inventar in Heidelberg wie Lochsirenen und einen ganzen Satz von Kugeln ebenso ein wie elektronische Generatoren für die zahlreichen psychoakustischen Paradigmen, live analysiert mit schneller Fourieranalyse und Zeitverlauf mit Oszillograph. Zusammen mit einem Projektor für die Dosch'schen Erklärungen benötigte das 3 Bildschirme gleichzeitig. Musikinstrumente live spielten ebenfalls eine grosse Rolle, der Flügel mit mir und die Flöte mit Dosch für Schnelldemonstrationen aller Art, aber auch ein grosses Spektrum anderer Instrumente, für die sich allerlei Kollegen aus dem Publikum zur Verfügung stellten. Alles in allem ein unvergessliches Ereignis, was sich schnell auch ausserhalb Heidelbergs herumsprach.

Beginnend mit einem Kolloquium 1987 in Bielefeld, zu dem auch Hörer von der nahen Musikhochschule Detmold kamen, gab es bis heute mehr als 20 Einladungen dieser Art, u. a. zur GSI, zu DESY und CERN, zu AvH Treffen, zu den Loeb-Lectures in Harvard (6 h), zu den Unis in München, Wien und den Einstein Lectures in Berlin, zu einem Workshop der Leopoldina, aber auch zu allgemeinen Vorträgen wie im Deutschen Museum München und im Beiprogramm von Musikfestivals wie Verbier und dem Beethovenfest in Bonn im Kammermusiksaal des Beethovenhauses. Es bürgerte sich auch schnell ein, als Amateur die eigenen musikalischen Darbietungen von Literaturbeispielen nicht zu übertreiben, sondern zum Abschluss professionelle Kurzkonzerte wie einzelne Streichquartett-Sätze oder ähnliches anzubieten. Dazu dienten vorwiegend Studenten der lokalen Musikhochschulen, in Berlin sogar Alban Gerhard, einer der gegenwärtig führenden Cellisten weltweit.

Die schnell wachsende Zahl der Einladungen war kein Zufall: der fast spielerische Stil erhielt sich, aber die Lernprozesse für zunehmenden Tiefgang anhand von Originalliteratur waren enorm und wurden noch intensiviert durch zwei wöchentliche Vorlesungsreihen 1994 und 2000, mit Hörern dann auch von der Musikhochschule Mannheim. In der Vorbereitung psychoakustischer Experimente zeigte sich, dass unsere eigenen Ohren nicht immer das hörten, was die Literatur beschrieb. Das war die beste Motivation für eigene Forschung.

Psychoakustische Tests waren bereits im Hörsaal mit Studenten erfolgt, z.B. das Empfinden von Konsonanz und Dissonanz für Sinustöne. Um 2000 herum kamen wir in Kontakt mit der Gruppe von R. Scherg an der Kopfklinik, die Magnetoenzephalographie (MEG) betreibt, aber natürlich auch Standardmethoden wie MRT nutzt. Im MEG werden die Ströme im Gehirn, die während kognitiver Prozesse auftreten, über die durch sie erzeugten Magnetfelder gemessen. Das MRT misst die lokale Anatomie in der Form der grauen Materie. Der Kontakt führte zu einer mehrjährigen intensiven Zusammenarbeit, die auf der Seite der Klinik später von A. Rupp als Leiter fortgesetzt wurde. Mit den strikten Methoden der Physik hatten wir sehr wohl etwas Eigenes zu bieten.

Im Mittelpunkt der Untersuchungen stand von Beginn an der Heschl-Gyrus, der primäre Hörkortex im Gehirn, in dem die Frühverarbeitung musikalisch relevanter Größen wie Tonhöhe und Klangspektrum stattfindet. Die erste Publikation war die Doktorarbeit von P. Schneider, Physiker und gleichzeitig ausübender Berufsmusiker, der bei uns bereits seine Diplomarbeit in der Psychoakustik gemacht hatte und dann von uns Physikern weiter betreut wurde. Abb. 16 [Nature Neuroscience 5 (2002) 688] zeigt ein überraschendes und völlig unerwartetes Resultat. Für die hier untersuchte P30 Zeitkomponente korrelieren Dipolstärke im MEG und graue Materie im MRT in gleicher Weise mit dem heute weltweit an Konservatorien benutzten AMMA Musikalitätstest von E. E. Gordon. Begabte Berufsmusiker haben offenbar einen

doppelt so grossen Gyrus im P30 Bereich wie nicht-Musiker; Amateure füllen je nach Begabung den ganzen Wertebereich aus. Solch grosse Effekte für den Zusammenhang zwischen subjektiven Grössen (wie Musikalität) und objektiven Messdaten in Hirnarealen sind bisher kaum bekannt. Bemerkenswert: dies ist meine zweitmeist zitierte Veröffentlichung nach dem CERES Resultat 1995.

Die Referees dieser Arbeit stritten mächtig mit uns über die Ursache dieser Korrelation: Begabung vs. Übung. Tatsächlich findet sich für die P30 Komponente keine Korrelation mit der Übungszeit. Sie fand sich in einer späteren Messung um so stärker in der P50 Komponente: ein monotoner Anstieg der MEG Signale mit der Übungszeit bis zu einem Faktor 5 bei Berufsmusikern mit 10h/Tag über die letzten 10a. Amateure wie ich zeigen hier ausschliesslich kleine Signale bei 0-2h/Tag.

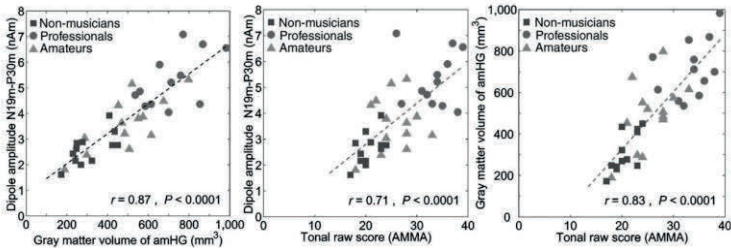


Abbildung 16. Korrelation neurologischer Grössen mit AMMA Test.

Eine andere Veröffentlichung befasst sich mit der Tonhöhen-erkennung. Es ist seit den 30iger Jahren bekannt, dass die Tonhöhe nicht durch den Grundton einer harmonischen Reihe bestimmt ist, sondern allein durch ihre Existenz: Basis der Erkennung von Bass-tönen bei etlichen Musikinstrumenten wie beim Flügel oder bei künstlich beschnittener Tonwiedergabe. Psychoakustische Tests mit unvollständigen Tonkomplexen auch nach oben wie  $n = 3,4,5$  werden entweder mit dem fehlenden Grundton ("Grundtonhörer") oder als höher liegender Tonkomplex ("Obertonhörer") empfunden.



den. Die Häufigkeitsverteilung der beiden Typen hat kein Maximum in der Mitte, sondern Individuen sind vorwiegend das eine oder das andere. Dazu fanden wir mit MEG ein neuronales Korrelat: bei den Grundtonhörern ist der linke Gyrus grösser als der rechte, bei den Obertonhörern umgekehrt, entsprechend einer Zuordnung Tonhöhenenerkennung links, spektrale Erkennung rechts [Nature Neuroscience 8 (2005) 1241]. Die musikalischen Konsequenzen der Sonderrolle harmonischer Reihen und ihrer Verarbeitung reichen vom "basse fondamentale" von Rameau bis, möglicherweise, zur Instrumentenwahl von Berufsmusikern, abhängig vom Hörertyp.

### **Wissenschaftlicher Geschäftsführer der GSI Darmstadt 1992–1999**

Wachsende Erfahrung in der Führung experimenteller Arbeitsgruppen, Mitwirkung in zahlreichen nationalen und internationalen Beratungs-Gremien (oft auch in der Rolle des Vorsitzenden) und andere Umstände brachten auch den Beigeschmack von Wissenschafts-Management. Die erfreulichsten Erinnerungen habe ich an 15 Jahre Award-Ausschuss der A.v. Humboldt-Stiftung, an das erste Board of Directors von ECT\* in Trento unter Leitung von B. Mottelson, an 5+5 Jahre CERN SPC mit der einzigartigen Sitte einer jährlichen Wiedereinladung seit 2000 bis heute, und an den vergnüglichsten Ausschuss von allen: die "LHC Safety Group" des CERN, die die am LHC vielleicht produzierten Schwarzen Löcher und andere Absurditäten zu beurteilen hatte. Relevanter für das Folgende waren eher 4 Gutachter- und 2 Ad-hoc-Ausschüsse des BMFT.

Im Jahre 1992 erwischte es mich jedenfalls voll: ich akzeptierte, wenn auch etwas zögerlich, die Position des Wissenschaftlich-Technischen Geschäftsführers der GSI Darmstadt. Als vorbeugende Massnahme für effektives Management bestand ich darauf, von Anfang an den GF ruhen zu lassen und dafür ein echtes Direktorium a la CERN oder DESY einzurichten, mit Direktoren für Forschung (V. Metag, aus Giessen), für Beschleuniger (N. Angert),

für Infrastruktur (W. von Rüden, vom CERN), und für die Administration (GF H. Zeitträger). Die Effizienz für beste Kommunikation wurde noch weiter verbessert durch Teilnahme der Leitenden Wissenschaftler P. Armbruster, R. Bock und J. Kluge an den Routinesitzungen. Als Vorsitzender war ich so befreit von zu viel Routine, und alles klappte perfekt. Eine weitere Sofortmassnahme war die Aufwertung des Wissenschaftlichen Rats auf Amtssprache Englisch, so dass eine konsequent internationale Besetzung ermöglicht wurde.

Es wurden dann sieben Jahre daraus, bis Herbst 1999, in denen ich geographisch zwischen Heidelberg und Darmstadt und inhaltlich zwischen Management, Physik in Darmstadt und persönlicher Physik in Heidelberg/Genf hin- und herpendelte (letzteres natürlich nur außerhalb der regulären, ohnehin schon randvollen Arbeitszeit). Im Nachhinein, auch in meiner offiziellen Abschiedsrede, habe ich diese sieben Jahre als einen häufigen Seiltanz zwischen Lust und Frust bezeichnet. Zum Bereich der Lust zähle ich natürlich die Wissenschaft, nicht nur die Grundlagenforschung als Kernaufgabe der GSI, in der es eine Fülle von schönen Erfolgen gab wie die Entdeckung der superschweren Elemente 110-112 in 1994-1996 (gekrönt von Ministerbesuchen aus Bonn, auch aus anderen Anlässen). Fast noch mehr interessierten mich einige angewandte Aspekte, in denen gewisse Voraussetzungen bei GSI ebenfalls Einzigartigkeit im weltweiten Maßstab versprachen und die daher höchste Priorität genossen (leider nicht immer unter dem Beifall der Grundlagen-Puristen).

Hier ist vor allem die Strahlentherapie mit beschleunigten Kohlenstoff-Ionen zu nennen, mit der bestimmte wohl-lokalisierte Tumorarten, vor allem im Bereich des Gehirns, die weder operabel noch herkömmlicher Strahlentherapie zugänglich sind, erstmalig einer erfolgreichen Therapie mit langjährigen Überlebenschancen zugeführt werden können. High-Tech Raffinessen wie ein 3-dimensionaler Rasterscan, der eine Bestrahlungsgenauigkeit von mm erlaubt und damit auch Risikoorgane wie Sehnerven oder Hirnstamm in unmittelbarer Nachbarschaft völlig verschont,

waren bereits in Vorbereitung durch G. Kraft und T. Haberer, ergänzt durch ein jahrelanges Forschungsprogramm zum Zell-Verhalten unter Strahlenschäden. Die wichtigste Entscheidung fiel bereits zu Beginn: ein Pilotprojekt mit der Bestrahlung von Patienten auf dem Gelände der GSI selbst. Der offizielle Vorschlag von 100 Seiten dazu, ein Musterbeispiel interdisziplinärer Zusammenarbeit zwischen der GSI, der Radiologischen Klinik der Universität Heidelberg und dem Deutschen Krebsforschungszentrum in Heidelberg, wurde in 8 Monaten nach meiner Ankunft erarbeitet und sah einen eigenen Bestrahlungs- sowie Kontrollraum vor, mit einer Ergonomie fast so wie in der Klinik in Heidelberg. Dem GSI Aufsichtsrat, insbesondere den Vorsitzenden H. Grübel und später H. Schunck, gebührt im Nachhinein allerhöchstes Lob für Ihre Bereitschaft, das Projekt nicht nur zu genehmigen, sondern in der weiteren Unterstützung es fast zu ihrer eigenen Sache zu machen. An den technischen Routine-sitzungen der Hauptakteure nahm ich sehr oft teil, und Top Priorität in der GSI Infrastruktur war unvermeidbar. Die Forschung respektierte das aber, zumal ich mit meiner Entscheidung zugunsten paralleler Strahlen für Therapie und Forschung von Anfang an einen der Grundfehler in Berkeley vermieden hatte. In bester Erinnerung ist mir auch die konstruktive und menschlich warme Zusammenarbeit mit M. Wannenmacher und mit J. Debus, dem lokalen medizinischen Projektleiter und Nachfolger von M. Wannenmacher in Heidelberg. Auch H. zur Hausen unterstützte das Projekt nachhaltig, trotz seiner ganz anders gelagerten Interessen.

So konnte die erste Bestrahlung eines Patienten 1997 stattfinden, und ich zitiere bis heute diesen Tag von der Atmosphäre und der schliesslichen Erfolgsmeldung her als den zweifellos bewegendsten in meinem gesamten Berufsleben. Von 1997-2008, bis lange nach meinem Weggang, wurden insgesamt 450 Patienten erfolgreich bestrahlt. Den Projektvorschlag für die Klinikmaschine HIT in Heidelberg, der *raison d'être* für das Ganze, habe ich Herrn Minister Rütgers anlässlich der Einweihung des GSI

Pilotprojekts 1998 noch persönlich überreicht. Der Rest ist bekannt: von GSI weitgehend gebaut, läuft HIT erfolgreich seit 2009, mit mehr als 4000 Bestrahlungen bis heute. In der Bewertung des Projekts aus heutiger Sicht war es wohl das Nützlichste und Wertvollste, zu dem ich in meinem Leben beitragen konnte, abgesehen von dem wissenschafts-politischen Aspekt, der der GSI ein ungeahnt neues Image bescherte und sicher auch den Weg in die Zukunft ebnete.

Das laufende Forschungsprogramm lebte vom UNILAC und dem unter meinem Vorgänger P. Kienle gerade fertiggestellten SIS18. Über die superschweren Elemente hinaus gab es eine Vielzahl wichtiger neuer Ergebnisse an beiden Fronten. Das Puzzle der berühmt-berüchtigten "GSI Positronen" erledigte sich rasch als Artefakt durch erzwungene Kommunikation zwischen den Gruppen und ausreichende Strahlzeiten. Andere grosse zukunfts-trächtige Projekte jenseits der Tumor-Therapie waren das neue SIS18 Experiment HADES, optimiert auf die Messung von Elektronpaaren in Ergänzung zum reichhaltigen Hadron-Programm, die Teilnahme am künftigen LHC Experiment ALICE zusammen mit der Finanzierungs-Problematik (GSI und BMFT) auch für die deutschen Hochschulgruppen -, und PHELIX, ein Kurzzeit-Hochleistungs-Laser für die Atom-, Kern- und Plasma-physik mit Synergie-Effekten zwischen Schweren Ionen und Laser-Licht, was mich zu einem ausgedehnten Besuch nach Livermoore brachte.

Schliesslich stand trotz des erst 1990/91 angelaufenen SIS18 auch eine Diskussion über die längerfristige Zukunft der GSI an. Im Jahr 1996 wurden dazu 9 international besetzte Arbeitsgruppen gebildet, wo nötig fachlich gemischt zwischen Kern-, Hochenergie- und anderen Physikern mit speziellen Erfahrungen. Die Teilgebiete: tiefinelastische Elektron-Nukleon und Elektron-Kern Streuung, Kernkollisionen bei maximaler Baryondichte, Physik mit Sekundärstrahlen, Kernstruktur-Physik mit radioaktiven Strahlen, Röntgenspektroskopie und Strahlungsphysik, Plasmaphysik mit Schweren Ionen, Beschleunigerstudien Elektron-Nukleon/Nukleus

Kollider und Höchstintensitäten, Hochleistungslaser. Das Resumee bis Ende 1998: 1) Verzicht auf "fremdes Terrain", wo entsprechende Möglichkeiten bei DESY und/oder CERN auf Dauer überlegen schienen; 2) Konzentration auf die GSI Kernbereiche mit weltweiter Einzigartigkeit: Schwere Ionen, neuer Fragment-Separator, verbesserte Speicherringe, Elektron Speicherring, Synchrotron mit 50 TM oder mehr, Akkumulatoring; höchste Luminositäten.

Die Chance existierte, zumindest wichtige Teilschritte bis etwa 2005 zu realisieren. Der WR der GSI empfahl aber 1999 Vertagung auf meinen Nachfolger, sicher in gutem Glauben. Der Rest ist bekannt. Prognose im laufenden Jahr 2017: erster nutzbarer Strahl aus SIS100 2025, 20 Jahre später.

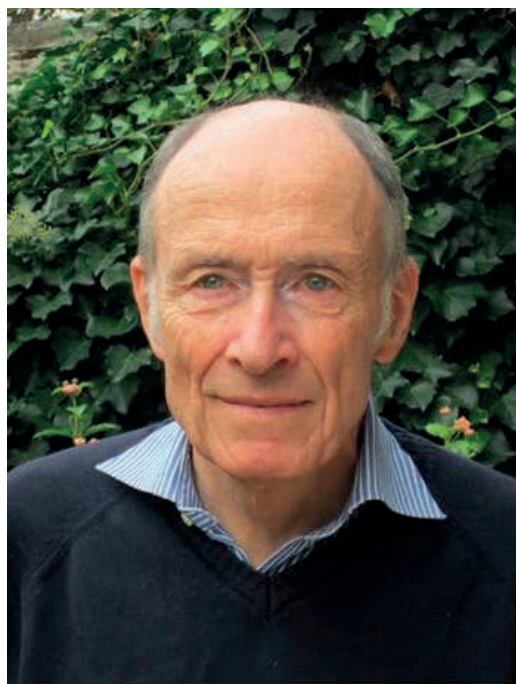
### **Epilog**

Faszination der Vielfalt: das hat noch immer nicht aufgehört. In der Rückschau auf das, was unser Physikerleben ganz unabhängig von den Details der Inhalte ausmachen kann, hat es am schönsten J. Heintze in seinem Emeritus Vortrag 1992 ausgedrückt: "... das hat schon Spass gemacht. Das kann ich Ihnen versichern".

Vortrag gehalten an der Fakultät für Physik und Astronomie der Universität Heidelberg am 28. Januar 2016.



