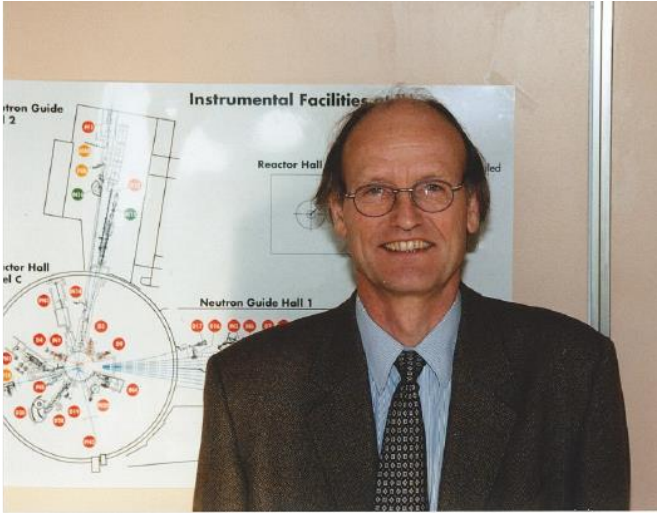


Dirk Dubbers



# Dirk Dubbers

Dirk Dubbers wurde 1943 in Dresden geboren, die Familie floh Anfang 1945 aus der zerstörten Stadt. Er besuchte das altsprachliche Gymnasium in Tübingen, und war ein Jahr als Austauschschüler in Ann Arbor, USA. Nach dem Studium der Physik in Göttingen und Heidelberg untersuchte er in Diplom- und Doktorarbeit, mit Methoden der magnetischen Kernresonanz (NMR), die Multipolwechselwirkungen von kurzlebigen Isotopen im Festkörper. Die Messungen fanden am damaligen Forschungsreaktor des Kernforschungszentrums Karlsruhe statt. Anschließend ging Dubbers 1972 für zwei Jahre als Postdoc an die neu eröffnete Europäische Neutronenquelle des Institut Laue-Langevin (ILL) in Grenoble, Frankreich. Mit den zuvor entwickelten NMR-Methoden bearbeitete er dort verschiedene aktuelle Probleme der Kern- und Festkörperphysik. 1978 habilitierte er sich in Heidelberg. Dann wechselte er zu Themen der Teilchenphysik mit kalten und ultrakalten Neutronen, wie dem Zerfall des freien Neutrons, den Baryonenzahl-verletzenden Neutron-Antineutron Oszillationen, und vielen anderen. 1985 wurde er Senior Scientist für Kernphysik am ILL, um dort die Teilchenphysik bei niedrigen Energien als Schwerpunkt zu etablieren. Für seine Studien zur schwachen Wechselwirkung erhielt er 1991 zusammen mit Walter Mampe den Stern-Gerlach Preis der Deutschen Physikalischen Gesellschaft. Im gleichen Jahr trat er eine Professur an der Technischen Universität München an. Dem folgte 1993 ein Ruf an die Universität Heidelberg, wo er und seine Arbeitsgruppe am Physikalischen Institut verschiedene neue Methoden zum Studium grundlegender Fragen der Physik entwickelten.

1998 übernahm Dubbers für vier Jahre die Leitung des ILL, wo er das erfolgreiche "Millenium" Erneuerungsprogramm initiierte. Zurück in Heidelberg setzte er sich für den Neubau des Physikalischen Instituts ein, der 2012 bezogen wurde. Nach seiner

Emeritierung 2011 zog es ihn wieder ins Labor, mit Schwerpunkt Messmethodik. Zusammen mit H.-J. Stöckmann schrieb er ein Lehrbuch "Quantum Physics – The Bottom-up Approach". 2012 wurde er Ehrendoktor der Technischen Universität Wien. Die American Physical Society hat ihn kürzlich zum Outstanding Referee ernannt.

*Dirk Dubbers*

## **Fröhliche Wissenschaft – Von Neutronen und anderen wichtigen Dingen**

Dass Wissenschaft fröhlich sein soll, verlangte bereits Friedrich Nietzsche. Ob Neutronen wichtig sind, möchte ich erst mal offenlassen. Auf jeden Fall haben sie einiges Gewicht: Wenn wir morgens auf die Waage schauen, so machen die Neutronen knapp die Hälfte der angezeigten Kilos aus.

Zur Schule ging ich in Tübingen. Das dortige Uhlandgymnasium liegt an der Uhlandstraße, nahe Uhlandplatz und Uhlandbad. Das klingt etwas provinziell, gewiss. Auf der anderen Seite des Neckars liegt das Stift, wo einst Hegel, Schelling und Hölderlin ihre Studienzeit verbrachten und gemeinsam ihre Gesellschaftsutopien ausheckten. Spätere Insassen des Stifts waren Mörike und Hauff, davor war dort Kepler, dessen Mutter als anerkannte Hexe bleibende Schäden davontrug. Die Ureinwohner von Tübingen, die Gogen, sind bekannt für derbe Ausdrucksweise und sauren Wein. Als Stadt auf jeden Fall ein interessantes Biotop.

Wie heute gab es Schulversuche und Versuchsschulen, darunter damals auch das Uhlandgymnasium. In der Oberstufe mussten wir zwischen Mathematik und Englisch wählen, plus ein naturwissenschaftliches Fach, man glaubt es heute kaum. Die so gewonnene Zeit floss in zehn Wochenstunden Griechisch und Latein. Abgesehen von Philosophie und Religion blieben nur noch 13 Wochenstunden für alles andere. Aber Bildungslücken tun ja nicht weh, man spürt sie eigentlich kaum. Englisch abzuwählen kam mir entgegen, da ich zuvor als Austauschschüler ein high school Diplom in Ann Arbor, Michigan (später Tübingens Partnerstadt) erworben hatte. Dort hatte es mir sehr gut gefallen: noch heute

hebt sich meine Stimmung, wenn ich in den USA aus dem Flugzeug steige.

Sie merken, ich bin kein Schwabe. Wir waren wenn auch wohlgelittene "Reingeschmeckte", wie man in Tübingen sagt. Meine Mutter war kurz vor Kriegsende mit ihren damals drei Kindern im Leiterwagen aus Dresden geflohen, wo unser Haus ausgebombt war bis zum Keller, in dem wir saßen. Mein Vater war währenddessen an der Ostfront und danach in Kriegsgefangenschaft.

Zum Studium ging ich 1964 nach Göttingen. Dort hat man als Physikstudent bis zum Vordiplom eigentlich nur Mathematik getrieben. Diese war abstrakt und schwierig, beispielsweise kam in der Vorlesung zur Integralrechnung kein einziges Integralzeichen vor. Das klingt heute etwas schräg als Grundausbildung Physik, hatte aber auch Vorteile. Erstens hatten die naturwissenschaftlich vorgebildeten Kommilitonen keinen nennenswerten Vorsprung vor den sprachlich belasteten. Zweitens erweckt man mit solch einem Portfolio den Eindruck, dass man sich einen gewissen Luxus leisten kann (ähnliches gilt für den Umgang mit alten Sprachen). Drittens, noch wichtiger, man verliert die Scheu, sich mit Dingen abzugeben, die eigentlich viel zu schwer für einen sind.

### → **Heidelberg 1966**

Nach dem Vordiplom zog ich (angedeutet durch →) mit einer Gruppe Gleichgesinnter nach Heidelberg. Dort begann ich nach dem sechsten Semester meine Diplomarbeit, die damals noch vor der Diplomprüfung anzufertigen war. Das heißt nicht, dass ich besonders schnell studiert hätte, das Vordiplom machte ich wie damals üblich im fünften Semester. Der Grund für die Eile war, dass ich endlich etwas Gescheites machen wollte. Als Thema wählte ich eines, bei dem es noch nichts gab außer ein leeres Labor.

Ich hatte erst eine Theorievorlesung gehört, die Quantenphysik bei Jensen nach der Heisenbergschen Matrixmechanik. Letztere erinnerte mich an das in Göttingen Erlernte, aber mir war lange nicht klar, dass das etwas mit Physik zu tun hat. Ich fiel jedenfalls aus allen Wolken, als Jensen spät im Semester sagte: "Nehmen wir

als Beispiel einen Elektronenstrahl". Auf die Frage, ob er uns ein Lehrbuch empfehlen könne, sagte Jensen: "Nein, ich habe nie eins gelesen, alles ist aus der Originalliteratur". Auf eine ähnliche Frage hatte Pohls Schwiegersohn in der Anfängervorlesung in Göttingen geantwortet: "Als Lehrbuch kommt nur der Pohl in Frage", was unseren Standortwechsel nachträglich verständlich macht.

Da ich wegen der Diplomarbeit weder für Vorlesungen noch für Übungsstunden Zeit hatte, verabredete ich mit einem Übungsassistenten, dass ich nur die Übungsaufgaben zur Elektrodynamik abgeben und mich hinterher von ihm prüfen lassen werde. Bei dieser Miniprüfung war der Assistent dann ausgesprochen ungnädig, aber ich hatte den Schein.

### **Kernmomente kurzlebiger Betastrahler**

Als Diplomand hatte ich die Aufgabe, unter Anleitung von Hans Ackermann eine Apparatur zu bauen zur Kernresonanz (NMR) an spinpolarisierten  $\beta$ -Strahlern, aktiviert durch den Einfang polarisierter Neutronen. Mit ihr sollten am Reaktor des Kernforschungszentrums Karlsruhe die magnetischen Dipolmomente kurzlebiger Kerne bestimmt werden, Kopfermann lässt grüßen. Zum NMR-Nachweis wurde die Polarisation der aktivierten Sondenkerne über deren paritätsverletzende  $\beta$ -Asymmetrie gemessen. Die Idee hierzu hatte zu Putlitz (Band 2) aus Amerika mitgebracht.

Als erstes musste ich ein Labor am Physikalischen Institut, seinerzeit Philosophenweg 12, mit großen Holzbalken auslegen, damit der Boden nicht einstürzte, wenn wir den schweren Elektromagneten daraufstellten, den ich zu homogenisieren hatte. Den dazu passenden regelbaren Heliumkryostaten für die tiefen Temperaturen baute währenddessen für uns ein Herr F. X. Stöhr in Augsburg, damals noch Spezialist für Molkereiarmaturen, heute hidden champion für Kryo- und Vakuumtechnik. Der Frequenzgenerator für die Kernresonanz, heute ein kleiner Baustein, hatte die Ausmaße eines deckenhohen Kühlschranks.

Unsere Apparatur ließen wir an einem Gründonnerstag auf einem Tieflader nach Karlsruhe bringen, wo ich über die Ostertage

in Ruhe das magnetische Kernmoment von Indium-116 (Halbwertszeit 14 s) messen wollte. Wie groß war meine Enttäuschung, als die Reaktormannschaft sich weigerte, die Apparatur noch am selben Nachmittag an den vorgesehenen Strahlplatz zu hieven, und uns auf den folgenden Dienstag vertröstete. Völlig unverständlich war auch, dass die Reaktorsicherheit mein Bett, das ich später neben dem Strahlrohr aufgebaut hatte, entfernt haben wollte, und ebenso, dass Herr Ackermann glaubte, zusätzlich zwei Doktoranden einstellen zu müssen, einen Herrn Mertens und einen Herrn Winnacker. – Die Resonanzsignale von Indium-116 sowie weiterer Kerne haben wir schließlich in gemeinsamer harter Arbeit etwa ein Jahr später gefunden, wie hier im Sommer von Albrecht Winnacker berichtet, der im Anschluss an seine Doktorarbeit 1970 in die USA zu neuen Ufern aufbrach.

### **Festkörperphysik mit Methoden der Kernphysik**

Während meiner Doktorarbeit 1970–72 wurden an dieser Apparatur, mit Hans-Jürgen Stöckmann als weiterem Doktoranden, über die NMR-Signale nicht nur die magnetischen Dipolmomente, sondern auch die elektrischen Quadrupolmomente leichter Kerne wie Lithium-8 (0.8 s) und Fluor-20 (11 s) bestimmt. Dazu diente die Aufspaltung des NRM-Signals in nichtkubischer Umgebung. Kennt man ein solches Kernmoment, dann kann man die NMR-Signale in verschiedenen Kristallumgebungen dazu verwenden, um innere Kristallfelder zu messen. So konnten wir das Kristallfeld am Ort eines regulären Gitterplatzes bestimmen, welches durch ein benachbartes Zwischengitteratom erzeugt wird. Von praktischer Bedeutung war insbesondere, dass wir auf diese Weise die Temperatur bestimmen konnten, bei der ein solcher (hier durch  $\gamma$ -Rückstoß erzeugter) Kristalldefekt wieder ausheilt.

