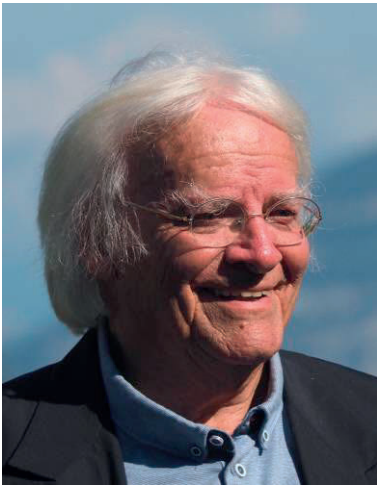


Hans Joachim Specht



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.

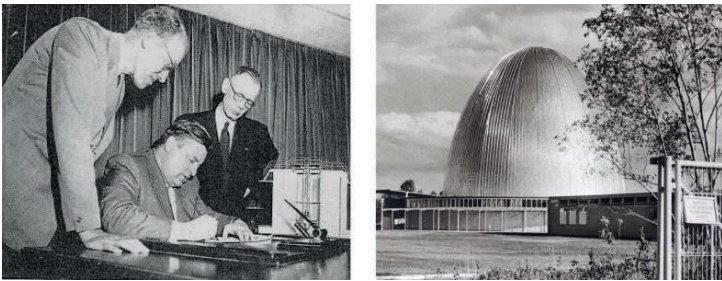


Abbildung 1. Vertragsunterzeichnung FRM 1956.

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}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 β -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 anzugehen. 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).

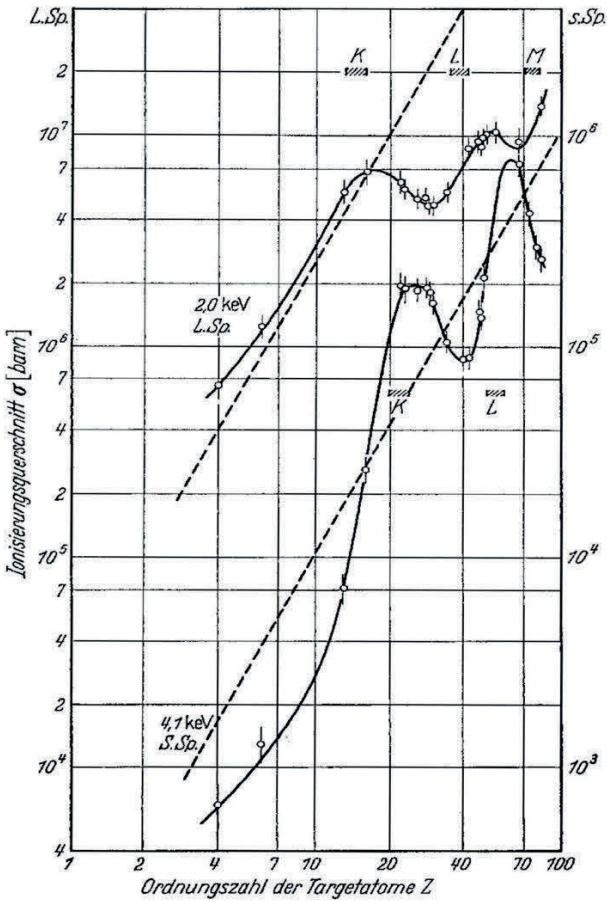


Abbildung 2. Ionisation der L-Schale leichter (L.Sp. $\langle Z \rangle = 38$) und schwerer (S.Sp. $\langle Z \rangle = 54$) Spaltfragmente vs. Z der Targetatome. Gestrichelt: Bornsche Näherung [Z. Physik 185 (1965) 301].

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}U und ^{239}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.