Franz Wegner





# Franz Wegner

Franz Joachim Wegner wurde 1940 in Dessau geboren. Nach dem Schulbesuch in Bayreuth studierte er Physik an der Technischen Hochschule München, wo er 1968 promoviert wurde. Zwischen 1970 und 1974 war er tätig in Garching, der Kernforschungsanlage Jülich, an der Brown University in Providence R.I., USA, und der Universität zu Köln. 1974 kam Herr Wegner als Ordentlicher Professor für Theoretische Physik nach Heidelberg. Forschungssemester führten ihn 1978 an die Universität von Chicago, 1987 an die Ecole Normale Supérieure in Paris und an das Centre d'Etudes Nucleaires in Saclay. Zu den Themen, zu denen er herausragende Beiträge lieferte, gehören die Statistische Physik, insbesondere die Theorie der Phasenübergänge und die Renormierungsgruppentheorie. Nach ihm ist der "Wegner-Exponent" benannt, der Korrekturen zum asymptotischen Skalenverhalten von Phasenübergängen beschreibt. Herr Wegner entwickelte grundlegende gittertheoretische Modelle, deren Methodik auch bei der Simulation der Quantenchromodynamik benutzt wird. In der Mathematik ist die "Wegnersche Ungleichung" für die Spektraltheorie gestörter Systeme bekannt. Wegners Arbeiten wurden mit zahlreichen Auszeichnungen geehrt. Dazu gehören der Walter-Schottky-Preis, die Max-Planck-Medaille und der Lars-Onsager-Preis. Seit 2000 ist er Mitglied der Heidelberger Akademie der Wissenschaften. Herr Wegner wurde 2006 emeritiert. 2016 erschien von ihm das Buch "Supermathematics and its applications in statistical physics".



*Franz Wegner*

## **Phasenübergänge, Renormierung und Flussgleichung**

1940 wurde ich in Dessau geboren. Ende 1944 kam ich mit meiner Mutter nach Kulmbach zu meiner Tante. Mein Vater kam Mitte 1945 nach. Er wusste wohl, dass die Amerikaner nach Bayern kommen und bleiben werden, während Dessau nach anfänglich amerikanischer Besetzung den Russen übergeben würde. 1947 zogen wir nach Bayreuth um. Ich besuchte dort die Oberrealschule, heute Graf-Münster-Gymnasium, und legte 1959 das Abitur ab.

### **Studium**

Im Winter 1959/60 begann ich das Studium der Physik an der Technischen Hochschule München, heute Technische Universität München.

Die Thermodynamik und Statistische Mechanik habe ich dreimal gehört: Im Sommersemester 1961 habe ich die Statistische Mechanik noch bei Gerhard Hettner gehört. Es war das letzte Semester vor seiner Emeritierung. Die Vorlesung umfasste Thermodynamik und klassische Statistik, nur in der letzten Woche Bose- und Fermistatistik. Im Winter darauf waren Wilhelm Brenig und Wolfgang Wild an die Universität gekommen. Bei Wild habe ich im Sommer 1962 die Statistische Mechanik nochmals gehört und gehörte zu den Übungskorrektoren, wobei ich auch meine eigenen Übungen abgab, die von jemand anderem korrigiert wurden. Bei Brenig hörte ich eine richtige Quantenstatistik und leitete die Übungen dazu.

Meine Diplomarbeit *Zum Supraflüssigkeitsmodell für sphärische Atomkerne* fertigte ich bei Brenig an. Die Fragestellung war, ob die damals gängigen Wechselwirkungen für Atomkerne auch die

Stärke der Paar-Wechselwirkung richtig beschreiben, so dass der Grundzustand von Kernen mit geeigneter Nukleonenzahl besser durch einen BCS-Zustand als durch einen Hartree-Fock-Zustand dargestellt wird, da ersterer einen niedrigeren Energie-Erwartungswert ergibt. Dies bewahrheitete sich. Der BCS-Zustand zeichnet sich durch das Auftreten von Paaren von Nukleonen aus. Wie ich später bemerkte, sind es unterschiedliche Kanäle, die dafür verantwortlich sind. Die effektive Wechselwirkung im Teilchen-Teilchen-Kanal, die für die Paar-Bildung verantwortlich ist, muss nicht mit der des Teilchen-Loch-Kanals übereinstimmen.

Die numerischen Rechnungen führte ich anfangs an einer mechanischen Rechenmaschine durch, die allerdings glücklicherweise mit Elektromotor ausgestattet war. Nächstelang saß ich an der Maschine, denn die Durchführung von Rechenoperationen dauerte ganz schön lange. Später konnte ich das Rechenzentrum der TH nutzen, das glücklicherweise im gleichen Gebäude in der Richard-Wagner-Str. untergebracht war. Man musste nur eine Etage tiefer gehen, konnte dann einen Stapel Lochkarten abgeben und hoffen, dass man nach einiger Zeit ein vernünftiges Ergebnis bekam.

Brenig hatte mir eine Doktorarbeit über Dreiteilchen-Anregungen in Kernen vorgeschlagen, also zwei Teilchen und ein Loch oder ein Teilchen und zwei Löcher, ausgehend von einem Kern mit abgeschlossener Schale. Das Thema hat mich im Gegensatz zu dem meiner Diplomarbeit nicht besonders angetan. Ich hätte wohl alsbald etwas sagen sollen; so aber machte meine Doktorarbeit keine Fortschritte. Soviel ich weiß, hat später Peter Schuck auf diesem Thema gearbeitet.

Im Zusammenhang mit meiner Diplomarbeit hatte ich Slater-Integrale auszurechnen. Eine Arbeit habe ich in Nuclear Physics A veröffentlicht. Eine zweite reichte ich bei Zeitschrift für Physik ein. Diese hat mir Jensen mit einem eigentlich sehr freundlichen Brief abgelehnt. Er hat sie nicht abgelehnt, weil sie falsch wäre, sondern weil die Zeitschrift mehr Anwendungen sucht. Allein wie man so etwas auswertet, das sei nicht, was die Zeitschrift sucht. Dies war

für mich wohl insofern ganz gut, als ich mich dann mehr mit physikalischen Inhalten als mit Algorithmen befasste.

### **Kritische Phänomene und Renormierung**

Zu dieser Zeit begann sich Brenig wieder mehr der Festkörperphysik zuzuwenden, darunter auch den kritischen Phänomenen. Hierbei handelt es sich um das Verhalten von Flüssigkeits-Gas-Systemen nahe des kritischen Punkts oder von Ferromagneten nahe der Curie-Temperatur oder auch anderen Systemen mit ähnlichem Verhalten. Bereits 1900 war bekannt, dass die Molekularfeld-Exponenten, entsprechend auch die Vorhersagen der van-der-Waals-Theorie experimentell nicht verifiziert werden konnten. Die van-der-Waals-Gleichung ergibt für die Differenz  $\Delta\rho$  der Dichten unterhalb der kritischen Temperatur  $T_c$  ein Verhalten  $\Delta\rho \propto (T_c - T)^\beta$  mit  $\beta = 1/2$ ; experimentell findet man aber einen Wert für den Exponenten  $\beta$  nahe  $1/3$ . Ähnliches fand man für die spontane Magnetisierung  $m$  von Ferromagneten,  $m \propto (T_c - T)^\beta$ .

Was gab es also an exakten Ergebnissen, die von der Molekularfeldnäherung abwichen? Da war einmal die Lösung des zweidimensionalen Ising-Modells von Lars Onsager. Er fand für die spontane Magnetisierung den Exponenten  $\beta = 1/8$ . Das sphärische Modell zeigt ebenfalls ein abweichendes kritisches Verhalten in drei Dimensionen.

Hochtemperatur-Entwicklungen z.B. für das Ising-Modell erlaubten Abschätzungen kritischer Exponenten, die deutlich näher an den experimentell gemessenen lagen. Die Entwicklungen trugen allerdings wenig zum Verständnis des Verhaltens am kritischen Punkt bei. In Seminaren studierten wir die damals entstandenen Review-Artikel. Dies waren vor allem ein experimenteller von Peter Heller und zwei theoretisch ausgerichtete: einer von Michael Fisher und einer von Leo Kadanoff und neun Mitarbeitern, scherzweise United Nations genannt. Von besonderer Bedeutung erwies sich die Homogenitätshypothese von Ben Widom. Die Homogenitätshypothese besagt, dass die freie Energie (bzw. deren singulärer Anteil) eine homogene Funktion der

Temperaturdifferenz  $\Delta T$  und der Differenz des chemischen Potentials vom kritischen Wert bzw. dem Magnetfeld ist. Das von Leo Kadanoff entwickelte Zellenmodell gibt eine Begründung für diese Hypothese. Sie beschreibt, wie sich die effektive Wechselwirkung unter Änderung der Längenskala verändert, gab aber kein Verfahren zur Berechnung der Exponenten.

Unter der Betreuung von Wilhelm Brenig und Herbert Wagner, der vom Mermin-Wagner-Theorem bekannt ist, schrieb ich meine Doktorarbeit *Zum Heisenberg-Modell im paramagnetischen Bereich und am kritischen Punkt* und promovierte im Juni 1968. Im Wesentlichen habe ich die von Mori, Kawasaki, Resibois und de Leener entwickelte Modenkopplungstheorie auf den Heisenberg-Ferromagneten angewandt. Zunächst war die Idee nur, die Dynamik zu berechnen. Interessanterweise stellte sich heraus, dass man im Rahmen dieser Theorie, die natürlich eine Näherung ist, auch die statischen Korrelationen berechnen kann. Insofern konnte man das Ganze selbstkonsistent durchführen. Die numerischen Rechnungen führte ich an der G3 (21 Kilobyte Speicher) des MPI in München-Freimann durch. Es schlossen sich weitere Rechnungen zur Dynamik am kritischen Punkt von Ferro- und Antiferromagneten an.

Im Anschluss an eine Arbeit von Jasnow und Wortis untersuchte ich mit Eberhard Riedel das Skalenverhalten in (schwach) anisotropen Magneten. Beim Übergang vom anisotropen zum isotropen Ferromagneten ändern sich die kritischen Exponenten sprunghaft. Dies konnten wir erklären, indem wir die Anisotropie als Skalenvariable mit zugehörigem Crossover-Exponenten einführten. Diese Theorie entwickelten wir zunächst für die Statik, erweiterten sie dann auf die Dynamik verschiedener anisotroper ferro- und antiferromagnetischer Systeme.

Ich gebe nun einen kurzen Überblick über meine Wanderjahre:  
Nov. 1964 - Nov. 1966 Verwalter einer wiss. Assistentenstelle an der THM.

Dez. 1966 - Okt. 1968 MPI für Physik und Astrophysik, München.

Nov. 1968 - Sep. 1970 Institut Max von Laue - Paul Langevin, Garching

Okt. 1970 - Dez. 1970 und Feb. 1972 - März 1974 Institut für Festkörperforschung an der Kernforschungsanlage Jülich.

Jan. 1971 - Jan. 1972 Brown University, Providence Rhodes Island

Ungefähr alle zwei Jahre habe ich mich weiterbewegt: Anfangs hatte ich eine Assistentenstelle, genauer gesagt, ich war Verwalter einer Assistentenstelle. Dadurch sparte der Staat zehn Prozent Gehalt. Dann war ich fast zwei Jahre am MPI für Physik und Astrophysik in Freimann, dann am Institut Max von Laue - Paul Langevin in Garching. Dies war eine Dependence des Instituts in Grenoble mit etwa zehn Theoretikern, die dann irgendwann abgeschafft wurde. Ab Oktober 1970 war ich am Institut für Festkörperforschung an der KFA Jülich, von wo ich für ein Jahr an die Brown University beurlaubt war.

1970 hatte ich Gelegenheit, an der "Midwinter Solid State Research Conference" in USA teilzunehmen. Diese war für mich außerordentlich interessant, denn dort konnte ich erstmals all die führenden Wissenschaftler auf dem Gebiet der kritischen Phänomene kennenlernen. Ich erwähne nur Günter Ahlers, George Baker, Richard Ferrell, Michael Fisher, Robert Griffiths, Bertrand Halperin, Peter Heller, Pierre Hohenberg, Leo Kadanoff, David Landau, Paul Martin, Michael Schulhof, Eugene Stanley, Gerard Toulouse, Michael Wortis und Peter Young. Auch Ken Wilson kam noch dazu, der über die Operatorprodukt-Algebra sprach. Ein wesentlicher Diskussionspunkt der Konferenz war, ob die Universalitätshypothese gilt, das heißt die kritischen Exponenten nur von Symmetrie und Dimension des Systems abhängen, aber nicht von Details wie etwa dem Gitter. Diese Hypothese bestätigte sich später. Allerdings kann eine lange Reichweite einer Wechselwirkung wesentlich werden. Zu berücksichtigen bei der damaligen Skepsis ist, dass es für das Gas-Flüssigkeits-System keine exakte Symmetrie für die Dichtedifferenz  $\rho - \rho_c$  gibt, und dass in magne-

tischen Systemen auch die langreichweitige Dipol-Wechselwirkung eine Rolle spielt.

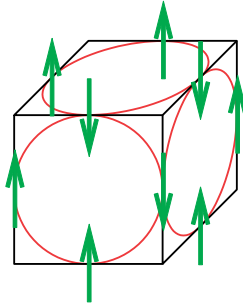
Die Konferenz war für mich auch deshalb interessant, weil ich mich in den USA um eine Postdoc-Stelle beworben hatte. Auf diese Weise konnte ich diejenigen, bei denen ich mich beworben hatte, persönlich kennenlernen. Ich entschied mich, zu Leo Kadanoff an die Brown University zu gehen. Was ich damals nicht wusste, war, dass gerade zu dieser Zeit Kadanoff sich weniger mit kritischen Phänomenen befasste, sondern mit Urban Planning (Städteplanung), also einem ganz anderen Thema. Trotzdem ging er auf alles gerne ein, und es gibt sogar zwei Arbeiten, die wir zusammen erstellten.

Was ich allerdings zunächst dort machte, hatte ich zum Teil schon aus Deutschland mitgebracht. Es ging dabei um die Verallgemeinerung des Dualitätsarguments von Kramers und Wannier für das zweidimensionale Ising-Modell. Sie verglichen eine Hoch- und eine Tieftemperatur-Entwicklung für die Zustandssumme. In beiden Entwicklungen tritt die gleiche Funktion auf. In der Hochtemperatur-Entwicklung ist es eine Entwicklung nach  $\tanh K$ , wobei  $K$  durch  $K = I/k_B T$  gegeben ist.  $I$  ist die Kopplung zwischen Ising-Spins auf Nachbarplätzen eines quadratischen Gitters,  $k_B$  die Boltzmann-Konstante und  $T$  die Temperatur. In der Tieftemperatur-Entwicklung wird nach Potenzen von  $e^{-2K}$  entwickelt. Die Autoren nahmen an, dass die freie Energie nur eine Singularität hat und zwar an der kritischen Temperatur, die dann durch  $\tanh K = e^{-2K}$  gegeben ist. Dadurch konnten sie den kritischen Wert  $K_c = \frac{1}{2} \ln(1+\sqrt{2}) = 0.4407$  bestimmen. Dieser wurde später durch die exakte Lösung von Onsager bestätigt.

Ich stellte mir die Frage, ob man das Dualitätsargument auch auf höhere Dimensionen verallgemeinern kann. Beim dreidimensionalen Ising-Modell fand ich, dass das duale Modell Ising-Spins auf den Kanten der Würfel hat, aus denen sich das Gitter zusammensetzt, wie im Bild gezeigt. Die Wechselwirkung wird als Summe der Produkte der vier Spins auf der Berandung der Quadrate (Plaketten) gegeben. Im Bild sind die vier zu multi-



plizierenden Spins jeweils durch rote Kreise verbunden. Das heißt, dass nun die freie Energie des Plaketten-Modells als Funktion von  $\tanh K$  gleich der freien Energie des Ising-Modells ausgedrückt durch die gleiche Funktion aber von  $e^{-2K}$  ist (abgesehen von trivialen additiven Beiträgen).



Dieses Modell hat eine lokale Eichinvarianz. Ändert man nämlich die Vorzeichen aller Spins auf Kanten, die an eine bestimmte Ecke anstoßen, so ändert man die Vorzeichen zweier Spins in den anstoßenden Plaketten, so dass die Energie erhalten bleibt.

In vier Dimensionen ist dieses Modell selbstdual, das heißt das Modell mit den Plaketten-Wechselwirkungen geht wieder in eines mit Plaketten-Wechselwirkungen über, so dass sich für die kritische Kopplung der gleiche Wert wie für das zwei-dimensionale Ising-Modell ergibt. Numerische Rechnungen von Creutz, Jacobs und Rebbi haben einen Phasenübergang erster Ordnung im Rahmen der numerischen Genauigkeit bei dieser Kopplung bestätigt.

Etwa zwei Jahre später stellte sich heraus, dass vier-dimensionale Modelle dieser Art, bei denen allerdings die Ising-Spins durch  $SU(3)$ -Matrizen ersetzt werden, in der Hochenergiephysik eine wichtige Rolle spielen. Von Null verschiedene Erwartungswerte erhält man für Produkte von Spins auf geschlossenen Linien (bekannt als Wilson-Loops). Je nach Stärke der Kopplung  $K$  fällt der Erwartungswert mit  $e$  hoch minus Umfang oder mit  $e$  hoch minus eingeschlossener Fläche ab. Man findet also zwei

verschiedene Phasen. Man kann die Spin-Wechselwirkung als Wirkung betrachten, grob gesagt als ein über die Zeit integriertes Potential. Dividiert man den Logarithmus des Erwartungswertes durch die Zeitdimension, so erhält man je nach Phase ein endliches effektives Potential oder ein proportional zur Entfernung anwachsendes effektives Potential. Das entspricht der Situation, die man im Quark-Gluon Plasma bzw. in der kondensierten Phase antrifft. Damit stellt das Spin-Modell eine Karikatur dieses Übergangs dar.

Während meines Aufenthaltes an der Brown University gab es zwei sehr interessante Entwicklungen. Zum einen gelang Rodney Baxter die exakte Lösung des Acht-Vertex-Modells. Das Modell ist äquivalent zu zwei zweidimensionalen Ising-Modellen, die durch eine Vier-Spin-Wechselwirkung miteinander gekoppelt sind. Leo Kadanoff und ich hatten Ideen, Baxters Ergebnisse im Limes schwacher Kopplung zu interpretieren (*Some critical properties of the eight-vertex model*).

Im gleichen Jahr erschien Wilsons Näherungs-Lösung für die Renormierung kritischer Spinsysteme. Ihm gelang es, Kadanoffs Zellenmodell in eine Wavelet-Form zu bringen, die erlaubte, die kurzwelligen Spinfluktuationen auszuintegrieren und die Wechselwirkung auf neuer Skala zu berechnen. So konnte er die kritischen Exponenten in drei Dimensionen bestimmen.