Die Neutronenphysik hatten wir in einer schönen und anspruchsvollen Vorlesung von K. Beckurts gelernt, der zwanzig Jahre später von der RAF ermordet wurde. Jedoch war niemand von uns in der Festkörperphysik beschlagen. Daher veranstaltete ich mit anderen interessierten Doktoranden ein inoffizielles



Seminar nach folgendem Verfahren: Jede Woche mussten alle Beteiligten einen Vortrag über das jeweils nächste Thema vorbereiten. Dann wurde eine Weinflasche auf dem Tisch in Rotation versetzt, und auf wen am Ende der Flaschenhals zeigte, der bekam die Flasche und hielt den Vortrag. Auf diese Weise haben wir die Solid State Physics von Kittel von vorne bis hinten durchgearbeitet.

Es waren aufregende Zeiten, nicht nur in der Wissenschaft. Der Krieg in Vietnam mit seinen Flächenbombardements hielt uns im Bann, und jeder wusste besser, wie man die Gesellschaft verändern muss. Ich selber war in der Fakultät zum Mittelbauvertreter gewählt worden und machte Herrn Heintze (Band 1) und Herrn Soergel das Leben schwer. Heute wird oft vorgebracht, das damalige Verhalten sei die notwendige Abrechnung mit den Sünden der Väter gewesen. Nach meiner Erinnerung stand dies nicht im Vordergrund. Das sieht man auch daran, dass in Paris oder Berkeley, wo diese Begründung wegfällt, die Dinge nach dem gleichen Muster abliefen wie in Heidelberg.



**Abb. 1.** Doktorprüfung: Der Autor als polarisiertes Neutron, vor und nach einem Spin-Flip (Pfeil) mit, von links, Paul Heitjans, Hariolf Grupp (Rücken), sein nicht verwandter Namensvetter Michael Grupp, rechts hinten meine Frau.

→ **Grenoble 1973**

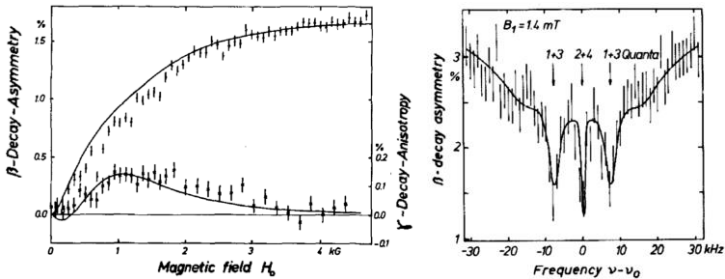
Nach meiner Promotion, Abb. 1, gingen Stöckmann, von dem ich viel gelernt habe, und ich Anfang 1973 zusammen mit Ackermann für gut zwei Jahre an die gerade eröffnete Europäische Neutronenquelle des Instituts Max von Laue – Paul Langevin in Grenoble (ILL). Dort bauten wir eine  $\beta$ -NMR Apparatur auf, unter sehr viel besseren Bedingungen als in Karlsruhe.

Von den vielen in Grenoble behandelten Themen möchte ich nur eines erwähnen, das ich sehr spannend fand. Ich hatte in meiner Doktorarbeit neben den Experimenten auch zur Theorie gearbeitet, zum Verhalten beliebig tensorpolarisierter Kerne unter Multipolwechselwirkung mit der Kristallumgebung. Die klassische NMR-Theorie taugte nicht dafür, sie benötigte ja nur den Grenzfall einer Vektorpolarisation der Kerne. Für einfache Fälle fand ich auch die irreduzible (d. h. einfachstmögliche) Darstellung des Problems, jedoch nicht für den allgemeinen Fall, ich vermutete aber, dass diese existiert. Dann kam U. Fano zu Besuch nach Heidelberg, bestätigte dies und nannte uns eine seiner Arbeiten zur gesuchten Darstellung, die ich dann als Ausgangspunkt für meine Rechnungen nahm.

Ich habe später Fanos Gruppe in seinem Chicagoer Institut nochmal einen Besuch abgestattet. Merkwürdigerweise wird Fanos dreiseitige Arbeit (Physical Review 1964) fast nirgends zitiert, obwohl sie für große Communities wichtig ist.

Abb. 2 zeigt zwei Ergebnisse nach dieser Methodik. Links ist eine simultane Messung der Magnetfeldabhängigkeit der Vektorpolarisation ( $\beta$ -Asymmetrie, obere Kurve) und der nachfolgenden Tensorpolarisation ( $\gamma$ -Anisotropie, untere Kurve) am Fluor-20 (11 s) in einem  $\text{MgF}_2$ -Einkristall wiedergegeben, die der Bestimmung des Vorzeichens des Quadrupolmoments diente. (Die Einbrüche in der  $\beta$ -Asymmetrie wurden später als resonante Kreuzrelaxationseffekte identifiziert, was zu einer weiteren Methode der Festkörperspektroskopie führte.) Rechts ist ein  $\beta$ -NMR-Spektrum zur Bestimmung des Quadrupolmoments von Lithium-8 (0.8 s) in einem  $\text{LiTaO}_3$ -Einkristall gezeigt. Die

verschiedenen Kurven der Abb. 2 wurden mit ein und demselben Programmpaket berechnet.



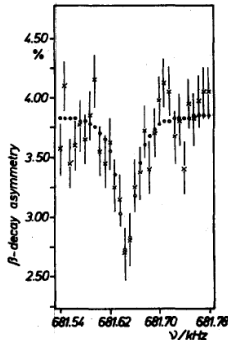
**Abb. 2.** Messungen und exakte Rechnungen zur  $\beta$ -NMR. *Links:* Reorientierung von Fluor-20 von einer Vektorpolarisation ( $\beta$ -Asymmetrie) zu einer Tensorpolarisation ( $\gamma$ -Anisotropie) unter Dipol- plus Quadrupol-Wechselwirkung. *Rechts:* Mehrquantenübergänge in der Quadrupolaufspaltung des NMR-Signals von Lithium-8.

### → Heidelberg 1975

Nach meiner Rückkehr nach Heidelberg sagte Soergel, ich solle nicht die Ochsentour machen und einfach meine Veröffentlichung zur Reorientierung, Abb. 2 links, zur Habilitation einreichen. Da ich wusste, dass Soergel Habilitationen als Zeitverschwendung ansah, ging ich nicht darauf ein und machte erst 1978 aus sieben Arbeiten eine kumulative Habilitation.

Albrecht Winnacker kam übrigens später nochmal zu uns, und wir verabredeten uns zu einem besonderen Experiment. Da er dieses in seinem Vortrag nicht genannt hat, hier in Kürze: In der klassischen Festkörper-NMR sind die Signale durch die Dipolwechselwirkung der NMR-Kerne mit ihren Nachbarkernen stets auf mehrere Kilohertz verbreitert, vgl. Abb. 2 rechts. Bei der  $\beta$ -NMR Methode haben die wenigen kurzlebigen Kerne jedoch keine gleichartigen Nachbarn, und der Einfluss ungleicher Nachbarn lässt sich durch selektive Resonanzeinstrahlung unterdrücken. Dadurch kamen wir mit Lithium-8 in  ${}^7\text{Li}_2\text{S}$ -Pulver auf eine Restlinienbreite von 32 Hertz, s. Abb. 3, ein Weltrekord in der

Festkörper-NMR, die sogar die Restbreite von 190 Hertz des bisherigen Rekordhalters, Herrn Haeberlen (Band 3, Abb. 1), unterbot. Zu dieser Methode haben wir schöne Ergebnisse veröffentlicht, eines zur Kern- und eines zur Festkörperphysik, aber das Potenzial der Methode wurde damit nicht wirklich ausgereizt.



**Abb. 3.** Weltrekord an NMR Linienbreite in einem Festkörper, gemessen mit  $\beta$ -NMR an Lithium-8.

1978 wurden Ackermann und Stöckmann nach Marburg berufen. Auch die meisten der in Grenoble von mir mitbetreuten Doktoranden erhielten später Rufe: Franz Fujara auf den NMR-Lehrstuhl der TU Darmstadt, Hariolf Grupp auf den Lehrstuhl für Systemdynamik am Institut für Wirtschaftspolitik der TU Karlsruhe, Paul Heitjans als (jetzt Senior-) Professor für Physikalische Chemie, U. Hannover; Michael Grupp hingegen gründete das alternative Synopsis-Institut für Energieforschung in Südfrankreich und bekam 2004 den Europäischen Solarpreis. Mir selber wurde angeboten, in Heidelberg zu bleiben, was mir lieber war als eine Dauerstelle in Marburg. Ich verließ daher die  $\beta$ -NMR Gruppe und startete als Privatdozent zwei neue Vorhaben.

### Der Zerfall des freien Neutrons

Frühere Experimente zum  $\beta$ -Zerfall des freien Neutrons fanden in den USA und der Sowjetunion statt, und zwar direkt an der

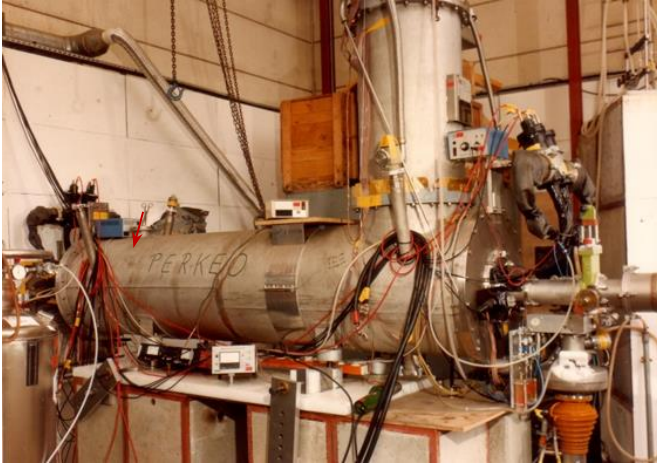
äußeren Wand eines Kernreaktors. Der Strahlungsuntergrund war hoch, das Strahlvolumen für den Neutronenzerfall war klein, und die Zählraten wurden noch in Ereignissen pro Stunde angegeben.

Meine Absicht war, in Grenoble den Ausgang eines der neuen, von Maier-Leibniz (Band 1) dort eingeführten fast verlustfreien Neutronenleiter zu benutzen. Diese Leiter sind lange, handbreite und handspannenhohe, innen metallverspiegelte Glaskanäle, in denen die Materiewellen der Neutronen Totalreflexion machen. Der anvisierte Leiterausgang war 100 m vom Reaktor entfernt, fast im Freien, und praktisch ohne Strahlungsuntergrund vom Reaktor. Mit einer großen supraleitenden Sammelspule für die  $\beta$ s sollte das Zerfallsvolumen vielhundertfach erhöht werden.

Von unserem Geldgeber wurde mein Antrag zum Neutronenzerfall bewilligt. Das ILL lehnte den Vorschlag jedoch ab, da ein bedeutender amerikanischer Ratgeber in einem Summary Talk am ILL sagte, an der Aufgabe hätten sich schon die Besten des Fachs die Zähne ausgebissen (er meinte sich selber), und neuer Fortschritt sei nicht zu erwarten. Zum Glück war die Welt damals noch nicht so gut vernetzt wie heute, der Geldgeber erfuhr nichts von dieser Ablehnung, und ich kaufte den genehmigten Supraleitermagneten. Die Paradenfirma Oxford Instruments war mir zu teuer, daher ging der Auftrag an BBC (jetzt ABB) in Mannheim. Deren Angebot war billig, denn die Firma wollte Supraleitung erst lernen. Zur Strafe mussten wir den Magneten zweimal aufschweißen, bevor er funktionierte. Im Jahr darauf machte ich einen neuen Anlauf am ILL, mein Vortrag wurde jedoch nach fünf Minuten abgebrochen mit der Begründung, dass wir sonst keinen Kaffee mehr bekämen. Aber Herr Soergel, trotz Grippe mitgereist, boxte die Sache durch.

Als wir am ILL bei der dann genehmigten Messzeit zum Neutronenzerfall den Strahl für das PERKEO getaufte Instrument öffneten, Abb. 4, sahen wir sofort auf dem Vielkanalanalysator ein wunderschönes  $\beta$ -Spektrum hochlaufen, mit einer Zählrate von 200 Ereignissen pro Sekunde. Ich war völlig überwältigt. Es ist nicht so sehr die Fröhlichkeit der Wissenschaft, die sich in solchen Momenten einstellt, sondern eher eine tiefe Erschütterung, wenn

einem nach jahrelanger Arbeit plötzlich entgegenspringt, wonach man sucht. Ich habe dieses Heureka bis in jüngster Zeit noch öfters erlebt, in Experiment und Theorie, womöglich hat das ein gewisses Suchtpotential.



**Abb. 4.** Der  $\beta$ -Zerfall polarisierter Neutronen. Das Spektrometer PERKEO außerhalb der großen Neutronenleiterhalle des ILL (1982). Die Schere auf dem Instrument (roter Pfeil) zeigt das supraleitende Magnetfeld an, bei abgehängten Stromzuleitungen (schwarz).