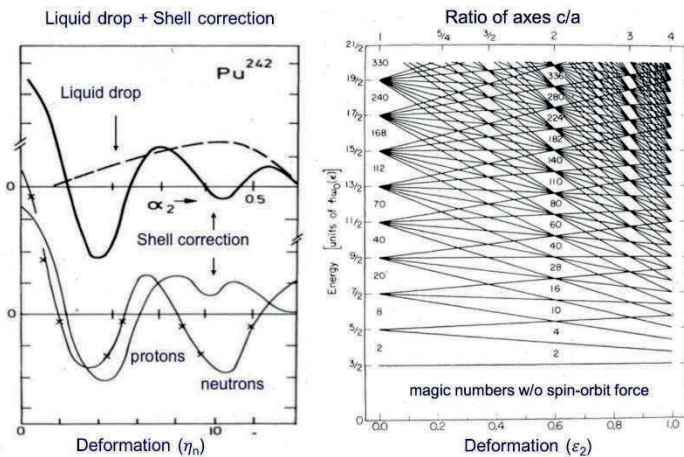


Abbildung 3. Beiträge von Tröpfchenmodell und Schalenkorrekturen zur Spaltbarriere (Strutinsky 1966, links). Generalisierte Schalenstruktur in einem harmonischen Oszillator Potential (rechts).

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.

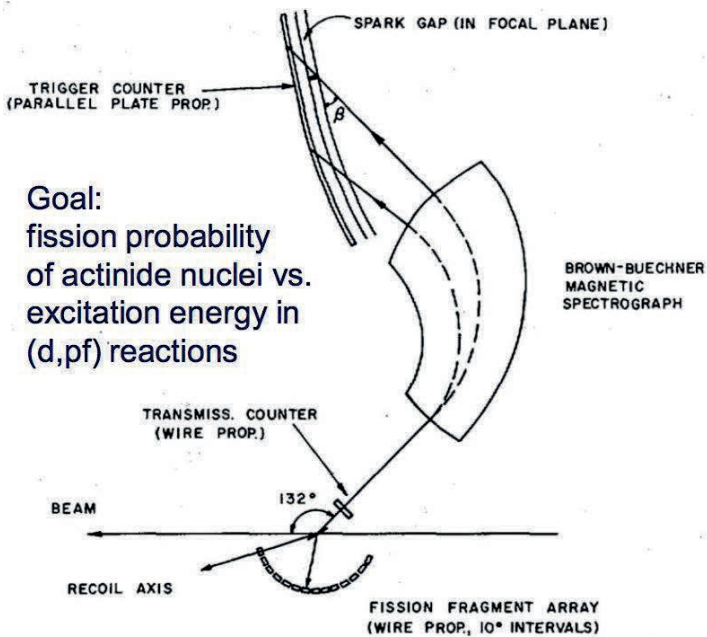


Abbildung 4. Versuchsaufbau am EN Tandem in Chalk River.

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.

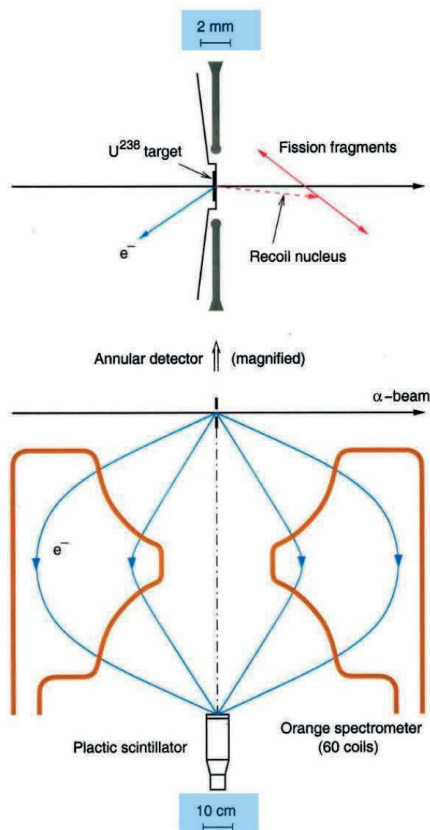


Abbildung 5. Ringförmiger Si Detektor mit Target im zentralen Loch; Messung der Konversionselektronen im Orangen β -Spektrometer.