Kurze Zeit später zeigten Ken Wilson und Michael Fisher in ihrer berühmten Arbeit *Critical exponents in 3.99 dimensions*, dass die kritischen Exponenten eines  $4-\varepsilon$ -dimensionalen Systems in einer  $\varepsilon$ -Entwicklung berechnet werden können. Dies überzeugte mich sehr, da diese Entwicklung das Ginzburg-Kriterium erfüllt. Es besagt, dass in Dimensionen  $d < 4$  das kritische Verhalten vom Molekularfeld-Verhalten abweicht, während man oberhalb vier Dimensionen das Molekularfeld-Verhalten zu erwarten hat. Man bezeichnet vier als die obere kritische Dimension für diese Systeme.

In der Folgezeit beschäftigte ich mich mit dieser Wilsonschen Renormierungsgruppe und führte Entwicklungen um die Dimension 4 durch. Mit Anthony Houghton untersuchte ich das

Verhalten des  $n$ -Vektor-Modells für große  $n$ . Wir konnten bestätigen, dass man in diesem Limes wie von Eugene Stanley vorhergesagt, das Verhalten des sphärischen Modells erhält. Unsere Arbeit wurde bekannt als *Funktionale Renormierung*, da wir das Potential selbstkonsistent berechneten.

Ich befasste mich aber auch mit der allgemeinen Struktur der Renormierungsgleichungen, insbesondere den Konsequenzen, die sich aus den nichtlinearen Beiträgen ergeben, wie logarithmischen Korrekturen, und den Korrekturen durch irrelevante Operatoren.

Mit Eberhard Riedel (Duke Univ., später Seattle) untersuchten wir Verhalten von Systemen am trikritischen Punkt. Für diesen liegt die obere kritische Dimension bei drei. Dies führt in drei Dimensionen zu logarithmischen Korrekturen zum Molekularfeld-Verhalten.

Zurück an der KFA Jülich in der Gruppe von Herbert Wagner habe ich mich im Dezember 1972 an der Universität zu Köln habilitiert. Meine Habilitationsschrift bestand aus vier Publikationen zur Wilsonschen Renormierungsgruppe

1) *Corrections to Scaling Laws*

2) *Logarithmic Corrections to the Molecular Field Behavior of Critical and Tricritical Systems* (mit Eberhard Riedel)

3) *Critical Exponents in Isotropic Spin Systems*

4) *Critical Exponents for the Heisenberg Model* (mit Morgan Grover und Leo Kadanoff) und einer Zusammenfassung. Den Habilitationsvortrag vor der gesamten Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät hielt ich über die *Hydrodynamik flüssiger Kristalle*, die in Köln obligatorische Einführungsvorlesung über *Phononen-Spektralverteilung in ungeordneten Gittern*.

1973 erhielt ich einen Ruf nach Heidelberg auf eine C4-Professur. Ich wurde vorher einmal von jemandem gefragt, ob ich mich auf eine C3-Professur bewerben möchte. Ich habe Bernhard Mühlischlegel in Köln gefragt, was er dazu meint. Er sagte mir, ich solle keine Zitterbewegungen machen. Ich habe mich dann auf diese Stelle nicht beworben. Der Ruf nach Heidelberg war natürlich etwas anderes. Trotzdem bin ich das etwas leger

angegangen. Das hing damit zusammen, dass mein Fünf-Jahres-Vertrag in Jülich kurz vorher in einen zeitlich unbefristeten umgewandelt wurde. Als ich die Kollegen in Heidelberg kennengelernt hatte, habe ich den Ruf gerne angenommen. Ich erinnere mich noch, dass sich Herr Weidenmüller und Herr Dosch sehr nett um mich gekümmert haben.

Seit April 1974 hatte ich dann mein Dienstzimmer in der schönen Villa Philosophenweg 19, die gerade für die Theoretische Physik, Abteilung Vielteilchenphysik renoviert worden war. Mit Jörg Hüfner, kurz danach auch Heinz Horner, Wolfgang Nörenberg, der an die GSI und nach Darmstadt ging, H. Dieter Zeh und Hans Pirner hatte ich sehr angenehme Arbeitskollegen. Später kam auch Dieter Heermann dazu.

Meine Arbeiten zur Wilson-Renormierung führte ich hier weiter. Insbesondere habe ich auch den Buchartikel *The critical state. General aspects* in Band 6 der Serie *Phase Transitions and Critical Phenomena* von Domb und Green geschrieben.

### **Anderson Lokalisierung und nichtlineares $\sigma$ -modell**

Mein Einführungs-Vortrag in Köln, den ich als einen möglichen Habilitations-Vortrag vorgeschlagen hatte, über die *Phononen-Spektralverteilung in ungeordneten Gittern* hatte mein Interesse an diesem Problem und auch an dem Verhalten von Elektronen in einem ungeordneten Gitter geweckt. Von besonderem Interesse ist dabei das Verhalten in der Umgebung der Mobilitätskante, der Energie  $E_c$ , die lokalisierte und ausgedehnte Zustände trennt. Im Bereich der lokalisierten Zustände ist das System ein Isolator, im Bereich der ausgedehnten metallisch. Dieser Übergang wurde bereits 1958 von Philip Anderson untersucht, war aber in vielen Punkten noch unverstanden. Für wechselwirkungsfreie Elektronen betrachtet man typischerweise ein Tight-binding Modell mit Orbitalen  $|r\rangle$  an Gitterorten  $r$ . Es wird beschrieben durch einen Hamilton-Operator

$$H = \sum_{r,r'} t_{r,r'} |r\rangle\langle r'| + \sum_r V(r) |r\rangle\langle r|.$$

Dabei sind die  $t$  die Hüpff-Matrixelemente zwischen benachbarten Orbitalen und die  $V(r)$  die Diagonal-Elemente, die man zufallsverteilt wählt.

Hierfür entwickelte ich 1976 ein Zellenmodell zur Beschreibung des Verhaltens an der Mobilitätskante (*Electrons in disordered systems. Scaling near the mobility edge*). Hieraus ergab sich das Skalengesetz  $s = (d-2)\nu$  zwischen dem Exponenten  $s$  für die Leitfähigkeit  $\sigma \propto (E - E_c)^s$  und dem Exponenten  $\nu$  für die Lokalisationslänge  $\xi \propto |E - E_c|^{-\nu}$ .

Angeregt durch Eugene Wigners Zufalls-Matrix-Ensembles zur Beschreibung der Energie-Niveaus im Kern übertrug ich seine Idee auf ein Gitter, indem ich an jedem Gitterort  $n$  Orbitale plazierte (*n-Orbital Modell*) und auch die Hüpff-Matrixelemente als Zufallsvariable einführte. Ich begann während eines Sabbaticals 1979 in Chicago (bei Morrel Cohen) damit. Im Limes  $n \rightarrow \infty$  lief dies auf die bereits bekannte coherent-potential Näherung hinaus. Alle Zustände waren ausgedehnt (*Disordered system with  $n$  orbitals per site.  $n = \infty$  limit*).

Interessant wurde das Modell, als ich mit Reinhold Oppermann begann, eine Entwicklung nach Potenzen von  $1/n$  durchzuführen. (*Disordered System with  $n$  Orbitals per site:  $1/n$  expansion*). Es kristallisierte sich heraus, dass 2 die untere kritische Dimension ist, da für  $d \leq 2$  die Integrale divergierten. Unter der Annahme, dass die Theorie renormierbar ist, konnten wir die Exponenten  $s = 1$  und  $\nu = 1/(d-2)$  für reelle und  $s = 1/2$  und  $1/(2(d-2))$  für komplexe Matrix-Elemente  $t$  nahe der unteren Dimension bestimmen.

1979 konnte ich das Modell auf ein System wechselwirkender Matrizen  $Q$  mit  $n = 0$  Komponenten wegen des Replica-Tricks abbilden: das nichtlineare  $\sigma$ -Modell. Nützlich war die lokale Eichinvarianz, die bewirkt, dass nur Korrelationen (Greensche Funktionen) zwischen Orten beitragen, die paarweise nahe beieinander liegen. (*The mobility edge problem: Continuous symmetry and a conjecture*). Damit war der Andersonübergang in die Klasse der konventionellen Phasenübergänge eingeordnet. Dieser Formulierung waren Aharony und Imry bereits sehr nahe. Sie hatten aber

nur die transversalen Komponenten des Modells berücksichtigt und damit seine Symmetrie übersehen. Mit Lothar Schäfer brachten wir die Theorie 1980 in eine Lagrange-Formulierung (*Disordered system with  $n$  orbitals per site: Lagrange formulation, hyperbolic symmetry, and Goldstone modes*).

Eine entsprechende Formulierung mit Grassmann-Variablen gaben 1980 Efetov, Larkin und Khmel'nitskii. Auch bei diesen Rechnungen wurde der Replica-Trick angewandt. Efetov ersetzte diesen 1982 durch eine supersymmetrische Formulierung, die mathematisch besser definiert ist. Mit dem nichtlinearen  $\sigma$ -Modell konnte ich 1980 Exponenten für das inverse Beteiligungsverhältnis und generell für die Erwartungswerte der Potenzen der Wellenfunktion und damit das multifraktale Verhalten bestimmen (*Inverse participation ratio in  $2+\varepsilon$  dimensions*).

Ich erwähne einige weitere Arbeiten: *Bounds on the density of states in disordered systems* 1981. Zweck dieser Arbeit war zu zeigen, dass unter recht allgemeinen Bedingungen die Zustandsdichte innerhalb des Bandes nicht verschwindet. Nebenbei ergab sich eine obere Abschätzung der Zustandsdichte, die von Mathematikern für weitere Abschätzungen geschätzt ist.

Für ein zweidimensionales System im starken Magnetfeld und Zufallspotential lässt sich die Zustandsdichte exakt berechnen (*Exact density of states for lowest Landau level in white noise potential. Superfield representation for interacting systems* 1983). Leider ist dies nur für das unterste Landau-Niveau möglich. Brézin, Gross und Itzykson haben die Berechnung auf andere Verteilungen der Unordnung mit einer supersymmetrischen Technik verallgemeinert.

Für das nichtlineare  $\sigma$ -Modell ist keine obere kritische Dimension bekannt. Daher lassen sich nur Entwicklungen um die untere kritische Dimension durchführen. Drei- und vier-Schleifen-Rechnungen für das nichtlineare  $\sigma$ -Modell in  $2+\varepsilon$  Dimensionen wurden mit Daniel Hoef und Werner Bernreuther durchgeführt.

Die  $2+\varepsilon$ -Entwicklung ergibt Korrekturen zu kritischen Exponenten, die befürchten lassen, dass die zugehörigen Operatoren

relevant werden, also vom Fixpunkt wegführen. Daher untersuchten wir mit Igor Lerner und Herbert Mall die Entwicklung dieser Exponenten für Operatoren mit vielen Gradienten im  $n$ -Vektormodell und nichtlinearen  $\sigma$ -Modellen. Dabei ergab sich keine definitive Antwort. Brézin und Hikami gaben eine andere Interpretation.

Dieses Verhalten gab Anlass, auch das Spektrum der Exponenten für das  $n$ -Vektor-Modell in  $4-\varepsilon$  Dimensionen zu untersuchen. Die Berechnungen mit Stefan Kehrein und Yuri Pismak ergaben jedoch Korrekturen, die die Stabilität des Fixpunkts nicht gefährden.

Eine Klasse von Modellen bekannt als chirale Modelle zeigt in der Bandmitte Singularitäten. Diese wurden 1991 mit Renate Gade untersucht (*The  $n=0$  replica limit of  $U(n)$  and  $U(n)/SO(n)$  models*).

Viele dieser Untersuchungen konnten wir in den 1980er Jahren im Teilprojekt *Ungeordnete physikalische Systeme* des Sonderforschungsbereichs 123 *Stochastische mathematische Modelle* durchführen unter anderem mit John Chalker, Adrianus Pruisken, Angus Mac Kinnon, Reinhold Oppermann, Karl Heinz Hoffmann, Andreas Mielke. Dem SFB gehörte auch Heinz Horner (Spingläser und Hirngespinnste) unter anderem mit Leo van Hemmen, Reimer Kühn und Reinhard Lipowski.

Von 1995 bis 2005 hatten wir das Graduierten-Kolleg *Physikalische Systeme mit vielen Freiheitsgraden* unter anderem mit Stefan Kehrein und Peter Lenz.

An dieser Stelle möchte ich auch kurz meine Sabbaticals und Forschungsaufenthalte erwähnen. An der Brown University in Providence hatte ich vor allem mit Leo Kadanoff, Anthony Houghton, Tom Lubensky und Humphrey Maris Kontakt. An der University von Chicago traf ich Morrel Cohen und Gene Mazenko. In Paris an der Ecole Normale Supérieure und am CEA Saclay konnte ich mit Edouard Brézin, Cyrano de Dominicis, Claude Itzykson und Jean Zinn-Justin diskutieren. An die Universität von Tokyo in Meguro lud mich mehrfach Shinobu Hikami ein.

## Fluss-Gleichungen

Ein weiteres Arbeitsgebiet eröffnete ich mir mit den Flussgleichungen. Ziel ist es, den Hamilton-Operator eines Quantensystems zu diagonalisieren oder in eine Form zu bringen, die Diagonalisierung erlaubt. Ähnlich wie in der kontinuierlichen Form der Renormierungsgruppe geschieht dies nicht in einem Schritt, sondern durch eine kontinuierliche unitäre Transformation, die die Außerdiagonalelemente laufend verkleinert. (*Flow equations for Hamiltonians* 1994).

Ein interessantes Ergebnis erhielt ich mit Peter Lenz 1996 bei der Elimination der Elektron-Phonon Wechselwirkung, die für die Supraleitung wesentlich ist. (*Flow equations for electron-phonon interactions*). Der Hamilton-Operator

$$H = \sum_q \omega_q a_q^\dagger a_q + \sum_k \varepsilon_k c_k^\dagger c_k + \sum_{k,q} M_q (a_{-q}^\dagger + a_q) c_{k+q}^\dagger c_k$$

enthält neben den Phononen der Frequenz  $\omega_q$  und den Elektronen der Energie  $\varepsilon_k$  die Elektron-Phonon-Kopplung der Stärke  $M_q$ . Die Elimination dieser Kopplung ergibt in zweiter Ordnung in  $M_q$  die effektive Wechselwirkung

$$H_{\text{eff}} = \sum_q \omega_q a_q^\dagger a_q + \sum_k \varepsilon_k c_k^\dagger c_k + \sum_{k,k',q} V_{k,k',q} c_{k+q}^\dagger c_{k'-q}^\dagger c_{k'} c_k$$

mit der für die Supraleitung wesentlichen Paar-Wechselwirkung

$$V_{k,-k,q} = -|M_q|^2 \frac{\omega_q}{\omega_q^2 \pm (\varepsilon_{k+q} - \varepsilon_k)^2},$$

wobei sich aus den Fluss-Gleichungen das Plus-Zeichen im Nenner ergibt. Die Wechselwirkung ist also durchgehend anziehend. Zweite Ordnung Störungstheorie wie sie von Herbert Fröhlich durchgeführt wurde, ergibt vergleichsweise das Minus-Zeichen im Nenner und man hat dann mit Händen und Füßen zu argumentieren, dass der anziehende Bereich entscheidend ist und nicht der abstoßende. Es gibt natürlich die anspruchsvollere Eliashberg-Theorie, die das Problem löst. Aber das Flussgleichungs-Verfahren führt auf eine instantane Wechselwirkung und ist so einfach, dass



es in einer einführenden Theoretischen Festkörperphysik-Vorlesung gebracht werden kann.

Das Verfahren haben Mitarbeiter auf viele andere Systeme angewendet, unter anderem Kehrein und Mielke auf das Anderson Impurity-Modell, Kehrein, Mielke und Neu auf das Spin-Boson-Modell, Gubankova und ich auf die QED in der Light-front Dynamik, Grote, Hankevych, KÖrding und ich auf das Auftreten verschiedener Phasen im zwei-dimensionalen Hubbard-Modell. Auch Goetz Uhrig hat sich intensiv mit dieser Technik befasst. Stefan Kehrein hat das Buch *The Flow Equation Approach to Many-Particle Physics* (2006) verfasst.

### Körper, die in allen Richtungen schwimmen

Ein ganz anderes 'Festkörper'-Problem hat mich in den letzten Jahren auch beschäftigt, das aber mehr mathematischer Natur ist, das Problem 19 im Schottischen Buch. In dieses Buch trugen Mathematiker der Universität Lwow (Lemberg) mathematische Probleme ein.

Das Problem 19 wurde von Ulam gestellt und lautet: Ist die Kugel der einzige Festkörper konstanter Dichte, der in jeder Orientierung schwimmen kann?

Das zweidimensionale Problem lautet: Gibt es lange gerade zylindrische Körper von nicht kreisförmigem Querschnitt, die in jeder Orientierung (mit Achse parallel zur Wasseroberfläche) schwimmen können, ohne zu rotieren? Die Lösung dieses Problems für die Dichte  $1/2$  wurde 1938 von Auerbach gefunden. Für andere Dichten fand ich die Lösung 2002-2007 (*Floating bodies of equilibrium*). In Polarkoordinaten  $(r, \phi)$  erhält man die Gleichung für die Berandung

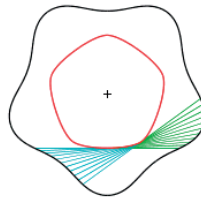
$$\frac{1}{\sqrt{r^2 + (dr/d\phi)^2}} = ar^2 + b + \frac{c}{r^2},$$

die sich auch durch die Krümmung  $\kappa$  der Berandung ausdrücken lässt

$$\kappa = 4ar^2 + 2b.$$

(*Floating bodies of equilibrium in 2D, the tire track problem and electrons in an inhomogeneous magnetic field*). Diese Kurven sind auch Lösungen für zwei andere Probleme: Eines tritt auf im Kriminalroman *The Priory School* von Arthur Conan Doyle, in der Sherlock Holmes und Dr. Watson beim Anblick von zwei Radspuren eines Fahrrads diskutieren, in welche Richtung das Rad fuhr. Das Problem ist: Gibt es außer Kreisen und Geraden Radspuren, denen man nicht entnehmen kann, in welche Richtung der Radler fuhr? Unter der vereinfachten Annahme, dass die Lenksäule senkrecht auf der Ebene steht, auf der das Rad fährt, durchläuft das Vorderrad die (schwarze) Berandungskurve, das Hinterrad die (rote) Einhüllende der Grenzgeraden zwischen Luft und Wasser.

Ein Beispiel wird hier gezeigt:



Zum anderen beschreiben die Berandungskurven die klassischen Trajektorien von Ladungen, die sich senkrecht zu einem parabolischen Magnetfeld bewegen. In einem geeigneten Limes werden diese zu Trajektorien in einem linear anwachsendem Magnetfeld. Diese wurden von Evers, Mirlin, Polyakov und Wölfle in ihrer Arbeit *Semiclassical theory of transport in a random magnetic field* 1999 untersucht.

Für das dreidimensionale Problem habe ich nur Entwicklungen für die Deformation um die Kugel, aber keine geschlossenen Lösungen.