Hauptakteure waren damals Peter Bopp, Eckehardt Klemt, Jürgen Last und Heinrich Schütze. Zudem hatte ich Stuart Freedman nach Heidelberg eingeladen, der gerade einen Anschlussjob suchte (später U. Berkeley). "Local contact" am ILL war Otto Schärpf, mehr zu ihm später.

Im Zerfall polarisierter Neutronen gibt es viele Messgrößen, neben der Lebensdauer vor allem solche, die von Impuls und Spin der beteiligten Teilchen (Neutron, Proton, Elektron, Neutrino) abhängen. Im Standardmodell der Teilchenphysik benötigt die Beschreibung des Neutronenzerfalls jedoch nur zwei Größen, die Stärke der Vektor- und die der Axialvektorkopplung. Das Problem

ist daher stark überbestimmt, und man kann mit den überzähligen Daten interessante Tests auf unbekanntes Physik jenseits des Standardmodells machen.

Über die Jahre hinweg dachten wir oft, jetzt ist es genug mit dem Neutronenzerfall, aber dann kamen stets neue Anforderungen, aus der Teilchenphysik, der Kosmologie (zur Entstehung der Elemente in den ersten drei Minuten nach dem Urknall), und aus der Physik der Sonne, da alle dort eingehenden Neutrinoquerschnitte und schwachen Kopplungskonstanten aus Neutronenzerfallsdaten hergeleitet sind.

### **Ausflug nach "Flatland"**

Mein zweites Standbein sollte ein Projekt zur Physik in zwei räumlichen Dimensionen sein. Herr Wegner (Band 3), damals frisch berufen, hatte im Kolloquium über Phasenübergänge gesprochen, die Änderungen des Aggregatzustands der Materie. Die wichtigen Größen, die kritischen Exponenten, sollten demnach nur von der räumlichen Dimension des Systems abhängen (sowie von der Dimension des Ordnungsparameters). In drei Dimensionen war das Gebiet der Phasenübergänge mittels Neutronenstreuung schon weitgehend abgegrast. In zwei Dimensionen gab es dagegen noch kaum Ergebnisse, vor allem fehlten die dynamischen Exponenten.

Um die Dynamik der Phasenübergänge in zwei räumlichen Dimensionen zu erforschen, deponierten wir radioaktive Atome auf einer Kristalloberfläche, um deren Kernspins dynamisch zu polarisieren, mit Wolfgang Weibler als Doktoranden. Anschließend sollte das Verhalten der Atome, ähnlich wie in der  $\beta$ -NMR, über gestörte Winkelverteilungen des Kernzerfalls verfolgt werden. Das Projekt hatte ich mit (dem späteren Nobelpreisträger) Gerhard Ertl in München abgesprochen. Dieser empfahl mir als Kopiloten seinen Mitarbeiter und Privatdozenten Klaus Wandelt (jetzt U. Bonn), der uns in die Geheimnisse der Oberflächenphysik einweichte. Wir kamen gut voran, hatten bereits ermutigende Zwischenergebnisse veröffentlicht, aber noch keine Polarisations-signale gefunden.

→ **Grenoble 1985**

Da erhielt ich das Angebot, für fünf Jahre als "Senior Scientist" für Kernphysik an das ILL zu kommen, um die Teilchenphysik mit Neutronen auszubauen. Ich kündigte meine ebenfalls befristete Stelle in Heidelberg, und wir zogen mit unseren inzwischen schulpflichtigen Kindern wieder nach Grenoble. Da ich am ILL (Abb. 5) ein neues Großprojekt beginnen wollte, musste ich den Ausflug in die zweidimensionale Welt erst einmal beenden.



**Abb. 5.** Das Reaktorgebäude des ILL. Rechts in 100 m Abstand das 13 m hohe Detektorgebäude zur Suche nach Neutron-Antineutron Oszillationen, dahinter die Autobahn nach Lyon und der Fluss Drac.

**Suche nach Neutron-Antineutron Oszillationen**

Seit Jahrhunderten wird ein Gesetz zur Erhaltung der Masse in den Prozessen der Natur postuliert und geprüft. Das moderne Analogon hierzu ist die Erhaltung der Baryonenzahl  $B$  in allen Teilchenreaktionen. Die Nichterhaltung von  $B$  ist jedoch in den meisten Modellen jenseits des Standardmodells vorprogrammiert. Ein wiederkehrendes Thema in der Teilchenphysik ist daher die Suche nach einer  $B$ -Verletzung. So wird zum Beispiel intensiv nach einem Zerfall des Protons gesucht. Dieser würde die Baryonenzahl um eine Einheit ändern, von  $B = +1$  nach  $B = 0$ . Wir wollten am ILL, in Kollaboration mit einer größeren Zahl von Kollegen aus Padua und Pavia, nach einem spontanen Übergang des Neutrons zum

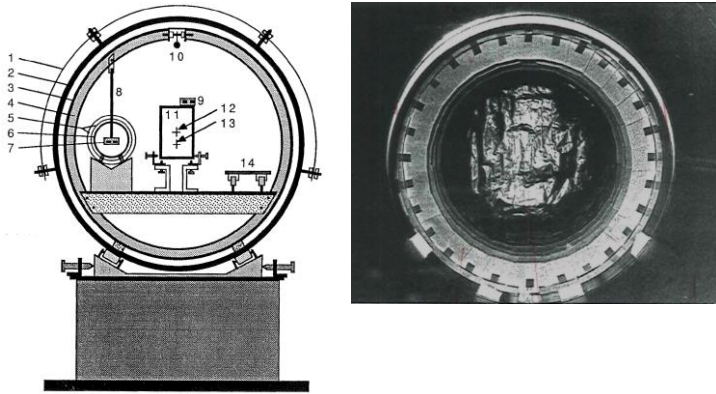


Antineutron suchen. Diese "n-nbar" Oszillationen würden  $B$  um zwei Einheiten verletzen, von  $B = +1$  nach  $B = -1$ .

Ich hatte versucht, auch eine französische Gruppe für n-nbar zu gewinnen. Einen Kollegen aus einer südfranzösischen Universität hatte ich fast überzeugt, aber er zog sich dann doch zurück mit der Entschuldigung, dass seine Studenten nicht mithalten können, da sie wüssten, dass sie es als Universitätsabsolventen bestenfalls zum Bahnhofsvorsteher bringen könnten ("chef de gare"). Tatsächlich hatte sich später mal ein Franzose aus einer Universität (statt aus einer Grande École) am ILL beworben, aber der französische Vizedirektor legte sein Veto ein. Meine britische Kollegin, die den Bewerber ebenfalls gerne eingestellt hätte, fragte spitz: "Are they damned forever?" – Ein Kollege der Universität Grenoble, den ich fragte, ob er eine Vorlesung Neutronenphysik halten wolle, meinte, das müsse Paris vorab genehmigen, und das sei ihm zu kompliziert.

Um das n-nbar Thema aufzuarbeiten, lud ich Robert Marshak, einen der Väter der elektroschwachen Standardtheorie, auf ein Sabbatical in das ILL ein. Marshak hatte in den USA die Theorie zum n-nbar Prozess entwickelt. Er veranstaltete am ILL mehrere Seminare, die er anschließend in seinem Werk "Conceptual Foundations of Modern Particle Physics" zusammenfasste. Ich besuchte ihn auch in Virginia. Sein Sohn schrieb mir später, dass Marshak, als er, zurück in den USA, das Manuskript in den Briefkasten warf, mit seiner Frau scherzte, jetzt könne er ja beruhigt sterben. Eine Woche darauf sei er beim Spielen mit seinen Enkeln am Meer im seichten Wasser plötzlich ertrunken. Ich trete seiner Familie wohl nicht zu nahe, wenn ich das hier ins Gedächtnis rufe.

Das n-nbar Experiment war konzeptuell sehr einfach. Die Neutronen fliegen frei über eine lange Strecke, und am Ende schaut man, ob ein Antineutron darunter ist, Abb. 5 bis 7. Ein Antineutron ist leicht zu erkennen, da es beim Auftreffen auf normale Materie annihilert, wobei viel Energie freigesetzt wird, hauptsächlich in Form schneller Pionen, die in einem großen Teilchenspurdetektor nachgewiesen werden können. Das Projekt wurde unter der Auflage gefördert, dass ich nichts anderes mache außer n-nbar.



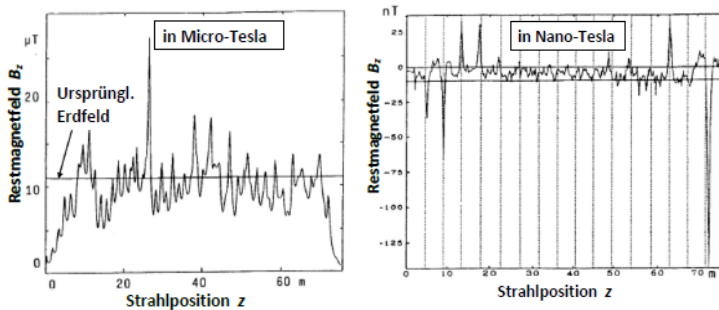
**Abb. 6.** Suche nach Neutron-Antineutron Oszillationen, Anfang und Ende des 75 m langen Strahlrohrs. *Links:* (2) Vakuumrohr (1.2 m  $\varnothing$ ), (3) Mu-metallrohr, (7) Magnetometer in Parkposition, (11) divergierender Neutronenleiter (17 m lang), (14) Personentransportwagen. *Rechts:* Die Kohlenstoff-Annihilationsfolie in der Mitte des Antineutron Detektors, umringt von  $^6\text{LiF}$  Platten.



**Abb. 7.** Eingangsseite des Antineutron-Detektors, mit (von innen) Trigger- und Vertex-Detektoren, Kalorimeter und Veto-Szintillatoren.

Es gab wie üblich große finanzielle und experimentelle Hürden zu überwinden. Hauptproblem war natürlich, sicherzustellen, dass innerhalb der Messzeit kein falsches Untergrundereignis auftrat, induziert durch kosmische Strahlen, die zu Hunderttausenden pro Sekunde auf den Detektor fielen. Dies gelang durch die Detektorbaukunst unserer italienischen Freunde unter Leitung von Milla Baldo-Ceolin und Gabriele Puglierin.

Ein weiteres Problem war, dass  $n$ -bar Oszillationen, so es sie gibt, im Magnetfeld der Erde unterdrückt sind, da die magnetische Energie von Neutron und Antineutron sich im Vorzeichen unterscheidet. Wir brauchten deshalb eine magnetische Abschirmung des Strahlrohrs, die das Erdmagnetfeld von 50 Mikrottesla auf einen 5000-mal kleineren Wert von 10 Nanotesla unterdrücken sollte.



**Abb. 8.** Magnetfeld längs des 75 m langen  $n$ -bar Strahls, mit der Mumetall-Abschirmung installiert. Links *vor*, rechts *nach* Kompensation des Längsfelds. Das horizontale Band rechts ist 10 nT breit.

Nun hat ein sehr langes Abschirmrohr, selbst aus dem besten weichmagnetischen Mumetall, praktisch keine Abschirmwirkung gegen Felder längs der Rohrachse. Aus einem langen Abschirmrohr bricht das Magnetfeld an allen Nahtstellen heraus, s. Abb. 8 links, und hat Komponenten in alle Richtungen, viel schlimmer als ohne Abschirmung. Das Gegenfeld einer langen, über das Strahlrohr gewickelten Magnetspule kann zwar ein homogenes Restfeld kompensieren, aber solch ein Feld?

Es gab mit solch langen Magnetabschirmungen keine Erfahrung, aber wir spekulierten nach langem Nachdenken, dass sich das ausgebrochene Feld, Abb. 8 links, von alleine wieder ins Mumetall zurückziehen sollte, sobald das Restfeld zu Null kompensiert ist, nach kunstvoller "Entmagnetisierung" des gesamten Aufbaus. Am CERN hatte ich zuvor einen Ofen gefunden, in dem die 4.5 m langen Rohre bei 1000°C unter Wasserstoff-Atmosphäre getempert werden konnten. Den Gefallen tat uns das Mumetall dann auch, s. Abb. 8 rechts, mit 99.8% Oszillationseffizienz im Restfeld. Der Erfolg kam kurz bevor der große Detektor fertig war. Es gab ein hörbares Aufatmen, denn wer will schon schuld sein, wenn mehr als 100 Mannjahre Arbeit in den Sand gesetzt sind.