Die Idee hatte ich bereits 1970. Nach einem erfolglosen Vorversuch am FRM mit dem 100 ns Spaltisomer ^{236}U kam der Durchbruch für solch ein Experiment 1971 am Tandem. Hier wurde mit der Reaktion $^{238}\text{U}(\alpha,2n)$ das Spaltisomer ^{240}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 β -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.

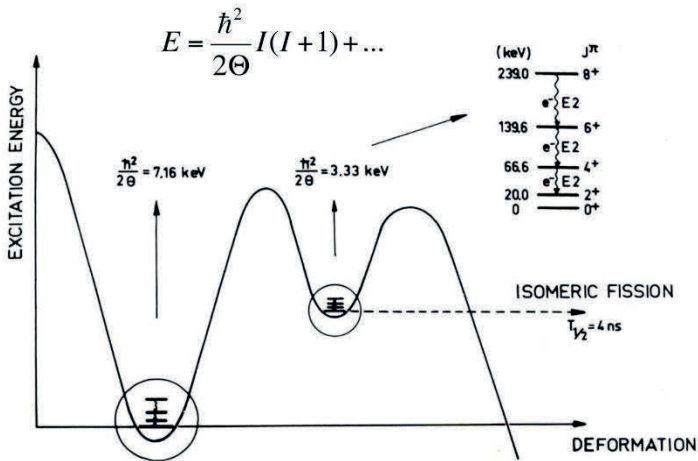


Abbildung 6. Rotationsbanden im ersten und zweiten Minimum.

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.

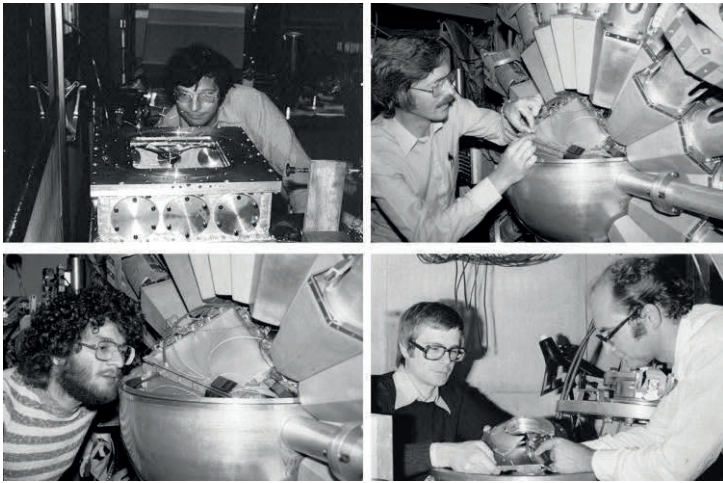


Abbildung 7. D. von Harrach, P. Glässel, J. Schukraft, V. Metag und D. Habs in den 1970igern.

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}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.

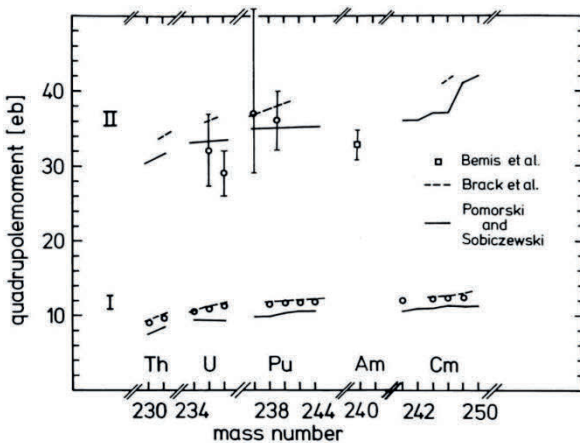


Abbildung 8. Quadrupolmomente von Spaltisomeren und Grundzuständen in den Aktiniden im Vergleich zur Theorie [Phys. Reports 65 (1980) 1].

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 ± 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}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 U+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 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.