Im April 2006 ließ ich mich emeritieren. Seither bin ich ohne Verpflichtung zu Verwaltungsaufgaben und Vorlesungen, frei für Forschung und Rückblicke.

Ich freue mich, dass ich, angeregt durch die Beschreibung des Anderson Übergangs mit dem nichtlinearen  $\sigma$ -Modell, aber auch

einer ganzen Anzahl anderer Systeme in der Statistischen Mechanik vor Kurzem einen Band in den *Lecture Notes in Physics* (920) über *Supermathematics and its Applications in Statistical Physics – Grassmann Variables and the Method of Supersymmetry* abschließen konnte.

Vortrag gehalten an der Fakultät für Physik und Astronomie der Universität Heidelberg am 14.Juli 2016.



Roland Wielen



# Roland Wielen

Roland Wielen wurde 1938 in Berlin geboren. Nach dem Schulbesuch in Oppeln (Oberschlesien) und Berlin studierte er Physik an der Freien Universität Berlin, wo er 1962 das Diplom in Physik erwarb. Anschließend arbeitete er als wissenschaftlicher Angestellter an der FU, wobei er unter anderem die Rechenanlage dieser Universität betreute. Im Jahr 1963 wechselte er an das Astronomische Rechen-Institut Heidelberg, wo er für die dortige Rechenanlage, die bis 1969 gleichzeitig das Rechenzentrum der Universität Heidelberg bildete, zuständig war. Nach der Promotion (1966) und der Habilitation (1969) im Fach Astronomie an der Universität Heidelberg arbeitete er hier als Privatdozent, apl. Professor und wissenschaftlicher Beamter. 1972 war er vorübergehend an der Sternwarte der Universität Nizza tätig, und im Wintersemester 1974/1975 vertrat er einen Lehrstuhl für Astronomie an der Universität Hamburg. Von 1978 bis 1985 wirkte Herr Wielen als Ordentlicher Professor für Astrophysik an der Technischen Universität Berlin und leitete dort das Institut für Astronomie und Astrophysik. 1985 kehrte er nach Heidelberg zurück, wo er bis zu seiner Emeritierung 2004 als Ordinarius für Theoretische Astronomie und Leiter des Astronomischen Rechen-Instituts tätig war. Zu den wissenschaftlichen Themen, zu denen Wielen wichtige Beiträge geleistet hat, gehören die Leuchtkraftentwicklung der Galaxien, die Dynamik der Sternhaufen und die Helligkeitsverteilung und die Diffusion der Sterne im Milchstraßen-System. Zwischen 1982 und 1985 war Wielen der Präsident der Kommission 33 (Galaktische Struktur und Dynamik) der Internationalen Astronomischen Union (IAU). Seine wissenschaftliche Arbeit wurde unter anderem durch die Benennung des Kleinplaneten 4548 "Wielen" geehrt.





*Roland Wielen*

# **Als Astronom in Berlin und Heidelberg, und das je zweimal**

## **1. Einleitung**

In diesem Beitrag möchte ich Ihnen im Wesentlichen über meinen astronomischen Berufsweg berichten: über meine Tätigkeiten, wo ich gearbeitet habe, und auch über einige Personen, die ich dabei kennengelernt habe.

Mein Leben als Astronom hat sich hauptsächlich in (nur) zwei Städten abgespielt: in Berlin und in Heidelberg. Zwischen diesen beiden Orten habe ich aber zweimal hin und her gewechselt. Ich bin 1938 in Berlin geboren worden, also noch vor dem Zweiten Weltkrieg. In Berlin habe ich studiert und dort auch bereits wissenschaftlich gearbeitet. 1963 bin ich nach Heidelberg gewechselt und war hier 15 Jahre lang als Astronom tätig. 1978 wurde ich als (ordentlicher) Professor nach Berlin berufen und habe dort sieben Jahre bis 1985 an der Technischen Universität und der Freien Universität gearbeitet. 1985 wurde ich dann nach Heidelberg berufen und kehrte hierher zurück. Sie sehen also, wie sich mein doppelter Wechsel zwischen Berlin und Heidelberg abgespielt hat. Auf Zwischenstationen, 1968 in den USA, 1972 in Nizza, und 1974/75 in Hamburg will ich hier nicht näher eingehen.

Meine "astronomische Karriere" begann als kleiner Junge (im Alter von ungefähr 10 Jahren) mit einem Omen oder Vorzeichen, das rückblickend ganz unwahrscheinlich erscheint. Ich wurde nämlich in den Jahren um 1948 zweimal in das Gebäude des Astronomischen Rechen-Instituts in Berlin-Dahlem, Altensteinstrasse 40 (Abbildung 1) zum Abendessen eingeladen. Wie kam es dazu? Das Astronomische Rechen-Institut war 1945 nach Heidel-

berg verlegt worden. Sein Domizil in Dahlem war von der amerikanischen Armee beschlagnahmt worden und wurde von ihr als Offiziers-Kasino genutzt. Nach Kriegsende hatte die amerikanische Regierung die Idee, die deutsche Bevölkerung müsse zur Demokratie und zu westlichen Werten umerzogen werden. Der Fachausdruck dafür war 're-education'. Dazu wurden im amerikanischen Sektor von Berlin u.a. sogenannte 'German Youth Clubs (GYC)' gegründet. In einen dieser Clubs war ich eingetreten. Neben Literatur, Vorträgen und sportlichen Aktivitäten wurden die Mitglieder des Clubs gelegentlich auch zu Abendessen eingeladen, meist in Kasernen, aber eben auch zweimal in das Offiziers-Kasino. Das war natürlich jedesmal eine Sensation für einen Jugendlichen, denn die Jahre von 1945 bis 1950 waren ja Hungerzeiten, insbesondere auch die Blockadezeit in Berlin 1948/49. Ich muß aber gestehen, daß ich den astronomischen Hintergrund des Offiziers-Kasinos damals gar nicht mitbekommen habe. Für mich war das ehemalige Gebäude des Astronomischen Rechen-Instituts kein Tempel der Astronomie, sondern einer der Gastronomie. Erst später, als ich am Astronomischen Rechen-Institut in Heidelberg arbeitete und rückwärts schaute, wurde mir klar, daß ich in dessen altem Gebäude in Dahlem schon gewesen war.



**Abbildung 1.** Gebäude des Astronomischen-Rechen-Instituts in Berlin-Dahlem, erbaut 1911/12. Aufnahme 1966.

Wie bin ich aber wirklich zur Astronomie gekommen? Bei mir wurde das Interesse an diesem Fach durch populär-wissenschaftliche Schriften geweckt. Meine Eltern hatten eine umfangreiche Bibliothek und ein Abonnement für die Zeitschrift "Der Kosmos". Am meisten beeindruckt hat mich das Buch von Bruno H. Bürgel: "Aus fernen Welten. Eine volkstümliche Himmelskunde.", von dem ich noch heute die Ausgabe von 1952 (und die Erstausgabe von 1910) besitze.

Schon als Schüler wurde ich 1954 Mitglied der Wilhelm-Foerster-Sternwarte in Berlin-Schöneberg. Dieser Verein hatte zwar als Hauptziel die Volksbildung. Aber jeden Mittwoch gab es einen Abend-Vortrag, dessen wissenschaftliches Niveau meist sehr hoch war. Der Grund für dieses Niveau war zum großen Teil, so komisch es klingt, "Westgeld". Der Verein konnte als Vortragshonorar bis zu 100 DM (West) bezahlen. Das war schon für einen West-Berliner eine ansehnliche Summe. Noch eindrucksvoller war das Honorar aber für Astronomen aus der DDR. Dort, am Stadtrand von Berlin, in Babelsberg und Potsdam, lagen zwei große Sternwarten. Die Astronomen aus der DDR waren daher sehr daran interessiert, in der Wilhelm-Foerster-Sternwarte einen Vortrag zu halten. Ihr Honorar konnten sie dann entweder für Einkäufe in West-Berlin ausgeben oder es zum Kurs von ca. 1:6 in einer Wechselstube in Ost-Mark umtauschen. Dann entsprach ihr Honorar oft mehr als ihrem ganzen Monatsgehalt in der DDR. Ich habe bei diesen Vorträgen viele Astronomen kennengelernt, u.a. Güntzel-Lingner (später Heidelberg), Jäger, Mattig (später Freiburg), Schröter (später Freiburg), Wempe, Wünschmann. Auch der Leiter des östlichen Teils des Astronomischen Rechen-Instituts, Kahrstedt, der in West-Berlin wohnte, aber in Babelsberg arbeitete und daher nur einen sehr kleinen Teil seines Gehalts in West-Mark erhielt, redete häufiger, z.B. 1956 über "Das Astronomische Recheninstitut -- Ein Stück Geschichte der Berliner Wissenschaft." oder 1957 über "Wenn der Astronom rechnet ... wie das Berliner Astronomische Jahrbuch entsteht". Aufgrund dieser Kontakte wurde ich ab 1956 mehrfach an das Astrophysikalische Obser-

vatorium Potsdam (AOP) eingeladen und erhielt sogar leihweise eine spezielle Platten-Kamera des AOP für Doppelsternaufnahmen. Auch unterstützten mich daher Mitarbeiter des AOP von 1956 bis 1960 bei meinen Bahnbestimmungen einiger visueller Doppelsterne durch Ratschläge und Beschaffung der erforderlichen Beobachtungsdaten aus der Literatur, die in West-Berlin zum großen Teil fehlte.



**Abbildung 2.** R.W. am Bamberg-Refraktor (12 Zoll / 31 cm Objektiv-Öffnung, 5 Meter Brennweite) der Wilhelm-Foerster-Sternwarte, damals noch in der Papestraße. Aufnahme um 1956/57

Da mich die meisten nur als Theoretiker kennen, möchte ich hier ein Bild einflechten, das mich in jungen Jahren am Fernrohr zeigt (Abbildung 2). Meine Spezialität waren zunächst Mikrometer-Messungen der Phasen des Merkur und dann photographische Beobachtungen von visuellen Doppelsternen nach der Methode von Hertzsprung (mit Objektivgitter und relativ engem Filter).

Als Schüler habe ich in der Prima des Gymnasiums eine "Jahresarbeit" (eine Art Mini-Diplomarbeit) über die Bahnberechnung visueller Doppelsterne geschrieben. Das war insbesondere für meine weiter unten geschilderte Zusammenarbeit mit Hertzprung eine gute Vorbereitung.



**Abbildung 3.** Teilnehmer der Tagung der Astronomischen Gesellschaft 1956 in Hannover. R.W. (grüner Pfeil) in der letzten Reihe. Dagegen in der ersten Reihe mit weißer Bluse U.B. (die spätere U.W., roter Pfeil). Neben ihr der Astrophysiker Unsöld aus Kiel (4.v.l.).

Während meiner Schulzeit durfte ich 1956 auch als Gast an der Tagung der Astronomischen Gesellschaft in Hannover teilnehmen, was für mich natürlich außerordentlich wichtig und wissenschaftlich interessant war. Für meine Mitschüler und Verwandten war es dabei allerdings am bemerkenswertesten, daß ich dazu eine Woche schulfrei erhielt. Auf dem Tagungsphoto von 1956 der Astronomischen Gesellschaft in Hannover (Abbildung 3) bin ich ganz zurückhaltend in der letzten Reihe zu sehen. Dagegen wurde das junge Mädchen Ute Bachmann, das damals an der Sternwarte Babelsberg arbeitete und später Ute Wielen wurde, wohl zur Auflockerung des Photos, in die erste Reihe plaziert.

## 2. Studium und erste Tätigkeit in Berlin bis 1963

Vom Sommersemester 1957 ab studierte ich an der Freien Universität Berlin, war aber gleichzeitig Gasthörer an der Technischen Universität. Eigentlich wollte ich ja Astronom werden, aber damals gab es in West-Berlin an den Universitäten kein astronomisches Institut (aber immerhin astronomische Vorlesungen von Hinderer an der FU und von Slevogt an der TU). Ich entschloß mich daher, Theoretische Physik zu wählen. Ordinarius für dieses Fach an der FU war damals Günther Ludwig (1918-2007). Ludwig arbeitete vor allem über die begrifflichen Grundlagen der Quantenmechanik (u.a. den quantenmechanischen Meßprozeß) und über die Grundlagen der Statistischen Mechanik. Ludwig hatte aber auch über die von Pascual Jordan entwickelte "Projektive Relativitätstheorie" gearbeitet. Diese Erweiterung der Einsteinschen Allgemeinen Relativitätstheorie benutzt fünf Dimensionen und ein zusätzliches skalares Feld (in Form einer zeitlich variablen Gravitationskonstanten). An der FU hat diese Untersuchungen der Privat-Dozent und Wissenschaftliche Rat Kurt Just fortgesetzt. Dabei sollten vor allem kosmologische Studien helfen, die Ludwig und Just in einem Drittmittel-Projekt mit dem Titel 'Clustering of Galaxies' ausführten. An diesem Projekt durfte ich nach meinem Vordiplom 1959 mitarbeiten, und dabei auch meine Diplomarbeit über "Zeitliche Leuchtkraft-Änderungen von Galaxien und ihre kosmologische Bedeutung" schreiben.

Manche werden sich über den englischen Titel des Drittmittel-Projekts wundern. Grund war der Drittmittel-Geber, nämlich die U.S. Air Force. Die U.S. Air Force hatte natürlich keine Verwendung für Resultate über die Verteilung von Galaxien am Himmel und über die Struktur von Galaxien-Haufen. Mit derartigen Drittmittel-Projekten wurde aber die Arbeit der FU finanziell unterstützt, damit die FU schneller wissenschaftliches Prestige gewinnen konnte.

Von der Sache her war das Projekt aber auch sehr aktuell. Es waren nämlich gerade viele wichtige neue Daten zum Thema Galaxien-Haufen veröffentlicht worden. Wir benutzten vor allem

den vom Amerikaner George Abell 1957/58 veröffentlichten Katalog von 2712 reichen Galaxien-Haufen ('rich clusters of galaxies'), die er auf den Aufnahmen des Palomar Sky Surveys identifiziert hatte. Ferner standen uns die Galaxien-Zählungen auf der galaktischen Nordkappe zur Verfügung, die aus Aufnahmen des Lick-Observatoriums in kleinen Zähl-Feldern von  $10 \times 10$  Bogenminuten gewonnen worden waren. Alle diese Daten wurden im Institut auf Korrelationen usw. untersucht. Dazu mußte das Material zunächst auf Lochstreifen bzw. Lochkarten digitalisiert und dann in elektronischen Rechenanlagen verarbeitet werden.

Die Arbeit an den Galaxien-Haufen war meine Hauptaufgabe, aber offensichtlich war ich damit nicht völlig ausgelastet. Denn ich benutzte die Computer, mit denen ich arbeiten durfte, zusätzlich für die Bahnbestimmung visueller Doppelsterne. Ich komme damit zu einem Punkt, auf den ich immer besonders stolz bin, nämlich auf meine umfangreiche Korrespondenz und Kooperation mit Ejnar Hertzsprung in den Jahren von 1960 bis 1963.

Hertzsprung (Abbildung 4) hatte ab 1905 das Hertzsprung-Russell-Diagramm entwickelt (Russell hat vor allem an der Daten-Verbesserung und der Deutung des Diagramms mitgearbeitet). In diesem Diagramm wird die Leuchtkraft der Sterne (in Form ihrer absoluten Helligkeit) als Funktion der Oberflächen-Temperatur ("Effektiv-Temperatur") der Sterne (charakterisiert durch ihren Spektral-Typ) aufgetragen. Man erkennt dort z.B. die relativ schmale "Hauptreihe" und bei den kühleren Sternen aufgrund ihrer sehr unterschiedlichen Radien die deutliche Trennung in lichtschwächere "Zwerg-Sterne" und hellere "Riesen-Sterne" (auf dem "Riesen-Ast"). Wer sich auch nur etwas mit Astronomie beschäftigt hat, weiß, daß die Astronomen das Hertzsprung-Russell-Diagramm über alles lieben, ähnlich wie die Kernphysiker die Nuklidkarte oder Chemiker das Periodensystem der Elemente.



**Abbildung 4.** Einar Hertzsprung (1873–1967).

Als ich 1960 in Kontakt mit Hertzsprung kam, war er bereits seit langem ein weltweit legendärer Astronom. Er war damals zwar bereits weit über 80 Jahre alt, aber doch noch sehr geistig rege und aktiv. Man fragt sich sicher nun, was kann einen solchen bedeutenden Mann dazu bewegen, mit einem jungen Studenten im 7. Semester wissenschaftlich zu korrespondieren und zu kooperieren. In der Physik wäre so etwas (damals und wohl auch heute) nur schwer vorstellbar. Der Hintergrund war folgender:

Hertzsprung, der Mitarbeiter von Karl Schwarzschild war, zunächst in Göttingen, ab 1909 in Potsdam, entwickelte am großen Refraktor des AOP eine neuartige Methode zur photographischen Beobachtung von visuellen Doppelsternen (siehe z.B.: "Photographische Messungen von Doppelsternen von 1914.0 bis 1919.4". Publikationen des Astrophysikalischen Observatoriums zu Potsdam, Nr. 75, 1920). Dabei wurden auf einer Photoplatte zahlreiche kurzbelichtete, leicht gegeneinander versetzte Aufnahmen eines Doppelsterns gemacht und später ausgemessen. Man



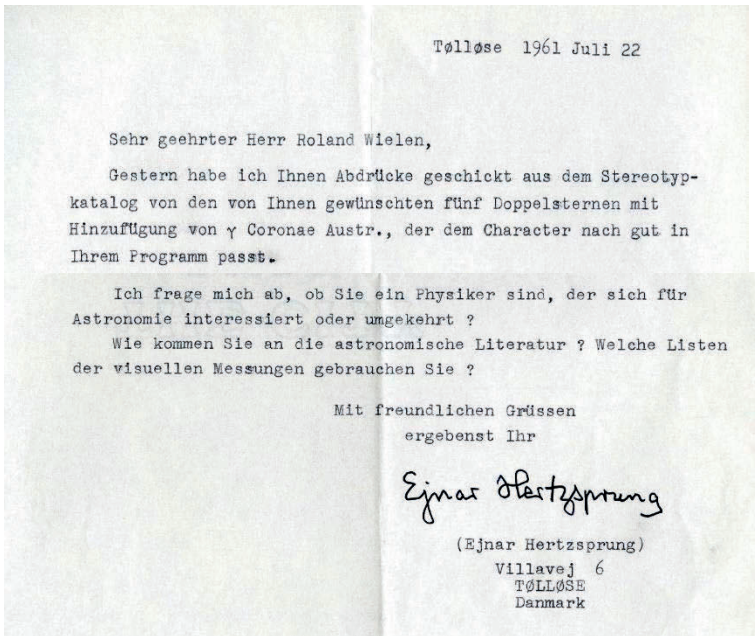
konnte so die Wirkung der Luftunruhe ("seeing") durch Mittelbildung stark vermindern und auch nur die qualitativ guten Bilder ausmessen. Zum Ausgleich der Helligkeitsunterschiede der Komponenten des Doppelsterns wurden verschiedene Objektiv-Gitter angewandt und enge Filter eingesetzt. Insgesamt erreichte man damit eine Meßgenauigkeit der Relativ-Positionen von einigen Millibogensekunden, was außerordentlich gut war und erst viel später, z.B. durch den HIPPARCOS-Satelliten, übertroffen wurde. Nach dieser Methode wurden an zahlreichen Sternwarten, die über große, langbrennweitige Refraktoren verfügten, viele Platten aufgenommen. Wegen des sehr hohen Aufwandes für die anschließende Ausmessung blieben sie aber oft unbearbeitet liegen.