Nächstes Problem: Als wir den Strahl öffneten, erkrankte der Detektor im Untergrund gestreuter Neutronen. Auslöser war eine mit anderen Mitteln nicht erkennbare Wasserstoff-Verunreinigung in der hochreinen Kohlenstoff-Annihilationsfolie. Um den Detektor zu schützen, mussten wir eine Lage aus  ${}^6\text{LiF}$  Kacheln mit angereichertem  ${}^6\text{Li}$  einziehen, einem starken Neutronenabsorber.

Ich besorgte 20 kg  ${}^6\text{Li}$  Metall, das zu 75 kg  ${}^6\text{LiF}$  Pulver verarbeitet werden musste. Bei dessen Herstellung sind große Mengen an Flusssäure und explosivem Wasserstoff im Spiel, und die Reaktionen gehören zu den energiereichsten des Periodensystems. Daher machte ich die Umwandlung lieber selber, in unzähligen 10-Gramm Portionen in einer kleinen Hütte. Auch das Sintern der 900 Kacheln, je  $20 \times 20 \times 0,2 \text{ cm}^3$ , war wegen der Aggressivität von LiF bei hohen Temperaturen kein Kinderspiel, und wenn ich abends nach Hause kam, sah ich aus wie ein Bäcker.

Die Mühe hat sich gelohnt. Wir fanden zwar keine n-nbar Oszillationen, sonst hätten Sie davon gehört. Wir konnten aber eine sehr gute untere Grenze von drei Jahren für eine zeitliche n-nbar Oszillationsperiode setzen, entsprechend einer Übergangsenergie von  $10^{-23} \text{ eV}$ , bei einer mittleren Neutronenflugzeit von nur 0.2 Sekunden. Damit können diverse Modelle im  $10^{+14} \text{ eV}$ -Bereich ausgeschlossen werden. – Zurzeit bereiten amerikanische

Gruppen ein neues  $n$ - $n$ bar Experiment vor, an der neu entstehenden Europäische Spallationsquelle (ESS) in Lund, Schweden.



**Abb. 9.** Der Autor mit einem Teil der  $n$ - $n$ bar Mannschaft: Physiker, Techniker, Ingenieure und Datenscanner.

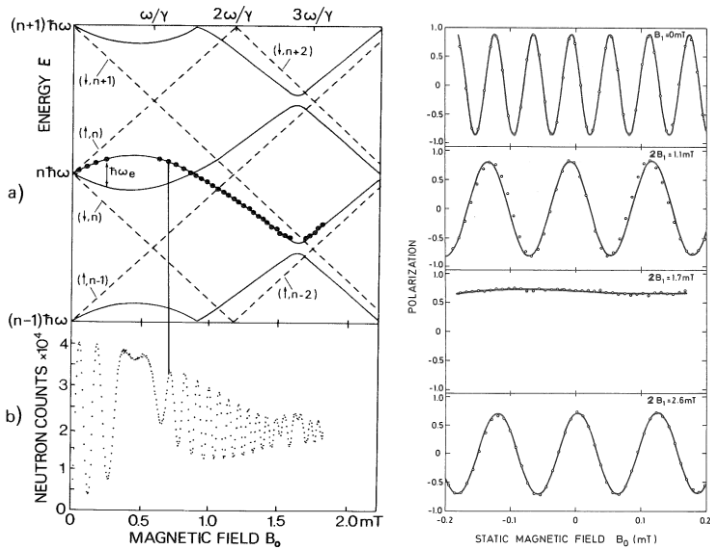
Abb. 9 zeigt einen Teil der Mannschaft. – Unser italienischer Ingenieur pflegte zu sagen, Ingenieure unterschieden sich von Physikern darin, dass sie nachdenken, bevor sie handeln. Unser bretonischer Techniker sagte: "Les physiciens aiment les neutrons plus que les femmes". Wie bereits im Untertitel dieses Artikels vermutet, müssen Neutronen doch sehr wichtig sein.

### **Dressed neutrons, Berryphasen und anderes**

Es stellte sich heraus, dass ein großes Experiment wie  $n$ - $n$ bar, wo das Schleppen von Röhren und der Abbau von Datenbergen täglich Brot ist, die Gefahr geistiger Verödung bergen kann. Daher war es gut, dass man am ILL auch kleine Experimente machen kann, von denen ich eine Auswahl vorstelle.

"*Dressed neutrons*": Im früheren "Palaver" des Physikalischen Instituts trugen Diplomanden aller Fachrichtungen vor, ebenso wie durchreisende Koryphäen. Cohen-Tannoudji, später Nobelpreis-

träger, erzählte dort über seine Experimente mit "dressed atoms", das sind Atome, die mit den sie umgebenden Hochfrequenz-Quanten ein gekoppeltes System bilden. Wir wollten ein solches Experiment mit einem Strahl kalter Neutronen machen, die wir im Fluge mit einem Hochfrequenzfeld bestrahlten, mit im Prinzip beliebiger Frequenz.



**Abb. 10.** Dressed-particle Effekte mit polarisierten Neutronen: *Links:* a) berechnetes und gemessenes dressed-neutron Energieniveauschema, letzteres rekonstruiert aus der in b) gezeigten Spinrotationskurve. *Rechts:* Unterdrückung der Spinrotation des Neutrons durch Bestrahlen mit Hochfrequenz einer kritischen Feldstärke (3. Kurve).

Wir machten dieses Experiment aus zwei Gründen. Erstens steht in vielen Lehrbüchern über derlei Effekte, dass es sich um Interferenzen zwischen ein- und auslaufenden Lichtstrahlen handle (dasselbe wird vom Hanle-Effekt gesagt). Das ist nicht einmal richtig falsch, aber es trifft nicht den Kern der Sache. Dies sieht man daran, dass man dieselben Effekte statt mit Atomen auch mit

Neutronen ohne jede Lichteinstrahlung erhält. Abb. 10 zeigt links das gemessene und das berechnete Energiediagramm des gekoppelten Systems aus Neutron und Hochfrequenz ( $\omega = 113$  kHz), den Atomphysikern wohlbekannt aus dem später erfundenen "Sisyphos"-Kühlverfahren. Mit der gleichen Apparatur haben wir auch dressed-neutron "level-crossing" Signale gemessen.

Unser zweites und wichtigeres Motiv war, dass man die Spinrotation der "gedressten" Neutronen bei einer bestimmten Stärke des Hochfrequenzfeldes komplett unterdrücken kann, siehe Abb. 10 rechts. Die Hoffnung bestand, dass man wegen der damit einhergehenden Energiedegeneration die Neutron-Oszillationen im Erdmagnetfeld wieder aufleben lassen und so das teure Mumetall einsparen könnte. Wir fanden, dass dies über die Levelcrossing-Signale tatsächlich möglich ist. Aber es stellte sich heraus, dass dann ohne Mumetall die Homogenität des Erdfeldes nicht ausreicht, und wir hätten nichts gewonnen. – Die Gutachter glaubten übrigens nicht, dass man die Spinrotation im Flug einfach durch Hochfrequenz-Bestrahlung unterdrücken kann ("wenn es das gäbe, dann wüssten wir das"). Aber da hatten wir den Effekt schon gemessen, siehe Abb. 10 rechts, weil wir es nicht aushielten, länger zu warten.

Wir machten das dressed-neutron Experiment mit Erich Muskat als Diplomand und mit Otto Schärpf, sonntags, wenn dessen Teststrahl frei war. Schärpf ist Jesuit, und wir neckten ihn, ob er denn sonntags arbeiten dürfe. Er hielt uns einen Vortrag über *opera servilia* und *artes liberales* und sagte, er würde sonntags besonders gerne hämmern. Von ihm lernte ich die subtilen Tricks im Umgang mit langsamen polarisierten Neutronen, aber auch, wie man eine Nacht durchhält, ohne einzuschlafen. Wichtig ist, um Mitternacht nochmal ein gutes Mittagessen einzunehmen, da es vor allem der Kalorienmangel ist, der müde macht.

*Berryphasen:* Damals konnte man die führenden Zeitschriften noch systematisch nach interessanten Artikeln durchforsten. Ich stieß dabei auf eine merkwürdige Arbeit von M. V. Berry, der behauptete, dass ein Quantensystem seine Vergangenheit im

Gedächtnis behält, und zwar über eine "topologische" Phase seiner Wellenfunktion. Da zu dem Zeitpunkt der experimentelle Nachweis noch offen war, sollte Thomas Bitter, einer unserer n-nbar Doktoranden, diesen Nachweis mit einem Strahl polarisierter Neutronen führen. Als Parameterraum, in dem sich das System bewegte, nahmen wir den Raum der Magnetfeldvektoren  $\mathbf{B}$ , mit dem für die Berryphase erforderlichen "diabolischen Punkt" bei  $\mathbf{B} = 0$ . Der Vektor  $\mathbf{B}$  beschreibt entlang der Flugstrecke des Neutrons eine (im Experiment frei wählbare) Exkursion in diesem Raum. Bei der Messung der Neutron-Spinrotation sprang uns deren Verzögerung durch die Berryphase regelrecht entgegen, höchste Aufregung! – Bitter entwickelte später bei der Firma AEG die blauen Anzeigetafeln, die am Bahnsteig die Verzögerung der Züge anzeigen.

*Weitere Arbeiten:* Welterstes Nullfeld Spinecho-Spektrometer für kalte Neutronen, mit Ulrich Schmidt, nach einer genialen Idee von Roland Gähler und Robert Golub. – Neuartiger bistabiler Neutron-Spinflipper. – Klassische chaotische Streuung ultrakalter Neutronen. – Es gab also neben n-nbar genügend Themen, um sich zu amüsieren. Eine Bauernregel sagt: "Immer in dieselbe Kerbe hauen bringt Erfolg". Das stimmt wohl, aber etwas Vagabundieren bringt mehr Spaß.

*Anderson-Lokalisierung:* Man hört nur von gelungenen Experimenten, aber wenn alle Experimente gelingen, kann das heißen, dass man nicht genügend hoch zielt. Daher kurz zu einem misslungenen Experiment. P. W. Anderson sagte vor sechzig Jahren voraus, dass die Ausbreitung von Wellen in ungeordneten Medien unter bestimmten Bedingungen zum Stillstand kommt, wofür er den Nobelpreis bekam. Wir wollten diese bis dahin noch nicht einwandfrei nachgewiesene Lokalisierung über die Materiewellen ultrakalter Neutronen in einem Diamantpulver nachweisen. Tatsächlich fanden wir die allerschönsten Transmissionsignale, die ich bestens mit der Lokalisierungstheorie erklären konnte. Leider stellte sich wenig später heraus, dass die Signale auf einer fehlerhaften Zuordnung der Speicherplätze im Rechner beruhten. Nach Behebung des Fehlers waren sie alle wieder verschwunden.



Natürlich führten wir auch die PERKEO Experimente zum Neutronenzerfall weiter. Aus der Lebensdauer des Neutrons und der  $\beta$ -Asymmetrie ergaben sich die genauen Kopplungsstärken der schwachen Wechselwirkung des Neutrons. Dafür erhielten Walter Mampe und ich 1991 den Stern-Gerlach Preis der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG). Zudem suchten wir mit PERKEO mit hoher Empfindlichkeit nach den geheimnisvollen Axionen (nach Neutroneneinfang im Wasserstoff, über einen möglichen Zerfallskanal parallel zur klassischen inneren Paarbildung).

### **Berge und Täler**

Am ILL traf ich auf Walter Mampe und Klaus Schreckenbach, beide "Konvertiten" von der Kernphysik zur Teilchenphysik. Mampe war bekannt durch seine genaue Messung der Lebensdauer an gespeicherten ultrakalten Neutronen, sowie durch die Suche nach einem elektrischen Dipolmoment des Neutrons, zusammen mit Nobelpreisträger N. Ramsey. Schreckenbachs präzise Bestimmung des Reaktor-Neutrinospektrums ist noch heute in aller Munde. Wir drei waren anfangs die einzigen Vertreter der Neutron-Teilchenphysik in Kontinentaleuropa, weitere Gruppen gab es in England, Russland und den USA. Später kamen mehrere Lehrstühle zu diesem Thema hinzu, in München, Mainz, Wien, Zürich, Heidelberg, sowie in neuerer Zeit ein gutes Dutzend in den USA und Kanada.

Mampe und Schreckenbach waren begeisterte Bergsteiger, letzterer war 1973 Expeditionsleiter der Erstbesteigung des Dhaulagiri III im Himalaya. Mit beiden erlebte ich die merkwürdigste Reise meines Lebens. Wir waren, ich glaube, es war 1987, für zwei Wochen in die Sowjetunion eingeladen, um Labors in Leningrad und Moskau zu besichtigen. Wir sagten, wir wollten auch die Untergrundlabors im Kaukasus anschauen, was die Russen aber ablehnten. Wir schrieben zurück, dann blieben wir halt zu Hause, worauf wir grünes Licht bekamen. Die Russen aber grübelten, weshalb wir so insistierten, und kamen zu dem Schluss, dass wir im Kaukasus sicher auf Bergtour gehen wollten.