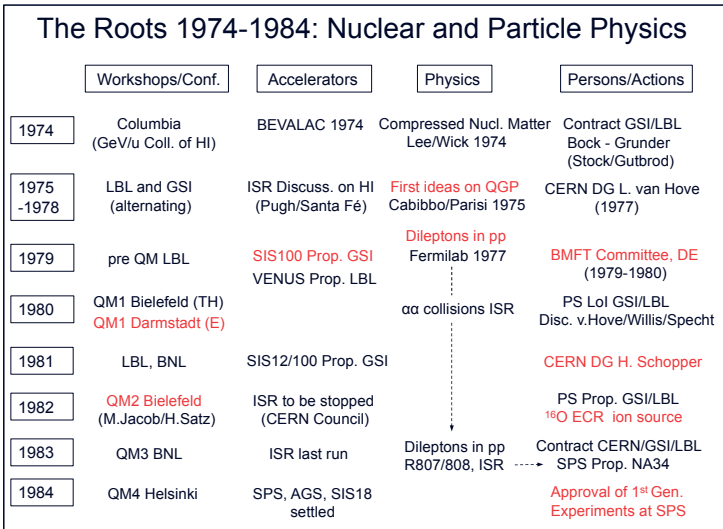


Abbildung 9. Die Geburt der Schwerionen-Physik am CERN.

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}O und ^{32}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 eingesperreten 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.

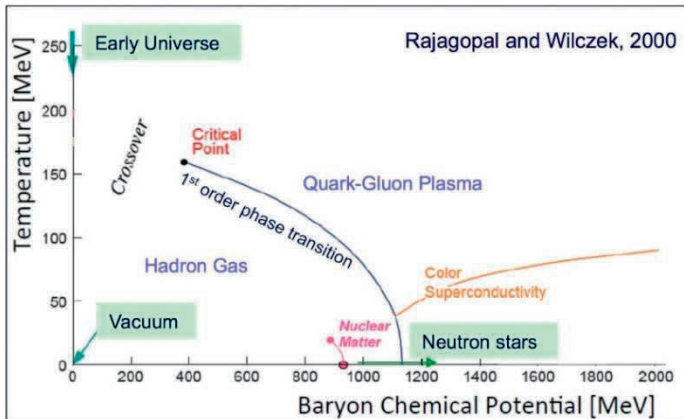


Abbildung 10. Der Phasenübergang zwischen einem Quark-Gluon Plasma und einem Gas von Hadronen.

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 4π 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/ψ 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.

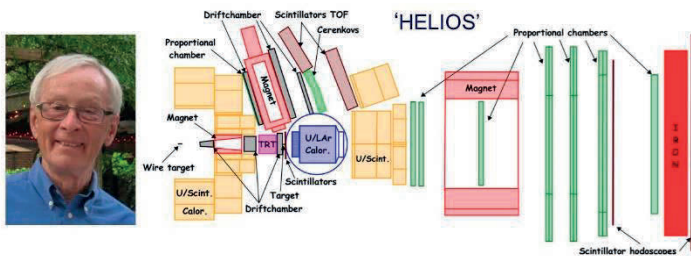


Abbildung 11. Aufbau NA34/HELIOS-2 am CERN (with B. Willis).

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 ρ , 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 π -Dalitz- und γ -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 2×50.000 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.

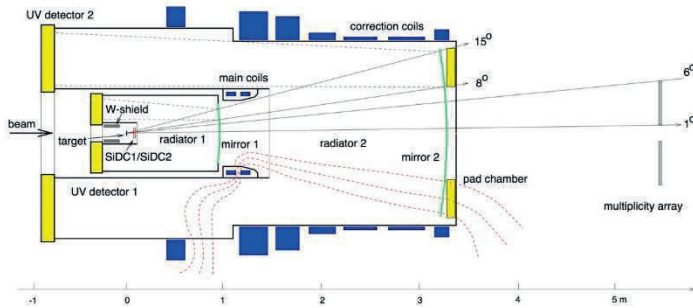


Abbildung 12. Aufbau NA45/CERES am CERN SPS.