Hertzprung, der seit 1935 Direktor der holländischen Sternwarte in Leiden gewesen war, ging nach seiner Emeritierung 1945 in sein Heimatland Dänemark zurück. In einem kleinen Ort bei Kopenhagen, Tølløse, wohnte er und gründete dort ein kleines Meßlabor, wobei ihn der Stiftungsfond der Carlsberg-Brauerei unterstützte. Zusammen mit Mitarbeitern hat er dort noch über zwanzig Jahre lang zahllose Aufnahmen von Doppelsternen vermessen, die ihm aus aller Welt zugeschickt wurden.

Die älteren Astronomen, die die Bahnrechnungen noch "von Hand" ausführten, konnten diese Flut von neuen Resultaten kaum bewältigen. Daher war Hertzprung froh, daß ich ihm anbot, mit den neuen elektronischen Rechenanlagen in kurzer Zeit viele Doppelstern-Bahnen unter Benutzung seiner Messungen zu berechnen. Außer den Bahnen erhielt Hertzprung von mir riesige Mengen von Computer-Ausdrucken mit "Residuen". d.h. den Abweichungen der einzelnen Beobachtungen von der Ausgleichsbahn. Daraus konnte Hertzprung z.B. schließen, wie gut die Aufnahmen verschiedener Sternwarten wirklich waren und welche die beste Meßmethode war.

Einen Auszug aus einem netten Brief von Hertzprung an mich zeigt Abbildung 5. Am Schluß dieses Briefes fragt er sich, ob ich eher Physiker oder eher Astronom sei. Die Doppelsterne gehörten

ja zur Astronomie, aber meine Anschrift lautete "Institut für Theoretische Physik". Auch wunderte er sich, wie ich in West-Berlin die notwendige Literatur auftrieb. Er wußte ja, daß die nahen Sternwarten in der DDR lagen und daß das Astronomische Rechen-Institut nach Heidelberg verlegt worden war.



**Abbildung 5.** Anfang und Ende des Briefes vom 22. Juli 1961 von Hertzsprung an R.W.

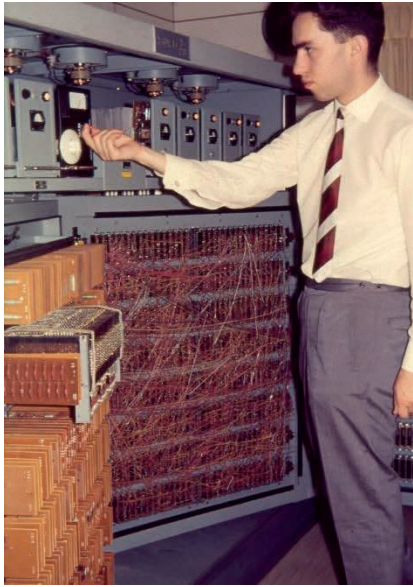
Ich habe damals sehr viele Bahnen von Doppelsternen berechnet. Nur wenige davon konnte ich veröffentlichen. Besonders stolz war ich, daß meine bis dahin größte Publikation 1962 in der renommierten amerikanischen Zeitschrift 'Astronomical Journal', Volume 67, pages 599-607 erschienen ist. Sie trägt den Titel 'Automatic Orbit Computation for Visual Binaries'. Ich hatte sie noch als Student verfaßt.

Da ich sowohl im Galaxien-Haufen-Projekt als auch für meine Bahnrechnungen auf die Benutzung von Computern angewiesen war, wurde ich automatisch ein "EDV-Spezialist", denn man mußte die elektronischen Rechenanlagen nicht nur programmieren, sondern auch noch selbst bedienen. Die erste von mir benutzte Maschine war eine IBM 650, die noch mit Röhren arbeitete. Sie war die größte Berliner Rechenanlage und stand beim Finanzsenator am Fehrbelliner Platz in Wilmersdorf. Dort wurde sie tagsüber benutzt. Vom Abend bis zum nächsten Morgen und sonntags stand sie aber still. Ludwig kam daher auf die Idee, wir könnten sie doch in diesen Zeiten eigentlich gut verwenden. Der Berliner Senat stimmte zu. So kam es, daß ich als Diplomand, unterstützt von meiner späteren Frau, die seit 1959 auch im FU-Institut arbeitete, abends und nachts an der IBM 650 rechneten. Heute würde man so etwas kaum mehr erlauben (wegen Datenschutz, Sicherheit usw.).

1961 bekamen wir dann Zugang zu einer moderneren Maschine, der SIEMENS 2002, die bereits mit Transistoren arbeitete. Die SIEMENS 2002 stand im Hahn-Meitner-Institut für Kernforschung (HMI) in Berlin-Wannsee. Neben dem HMI durften auch die Berliner Universitäten (FU und TU) die Rechenanlage benutzen. Weil es aber an der SIEMENS 2002 Kapazitätsengpässe gab, strebte Ludwig eine eigene Maschine für die FU an.

1962 bewilligte die Deutsche Forschungsgemeinschaft der FU die beantragte Rechenanlage ZUSE Z23. Die Maschine war zwar etwas langsamer als die SIEMENS 2002, aber als erste Zuse-Anlage auch mit Transistoren ausgestattet. Da es außer mir am Institut niemanden gab, der praktische Erfahrungen mit Rechenanlagen hatte, mußte ich als Diplomand (erfreulicherweise aber auch hier wieder zusammen mit meiner späteren Frau) die ZUSE Z23 in Bad Hersfeld, dem Sitz der Firma Zuse, offiziell abnehmen. Dort hat uns Konrad Zuse sehr freundlich betreut und selbst zum Abendessen eingeladen. Nach meiner Diplom-Prüfung im Juli 1962 wurde ich dann ab September als wissenschaftlicher Angestellter sozusagen "amtlich" mit der Aufstellung und Betriebsleitung der ZUSE Z23

der FU in Dahlem in der Ihnestrasse 53 betraut. Abbildung 6 zeigt mich dort vor einem der Schaltschränke der ZUSE Z23.



**Abbildung 6.** R.W. an der Rechenanlage ZUSE Z23 der FU in Dahlem. Der Einschub am linken Rand des Bildes, der etwas hervorsteht, enthält den Ferrit-Kern-Schnellspeicher der Maschine mit 256 Worten zu je 40 bit. Dazu gab es noch einen hier nicht gezeigten langsameren Magnettrommel-Speicher mit 8192 Worten. Photo von Anfang 1963.

Eigentlich wollte ich aber kein EDV-Spezialist, sondern ein "echter" Astronom werden. Ich schaute mich daher um, wo ich denn unmittelbarer in der Astronomie arbeiten könnte. Ich fand dann auch relativ schnell einen Arbeitsplatz am Astronomischen Rechen-Institut und zog Mitte 1963 nach Heidelberg um.

### **3. Tätigkeit in Heidelberg von 1963 bis 1978**

#### **3.1 Berufliche Entwicklung**

Am 1. Juli 1963 begann ich mit meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Angestellter am Astronomischen Rechen-Institut (ARI) in Heidelberg. Das ARI war bis 2004 ein Landesinstitut, das aber eng mit der Universität Heidelberg verbunden war. Der Direktor des Instituts war damals Walter Fricke (1915-1988), der zugleich Ordinarius der Universität war. Da ich in Berlin bereits eine unbefristete Stelle inne hatte, erhielt ich auch am ARI sofort eine Dauerstelle, obwohl ich erst 24 Jahre alt war. Das war damals schon ungewöhnlich und klingt heute natürlich paradiesisch. Später wurde man Beamter mit so schönen Amtsbezeichnungen wie Observator oder Oberobservator.

Bei meiner "Stellenbeschreibung" hatte ich darauf geachtet, daß mein Hauptaufgabengebiet auf die Forschung gerichtet war. Schwerpunkt war die Stelldynamik. Trotzdem habe ich über zehn Jahre lang den Betrieb der Rechananlage im ARI geleitet. Dabei trug ich den Titel "Leiter des Betriebes an der Rechananlage SIEMENS 2002 der Universität Heidelberg". Diese Maschine war die erste Rechananlage der Universität und die Keimzelle des späteren Universitätsrechenzentrums. Diese Aufgabe war vermutlich auch ein wesentlicher Grund für meine Anstellung am ARI, denn die beiden anderen Astronomen, die die Rechananlage im ARI bisher betreut hatten, Sebastian von Hoerner und Peter Stumpff, waren kurz vorher in die USA ausgewandert. Die anderen (meist sehr viel älteren) Kollegen wollten sich nicht im Detail mit der neuen Technik befassen und schon gar nicht für den Betrieb der Rechananlage verantwortlich sein. Insofern war es für Fricke sicher auch ein wichtiger Gesichtspunkt für meinen Start am ARI, daß ich bereits mehrjährige Erfahrung mit Rechananlagen besaß.

Im Februar 1966 promovierte ich mit einer Arbeit über die "Dynamische Entwicklung von Sternhaufen-Modellen". Bereits 1969 konnte ich mich an der Universität habilitieren. Dafür bin ich insbesondere dem Kollegen Soergel sehr dankbar, denn er hat als damaliger Dekan der Naturwissenschaftlich-Mathematischen

Fakultät durchgesetzt, daß ich, zusammen mit einer Reihe anderer Kollegen, 1969 noch schnell habilitieren konnte. Hintergrund waren die Umwälzungen im Zuge der 1968er-Bewegung, die auch an der Universität Heidelberg nicht spurlos vorübergingen. Für die Universität wurde die Einführung neuer Strukturen beschlossen. So sollte die bisherige Nat.-Math. Fakultät in mehrere kleinere Fakultäten aufgespalten werden (u.a. die Fakultät für Physik und Astronomie ab 1970). Dafür mußten aber neue Ordnungen ausgearbeitet werden, und es war unklar, ab wann man nach Ende 1969 wieder habilitieren konnte.

Noch eine Erinnerung an ein schwieriges logistisches Problem bei meiner Habilitation: Es war damals Usus, daß ein Habilitand jeden der ca. dreißig Ordinarien und Extraordinarien der gesamten Nat.-Math. Fakultät (also auch Chemiker, Biologen, Mineralogen usw.) zu einem persönlichen Gespräch von ungefähr einer halben Stunde Dauer aufsuchen mußte, damit sich diese vor der Abstimmung in der Fakultät einen Eindruck von ihm verschaffen konnten. Für mich war es wegen der Kürze der zur Verfügung stehenden Zeit sehr schwer, bei allen kurzfristig einen Termin zu erhalten und die Termine auch noch so zu schachteln, daß sie nicht zu dicht aufeinander folgten, damit nicht der nächste Ordinarius schon völlig ungehalten war, wenn ich mich beim vorherigen Gespräch länger als vorgesehen aufhielt.

Aufgrund der neuen Universitätsstruktur konnte (mußte) man bereits als Privat-Dozent in vielen Gremien mitwirken. So war ich ab 1970 viele Jahre lang gewählter Vertreter der Astronomie-Dozenten in der Fakultätskonferenz, denn vor allem die älteren Kollegen wollten nur ungern an diesen oft überlangen und stürmischen Sitzungen teilnehmen. Es gab damals auch etwas, an das sich heute vermutlich nur noch wenige erinnern werden: Als Zwischenebene zwischen Fakultät und Institute waren "Fachgruppen" eingeschoben worden. Jeder Hochschullehrer gehörte der Fachgruppe seines Faches automatisch an. In den Jahren 1974 und 1975 wurde ich daher sogar Leiter der Fachgruppe Astronomie der Universität. 1974 wurde ich in Heidelberg zum Außerplan-

mäßigen Professor ernannt. Während des Wintersemesters 1974/75 hatte ich an der Sternwarte der Universität Hamburg eine Lehrstuhlvertretung in Astronomie inne, weil der Ordinarius Alfred Behr in dieser Zeit an die Europäische Südsternwarte (ESO) beurlaubt worden war, um die Aufstellung des ESO-Schmidt-Spiegels in Chile von Genf aus zu leiten.

### 3.2 Helligkeits-Änderungen von Galaxien und Kosmologie

Was habe ich nun in Heidelberg wissenschaftlich getan? Eine meiner ersten Tätigkeiten war die Aufarbeitung meiner Berliner Diplom-Arbeit. Dabei ging es um die Berechnung der Änderung der Leuchtkraft von Galaxien aufgrund der inneren Entwicklung ihrer Sterne, und um die Ermittlung der Auswirkung dieser Helligkeitsänderung auf die Herleitung kosmologischer Modelle aus der beobachteten Helligkeits-Rotverschiebungs-Relation von Galaxien.

Ich bin noch heute recht stolz darauf, als Student in erster Näherung eine überraschend einfache (Potenz-)Beziehung zwischen der Leuchtkraft und dem Alter einer elliptischen Galaxie abgeleitet zu haben und deren drastische Auswirkung auf kosmologische Weltmodelle gezeigt zu haben. Wie ich weiter unten beschreibe, wird diese Erkenntnis heute aber leider meist der Amerikanerin Tinsley zugeschrieben.

Als einfachsten Fall betrachten wir eine elliptische Galaxie und nehmen an, daß dort alle Sterne zum gleichen Zeitpunkt, vor ca.  $10^{10}$  Jahren, entstanden sind. Für die Berechnung der gesamten Leuchtkraft  $L(t)$  der Galaxie und ihrer Änderung mit dem Alter  $t$  benötigt man vor allem die Entwicklungswege der Sterne der verschiedenen Massen  $M_*$ , d.h. die stellare Leuchtkraft  $l_*(M_*, t)$  und die Verteilungsfunktion der anfänglichen Stern-Massen, die sogenannte Initial Mass Function (IMF)  $\xi(M_*)$ .  $L(t)$  ist dann das Integral über  $M_*$  des Produktes  $l_*(M_*, t) \xi(M_*, t)$ .

Zunächst hatte ich für die Entwicklungswege  $l_*(M_*, t)$  numerische Daten benutzt. Es gab bereits einige theoretische Rechnungen

dazu, die allerdings die späten Phasen der Sternentwicklung kaum erfaßten. Vollständigere, empirische Entwicklungswege waren aus den Farben-Helligkeits-Diagrammen von Sternhaufen abgeleitet worden. Als IMF wurde damals allgemein die empirische "Salpeter-Funktion"  $\xi(M_*) \propto M_*^{-\beta}$  mit  $\beta = 2.35$  verwendet. Aus all diesen Daten habe ich dann zunächst die Leuchtkraft-Änderung  $L(t)$  der Galaxie durch numerische Integration auf einer Rechenanlage bestimmt.

Das überraschende Ergebnis war, daß die Zeitabhängigkeit der Gesamt-Leuchtkraft  $L(t)$  der Galaxie nahezu unabhängig von den verschiedenen hineingesteckten Entwicklungswegen  $l_*(M_*, t)$  war und meist in guter Näherung einem Potenz-Gesetz folgte,  $L(t) \propto t^\kappa$ . Wie kann man das verstehen? Ich fand folgende Erklärung: Die Entwicklungswege  $l_*(M_*, t)$  verhalten sich in erster Näherung "homolog", zumindest für den relativ kleinen Bereich der Sternmassen von 0.8 bis knapp 3 Sonnenmassen, den man für kosmologische Anwendungen benötigt. Massereichere Sterne haben sich bereits zu Objekten mit relativ vernachlässigbarer Helligkeit (z.B. zu Weißen Zwergen) entwickelt, während masseärmere Sterne sich noch kaum von der Hauptreihe weg entwickelt haben. Formelmäßig bedeutet die Homologie-Annahme, daß man annimmt, daß  $l_*(M_*, t)$  die Form  $l_{*,MS}(M_*) f(t/\tau_{MS}(M_*))$  besitzt. Dabei ist  $l_{*,MS}(M_*)$  die Leuchtkraft des Sterns auf der Hauptreihe ('Main Sequence'). Diese kennt man empirisch als Masse-Leuchtkraft-Relation:  $l_{*,MS}(M_*) \propto M_*^\lambda$  mit  $\lambda \approx 4$ . Die Funktion  $f$  beschreibt die eigentliche Entwicklung des Sterns. Die Zeit  $t$  soll aber hier nur in der skalierten Form als  $t/\tau_{MS}(M_*)$  eingehen, wobei  $\tau_{MS}(M_*)$  die Verweildauer des Sterns auf der Hauptreihe bezeichnet. Die Verweildauer  $\tau_{MS}(M_*)$  ist proportional zu  $M_*/l_{*,MS}$ , denn die Masse  $M_*$  beschreibt den Energie-Vorrat des Sterns, während die Leuchtkraft  $l_{*,MS}$  den zeitlichen Energie-Verbrauch des Sterns darstellt. Mit  $\lambda = 4$  ergibt sich  $\tau_{MS}(M_*) \propto M_*^{-3}$ . Anschaulich bedeutet die Homologie-Annahme, daß die Entwicklungswege der Sterne verschiedener Masse im Hertzsprung-Russell-Diagramm nur parallel entlang der Hauptreihe verschoben sind, sonst aber ihre Form behalten, und



daß die Entwicklungsgeschwindigkeit eines Sterns überall umgekehrt proportional zu seiner Verweildauer  $\tau_{MS}$  auf der Hauptreihe ist, d.h. proportional zur dritten Potenz seiner Masse. Ein Stern von zwei Sonnenmassen durchläuft seinen Entwicklungsweg also z.B. achtmal so schnell wie unsere Sonne.

Bei der Funktion  $f(t/\tau_{MS}(M_*))$  ist wichtig, daß sie nach einer bestimmten Zeit (gemessen in Einheiten von  $\tau_{MS}(M_*)$ ) nahezu auf Null abfällt. Dieses "Verlöschen" von Sternen (als Weißer Zwerg) in Abhängigkeit von ihrer Masse  $M_*$  bewirkt letztlich die Abnahme der Gesamt-Leuchtkraft  $L(t)$  der Galaxie mit zunehmendem Alter  $t$ .