Als wir dort ankamen, bekamen wir zwei Dutzend Bergschuhe zur Auswahl, mit denen wir den Elbrus besteigen sollten, den mit über 5600 m aus russischer Sicht höchsten Berg Europas. Wir hatten sonst keinerlei Ausrüstung, aber wir machten das Spiel mit. Ich benutzte beim Aufstieg mein Unterhemd als Sonnenbrille. Abb. 11 zeigt die Gruppe, zusammen mit dem unvergessenen Lev Bondarenko auf 4300 m Höhe, kurz bevor wir wegen undurchdringlichem Nebel umkehren mussten. Den Elbrus Gipfel haben wir nie zu Gesicht bekommen, wohl aber das darunterliegende hochinteressante Baksan-Untergrundlabor.



**Abb. 11.** Lev Bondarenko, der Autor, Klaus Schreckenbach und Walter Mampe (von links) attackieren den Elbrus, aufgenommen von einem leicht verwunderten russischen Bergsteiger.

Während meiner Zeit als senior scientist am ILL bekam ich auch eine Aufforderung, mich beim Max Planck Institut in Heidelberg zu bewerben und anzugeben, was ich dort zu machen gedenke. Ich schrieb zurück und nannte Herrn Povh (Band 2) drei Projekte. Erstens die Erzeugung ultrakalter Atome in einer Magnetfalle. Den

Begriff ultrakalte Atome gab es damals noch nicht, und ich nannte als Vorbild die im Magnetpotenzial gespeicherten ultrakalten Neutronen, mit denen am ILL die schönsten Experimente gemacht wurden. Zweitens die gerade in Zürich erfundene Tunnelmikroskopie an Oberflächen, von der es erst einen Konferenzbericht gab, den ich in Kopie mitschickte. (Jahre später wurden beide Themen von MPI und GSI aufgenommen, nachdem sie zu höchsten Ehren gekommen waren.) Drittes Thema war "Spinecho im Fluge" mit einem Helium-3 Strahl zum Studium zweidimensionaler Systeme, in Analogie zum Spinecho mit Neutronen in drei Dimensionen. Das MPI wies das alles natürlich zurück, das sei ja keine Kernphysik, aber ich wollte meine eben erst am ILL begonnenen Projekte sowieso nicht schon wieder aufgeben.

Im Jahr 1991 musste der Reaktor des ILL unerwartet seinen Betrieb einstellen, da ein unzugängliches Metallteil in seinem Innern Schäden aufwies. Dies erforderte einen kompletten Neubau des Reaktors, der erst fünf Jahre später wieder seinen Betrieb aufnehmen sollte. Die Abhängigkeit einer Arbeitsgruppe (oder gar eines Instituts) von nur einem Großgerät ist ein nicht zu unterschätzendes Klumpenrisiko. Von einem Tag auf den anderen mussten n-nbar und PERKEO eingestellt und neue Themen für viele Doktorarbeiten gefunden werden.

### → München 1991

Im selben Jahr übernahm ich eine Professur an der TU München und wurde bayerischer Beamter. Es stellte sich heraus, dass ein Schock wie der lange Stillstand des ILL auch fruchtbar sein kann, denn es entstand eine Reihe neuer Arbeiten, von denen ich einige nennen will.

### **17-keV Neutrino, spontane Polarisierung, nicht-diagonale Berryphasen und anderes**

*17-keV Neutrino:* Hartmut Abele sollte in seiner Doktorarbeit ursprünglich die Lebensdauer des Neutrons nach einer neuen Methode bestimmen. Mangels Neutronen erledigte er stattdessen mit Blattschuss die Existenz eines seinerzeit durch die Welt

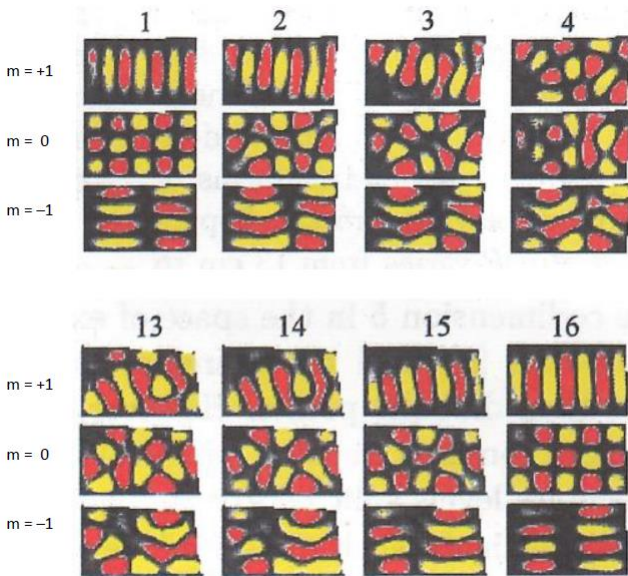
geisternden 17 keV Neutrinos, mit Hilfe eines PERKINO genannten Instruments, mit Christian Schmidt als Diplomanden. Die Methode wurde frühzeitig in den USA kopiert, von einem Kollegen, mit dem wir vorher vertrauensvoll zusammengearbeitet hatten.

*Spontane Polarisierung:* Ulrich Schmidt zeigte in seiner Doktorarbeit, unterstützt durch Experimente am alten "Atomei" FRM (hundertmal schwächer als das ILL), dass neutrale Teilchen wie das Neutron sich im thermischen Strahlungsfeld spontan polarisieren können, was eine Paritätsverletzung vortäuschen kann.

*Nichtdiagonale Berryphasen:* Dies etwas ausführlicher. Hans-Martin Lauber machte ein neues Experiment zur Berryphase, diesmal mit Mikrowellen statt mit Neutronen. Der Parameterraum war der "Raum der Formen" des Mikrowellenresonators. Dessen Geometrie änderten wir schrittweise so, dass ein diabolischer Punkt im Frequenzspektrum des Resonators umfahren wurde (effektiver Spin- $\frac{1}{2}$ ). Wie nach Berry erwartet, änderte sich bei dieser Prozedur das Vorzeichen des stehenden Mikrowellenfeldes.

Zur Kontrolle machten wir dann dasselbe Experiment für einen effektiven Spin-1, realisiert durch ein stehendes Wellenbild mit einem zufälligen Kreuzungspunkt dreier Eigenfrequenzen. Damit wollten wir zeigen, dass sich nach Berry in diesem Fall das Vorzeichen der Wellenfunktion *nicht* ändert. Das stimmte auch für die  $m = 0$ -Komponente des effektiven Spins. Jedoch änderten die  $m = \pm 1$ -Komponenten völlig unerwartet ihr Vorzeichen, siehe Abb. 12. Herr Berry kam angereist und erklärte in seiner unnachahmlichen Art: "Folks, do not be depressed if I find in five minutes what you did not find in three months", und er schlug dann lauter Lösungen des Rätsels vor, die wir längst ausgeschlossen hatten.

Jahre später konnte ich am ILL N. Manini und F. Pistolesi aus P. Nozières Theoriegruppe überreden, sich des Problems anzunehmen. Sie entdeckten, was sie "off-diagonal Berry phases" nannten, wodurch Berrys Theorie komplettiert und unser Experiment erklärt wurde. Selbst in einem Mikrowellenofen kann man Neue Physik finden!



**Abb. 12.** Entdeckung der nichtdiagonalen Berryphasen in den stehenden Wellen eines fast rechteckigen Mikrowellenresonators, mit effektivem Spin-1. Nach einer zyklischen Veränderung der Form des Resonators, beginnend bei Bildchen 1 und endend bei 16, bleibt die Wellenfunktion mit  $m = 0$  dieselbe, für  $m = \pm 1$  jedoch wechselt sie das Vorzeichen (von "rot" nach "gelb"), entgegen Berrys Voraussage.

*Weitere Arbeiten:* Welterster "Supermirror"-Neutronenleiter und Supermirror beam-bender für den FRM, mit 38 Metallschichten statt nur einer (Ulrich Schmidt). Polarisiertes Protonentarget und daran Stern-Gerlach Effekt des Neutrons ohne Magnetfeld (Oliver Zimmer).

In München verfolgte W. Gläser seinerzeit den Bau einer neuen Neutronenquelle, des heutigen FRM-II. Wir zogen alle mit bei diesem Projekt, ich sollte beim Garchinger Stadtrat für das Projekt werben. Ein Zuhörer fragte nach meinem Vortrag: Dann ist das also eine Neutronenquelle und kein Kernkraftwerk? Als ich das bejahte, erhob sich eine junge Dame und fragte den Bürgermeister,

kein Witz: Können wir zum vorherigen Tagesordnungspunkt zurückkommen, zur Parkplatzsituation in Garching?

Ein entgegengesetztes Erlebnis hatte Schreckenbach, damals zurück in München als Leiter des FRM. Ein Fernsehteam fragte ihn, ob es stimme, dass der Reaktor Tritium abgebe. Schreckenbach: "Ja, das stimmt, aber es ist weniger als ein Tausendstel der gesetzlichen Obergrenze". In der Sendung wurde das Interview in gewohnter Wahrheitstreue gezeigt, bis zu "Ja, das stimmt" – dann Cut!

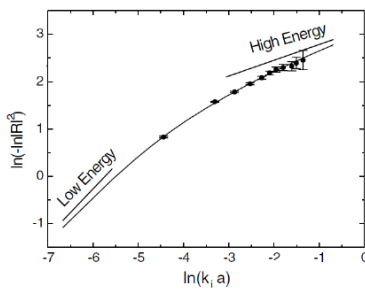
### → Heidelberg 1993

1993 folgte ich einem Ruf nach Heidelberg auf einen Lehrstuhl, der vorher in der Hochenergiephysik angesiedelt war. Das überraschte mich umso mehr, als ich bis dahin öfters erlebt hatte, dass Mehrheiten versuchten, auf Kosten von Minderheiten ihr Arbeitsgebiet abzurunden, und dies war nun der umgekehrte Effekt.

Als Institutsdirektor hatte ich als erstes die Aufgabe, den "Solidarpakt" zwischen der Landesregierung und den Landeshochschulen abzuwickeln. Dieser sah vor, dass 20% der Landesstellen des Instituts abgegeben werden, im Tausch gegen zukünftige Planungssicherheit. Um die Schlagkraft des Instituts zu erhalten, entschieden wir uns schweren Herzens, dem "Stellen-Kuchen" nicht den tragenden Boden, sondern ein ganzes Tortenstück wegzuschneiden in Form eines kompletten Lehrstuhls. Dadurch blieb dem Institut wertvolle Werkstattkapazität erhalten, die auch einer vom Land veranlassten Organisationsuntersuchung standhielt.

Am Lehrstuhl bildeten sich die folgenden Arbeitsgruppen:  
*Maarten DeKieviet* hatte in seiner Doktorarbeit bei G. Scholes in Princeton zur Streuung von Heliumstrahlen an Oberflächen gearbeitet, und dort auch einen Preis für exzellente Lehre gewonnen. Er baute in Heidelberg, mit Christian Schmidt als Doktorand, ein sehr leistungsfähiges Oberflächen-Spinochomometer für Helium-3 und Wasserstoff-Atomstrahlen. Das Instrument war im Nano-eV Bereich so empfindlich, dass es einen Höhenunterschied der Atome im Gravitationsfeld der Erde von wenigen Zentimetern energetisch auflösen konnte, und führte zu

schönen Ergebnissen in der Oberflächenphysik. Der ca. 8 m lange Apparat musste übrigens im alten Institut an der Labordecke aufgehängt werden, um nicht durch den Boden zu brechen. – Mit diesem Instrument erschloss DeKieviet darüber hinaus ein neues Arbeitsgebiet, mit vielbeachteten Arbeiten zu den von den Fluktuationen des Vakuums induzierten Casimirkräften. Abb. 13 zeigt das Ergebnis eines Helium-Streuxperiments, mit V. Druzhinina, in dem erstmals der Einfluss der Casimirkräfte zwischen einzelnen Atomen und fester Materie sichtbar wird.



**Abb. 13.** Casimirkräfte zwischen Atomen und fester Materie, erstmals sichtbar gemacht im Helium-Streuerquerschnitt bei kleinen Impulsüberträgen an Oberflächen.