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 ρ (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 ρ 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 Elektronpaar-Daten bei 40 GeV/u, was ebenfalls ein vielzitatierter

Erfolg mit einem noch grösseren Effekt in der ρ 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.

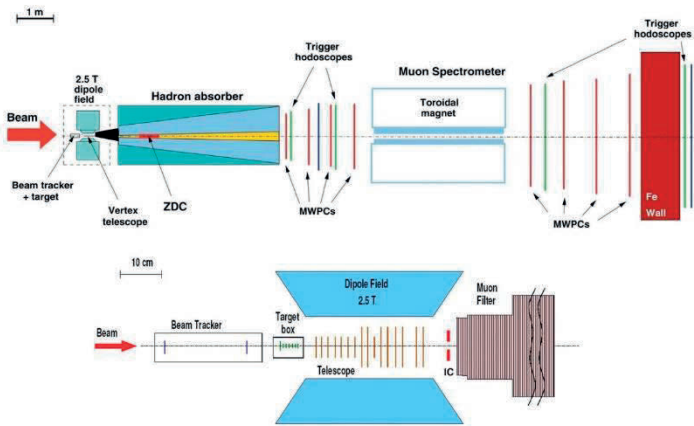


Abbildung 14. Aufbau NA60 am CERN SPS.

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.

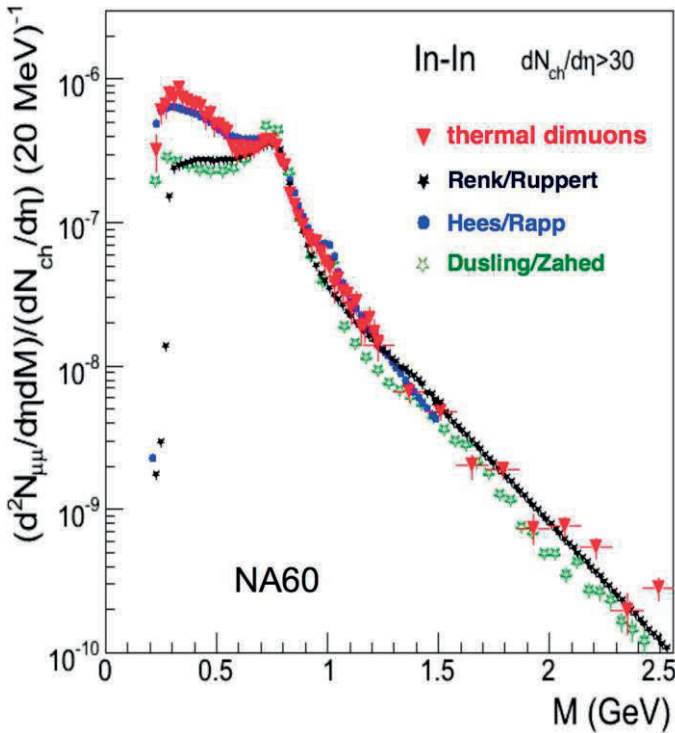


Abbildung 15. Thermisches Myonpaar-Massenspektrum in In-In.

Im Massenbereich $< 1 \text{ GeV}$ erscheint das ρ als Peak in der nominalen Position. Als "in-medium" Effekt findet sich allein eine Verbreiterung, das " ρ 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 ± 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 ρ 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.

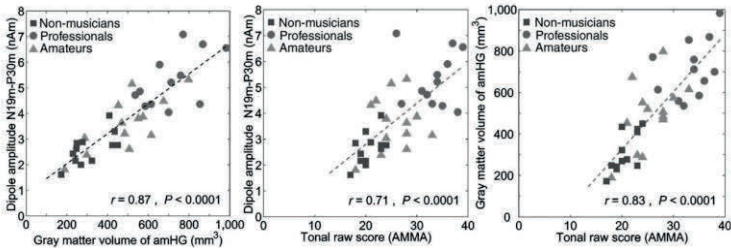


Abbildung 16. Korrelation neurologischer Grössen mit AMMA Test.

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.