Wenn man die Homologie-Annahme für die Sternentwicklung und die Potenzgesetze für die stellare Leuchtkraft  $l_{*,MS}$  und für die Initial Mass Function  $\xi(M_*)$  benutzt, dann kann man die zeitliche Entwicklung der gesamten Leuchtkraft  $L(t)$  der elliptischen Galaxie analytisch ausrechnen. Man findet

$$L(t) \propto t^{-\kappa} \text{ mit } \kappa = \frac{\lambda - \beta + 1}{\lambda - 1}.$$

Mit den oben genannten Zahlenwerten von  $\lambda = 4$  und  $\beta = 2.35$  erhält man  $\kappa = 0.88$ . Am obigen Resultat ist besonders bemerkenswert, daß die eigentliche Entwicklungsfunktion  $f$  im Endergebnis überhaupt nicht auftritt. Damit wurde verständlich, warum meine numerischen Berechnungen fast immer das gleiche Potenzgesetz ergeben hatten.

Der Astronom arbeitet in der Regel nicht mit der Leuchtkraft  $L$  eines Objektes, sondern mit dessen absoluter Helligkeit  $M = -2.5 \log(L) + \text{const}$ . Für kosmologische Anwendungen ist die zeitliche Ableitung  $\dot{M}$  von  $M$  wichtig, die die relative zeitliche Änderung der Leuchtkraft beschreibt:

$$\dot{M} = \frac{5 \log(e)}{2} \frac{\lambda - \beta + 1}{\lambda - 1} \cdot \frac{1}{t}.$$

In  $\dot{M}$  treten weder die Entwicklungsfunktion  $f$  noch die Proportionalitätskonstanten, die die absoluten Werte der Zeitskala  $\tau_{MS}(M_*)$  beschreiben, auf. Auch die Gesamtmasse der elliptischen Galaxie hat keinen Einfluß auf  $\dot{M}$ . Man benötigt (neben  $\lambda$  und  $\beta$ )

nur das Alter  $t$  der Galaxie. Zum Beispiel sollte eine Galaxie im Alter von  $10^{10}$  Jahren ihre absolute Helligkeit  $M$  um  $+0^m.096$  pro  $10^9$  Jahre ändern. Diese relativ klein erscheinende Änderung hat aber sehr starke kosmologische Auswirkungen.

Kosmologische Weltmodelle wurden damals eindeutig durch die heutige Hubble-Konstante  $H_0$  und durch den heutigen Abbremsungsparameter  $q_0$  festgelegt, weil man die Kosmologische Konstante  $\Lambda$  von vornherein null setzte. Der Parameter  $q_0$  ist definiert als  $q_0 = -\ddot{R} R / \dot{R}^2$ , wobei  $R(t)$  der Weltradius ist. (Heute würde man statt  $q_0$  eher den Dichteparameter  $\Omega_0 = \rho_0 / \rho_{\text{crit},0} = 2q_0$  verwenden). Ein räumlich flaches Universum entspricht  $q_0 = 1/2$  ( $\Omega_0 = 1$ ). Größere Werte von  $q_0$  bedeuten ein positiv gekrümmtes Weltall, kleinere Werte eine negative Raumkrümmung. Den Parameter  $q_0$  kann man am direktesten aus der beobachteten Beziehung zwischen der scheinbaren Helligkeit  $m$  und der Rotverschiebung  $z$  von Galaxien bestimmen. Zunächst nahm man an, daß die hellsten Galaxien in Galaxienhaufen als eine Art "Standard-Kerzen" überall und immer die gleiche absolute Helligkeit besitzen würden. Die Auswertung der beobachteten Helligkeits-Rotverschiebungs-Relation durch W. A. Baum (1957 und 1962) ergab dann  $q_0 = 1.0$ , also ein positiv gekrümmtes, später in Kontraktion übergehendes Universum.

Wenn man aber die beobachteten Helligkeiten der Galaxien für den oben abgeleiteten zeitlichen Entwicklungseffekt  $\dot{M}$  korrigiert, ändert sich das Resultat drastisch. Aus einer Reihenentwicklung der Helligkeits-Rotverschiebungs-Relation um den heutigen Zeitpunkt  $t_0$  kann man die entsprechende Korrektur von  $q_0$  analytisch ableiten:

$$\Delta q_0 = q_0^{\text{korr}} - q_0^{\text{unkorr}} = -(2 / (5 \log(e))) \dot{M}(t_0) / H_0 = -\kappa / (t_0 H_0) \cdot$$

Wenn man als maximales Alter  $t_0$  der Sterne der Galaxie die reziproke Hubblekonstante  $1/H_0$  ansetzt (also  $t_0 H_0 = 1$  annimmt), erhält man als minimale Korrektur  $\Delta q_0 = -\kappa \approx -0.9$ . Bringt man diese Korrektur an  $q_0^{\text{unkorr}} = 1.0$  an, dann ergibt sich  $q_0^{\text{korr}} = 0.1$ . Die Berücksichtigung der Leuchtkraft-Änderung der Galaxien

lieferte also ein stark negativ gekrümmtes, nahezu ungebremst expandierendes Weltall.

Die obigen Resultate habe ich 1964 in der Zeitschrift für Astrophysik (ZfA), Band 59, Seite 129-135 veröffentlicht ("Zeitliche Helligkeitsänderungen von elliptischen Galaxien"). Leider konnte die Arbeit nur auf Deutsch erscheinen, weil Unsöld als Herausgeber der Zeitschrift darauf bestand, daß deutschsprachige Autoren dort nur auf Deutsch publizieren. Schon mein englisches Abstract wurde kritisch betrachtet. Dadurch wurde meine Arbeit natürlich weniger gelesen. Der "Papst" auf diesem Gebiet, der Amerikaner Alan Sandage, hat sie zwar zitiert, aber insgesamt blieb die Resonanz enttäuschend.

Umso erstaunter war ich, als 1972 im *Astrophysical Journal* (ApJ), Vol.173, p. L93-L97 eine Veröffentlichung von Beatrice M. Tinsley erschien, die in den USA arbeitete. Die Arbeit trug den Titel: 'A First Approximation to the Effect of Evolution on  $q_0$ '. Darin wurde exakt meine schöne alte Potenz-Gleichung für  $L(t)$  abgeleitet und naturgemäß eine sehr ähnliche Schlußfolgerung für den wahren Wert von  $q_0$  gezogen. Tinsley hat sich nach dem Erscheinen ihrer Arbeit in einem Brief bei mir entschuldigt, weil sie meine Arbeit übersehen hatte. Sie hat dann zwar in ihren folgenden Arbeiten auf meine früheren Untersuchungen hingewiesen. Trotzdem wird heute in der Literatur meist die Arbeit von Tinsley zitiert, vermutlich weil die meisten eben besser Englisch als Deutsch verstehen. Natürlich war es enttäuschend, daß mein "großer Wurf" nicht die Resonanz fand, die ich mir erhofft hatte. Andererseits war es sehr ermutigend zu sehen, daß die Resultate meiner Diplomarbeit von 1962 und meiner ZfA Veröffentlichung von 1964 im Jahre 1972 (also ca. 10 Jahre später) indirekt für so aktuell und wichtig angesehen wurden, daß eine analoge Arbeit sogar in die bevorzugt erscheinenden 'Letters' des ApJ aufgenommen wurde.

Aufgrund der starken und natürlich auch recht unsicheren Entwicklungskorrektur, bei der man heute auch noch die Verschmelzung von Galaxien ('Merger') berücksichtigen muß, hat die Helligkeits-Rotverschiebungs-Relation für Galaxien heute ihre

kosmologische Aussagekraft weitgehend verloren. Für andere Objekte ist die Helligkeits-Rotverschiebungs-Relation aber wieder kosmologisch nutzbar geworden und ist eine wichtige Stütze des sogenannten Standard-Modells der Kosmologie. Dabei werden als "Standard-Kerzen" nicht Galaxien, sondern Supernovae vom Typ Ia verwendet.

### **3.3 Numerische $N$ -Körper-Experimente und die Auflösungszeiten offener Sternhaufen**

Mein Hauptarbeitsgebiet in Heidelberg war aber für viele Jahre die Untersuchung der Entwicklung von Sternhaufen. In sogenannten numerischen  $N$ -Körper-Experimenten verfolgt man auf dem Computer die zeitliche Entwicklung einer Ansammlung von  $N$  Massenpunkten, die Sterne darstellen sollen, durch die numerische Integration der einzelnen Sternbahnen. Für höhere Werte von  $N$  ist das sehr aufwendig in Bezug auf Rechenzeit, weil die Anzahl der gravitativen Wechselwirkungen mit  $N^2$  anwächst. Man mußte daher spezielle Integrationsverfahren entwickeln, die u.a. zeitlich variable und von Stern zu Stern verschiedene ("individuelle") Integrations-Schrittweiten benutzen. Um die Experimente möglichst realistisch zu gestalten, werden z.T. auch weitere Effekte berücksichtigt: z.B. Massenspektrum der Sterne, Massenverlust der Sterne in späteren Entwicklungsstadien, Gezeitenfeld der Galaxis und Störungen durch vorbeifliegende interstellare Wolken. Als stationären Anfangszustand des Haufens benutzt man heute oft das "Plummer-Modell" (so wie ich es bereits ab 1963 tat).

Pionier auf dem Gebiet der  $N$ -Körper-Experimente war Sebastian von Hoerner, der bis Ende Oktober 1962 am ARI tätig war, dann aber in die USA übersiedelte. Er hatte um 1960 bis zu  $N = 16$  Sterne verfolgen können, etwas später bis zu  $N = 25$ . Ich erreichte um 1965 bereits  $N = 100$  und um 1972  $N = 500$ . Heute erlaubt die verbesserte Computertechnik die direkte Simulation von Kugelsternhaufen mit über  $10^5$  Sternen.

Die Ergebnisse der  $N$ -Körper-Experimente kann man z.B. mit anderen theoretischen Vorhersagen vergleichen. Auf der Basis der Fokker-Planck-Gleichung für Zwei-Körper-Wechselwirkungen war dabei vorausgesagt worden, daß die zentrale Dichte eines Sternhaufens nach endlicher Zeit (wenigen Relaxationszeiten) unendlich groß wird und damit eine "gravothermische Katastrophe" eintreten würde. Von realen Sternhaufen wußte man zwar bereits, daß das so nicht stimmen kann. Aber erst die Experimente haben den Ausweg gezeigt: Es bilden sich im Zentrum des Haufens enge Doppelsterne, die erstens potentielle Energie speichern und zweitens durch Drei-Körper-Wechselwirkungen andere Sterne so stark beschleunigen, daß der restliche Sternhaufen sogar in Expansion übergeht. Ein Beispiel für einen Vergleich findet man in der Arbeit von S. Aarseth, M. Hénon und R. Wielen von 1974 ('A comparison of numerical methods for the study of star cluster dynamics', *Astronomy and Astrophysics* Vol. 37, p. 183).

Bei meinen Untersuchungen zur dynamischen Entwicklung von Sternhaufen kam ich in engeren Kontakt mit dem französischen Astronomen Michel Hénon (1931-2013), der am Observatoire de Nice arbeitete. Hénon war damals einer der führenden Stellardynamiker. Er hat aber auch auf dem Gebiet der Himmelsmechanik gearbeitet und kam von daher zur Chaos-Theorie. Heute ist er als Chaos-Forscher weit bekannter als als Astronom. Nach ihm sind z.B. der Hénon-Attraktor und das Hénon-Mapping benannt. Für seine Arbeiten zur Chaos-Theorie hat Hénon 1978 den Prix Jean Ricard der Französischen Physikalischen Gesellschaft erhalten.

Hénon hat mich 1972 zu einem halbjährigen Forschungsaufenthalt an das Observatoire de Nice eingeladen, der wissenschaftlich sehr erfolgreich war. Obwohl ich in Nizza ganz überwiegend vom Observatoire de Nice als französischer Beamter ("fonctionnaire") besoldet wurde, hat das für mich zuständige Ministerium meinen Wunsch auf unbezahlte Beurlaubung an die Côte d'Azur und insbesondere auf Anerkennung "des dienstlichen Interesses und der öffentlichen Belange" (wichtig für das Weiter-

laufen der Dienstzeit als Beamter) sehr kritisch hinterfragt und erst bewilligt, als ich zustimmte, davon wenigstens einen Monat als deutschen Erholungsurlaub gelten zu lassen. Wer die herrliche Lage der Sternwarte auf dem Mont Gros kennt, direkt oberhalb von Nizza, mit Blick auf die schneebedeckten See-Alpen einerseits und das Mittelmeer andererseits, kann dies wohl sogar nachvollziehen.



**Abbildung 7.** Michel Hénon 1972 in seinem Arbeitszimmer auf der Sternwarte in Nizza.

Die numerischen Experimente mit Sternhaufen können auch zur Deutung von Beobachtungen an realen Sternhaufen herangezogen werden. In meiner Habilitationsschrift von 1969 und in einer folgenden Publikation von 1971 hatte ich aus der beobachteten Altersverteilung offener Sternhaufen abgeleitet, daß sich die Hälfte aller dieser Sternhaufen in weniger als  $2 \cdot 10^8$  Jahren auflösen. 10% der Haufen leben länger als  $5 \cdot 10^8$  Jahre, und nur 2% länger als  $1 \cdot 10^9$  Jahre. Diese gegenüber dem Alter der Milchstraße von über  $10^{10}$  Jahren sehr kurzen Auflösungszeiten ("Verdampfungs"-Zeiten) offener Sternhaufen kann man mit Hilfe der in

den  $N$ -Körper-Experimenten beobachteten Ausreißer-Raten quantitativ erklären. Für den zusätzlichen Auflösungs-Effekt durch den Vorbeiflug interstellarer HI- und Molekül-Wolken muß man allerdings analytische Resultate hinzuziehen, weil der hochgradig stochastische Effekt der Wolken-Passagen sehr viele Experimente und damit sehr hohe Rechenzeiten erfordern würde.

### **3.4 Dichtewellen-Theorie der Spiralstruktur von Galaxien**

Nachdem die Grundlagen der gravitativen Deutung der Spiralstruktur von Galaxien in Form der Dichtewellen-Theorie durch Lindblad, Lin (und seine Mitarbeiter), Toomre u.a. gelegt worden waren, habe ich mich seit 1968 bemüht, einige eigene Beiträge zur Anwendung dieser Theorie zu liefern. Vor allem aber habe ich 1970 einen ausführlichen Übersichtsartikel zu dieser Theorie auf Deutsch veröffentlicht. Der wurde zwar von vielen sehr gelobt, aber wegen seiner Sprache weltweit kaum gelesen. Erst als der Artikel dem amerikanischen Astronomen Ivan King besonders gut gefiel, erhielt ich die Einladung, eine neue Version in Englisch als 'Invited Review' in der vielgelesenen Zeitschrift "Publications of the Astronomical Society of the Pacific" (Vol. 86 (1974), p. 341) zu publizieren ("Density-Wave Theory of the Spiral Structure of Galaxies"). Danach kannten mich lange Zeit sehr viel mehr amerikanische Astronomen aufgrund dieses einzelnen Reviews als wegen aller meiner Originalarbeiten zusammen! Selbst auf einer Tagung im sibirischen Irkutsk 1976 wurde ich von sowjetischen Kollegen primär auf diesen Review angesprochen.

### **3.5 Leuchtkraft-Funktion sonnennaher Sterne**

Das Astronomische Rechen-Institut war bereits damals weltweit das Zentrum für die Katalogisierung sonnennaher Sterne. Ein älterer Kollege, Wilhelm Gliese (1915-1993), sammelte sonnennahe Sterne und ihre Daten mit großer Leidenschaft. Da er aber mit Computern nicht vertraut war, mußte ich vieles für ihn berechnen, z.B. die Geschwindigkeits-Komponenten der Sterne in galaktischen

Koordinaten. Dadurch hatte ich guten Zugang zu den Daten und konnte sie mit als Erster auswerten.

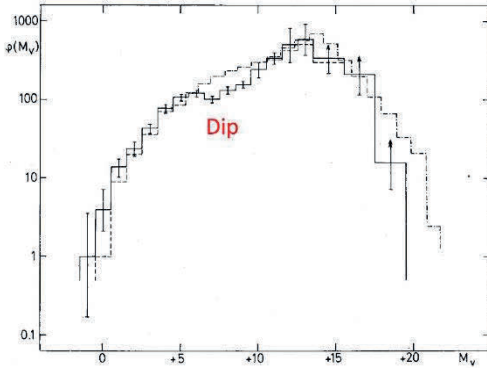


Fig. 1. Luminosity function  $\varphi(M_V)$ . Full line: total  $\varphi$ ; dashed line:  $\varphi$  for stars on or near the main sequence; dashed-dotted line: Luyten's  $\varphi$  (1968).

**Abbildung 8.** Die Leuchtkraft-Funktion der sonnennahen Sterne (aus Wielen (1974)).

Eines meiner Resultate betraf die Leuchtkraft-Funktion sonnennaher Sterne. Sie gibt die Anzahl der Sterne, z.B. innerhalb eines Radius von 20 parsec um die Sonne, als Funktion ihrer absoluten Helligkeiten  $M_V$  an (Abbildung 8). Nur in unmittelbarer Sonnennähe kann man die Leuchtkraft-Funktion bis hinab zu den lichtschwächsten Zwerg-Sternen nahezu vollständig bestimmen. Die sonnennahen Sterne, zumindest die mit Massen unter einer Sonnenmasse (d.h. mit absoluten Helligkeiten  $M_V > +5^m$ ), sind eine sehr gute Mischung von Sternen der gesamten Galaxis, sozusagen ein "Fingerhut voll Milchstraße". Ihre Leuchtkraft-Funktion wird meist sogar auch für andere Galaxien als repräsentativ angesehen.

Während man früher glaubte, daß die Leuchtkraft-Funktion einen relativ glatten Verlauf aufweist, fand ich (Abbildung 8), daß für Sterne, die etwas schwächer als die Sonne sind (mit  $M_V$  zwischen ca.  $+6^m$  und  $+9^m$ ), eine leichte Senke auftritt. Im



Englischen heißt eine solche Senke ein 'Dip'. Ein amerikanischer Kollege, John N. Bahcall, der die Astrophysik-Abteilung des Institute for Advanced Study in Princeton leitete und vielen Physikern besonders durch seine Arbeiten zur Neutrino-Astrophysik bekannt ist, bezeichnete dieses Phänomen als 'Wielen Dip'. Als solches ist es sogar in Lexika aufgenommen worden (Abbildung 9). Manchmal muß ich aber Unkundige aufklären, daß der "Wielen-Dip" keine spezielle Grill-Soße ist!

The image shows a screenshot of the Oxford Index website. At the top, the logo 'Oxford Index' is displayed in blue and green, followed by the tagline 'A Search and Discovery Gateway'. To the right of the logo is a search input field. Below the logo, there are two dropdown menus: 'Language' and 'My Co'. The main content area has a grey header with the word 'OVERVIEW' in small letters and 'Wielen dip' in a larger, bold font. Below this, there is a section titled 'QUICK REFERENCE' in all caps. The text in this section reads: 'A feature of the luminosity function of stars. Instead of rising steadily towards fainter absolute magnitudes, the number of stars increases little between absolute magnitudes 6 and 9. This feature may provide a clue to the formation of stars of different masses, but its full significance is not yet understood. It is named after its discoverer, the German astronomer Roland Wielen (1938- ).' At the bottom of the screenshot, there is a line of text: 'From: Wielen dip in A Dictionary of Astronomy »'.