*Ulrich Schmidt* arbeitete, mit Harald Häse als Diplomand, an der Entwicklung eines großen Supermirror Neutronenleiters für die Neutron-Teilchenphysik am ILL. Dieser hatte 80 alternierenden Metallschichten, was den Winkel der Totalreflexion für Neutronen verdoppelte. – Eine weitere Premiere: Zusammen mit Martin Klein und Hartmut Abele polarisierte Ulrich Schmidt ultrakalte Neutronen vollständig durch "optisches Pumpen" in einem Hochfrequenzfeld, ohne die falsche Spinkomponente zu verlieren. – Später ging Schmidt zu E. Adelberger nach Seattle, wo er bei den dortigen Gravitationsexperimenten die grandiose Idee hatte, die üblichen zylindrischen Probekörper durch deren Komplement, nämlich Löcher in einer Platte zu ersetzen, was die

Präzision der Experimente enorm steigerte. – Gegenwärtig produzieren Ulrich Schmidt und Werner Heil (U. Mainz), mit Fabian Allmendinger als Doktoranden, in Experimenten mit gespeichertem polarisiertem Helium-3 und Xenon-129 laufend Weltrekorde an Präzision zu grundlegenden Fragen der Physik, wie die Lorentz Invarianz der Relativitätstheorie, die Zeitumkehr-Invarianz in Kosmologie und Teilchenphysik, sowie zum CPT-Theorem. – Mit Markus Köhli als Doktoranden nutzt U. Schmidt des Weiteren schnelle Neutronen in der kosmischen Strahlung zur Messung des Wassergehalts des Erdbodens.

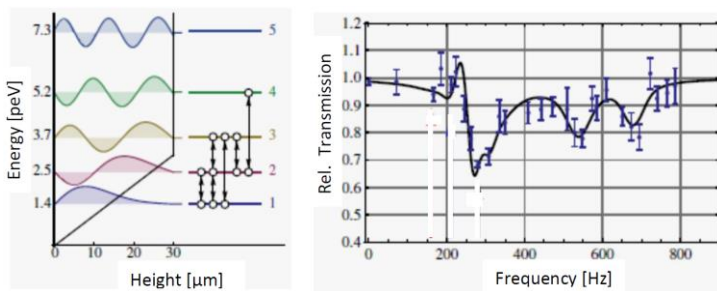
*Hartmut Abele* baute, mit den Doktoranden Stefan Baeßler und Thomas M. Müller, ein leistungsfähiges neues Instrument für den Neutronenzerfall, genannt PERKEO-II. Mit diesem Instrument wurden sukzessive die  $\beta$ -, die Neutrino- und die Protonasymmetrie  $A$ ,  $B$  und  $C$  mit hoher Präzision gemessen, das berühmte "Neutronen-ABC", mit Bastian Märkisch, Daniela Mund und Marc Schumann als Doktoranden. Damit konnten genaue Grenzen für rechtshändige Beiträge im linkshändig konzipierten Standardmodell gesetzt werden, jenseits einer Energieskala von 300 Giga-eV. Auch die Reinheit der  $V-A$  Struktur (Vektor minus Axialvektor) wird dabei gemessen.

Anfang 2000 ging nach neuesten Messungen die Unitarität der CKM-Matrix  $V$  plötzlich verloren. Die CKM-Matrix gibt an, wie stark sich die Wellenfunktionen der drei Quarks im Innern eines Baryons unter der schwachen Wechselwirkung miteinander vermischen. Die Unitarität von  $V$  beschreibt das Gerechtigkeitsprinzip, dass jedes der drei Quarks bei dieser Mischung nur so viel abgibt, wie es von den anderen Quarks einheimst. Wir fürchteten erst, unser im Neutronenzerfall gemessenes dominantes ("up-down") Matricelement  $V_{ud}$  könne der Sünder sein. Hinter dem nächstfolgenden sehr viel kleineren ("up-strange") Element  $V_{us}$  stand immerhin die Arbeit ganzer Hundertschaften von Hochenergiephysikern, und wir produzierten daher immer genauere Werte für  $V_{ud}$ . Es stellte sich dann aber heraus, dass der Fehler doch bei  $V_{us}$  lag. – Abele baute am ILL ferner eine Anlage zur Neutronen-



Tomographie und "filmte" mit hoher räumlicher 3D- und zeitlicher Auflösung Ölfluss und Kraftstoffeinspritzung im Innern eines laufenden Automotors.

Von konkurrenzloser Schönheit sind auch die Arbeiten zu den Quantenzuständen ultrakalter Neutronen im Schwerfeld der Erde, die Valery Nesvizhevsky, Hartmut Abele et al. im Jahr 2000 am ILL entdeckt hatten. Abele hat diese Methode mit seinen Mitarbeitern weiterentwickelt, und es ist ihnen kürzlich in Wien gelungen, schwingungsinduzierte Hochfrequenzübergänge zwischen den Eigenzuständen des Neutrons im Gravitationsfeld der Erde nachzuweisen, s. Abb. 14, und so eine neue Spektroskopie zu begründen, die mehrere Grenzen der Physik jenseits des Standardmodells weit hinauschiebt.



**Abb. 14.** Resonanzübergänge zwischen Quantenzuständen ultrakalter Neutronen (UCN) im Gravitationsfeld der Erde. *Links* das Energieschema (mit  $E_{\text{pot}} = mgh$ ), *rechts* das Transmissionsspektrum der UCN, mit den Resonanzfrequenzen  $\nu_{12} = 258$  Hz,  $\nu_{23} = 280$  Hz,  $\nu_{13} = 539$  Hz, und  $\nu_{24} = 680$  Hz.

Während der Zeit als Leiter des ILL (s. u.) besuchte ich fast ausschließlich für mich fachfremde Konferenzen und überließ unsere Stammgebiete den Heidelberger Mitstreitern, die ohne mich glänzend zurechtkamen. Dies war anscheinend nicht schlecht für die Entwicklung der Gruppe. Auf jeden Fall bekamen Hartmut Abele den Lehrstuhl für Neutronen und Quantenphysik an der TU Wien,

und Marc Schumann den für Astroteilchenphysik in Freiburg. Weitere Professuren gingen an Bastian Märkisch, TU München, an Oliver Zimmer, ebenfalls TU München, dann Grenoble, an Stefan Baeßler, U. Virginia, und an Maarten DeKieviet und Ulrich Schmidt, U. Heidelberg. Harald Häse sowie Martin Klein und Christian Schmidt gründeten ihre eigenen Firmen (s. u.), und Thomas M. Müller ist inzwischen Chef der Gesamtelektronik von AUDI.

→ **Grenoble 1998**

Mir wurde angeboten, Anfang 1998 die Leitung des Instituts Laue-Langevin zu übernehmen. Mein Verhältnis mit dem ILL dauerte nun schon 25 Jahre, und wir wussten beide, auf was wir uns einlassen. Das Physikalische Institut hatte bereits viele Direktoren entsandt, Heintze in seiner trockenen Art nannte das Institut einst "Directors Inc." Es galt die Devise, wer einen solchen Posten aktiv anstrebt, ist eine Fehlberufung, aber wer an der Reihe ist, muss seine Sache so gut wie möglich machen. Bei dieser Devise ist natürlich ein Hauch von Koketterie nicht ausgeschlossen. Wie dem auch sei, ich nahm das Angebot gerne an, da ich zu wissen glaubte, was am ILL zu tun ist.

Ich wusste, dass die Sache ihre Tücken hat, da ich an früheren Direktoren sehen konnte, dass diese später Schwierigkeiten mit der Weiterförderung ihrer Forschungen hatten und oft notgedrungen als Gremlins endeten. Tatsächlich beschlossen die Kollegen im zuständigen Förderausschuss sogleich nach meinem Dienstantritt in Grenoble, die Gelder für meine Heidelberger Arbeitsgruppe zu streichen, mit der schriftlichen Begründung, ich säße ja jetzt an der Quelle des Reichtums. Glücklicherweise überstanden wir durch die Solidarität der Heidelberger Kollegen die daraus resultierende Hungerperiode.

Zu den ersten Tagen im Dienst des ILL: Auf der Fahrt zu meinem neuen Einsatzort brauste ich in Genf durch ein Blitzlichtgewitter. Als ich an der Pforte des ILL ankam, hörte ich, ich sei in Genf wohl zu schnell gefahren. Einer der ca. 2000 jährlichen ILL-

Gäste (aus 30 Ländern) hatte mich wohl gesehen und war noch schneller am ILL als ich in meiner alten Karosse. Donnerwetter, dachte ich, das muss ein wichtiger Posten sein, den ich da antrete, wenn das Gerücht schneller ist als der eigene Schatten.

Am zweiten Tag gab es einen merkwürdigen Streik, zünftig mit "chute de barres" des Reaktors und erkennbar an langen Autoschlangen vor dem Eingang zum ILL. Da den Freunden von den Gewerkschaften zur Begrüßung kein geeignetes Thema eingefallen war, streikten sie, wie das Flugblatt mitteilte, weil sie nicht mit mir über den NIG sprechen wollten. Da ich (bis heute) nicht weiß, was der NIG ist, ließ ich ausrichten, das sei ganz in meinem Sinne. – Ein Jahrzehnt später sagte mir, aus Anlass seines Abschieds, ein Nachfolger meines tüchtigen Verwaltungschefs Sigurd Lettow (später CFO des CERN), er habe alles abgearbeitet, nur die Sache mit dem NIG sei leider noch offen. – Wenn ich oben von Freunden spreche, so ist das nicht abschätzig gemeint, das waren, mit wenigen Ausnahmen, brave und verlässliche Männer, mit denen ich über die Jahre viel am Experiment zusammengearbeitet hatte.

In der zweiten Woche kam ein Staatssekretär mit Gefolge aus Bonn, da es Probleme mit dem Nachschub an angereichertem Brennstoff gab. Vor den schwierigen Verhandlungen in Moskau war ich über jede Art der Unterstützung froh. Nachdem ich dem Besucher auch das benachbarte Synchrotron gezeigt hatte, fragte er mich: "Warum hat die ESRF eigentlich kein Uranproblem?". – Dies war der schöne Start in mein neues Leben am ILL. Ich gehe davon aus, dass dem fortgeschrittenen Alter verziehen wird, wenn es lange geübte Diskretion etwas lockert.

### **Das ILL-Millennium Programm**

Das ILL ist eine wunderbare Maschinerie. Es laufen, anders als an den meisten Beschleunigern, stets alle 40 Instrumente parallel, siehe das Foto auf der Eingangsseite. 80% der Nutzer sind Neutronenstreuer aus Festkörperphysik, Materialforschung, Chemie und Biologie, mit oft aufregenden Themen. Sie kommen für ein paar Tage ans ILL, arbeiten bis sie umfallen, und werden dann vom

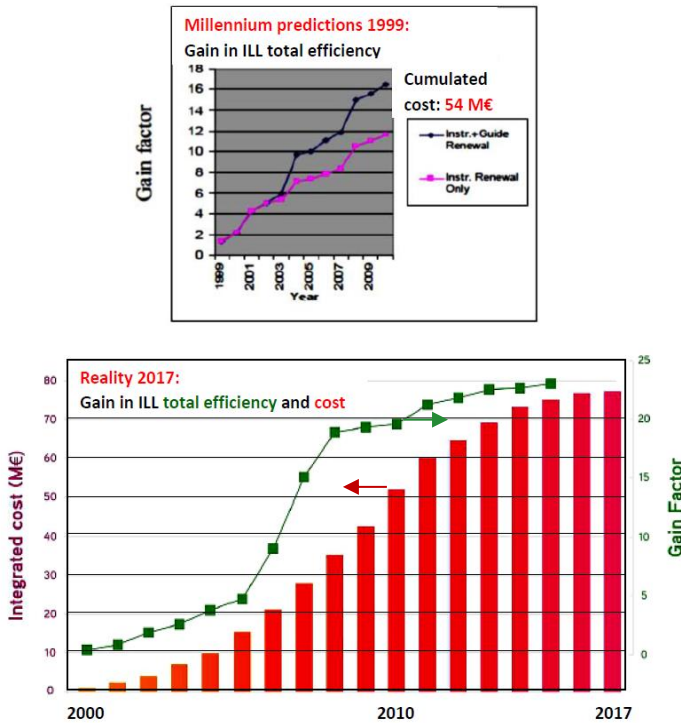
nächsten Team abgelöst. Dadurch sind die Kosten pro Veröffentlichung viel geringer als bei einem typischen Hausexperiment.

Aber es gab ein Problem. Das ILL hatte zwar einen neuen Reaktor, doch die Instrumente waren nicht mehr auf der Höhe der Zeit. Das Institut war in den vorhergehenden Jahren wegen des Reaktorneubaus finanziell in schwieriges Fahrwasser geraten, woraufhin die britische Seite auch noch einseitig ihren Beitrag kürzte. Etwa 20 Prozent der ca. 500 Mitarbeiter waren entlassen und viele Programme gekürzt worden. Ein anders Problem kam hinzu: alle Instrumente des ILL waren überbucht, eine Unterbrechung ihres Betriebs zu Erneuerungszwecken war vielen Nutzern unwillkommen. Und ein prominenter Kollege meinte: Wir machen doch schon alles, was man mit Neutronen machen kann.