**Abbildung 9.** Der 'Wielen Dip' in einem Lexikon (© Oxford Dictionary of Astronomy)

### 3.6 Geschwindigkeits-Dispersion der Sterne, Diffusion der Sternbahnen und der Entstehungsort der Sonne

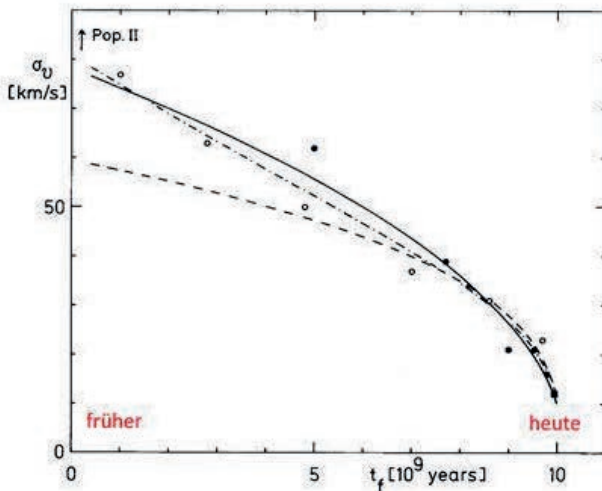
Eine geeignete, repräsentative Auswahl von sonnennahen Sternen und von Cepheiden erlaubte eine deutlich verbesserte Bestimmung der Geschwindigkeits-Dispersion  $\sigma(\tau)$  der Sterne als Funktion des Alters  $\tau$  der Sterne. Die Geschwindigkeits-Dispersion  $\sigma$  beschreibt im Wesentlichen, wie stark typischerweise die Raumgeschwindigkeit des Sterns einer Alters-Gruppe von der lokalen Kreisbahn-Geschwindigkeit in der Galaxis abweicht. Die ältesten Sterne weisen die höchsten Abweichungen, die jüngsten die

geringsten  $\sigma$ -Werte auf. In der Abbildung 10 ist  $\sigma$  als Funktion des Entstehungszeitpunktes  $t_f$  (time of formation,  $t_f = 10^{10}$  Jahre  $-\tau$ ) aufgetragen. Dann fällt besonders auf, daß  $\sigma(t_f)$  sehr steil zum heutigen Zeitpunkt  $t_f = 10^{10}$  Jahre bzw.  $\tau = 0$  abfällt, während  $\sigma(t_f)$  für die alten Sterne viel langsamer variiert.

Woher kommt dieser Effekt? Aus dem beobachteten Verlauf von  $\sigma(t_f)$  habe ich geschlossen, daß  $\sigma(t_f)$  nicht die Geschwindigkeits-Dispersion zum Entstehungszeitpunktes  $t_f$  der Sterne darstellt. Denn dann wäre heute ein bevorzugter Zeitpunkt, wo  $\sigma$  gerade gegen null konvergiert. Vielmehr entstehen die Sterne in der Scheibe der Milchstraße mit geringer Geschwindigkeits-Dispersion (d.h. mit einer Abweichung von wenigen km/s von der lokalen galaktischen Kreisbahn-Geschwindigkeit) aus dem interstellaren Gas, das vermutlich stets geringe  $\sigma$ -Werte aufgewiesen hat. Anschließend werden die Bahnen der Sterne ständig gravitativ gestört und ihre Geschwindigkeiten weichen dann im Durchschnitt mit zunehmendem Alter  $\tau$  immer stärker von der Kreisbahn Geschwindigkeit ab, d.h.  $\sigma(\tau)$  wächst mit  $\tau$  an. Einen solchen Prozeß hatten bereits L. Spitzer und M. Schwarzschild 1951 und 1953 vorgeschlagen. Ich habe diesen Vorgang die "Diffusion von Sternbahnen (Diffusion of Stellar Orbits)" genannt.

Bis heute ist die genaue Ursache für die gravitativen Störungen der Sternbahnen nicht bekannt. Vermutet werden z.B. massive Molekülwolken-Komplexe, von ihnen oder durch Instabilitäten verursachte Dichtefluktuationen in der galaktischen Scheibe, aber auch Resonanzerscheinungen in der Scheibe. Weil man den genauen Stör-Mechanismus nicht kennt, erschien es mir sinnvoll, den Diffusions-Koeffizienten, der die Diffusion der Sternbahnen mathematisch beschreibt, empirisch aus der beobachteten  $\sigma(\tau)$ -Relation zu bestimmen. Mit dem so bestimmten Diffusions-Koeffizienten kann man dann auch die Diffusion der Sterne und ihrer Bahnen im Ortsraum berechnen. Dabei ergibt sich insbesondere, daß sich der Abstand  $R$  eines Sterns vom galaktischen Zentrum im Laufe der Zeit durch die Diffusion deutlich ändern kann (radiale Migration der Sterne in unserer Milchstraße und

daher vermutlich auch in anderen Galaxien). Zum Beispiel konnte ich berechnen, daß der heutige  $R$ -Wert derjenigen Sterne, die so alt wie die Sonne sind, sich im (quadratischen) Mittel um ungefähr 2 kpc gegenüber ihrem galaktozentrischen Abstand bei ihrer Entstehung verändert hat.

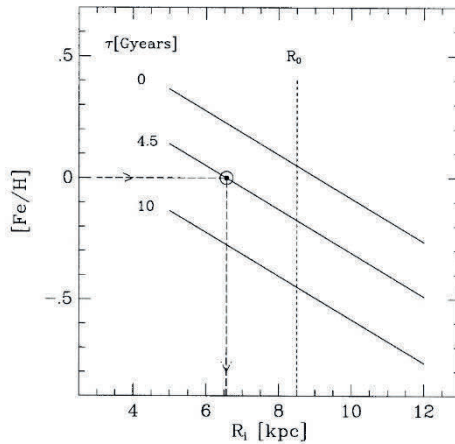


**Fig. 1.** Total velocity dispersion  $\sigma_v$  as a function of the time of formation  $t_f$ . Symbols: observed values. Curves: Theoretical fits based on different diffusion coefficients  $D$ . Full curve: constant  $D$ ; dashed curve: velocity-dependent  $D$ ; dash-dotted curve: velocity-time-dependent  $D$ .

**Abbildung 10.** Die galaktische Geschwindigkeits-Dispersion  $\sigma$  von Sternen als Funktion der Entstehungszeit  $t_f$  der Sterne (bzw. ihres Alters  $\tau = 10^{10}$  Jahre -  $t_f$ ). Aus Wielen (1977).

Die hier geschilderte Arbeit wurde 1977 veröffentlicht (R. Wielen: "The Diffusion of Stellar Orbits Derived from the Observed Age-Dependence of the Velocity Dispersion." Astronomy and Astrophysics, Vol. 60, p. 263). Von allen meinen Arbeiten wird sie am

häufigsten zitiert. Das bibliographische System ADS der NASA, das weltweit alle astronomischen Arbeiten enthält, verzeichnet bis heute weit über 500 Zitierungen. Das ist für eine Arbeit, die nichts mit großen Beobachtungsprojekten (wie Satelliten usw.) zu tun hat, recht viel. Ferner ist auffällig, daß die Zitier-Rate dieser Arbeit über fast 40 Jahre hinweg zeitlich nahezu konstant ist, während die Zitier-Rate von Arbeiten sonst meist im Verlauf einiger Jahre exponentiell abklingt. Das zeigt wohl, daß das Thema der "Migration von Sternen" immer wichtiger genommen wird.



**Abbildung 11.** Die Bestimmung des galaktozentrischen Radius  $R_i$  eines Sterns bei seiner Entstehung aus seiner chemischen Zusammensetzung (charakterisiert durch den Index  $[Fe/H]$ ) und aus seinem Alter  $\tau$  (in Einheiten von Giga-Jahren ( $10^9$  Jahren)). Aus Wielen et al. (1996).

Als Beispiel zur Untersuchung der Migration von Sternen will ich hier im Vorgriff eine Arbeit erwähnen, die ich mit meinen Mitarbeitern während meines zweiten Heidelberger Arbeitsperiode 1996 publiziert habe (R. Wielen, B. Fuchs, C. Dettbarn: "On the Birth-Place of the Sun and the Places of Formation of Other Nearby

Stars". Astronomy and Astrophysics, Vol. 314, p. 438). Zur Bestimmung des galaktozentrischen Radius  $R_i$ , bei dem der Stern entstanden ist ('initial'  $R$ ), benutzen wir seine chemische Zusammensetzung, charakterisiert durch seine Eisenhäufigkeit relativ zu Wasserstoff (Index  $[Fe/H]$ ), und sein Alter  $\tau$ . Für einige hundert hellere Sterne standen damals erstmals besonders genaue Werte von  $[Fe/H]$  und  $\tau$  zur Verfügung. Zunächst muß man die Relation zwischen  $R_i$  und  $[Fe/H]$  und  $\tau$  eichen. Unsere Eichung ist schematisch in Abbildung 11 wiedergegeben.

Dort wird auch die Bestimmung von  $R_i$  für unsere Sonne demonstriert: Mit dem Wert für  $[Fe/H]$  (hier 0, weil die Sonne als Bezugsobjekt benutzt wird) sucht man die Eichkurve für das Alter  $\tau$  (Alter der Sonne: ca.  $4.5 \cdot 10^9$  Jahre) auf und liest dann unten den Wert für  $R_i$  (Sonne:  $R_i = 6.6$  kpc) ab. Die Sonne ist also nach unserer Meinung mehr im Inneren der Milchstraße entstanden und bis heute insgesamt fast 2 kpc nach außen diffundiert (heutiger Wert von  $R$  für die Sonne:  $R_0 = 8.5$  kpc). Die Migration der Sonne (und der anderen Sterne) erfolgt aber nicht ständig in die gleiche Richtung, sondern diffusiv, also zufällig orientiert in einer Art 'Random Walk'-Prozeß. Quantitativ stimmt die typische Änderung von  $R$  als Funktion des Alters  $\tau$  für die untersuchten Sterne gut mit meinen Vorhersagen von 1977 zur Bahn-Diffusion im Ortsraum überein. Durch die Diffusion der Sternbahnen steigt auch an jedem Ort die Streuung der chemischen Zusammensetzung der gerade dort befindlichen Sterne mit zunehmendem Alter der Sterne.

#### **4. Tätigkeit in Berlin von 1978 bis 1985**

Im Juni 1978 erhielt ich den Ruf auf die Professur für Astrophysik der Technischen Universität Berlin (TU). Ich folgte dem Ruf nach kurzen, relativ erfolgreichen Berufungsverhandlungen und trat die Stelle im September 1978 an. Es handelte sich noch um eine ordentliche Professur alter Art, die erst später in eine C4-Stelle umgewandelt wurde. Mit dem Lehrstuhl war die Position des Geschäftsführenden Direktors des Instituts für Astrophysik der TU verbunden. Das Institut besaß auch ein paritätisch besetztes

Direktorium. Dort war die Demokratie aber etwas ungewöhnlich geregelt: Als (einzig) Professor besaß ich zwei Stimmen, der Assistenten-Vertreter eine Stimme, und die Vertreter der Studenten und sonstigen Angestellten hatten nur eine beratende Stimme. Der Ausgang von Abstimmungen war also gut vorhersagbar! Erfreulicherweise gab es aber meist keine wirklich strittigen Punkte.

Als erstes widmete ich mich mit großem Elan dem Anschluß der Arbeitsgruppe Astronomie der Freien Universität Berlin (FU) an das TU-Institut. Hier hatte ich in zeitlicher Hinsicht doppeltes Glück. Erstens war der Professor an der FU, Fritz Hinderer (1912-1991), gerade pensioniert worden. Er war der frühere Chef meiner Frau an der Sternwarte Babelsberg und kannte mich auch sehr gut aus meiner Studienzeit an der FU. Insofern war er mir wohlgesonnen. Zweitens hatte der Senat von Berlin gerade beschlossen, die Profile von FU und TU zu schärfen und deswegen zumindest kleinere Fächer an jeweils nur einer Universität zusammenzufassen. Für die Astronomie und Astrophysik war die TU als Ziel auserkoren worden.

Der Zusammenschluß erforderte zahlreiche Verhandlungen mit FU-Vertretern. Wie es der Zufall so will, spielte hier wieder das alte Gebäude des Astronomischen Rechen-Instituts (ARI) (siehe Kapitel 1) in Dahlem eine zentrale Rolle. Denn in diesem Haus residierten damals sowohl der Präsident der FU, Eberhard Lämmert (er hatte von 1970 bis 1977 eine Professur an der Heidelberger Universität innegehabt), als auch der Kanzler der FU, Detlef Bormann. Die Verhandlungen mit ihnen verliefen aus meiner Sicht sehr positiv. Nur eines gelang mir nicht: die von mir (mehr im Scherz) geforderte Rückgabe des alten ARI-Gebäudes an die Astronomen wurde strikt abgelehnt.

Ende April 1979 wurde die Zusammenfassung von Astronomie und Astrophysik an der TU vertraglich vereinbart und kurz darauf vollzogen. Das Institut an der TU wurde in "Institut für Astronomie und Astrophysik" umbenannt (meine Professur entsprechend in eine solche für "Astronomie und Astrophysik"). Wir hatten nun

Lehrverpflichtungen sowohl an der TU als auch an der FU. An beiden Universitäten konnten (und mußten) wir nun Diplom- und Doktor-Arbeiten in Astronomie betreuen und entsprechende Prüfungen abnehmen.

Die von der FU übernommene C3-Professur wurde im Oktober 1980 mit Erwin Sedlmayr besetzt. Ich kannte ihn gut aus Heidelberg, wo er am Institut für Theoretische Astrophysik arbeitete. Er wurde später mein Nachfolger auf der Berliner C4-Stelle. 1980 war mit Klaus Beuermann ein weiterer C3 Professor an das Institut gekommen. Als die Pädagogische Hochschule in Berlin 1980 aufgelöst wurde, hatte er für unser TU-Institut optiert. Er war schon vorher dem Institut als Privat-Dozent verbunden gewesen. 1992 folgte er einem Ruf auf einen Lehrstuhl für Astrophysik nach Göttingen. Das Institut war nun personell mit einer C4-Stelle und zwei C3-Stellen deutlich besser aufgestellt, zumal sich Hinderer auch nach seiner Pensionierung noch sehr aktiv an der Lehre beteiligte. Im Laufe der Zeit habilitierten sich noch zwei Mitarbeiter, Burkhard Fuchs und Jürgen Materne.

Das Institut war lange Zeit im 20-stöckigen "Telefunken-Hochhaus" der TU am Ernst-Reuter-Platz untergebracht. Hinzu kamen ab 1979 einige zusätzliche Räume an der FU, die dort vor allem für Praktika und eine Zweigbibliothek genutzt wurden. Im Jahr 1985 zog das Institut dann in den gerade fertig gestellten Neubau für die Physikalischen Institute der TU (an der Hardenbergstraße) um (Abbildung 12). Dort befinden sich die meisten Räume des Instituts im obersten (achten) Stockwerk. Bereits von weitem grüßt die weiße Kuppel der Übungs-Sternwarte auf dem Dach des Gebäudes. Die bisherige Übungs-Sternwarte auf dem Dahlemer TU-Gelände wurde aber beibehalten, hauptsächlich wegen ihrer Nähe zur FU.

Natürlich habe ich damals in Berlin auch intensiv geforscht. Ich will hier aber darauf nur ganz kurz eingehen: Meine Hauptarbeitsgebiete waren im Rahmen der Stelldynamik sonnennahe Sterne, Sternhaufen, Galaxien und Galaxienhaufen. Auch an der Aufstellung des Beobachtungs-Programms des Astrometrie-

Satelliten HIPPARCOS der ESA (dem sogenannten 'HIPPARCOS Input Catalogue') habe ich mich beteiligt. Aus allen diesen Bereichen wurden zahlreiche Diplom-Arbeiten und einige Dissertationen angefertigt.



**Abbildung 12.** Der Neubau für die Physikalischen Institute der Technischen Universität Berlin an der Hardenbergstraße in Charlottenburg. Fertiggestellt 1985. Die Astronomie befindet sich zum größten Teil im obersten Stockwerk. Deutlich sichtbar die weiße Kuppel der Übungssternwarte auf dem Dach des Gebäudes.

## 5. Tätigkeit in Heidelberg seit 1985

### 5.1 Professor der Universität Heidelberg und Direktor des Astronomischen Rechen-Instituts

Im März 1985 erhielt ich den Ruf auf den Lehrstuhl für Theoretische Astronomie der Universität Heidelberg. Der Inhaber dieser Professur war zugleich Direktor des Astronomischen Rechen-Instituts (ARI) des Landes Baden-Württemberg. Die



Berufungsverhandlungen mußte ich daher praktisch ausschließlich mit dem für das ARI zuständigen Ministerium (und nicht mit der Universität) führen. Es gelang mir unter anderem, vom Land drei neue wissenschaftliche Dauerstellen für das ARI zu erhalten. Damit konnte ich auch Mitarbeiter, die auf meinen Arbeitsgebieten besonders qualifiziert waren, aus Berlin nach Heidelberg mitnehmen. Anfang Oktober 1985 trat ich meine Stelle in Heidelberg an.

## **5.2 Mitarbeit in der Fakultät für Physik und Astronomie der Universität**

Als Ordinarius der Universität konnte ich am ARI viele Diplomarbeiten in Physik (mit astronomischer Thematik) und Doktorarbeiten (im Fach Astronomie) betreuen und an Prüfungen teilnehmen. Als Professor war man auch automatisch ständiges Mitglied der Fakultätskonferenz. In die engere Fakultätskonferenz wurde ich (abwechselnd mit dem Kollegen Appenzeller, der die Landessternwarte auf dem Königstuhl leitete) gewählt.

1989/90 war ich Dekan der Fakultät für Physik und Astronomie, 1990/91 ihr Prodekan. Allerdings wurde man damals nicht Dekan aufgrund besonderer geistiger Qualitäten oder organisatorischer Fähigkeiten. Es ging ausschließlich nach dem Datum der Ernennung zum Professor der Fakultät. Ferner wurde man als Dekan zwar für zwei Jahre gewählt, die Verabredung war aber, daß man nach einem Jahr zurücktrat und dann ein weiteres Jahr als Prodekan amtierte. Ob dieses System gut oder schlecht war, sei dahingestellt. Es betonte aber, daß der Dekan nur "Gleicher unter Gleichen" war und keine Ambitionen haben sollte, in Eigenregie große Umwälzungen einzuleiten. Nach meiner Emeritierung im Jahre 2004 bin ich noch Mitglied der Habilitationskonferenz der Fakultät.

## **5.3 Mitarbeit in der Internationalen Astronomischen Union**

Neben der Tätigkeit als Hochschullehrer und Institutsdirektor nahm man auch noch zahlreiche andere Aufgaben wahr. Ich will

hier als Beispiel nur meine Mitarbeit in der Internationalen Astronomischen Union (IAU) nennen, an die ich besonders gerne zurückdenke.