Mein Hauptanliegen am ILL war also die Erneuerung des Instrumentenparks. Als erste Aktion wollte ich alle ILL-Nutzer anschreiben, um Ideen zu sammeln. Dies erzählte ich eher beiläufig der Leiterin des Aufsichtsrats, und wurde prompt angewiesen, bis zum nächsten Jahr zu warten, damit der Rat über ein solches Schreiben befinden könne. Hierarchische Anweisungen waren mir bis dahin fremd, und so verschickte ich noch am selben Abend 3000 emails an alle Nutzer, was mir von französischer Seite eine scharfe Rüge, dem ILL eine Reihe brauchbarer Vorschläge einbrachte.

Ein gutes Aufsichtsgremium ist immun gegen Jammern und Schönfärben. Daher ermittelten wir im darauffolgenden halben Jahr quantitativ, über Monte-Carlo Simulationen separat für jedes Instrument, welchen Gewinn an nutzbaren Neutronen es bringt, wenn alle denkbaren Verbesserungen an Instrumenten, Detektoren und Neutronenleitern realisiert wären. Dann wurde abgeschätzt, wie viele Neuentwicklungen das ILL pro Jahr verkraftet, und welche Mittel das erfordert. Die stellvertretenden Direktoren (P. Leconte, A. Leadbetter), die Reaktordivision (E. Bauer) und die Verwaltung (S. Lettow) lieferten die Daten. Das Ergebnis war ein Szenario (die "ILL-Roadmap"), welches innerhalb von 10 Jahren

einen 16-fachen Intensitätsgewinn an Neutronen voraussagte, bei unveränderter Neutronenquelle, zu Kosten von 54 Millionen Euro, s. Abb. 15, oberes Bild.



**Abb. 15.** Das ILL Millennium Programm. *Oberes Bild:* Vorhersagen von 1999 zum Neutronengewinn (Gain factor) und den Gesamtkosten für die Jahre 2000 bis 2010 (schwarz). *Unteres Bild:* Das Programm verlief wie vorausberechnet: Neutronengewinn (grün), Gesamtkosten (rot), aus ILL-Website von 2018. Nach 2010 tritt Sättigung ein.

Das Millennium-Programm stellte ich im Frühjahr 1999 dem Aufsichtsrat vor. Ich war skeptisch, da die französische Seite noch verschnupft war, und da mein englischer Gegenspieler, Leiter der

britischen Neutronenquelle ISIS, mir hinwarf: "From us you will not get one penny." Ein Geburtsfehler des ILL war tatsächlich, dass in seinem Aufsichtsrat auch die Chefs der Konkurrenz das Sagen hatten. Wundersamer Weise wurde das Programm aber doch in voller Schönheit akzeptiert und bereits im Jahr 2000 die ersten fünf neuen Instrumente gebaut.

Mitte 1999 stand ein Wechsel der stellvertretenden Direktoren an, und ich suchte Kollegen, die bereit waren, diese immense Aufgabe mit zu schultern. Manch prominenter Kandidat schied daher aus. Einer antwortete auf meine Anfrage, ob seine Arbeitsgruppe mitziehen würde: "You'll never get us". Ein anderer Kollege meinte: "Ich werde doch meine Doktoranden nicht zu Instrumentbauern verkommen lassen". Ein Dritter sagte auf meine Frage, was er machen würde, wenn er ein aufregendes Problem hätte, aber nicht das passende Instrument: "Ich würde mir ein anderes Problem suchen".

Diese Einstellung klingt etwas bizarr in den Ohren von Atom- und Kernphysikern, die ihr Leben lang mit selbstgebauten Instrumenten arbeiten, aber sie ist verständlich: fast alle Wissenschaftler der Welt arbeiten mit gekaufter Ausrüstung. Im Rahmen eines Gastsymposiums bei einer Chemiekonferenz hatte ich auch versucht, deutsche Chemiker als ILL-Klienten zu gewinnen, da wir am ILL aus England die Creme des Fachs an Bord hatten. Die Bedingung der Chemiker war: Nur wenn ich garantieren könne, dass ein Instrument unverändert ist, wenn sie nach drei Jahren als Nutzer wiederkommen. Genau das wollte ich natürlich nicht versprechen. Aber die Forderung ist nachvollziehbar, da Chemiker bevorzugt Rangfolgen (größer/kleiner) in den Stoffeigenschaften messen.

Die Wahl der neuen Vizedirektoren C. Vettier und C. Carlile (später mein Nachfolger am ILL, dann Gründungsdirektor der ESS) erwies sich als Glücksfall, obwohl das britische Ministerium wettete, weil unser Auswahlgremium nicht seine Paradedepferde berücksichtigt hatte. Tatsächlich erreichte das Millennium Programm bis 2010 einen 20-fachen Neutronengewinn, nach Aus-

gaben von gut 50 Millionen Euro, s. Abb. 15, mit ca. 80 neu bewilligten Stellen. Und auch die Neutronenstreuer erkannten an, dass das Millennium Programm eine gute Sache war.

### **Les 35 heures**

Mein zweites, eher unfreiwilliges Steckenpferd war die Einführung der 35-Stundenwoche. Das ILL hatte vom Mitgesellschafter CEA (Commisariat à l'Énergie Atomique) die Regelung übernommen, dass wie bisher 39 Wochenstunden gearbeitet und die Arbeitszeitverkürzung in freie Tage umwandelt wird. Bei einer dadurch effektiven Viertageweche wird die innere Organisation z.B. von Arbeitstreffen sehr erschwert, und wir mussten versuchen, die Oberhand über das Zeitmanagement zu behalten – viele schöne Gelegenheiten zum Streiken.

Ein kleines Beispiel: Wir versuchten, die offiziell halbstündige Mittagspause um 12 Minuten zu verlängern, da kaum jemand in Frankreich weniger als eine Stunde zu Tisch sitzt. Nach mehreren Streiks und lautstarken Besuchen eines Dutzends meiner stämmigen Freunde von den Gewerkschaften in meinem kleinen Büro einigten wir uns auf fünf Minuten Verlängerung. Schließlich entsprechen zwei Minuten am Tag mehr als einem Arbeitstag im Jahr. Im Vergleich zu Deutschland sind die Gewerkschaften in Frankreich sehr schwach (wenngleich sie per Gesetz hohe finanzielle Zuwendungen bekommen). Als Patron ist man sogar Vorsitzender des Betriebsrats, und dessen Machtlosigkeit wird durch Aggressivität wettgemacht. Beim Streik hatte man übrigens nicht nur die Belegschaft gegen sich, sondern auch die Nutzer, die ausgefallene Messtage meist nicht ersetzt bekamen.

In Grenoble wurde ich, eher durch Zufall, Mitglied einer Vereinigung von Firmenchefs. Beitrittsvoraussetzung war die Leitung einer privaten Gesellschaft mit mehr als 300 Angestellten, beides traf auf das ILL zu. Bei den monatlichen Treffen wurden bekannte Gurus eingeflogen, die uns mit den neuesten Trends im Geschäftswesen bekannt machten. Das war fast noch interessanter als die Betriebsratssitzungen des ILL, wenn auch ein recht teurer

Spaß. Dort wurden auch Rollenspiele zu Streikverhandlungen gemacht, und ich stellte fest, dass ich der einzige in der Runde war, der tatsächlich Streikerfahrung hatte – das ILL ist anscheinend doch eher dem streikfreudigen öffentlichen Dienst Frankreichs zuzuordnen.

### **Unkenrufe**

Das Alter hat das Privileg, zu warnen, egal ob jemand zuhört. Wie oben bemerkt, spielen französische Universitäten in der Forschung nur eine geringe Rolle, und die Ministerien hüten seit Menschengedenken ihre Durchgriffsrechte auf die ihnen zugeordneten Grandes Écoles. Wie die deutschen und französischen Lokführer auf ihren gemeinsamen Überlandfahrten, so lernen auch die europäischen Aufsichtsbehörden gerne voneinander, und die französische Forschungsorganisation ist für manchen sehr attraktiv.

Ich habe sowohl weisungsgebundene Forschungszentren als auch Universitäten von innen kennengelernt. Beide haben ihre spezifischen Aufgaben, und es gibt wichtige Unterschiede. Grob gesagt, erstere glänzen durch industrielle Schlagkraft, letztere dadurch, dass sie bisher fast alle Nobelpreisträger stellten. Die Frage ist, wer in Zukunft das Sagen hat, denn es bedarf nur kleiner Unterschiede in den jährlichen finanziellen Zuwachsraten, um innerhalb einer Generation die Verhältnisse umzukehren. Warten wir also ab, wie lange es dauert, bis auch der deutsche Professor zum "chef de gare" mutiert.

Einige anekdotische Hinweise, wohin die Reise geht. Ein britischer Ministerialer erklärte mir, sein Haus habe inzwischen die gesamte Wertschöpfungskette der Forschung fest im Griff. Höchstens am Ende der Kette, bei der quantitativen Beurteilung des Outputs, hapere es noch. Die Wissenschaft in ihrer Einfalt bemüht sich nun eifrig, diese Lücke zu schließen und die notwendigen Werkzeuge zur Vermessung des Geistes beizuschaffen. – Am Grenobler Ableger des Heidelberger European Molecular Biology Laboratory erfuhr ich, dass das EMBL 1998 von den europäischen Ministerien das alleinige Promotionsrecht erhalten hatte, worauf



das EMBL heute noch stolz ist. Der Heidelberger Rektor, dem ich dies erzählte, hatte davon keine Kenntnis. – Für das ILL hatte ich einst ein neues Logo entworfen unter dem Slogan "Neutrons for Science". Dies wurde inzwischen umgeändert in das sicher hübschere "Neutrons for Society" – gewiss ein unwesentliches Detail, aber typisch für den Wandel von der freien Forschung zur Zweckforschung.

Wenn nicht Angleichung, was kann das Ziel internationaler Zusammenarbeit sein? Der erste Reflex eines frischen Expatriates ist oft die Frage: Wie kann das Gastland nur funktionieren angesichts der vielen absonderlichen Gewohnheiten, die man dort vorfindet? Das hatte ich schon als Austauschschüler in den USA bemerkt. Des Rätsels Lösung ist, in der Sprache der Physik, dass jede Merkwürdigkeit, sozusagen durch Polarisierungseffekte, durch andere Merkwürdigkeiten teilweise ausgeglichen wird, so dass sich meist ein wohlverträgliches, wenngleich nicht notwendig globales Optimum einstellt. So wird zum Beispiel in Frankreich viel gestreikt, aber das wird abgemildert dadurch, dass es dort weder Betriebsausflug noch Sommerfest oder Weihnachtsfeier gibt. Kopiert man nur einzelne Merkwürdigkeiten ohne diese Polarisierungseffekte, so ergibt dies selten ein neues Optimum. Ich glaube daher, dass bei der internationalen Zusammenarbeit statt Angleichung wichtiger ist, dass man das Nachbarland mit seinen Besonderheiten zu respektieren und zu schätzen lernt, sei es durch Gewohnheit, Einsicht oder Zuneigung.

### → **Heidelberg 2002**

Zurück in Heidelberg, arbeitete ich erst einmal die bis dahin angelaufenen Pflichten als Dekan und Institutsleiter ab. In der ersten Dekade der 2000er Jahren stand ein Vielfaches an Neubefürungen an, verglichen mit den Dekaden davor und danach, als Echo auf die Berufungspraxis der 70er Jahre. Daher organisierte ich als Dekan zur Themenfindung zwei prominent besetzte Symposien, eines zum Thema "Challenges in Biophysics", ein anderes zum Thema "The Physics of Information", letzteres setzte sich dann

durch. – Eine Analyse der zeitlichen Entwicklung der dem Physikalischen Institut zugewiesenen Landesmittel zeigte, dass diese im Zeitraum von dreißig Jahren, von 1976 bis 2006, nie erhöht wurden, sondern ohne Inflationsausgleich blieben, was einem Kaufkraftverlust von einem Faktor 2,1 entspricht (Verbraucherpreisindex). Weder der Heidelberger Rektor noch das Stuttgarter Ministerium wollten das glauben, aber so war es.

### **Neubau Physikalisches Institut**

Alsdann führte ich einen Beschluss der Fakultät herbei, dass ein Neubau des Physikalischen Instituts im Neuenheimer Feld wirklich gewollt ist. Das war ein Fortschritt, denn zu Anfang der 80er Jahre war, im Vorlauf zum 600-jährigen Universitätsjubiläum, der Fakultät bereits eine "Zweizentrenlösung" angeboten worden, mit Umzug aller Experimentalgruppen ins Neuenheimer Feld. Der Fakultätsrat lehnte es damals ab, über diesen Vorschlag auch nur zu verhandeln. Es gab nur zwei Gegenstimmen, eine von Herrn Treiber, damals Leiter der Elektronikfertigung, und eine von mir, in Anbetracht meiner Erfahrungen mit der Bodenbelastbarkeit der Labore des alten Physikalischen Instituts.