Ich wurde 1970 auf der Tagung in Brighton Mitglied der IAU. Vorher hatte ich bereits 1964 in Hamburg und 1967 in Prag als 'Invited Participant' an den alle drei Jahre stattfindenden Tagungen der IAU teilgenommen. Die wissenschaftliche Arbeit der IAU erfolgte damals überwiegend in den sogenannten IAU-Kommissionen. Ich wurde im Laufe der Zeit Mitglied in den Kommissionen 4 (Ephemerides), 5 (Documentation and Astronomical Data), 8 (Astrometry), 28 (Galaxies), 33 (Structure and Dynamics of the Galactic System), 37 (Star Clusters), und 41 (History of Astronomy).

Mein Hauptbetätigungsfeld wurde die IAU Commission 33, die mein Lieblingsarbeitsgebiet betraf (Struktur und Dynamik der Milchstraße). Dort wurde ich 1976 zum Mitglied des Organisations-Komitees gewählt, 1979 zum Vize-Präsidenten und 1982 bis 1985 zum Präsidenten der Kommission. 1982 in Patras war ich 'Acting President', da der damalige Präsident, G. G. Kuzmin (UdSSR), nicht teilnehmen konnte. Im Dezember 1985 leitete ich als Präsident dann die Sitzungen der Kommission in New Delhi. Einer meiner Erfolge war eine neue Vereinbarung über die Standard-Werte der galaktischen Konstanten.

Besonders stolz bin ich auch, 1991 der erste 'National Representative' des gerade wiedervereinigten Deutschlands bei der IAU-Tagung in Buenos Aires gewesen zu sein. Das war allerdings eine teilweise sehr schwierige Aufgabe. Denn die anderen Mitglieds-Länder forderten, daß das wiedervereinigte Deutschland nun als IAU-Beitrag zusätzlich zum Beitrag der alten Bundesrepublik auch den wegfallenden Beitrag der DDR übernehmen sollte. Deutschland war aber bereits in der zweithöchsten Beitrags-Kategorie und fand es ungerecht, zusammen mit den USA in die höchste Kategorie eingestuft zu werden. Auch hatte mir das Bundesministerium, das den deutschen Beitrag finanziert, eindringlich klargemacht, keine gravierende Beitragserhöhung für

Deutschland zu akzeptieren. Durch den Wegfall des DDR-Beitrags trat aber bei der IAU ein Defizit auf, das durch eine (leichte) Erhöhung der Beitragszahlungen aller anderen Länder kompensiert werden sollte. Natürlich beschwerten sich diese aber lautstark, daß sie so de facto für die deutsche Wiedervereinigung zur Kasse gebeten würden.

1988 auf der IAU-Tagung in Baltimore hatte ich ein außergewöhnliches Erlebnis: ich wurde von der IAU offiziell für tot erklärt! Auf den Tagungen gedenkt die IAU jeweils zum Beginn der General-Versammlung (General Assembly (GA)) der in den letzten Jahren verstorbenen Mitglieder, und der General-Sekretär der IAU verliest dazu aus einer Liste deren Namen. Durch einen ungeklärten Fehler erschien dort mein Name und wurde feierlich vor mehreren Tausend Tagungsteilnehmern verlesen. General-Sekretär war damals der Belgier Jean-Pierre Swings. Er schildert dieses Ereignis aus seiner Sicht (ohne meinen Namen zu nennen) in seinen Erinnerungen (IAU Information Bulletin No. 100 (2007), p. 13) auf Seite 16: 'One mishap I cannot forget which happened in Baltimore GA was the following. ...'. Seine Aussage, ich wäre dann aufgestanden und hätte mich als lebend gemeldet, stimmt aber nicht, denn ich hätte niemals eine solche zeremonielle Handlung durch profanen Widerspruch gestört. Ich habe Swings erst später (nach dem Ende der GA) informiert. Meine Todeserklärung nahm ich mit Humor und erklärte meinen ob der ungewöhnlichen Situation verblüfften Kollegen (Mark Twain zitierend): 'The reports of my death have been greatly exaggerated'.

#### **5.4 Geschichte und Arbeitsgebiete des Astronomischen Rechen-Instituts**

Das Astronomische Rechen-Institut (ARI) ist aus der Berliner Sternwarte hervorgegangen. Diese wurde durch das Kalender-Edikt vom 10. Mai 1700 des Brandenburgischen Kurfürsten Friedrich III. gegründet, vor allem zur Kalender-Berechnung. Manche Kollegen werden sich noch erinnern, daß wir am 10. Mai 2000, also genau 300 Jahre später, eine Feierstunde zum Kalender-

Edikt in der Alten Aula der Heidelberger Universität ausgerichtet haben. 1874 wurde das ARI von der Sternwarte getrennt und erhielt einen Neubau in Berlin-Kreuzberg, direkt neben der Sternwarte. An das ARI angeschlossen war das "Seminar zur Ausbildung von Studierenden im wissenschaftlichen Rechnen" der Berliner Universität. 1896/97 wurde das ARI als "Königliches Astronomisches Rechen-Institut" völlig selbständig und bekam 1912 den in der Einleitung erwähnten Neubau in Berlin-Dahlem. 1944 wurde es der Kriegsmarine unterstellt und in das kleine Dorf Sermuth in Sachsen evakuiert. Von dort wurde das ARI im Juni 1945 auf Anordnung der amerikanischen Militärregierung nach Heidelberg verlagert. Hier war es bis Ende 2004 ein Landesinstitut, war aber bereits eng mit der Universität verbunden. 2005 wurde es als Teil des Zentrums für Astronomie in die Universität Heidelberg integriert.



**Abbildung 13.** Der berühmteste Doktorand des Astronomischen Rechen-Instituts: Alfred Wegener (1880–1930).

Hier möchte ich auf den berühmtesten Doktoranden des ARI hinweisen (Abbildung 13). Es ist Alfred Wegener, der heute für

seine Theorie der Kontinental-Drift und der Platten-Tektonik weltbekannt ist. Die Wenigsten wissen aber, daß er aus der Astronomie kam. Er promovierte 1905 in Berlin mit einer Arbeit über "Die Alfonsinischen Tafeln für den Gebrauch eines modernen Rechners". Mit "Rechner" war damals natürlich ein Mensch gemeint. Seine Dissertation wurde vom Direktor des ARI, Julius Bauschinger, betreut. Wegener wechselte dann zur Meteorologie, Geophysik und Polarforschung, auch weil er für sich selbst keine Chance hinsichtlich einer geeigneten Stelle in der Astronomie sah.

Die Arbeitsgebiete des Astronomischen Rechen-Instituts (ARI) sind oder waren folgende (in historischer Reihenfolge): (a) Berechnung der astronomischen Kalender-Daten ab Jahrgang 1701. Das ARI gibt bis heute jährlich die "Astronomischen Grundlagen für den Kalender" in Deutschland heraus. (b) Berechnung und Herausgabe von astronomischen Ephemeriden: "Berliner Astronomisches Jahrbuch" für 1776 bis 1959, ab 1960 "Apparent Places of Fundamental Stars". (c) Himmelsmechanik. Bis 1945 war das ARI die weltweite Zentrale für Kleine Planeten (heute ist dies das Minor Planet Center der IAU in den USA). (d) Astrometrie. Insbesondere Erstellung von Fundamental-Katalogen (FC bis FK6). Diese enthalten Sterne mit den genauesten Daten; sie dienten bis 1997 auch zur Definition des astronomischen Inertial-Systems. Ab ca. 1975 Mitarbeit an Astrometrie-Satelliten der ESA (HIPPARCOS, später GAIA). (e) Erarbeitung der weltweiten astronomischen Bibliographie (bis 1969 "Astronomischer Jahresbericht", von 1969 bis 2000 "Astronomy and Astrophysics Abstracts". Heute abgelöst durch die ADS-Datenbank der NASA. (f) Stelldynamik. Bereits ab 1925. Intensiver erst seit 1955. Später eines der Hauptarbeitsgebiete des ARI. Für numerische Simulationen insbesondere Einsatz von schnellen, aber relativ preiswerten Spezialrechnern für die Berechnung der gravitativen Wechselwirkungen (GRAPE Boards, FGPA, GPUs). (g) Theoretische Astrophysik (Sternaufbau, Sternatmosphären) ab 1925 bis 1932 direkt im ARI. Ab 1964 befand sich der Lehrstuhl für Theoretische Astrophysik der Universität Heidelberg in den Räumen des ARI. 1969 zog das Institut für Theoretische

Astrophysik aber in Universitätsräume um. (i) Seit der Berufung von Joachim Wambsganz (2004) und Eva Grebel (2007) hat das ARI zahlreiche neue Arbeitsfelder bekommen, z.B. Gravitationslinsen, Suche nach extrasolaren Planeten, Entwicklung von Galaxien, galaktische Archäologie, Zwerg-Galaxien, Sternhaufen, Nahfeld-Kosmologie, Galaxienhaufen.



**Abbildung 14.** Der Astrometrie-Satellit HIPPARCOS der ESA

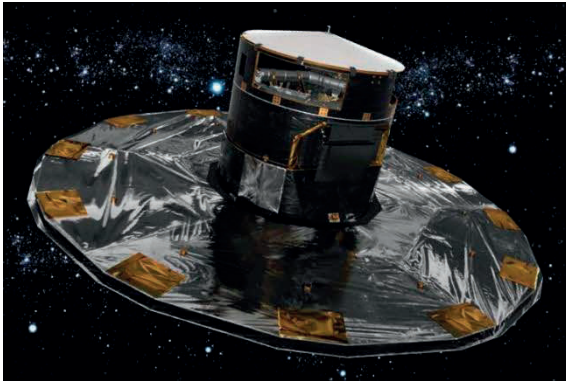
Als Direktor des ARI war ich naturgemäß in viele der in meiner Dienstzeit aktuellen Arbeitsgebiete des Instituts sachlich und/oder organisatorisch eingebunden. Schwerpunkt war aber eindeutig die Satelliten-Astrometrie. Das ARI war vor allem an der Vorbereitung und der Daten-Reduktion des Satelliten HIPPARCOS der Europäischen Weltraum-Behörde ESA (Abbildung 14) in großem Umfange beteiligt. Das ARI gehörte dazu drei europäischen Konsortien (INCA, FAST, TYCHO) an. Der Satellit war 1989 gestartet worden und arbeitete bis 1993. Aus den Daten von HIPPARCOS wurden Positionen, Eigenbewegungen und Paral-

laxen von ungefähr 118 000 Sternen mit einer bis dahin unerreichten Genauigkeit im Bereich von einer Milli-Bogensekunde abgeleitet. Der entsprechende Katalog wurde 1997 veröffentlicht.

Die Mitarbeit an Großprojekten wie HIPPARCOS bedeutet leider in der Regel einen Verlust an "Sichtbarkeit (Visibility)" für das Institut und seine Mitarbeiter, weil die Erfolge eher der entsprechenden Organisation (hier der ESA) oder den Konsortien als Ganzem zugeschrieben werden. Dennoch konnten wir einige besondere Resultate erzielen. Viele davon betrafen die Entdeckung bisher unbekannter, enger Doppelsterne durch HIPPARCOS. Drei Beispiele: (1) Enge, unaufgelöste Doppelsterne, in denen eine Komponente ihre Helligkeit verändert, verraten sich dadurch, daß das beobachtete Photozentrum im Rhythmus der Lichtkurve schwankt. Ich habe diese Objekte "VIMs (Variability-Induced Movers)" getauft. Die lautsprachliche Ähnlichkeit von VIMs mit WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles), nach denen die Physiker intensiv suchen, weil sie sie für die möglichen Träger der Dunklen Materie im Kosmos halten, war (als kleiner Scherz: "Wir haben als Erste VIMs / WIMPs entdeckt! ") durchaus gewollt. (2) Zahlreiche enge, unaufgelöste Doppelsterne kann man daran erkennen, daß ihre "instantane" HIPPARCOS Eigenbewegung  $\mu_{\text{hip}}$ , die ihre Bahnbewegung mit enthält, signifikant von der aus über sehr lange Zeiten aus Erdbeobachtungen abgeleiteten "mittleren" Eigenbewegung  $\mu_{\text{mitt}}$  abweicht. Ich habe diese Objekte  $\Delta\mu$ -Doppelsterne genannt. (3) Die Kombination von HIPPARCOS-Messungen mit vorhandenen erdgebundenen Messungen hat es uns erlaubt, eine genaue astrometrische Bahn des Photozentrums des Doppelsterns Polaris AP ( $\alpha$  UMi AP) zu bestimmen. Dies ist besonders interessant, weil Polaris A ein Cepheid ist, und zwar der sonnennächste. Der lichtschwache Begleiter  $\alpha$  UMi P des Cepheiden wurde erst 2005/2006 von amerikanischen Kollegen mit dem Hubble Space Telescope direkt beobachtet.

Das Nachfolge-Projekt für HIPPARCOS ist der Astrometrie-Satellit GAIA der ESA (Abbildung 15). Die Mitarbeit an diesem Satelliten ist heute das zentrale Astrometrie-Projekt des ARI. Die

Vorbereitungen für GAIA haben bereits 1994 begonnen. GAIA wurde im Dezember 2013 erfolgreich gestartet und wird hoffentlich mindestens 5 Jahre lang Daten liefern. Aus diesen Messungen kann man u.a. die Positionen, Eigenbewegungen und Parallaxen von ca. einer Milliarde Sternen mit einer Genauigkeit von bis zu 20 Mikro-Bogensekunden ableiten. GAIA liefert also insbesondere einen hervorragenden "Zensus" unserer Milchstraße. Die Daten des endgültigen GAIA-Katalogs sollen bald nach Missionsende veröffentlicht werden. Vorher werden aber in Abständen bereits Zwischenresultate zugänglich sein.



**Abbildung 15.** Der Astrometrie-Satellit GAIA der ESA.

### 5.5 Bücher zur Geschichte der Astronomie

Seit meiner Emeritierung im Jahre 2004 ist eine meiner Lieblingsbeschäftigungen das Schreiben von Büchern zur Astronomie-Geschichte. Dabei ist meine Frau Ute Mitautorin aller dieser Bücher.

Für unsere Bücher können wir erfreulicherweise auf Originalmaterial in Form von zahlreichen alten Dokumenten zurückgreifen, die sich erstaunlicherweise trotz aller Widernisse im Archiv des Astronomischen Rechen-Instituts (ARI) bis heute erhal-



ten haben. Darunter sind: ein Original-Druck des Kalender-Edikts von 1700; Schriftverkehr zum Kalender in Preußen; ein erst durch uns veröffentlichtes, handschriftliches Manuskript von Johann Elert Bode (1747-1826) über die Geschichte der Berliner Sternwarte, welches 1810 entstanden ist; Dokumente zur Trennung des ARI von der Sternwarte Ende des 19. Jahrhunderts; zwei Original-Briefe von Albert Einstein aus dem Jahre 1930 an August Kopff (damals Direktor des ARI); Schriftwechsel zur Evakuierung des ARI nach Sermuth und zur anschließenden Verlagerung nach Heidelberg; zahlreiche Dokumente zur außerordentlich erstaunlichen Kooperation des ARI mit Ephemeriden-Instituten in England und in den USA während des gesamten Zweiten Weltkriegs.

Als Beispiel will ich das Buch über August Kopff und die Relativitätstheorie anführen. Kopff (1882-1960) war von 1924 bis 1954 Direktor des ARI, zunächst in Berlin, dann in Heidelberg. Davor arbeitete er an der Landessternwarte in Heidelberg und war außerordentlicher Professor der Universität. Er veröffentlichte 1921 (und 1923) ein sehr erfolgreiches Lehrbuch zur Speziellen und Allgemeinen Relativitätstheorie. Das Buch wurde in mehrere Sprachen übersetzt. Besonders bemerkenswert ist, daß Kopff von 1919 bis zu seinem Weggang 1924 nach Berlin in Heidelberg Vorlesungen zur Relativitätstheorie hielt. Er tat dies quasi "in der Höhle des Löwen", denn der hiesige Ordinarius für Physik war der leidenschaftliche Einstein-Gegner und Nobel-Preisträger Philipp Lenard.

Für ihre Arbeit an unseren Büchern und für ihre Tätigkeit in der Astronomie generell wurde meine Frau von der Internationalen Astronomischen Union dadurch geehrt, daß die IAU den Kleinen Planeten (48492) Utewielen nach ihr benannte. Wir sind nun eines der wenigen Ehepaare, bei denen beide Partner einen eigenen Kleinen Planeten "besitzen", denn (4548) Wielen gibt es auch noch.

Bisher sind mehr als zehn Bücher von uns in elektronischer Form auf der Open-Access-Plattform heIDOK der Universität Heidelberg veröffentlicht worden. Wir sind aber unermüdlich dabei, weitere Bücher zu verfassen. In einem Nachwort zu einem unserer Bücher zitieren wir dazu den italienischen Dichter Petrarca

(1304-1374). Er schrieb auch ein Essay mit dem Dialog "De Scriptorum fama (Vom Ruhm der Schriftsteller)". Dort heißt es u.a., daß das Schreiben von Büchern eine ansteckende und unheilbare Krankheit sei. Das können wir nur bestätigen. Ferner schreibt Petrarca, daß es im Wesentlichen zwei Arten von Irren gibt: die einen werfen mit Steinen, die anderen schreiben Bücher. Sie können froh sein, daß wir nur zur zweiten Sorte gehören.

Vortrag gehalten an der Fakultät für Physik und Astronomie der Universität Heidelberg am 22. Oktober 2015



In dem zunächst auf vier Bände angelegten Werk „Heidelberger Physiker berichten“ blicken ehemalige Heidelberger Hochschul-lehrer der Physik und Astronomie auf ihren wissenschaftlichen Lebensweg und die Geschichte ihres Fachgebietes zurück. Die Basis für den vorliegenden Band bilden auto-biographische Vorträge, die im Rahmen einer Ringvorlesung in den Jahren 2015 und 2016 präsentiert wurden. Schwerpunkt war dabei die Entwicklung der Physik im letzten Drittel des 20. und am Beginn des 21. Jahrhunderts. In dieser Periode wurden die traditionellen Arbeitsgebiete der Heidelberger Physiker weiter ausgebaut, daneben aber auch vermehrt wichtige aktuelle Forschungsthemen aus der Anwendung neu aufgenommen. Neben wissenschaftlichen Inhalten liefern die Beiträge Einsichten in das jeweilige Umfeld und die Wege, die zu den wissenschaftlichen Erkenntnissen führten, wobei die Texte die Lebendigkeit des mündlichen Vortrags und der Authentizität persönlicher Erinnerung widerspiegeln.



**UNIVERSITÄT  
HEIDELBERG**  
ZUKUNFT  
SEIT 1386

ISBN 978-3-946531-67-8



9 783946 531678