Bevor der Neubau dann auf den Weg kam, hatte ich einen Antrag auf einen überregionalen Forschungsverbund gestellt, zum Thema Teilchenphysik bei niedrigsten Energien, mit illustren Mitstreitern aus München und Mainz. Eine benachbarte Forschungseinrichtung hatte ich unvorsichtigerweise mit in den Antrag aufgenommen, da diese mir dafür einen Batzen Geld zur Antragsvorbereitung zusteckte, den ich dringend brauchte. Ich erzähle das, weil es lehrreich ist. In dem zweistufigen Verfahren bekamen wir die besten Referenzen. Völlig unerwartet wurde der Antrag in der abschließenden Beschlussrunde gekippt, aus dem in den Vorunden nicht beanstandeten Grund, wir seien zu viele antragstellende Institutionen. – Einen Wissenschaftler beeindruckt ein Jahr vergeblicher Arbeit nicht besonders. Pikant war allerdings, dass die Leitung besagter Einrichtung dem (gemeinsamen) Geldgeber daraufhin in öffentlicher Sitzung empfahl, zum eigenen

Nutzen die Förderung unseres Arbeitsgebiets einzustellen. Doch auch das hat die Gruppe unbeschadet verkraftet.

Nach einem Absturz setzt man sich am besten gleich wieder ins Cockpit, und so bereitete ich in der darauffolgenden Woche einen Antrag für den Neubau des Physikalischen Instituts vor. Da gab es inzwischen den erschwerenden Umstand, dass durch die Föderalismusreform von 2006 die vorgesehene hälftige Förderung durch den Bund weggebrochen war. Ich glaube, es war Herr Eisele, der mir den Tipp gab, dass nach dem neuen Paragraphen 91b des Grundgesetzes Forschungsbauten in vorwiegendem Bundesinteresse weiterhin genehmigungsfähig waren. Aus Stuttgart bekamen wir jedoch heftiges Gegenfeuer, das Ministerium lehnte es ab, in der ersten Runde des bis dato unbekanntem Vergabeverfahrens dabei zu sein. Es wollte erst ein Jahr abwarten, wie sich die Sache mit 91b insgesamt anlässt.

Über Weihnachten 2006 schrieb ich trotzdem einen Antrag auf Neubau und schickte ihn ab. Sowohl das Rektorat als auch das Landesministerium reichten den Antrag in den ersten Januartagen einfach weiter, und dieser war letztendlich erfolgreich. Das Leben ist ein stochastischer Prozess. – Das Geld reichte wegen den bei anziehender Konjunktur steigenden Preisen trotzdem nicht, und die Südspange des Neubaus sollte deshalb weggelassen werden – ein scheußlicher Anblick. Dann kam uns die inzwischen amtlich beglaubigte Exzellenz zur Hilfe, und die offene Flanke des Gebäudes konnte geschlossen werden. Der Rest ist bekannt.

### **Lehre, aktiv vs. passiv**

Ich las mehrmals und gerne die Grundvorlesungen, damals Physik I bis VI. Dies fiel mir nicht schwer, einmal dank der exzellenten Unterstützung durch das Vorlesungs-Vorbereitungsteam, zum anderen weil ich einst Nukleare Festkörperphysik in einer Atomphysikgruppe in einem von der Teilchenphysik dominierten Institut betrieben und daher viele Gebiete kennengelernt hatte. Was mir allerdings immer zu denken gab: Ich habe zwar gerne Vorlesung gehalten, aber selber früher eher ungern gehört.

## Firmengründungen

Die Neutronenphysik hat, anders als die Röntgen- und Synchrotronphysik, nur wenige industrielle Zulieferer. Die Gründung zweier Neutronikfirmen durch Studenten unserer Gruppe war daher sehr willkommen. Auf unserem jährlichen Gruppenausflug in die Pfalz fragte ich Harald Häse, der nebenher auch Volkswirtschaft studierte, ob er sich nicht mit seiner Diplomarbeit von 1998 über Supermirror-Neutronenleiter selbständig machen wolle. Er antwortete, dasselbe habe er mich an dem Tag auch fragen wollen.



**Abb. 16.** Firmengründungen, *oben links*: Die Firma S-DH wird flügge und verlässt das Physikalische Institut (2001); *unten links*: Die Firma in ihrem neuen Domizil mit einem ihrer Produkte. *Oben rechts*: Ein orts- und zeitauflösender Detektor der Firma CASCADE CDT; *unten rechts*: CASCADE Firmengründer mit Kunden.

Gesagt getan, Häse baute in Heidelberg in mühevoller unbezahlter Arbeit einen kompletten und neuartigen 72 m langen Supermirror-Leiter für das ILL. Als er mit der Ladung in Grenoble ankam, war über Nacht Frost eingebrochen, und die gesamte Ladung der gläsernen Neutronenleiter zerbarst auf dem LKW. In der gleichen

Woche hatte er ein lukratives Angebot auf eine Industrieposition. Da er selbständig werden wollte, schlug er das Angebot aus, steckte den Rückschlag weg und produzierte den ganzen Leiter ein zweites Mal. Inzwischen beliefert seine Firma S-DH die ganze Welt mit ihrer Qualitätsware, siehe Abb. 16 links.

Das zweite Heidelberger Startup ist die CASCADE CDT GmbH, 2006 gegründet von den früheren Doktoranden Martin Klein und Christian Schmidt. Ich hatte der Gruppe gesagt, dass es bei den Neutronen eine Detektorkrise gibt, denn alle Welt misst Neutronen noch mit Helium-3 gefüllten Geiger-Müller Zählrohren, die aber die heutigen Neutronenraten nicht mehr verkraften. Verschärft wurde die Krise in jüngerer Zeit dadurch, dass die US-Regierung alles Helium-3 für ihre Homeland Security beschlagnahmt. Klein und Schmidt erfanden und patentierten einen schnellen zeit- und ortsauflösenden Detektor für Neutronen ohne Helium-3, und verkaufen jetzt große Detektoranlagen an die Neutronenstreuer, s. Abb. 16 rechts.

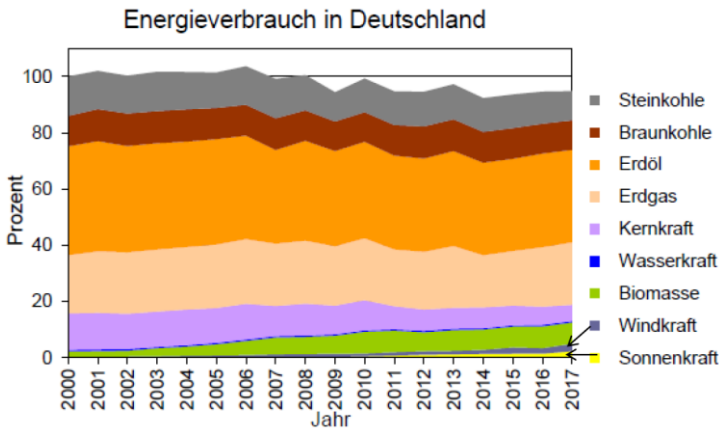
### **Ausklang**

Meine eigene Forschung kam nochmal in Fahrt, so bei der Entwicklung und dem erfolgreichen Einsatz des Spektrometers PERKEO III. In diesem werden kurze Pulse kalter Neutronen für kurze Zeit frei im Flug "gespeichert", mit sehr viel höheren Dichten als es mit gespeicherten ultrakalten Neutronen möglich ist. – Später entwickelten wir mit Bastian Märkisch eine Methode, anstelle der Neutronen nur deren Zerfallsprodukte aus einem sehr langen Stück Neutronenleiter verlustfrei zu extrahieren, was weitere hohe Gewinne an Zählrate und Präzision ermöglicht. Dieses Spektrometer, genannt PERC, steht an der TU München vor seinem ersten Einsatz.

Wie es die Tradition will, schrieb ich dann in meinem Austragshäusl im Museum des neuen Physikalischen Instituts, zusammen mit Michael G. Schmidt von der Theorie, einen Übersichtsartikel zum Thema Neutron und Kosmos, veröffentlicht 2011 in *Reviews of Modern Physics*. – Mit Hans-Jürgen Stöckmann verfasste ich

2013 ein Lehrbuch, so wie wir die Quantenphysik gerne gelernt hätten. Stöckmann gelang es beim Thema irreduzible Tensoren sogar, die Beweisführung von Fano und Racah radikal zu verkürzen; auch separat publiziert 2014 in New Journal of Physics.

Ein weiteres Anliegen war die Analyse der Energiewende in Deutschland, zusammen mit U. Uwer und J. Stachel, zu der Zeit Präsidentin der DPG, siehe auch: <http://www.physi.uni-heidelberg.de/energiewende/belege>. Abb. 17 zeigt den Einsatz an Primärenergieträgern seit dem Jahr 2000. Man sieht auf einen Blick, wie es mit der auf Wind und Sonne basierenden Energiewende und dem, trotz großer Aufwendungen, seit 10 Jahren unveränderten CO<sub>2</sub>-Ausstoß wohl weitergehen wird, weshalb auch keine Zeitung das haben wollte, nicht einmal das Physik Journal.



**Abb. 17.** Analyse der Energiewende: Anteil der verschiedenen Energieträger am Energieeinsatz, im Jahr 2000 auf 100% gesetzt. (Aus den Daten des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie 2018.)

Allmählich wollte ich dann kürzer treten, bei gutem Wein und netter Gesellschaft. Im vergangenen Jahr erlitt ich jedoch einen Rückfall und fing wieder an, selber Experimente aufzubauen. Erstes Experiment: Heute kommt man oft erst als Emeritus wieder zum Nachdenken. Mit reichlich Verspätung hatte ich heraus-

gefunden, dass Elektronen, die in PERKEO-Manier magnetisch auf einen Detektor abgebildet werden, auf dessen Oberfläche kaustikartige Singularitäten ausbilden. Das Prinzip ist einfach zu verstehen, veröffentlicht 2015 in *Physics Letters B*, aber der Effekt war der community unbekannt. Ein Kollege aus Mainz erzählte mir, dass sein Doktorand einst in seinen Monte-Carlo Simulationen (zum Thema der damals – mit mehr als 300 Veröffentlichungen – hohe Wellen schlagenden Darmstädter Positronenpeaks) ebenfalls solche Singularitäten fand, sie aber als Irrlauf des Computers verwarf. Auf solchen Singularitäten beruhende spektrale Peaks erblickte ich im Experiment nach einer Minute, noch bevor mir klar war, dass Ulrich Schmidt das Magnetfeld von PERKINO bereits angeworfen hatte und das Experiment schon lief. Deren Anblick erzeugte wieder den altbekannten Effekt; veröffentlicht 2016 in *Nuclear Instruments and Methods A*.

Zweites Experiment: Ich zeigte, dass man  $\beta$ -Spektroskopie mit einem Trick bis in den MeV Bereich hinein auch über die Elektronenflugzeit machen kann. Für das Experiment wickelten O. Hornberger von der Feinmechanik und ich eine 4 m lange magnetische Flugstrecke mit 3000 Windungen, die knapp in unser Labor passte. Als erste Anwendung wurde, mit Ulrich Schmidt und Bastian Märkischs Münchener Doktoranden Christoph Roick und Heiko Saul, über die Elektronenflugzeit die bisher bei weitem präziseste Eichkurve eines  $\beta$ -Detektors bestimmt, wie er in PERC verwendet werden soll; publiziert 2018 als "Editor's Suggestion" in *Physical Review C*.

Über das vergangene, aktiv miterlebte halbe Jahrhundert hat sich die Physik fröhlich und rasant fortentwickelt. Ich habe immer noch das Gefühl, wir hätten gerade erst angefangen. Dem großen Teppich der Wissenschaft habe ich mit meinen Mitarbeitern einige hübsche Muster und eine Anzahl nützlicher Zahlen und Methoden hinzugefügt, aber im eigentlichen Sinne kein Lebenswerk zu einem bestimmten Thema hinterlassen, da ich mich mal mit diesem, mal mit jenem Gebiet beschäftigte (was ich nicht bereue). Ich glaube, unbescheiden, dass das Millennium-Erneuerungsprogramm den

*Dirk Dubbers*

Fortbestand des Institut Laue-Langevin in Grenoble gesichert hat. Die positiven Rückmeldungen der Studenten im Vorlesungszyklus Physik fand ich stets wohltuend, ebenso die beruflichen Erfolge meiner Mitarbeiter. – Vor allem aber möchte ich meiner Frau und unseren Kindern danken, die das alles mitgetragen haben. Das mit dem Kürzertreten wird sicher auch bald klappen.

Vortrag gehalten an der Fakultät für Physik und Astronomie der Universität Heidelberg am 14. Dezember 2017.