

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

HEIDELBERGER PHYSIKER BERICHTEN 5

Rückblicke auf Forschung
in der Physik und Astronomie

Vielfalt der Physik



UNIVERSITÄTS-
BIBLIOTHEK
HEIDELBERG

Heidelberger Physiker berichten

5

Vielfalt der Physik

Heidelberger Physiker berichten

Rückblicke auf Forschung
in der Physik und Astronomie

Herausgegeben von

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

Band 5

Vielfalt der Physik



UNIVERSITÄTS-
BIBLIOTHEK
HEIDELBERG

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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



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

Texte © 2018. Das Copyright der Texte liegt beim jeweiligen Verfasser.

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

URN: <urn:nbn:de:bsz:16-heibooks-book-371-6>

DOI: <https://doi.org/10.11588/heibooks.371.527>

Umschlagbild: Das Spektrometer PERKEO zum Studium des Betazerfalls polarisierter Neutronen am Institut Laue-Langevin in Grenoble.

ISBN 978-3-946531-84-5 (PDF)

ISBN 978-3-946531-85-2 (Softcover)

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	1
Max Camenzind <i>Faszination der Kompakten Objekte: Weiße Zwerge, Neutronensterne und Schwarze Löcher</i>	3
Dirk Dubbers <i>Fröhliche Wissenschaft – Von Neutronen und anderen wichtigen Dingen</i>	33
Franz Eisele <i>Von der Verifizierung des Standardmodells und der Suche nach neuer Physik</i>	81
Heinz Horner <i>Spingläser und Hirngespinnste</i>	119
Ulrich Platt <i>Von Höhenstrahlquarks zur Atmosphärenforschung – Ein Weg zur Umweltphysik</i>	145

Vorwort

In diesem fünften und vorläufig letzten Band der Reihe "Heidelberger Physiker berichten", erschienen unter dem Titel "Vielfalt der Physik", sind Vorträge aus den Jahren 2017 und 2018 wiedergegeben. Diese Vorträge bilden das überaus weite Spektrum der in Heidelberg vertretenen Physik ab. Der erste Vortrag fiel per Zufall genau in die Tage, in denen der Nobelpreis für Physik 2017 vergeben wurde und gleichzeitig neue sensationelle Beobachtungen zu den mit dem Preis bedachten Gravitationswellen bekannt wurden. Dieser Vortrag ist daher eher als Einführung in dieses spannende neue Forschungsgebiet konzipiert. Die weiteren Vorträge zeichnen wie bisher die verschiedenen Bahnen nach, auf denen Wissenschaftler zu neuen Themen finden, die oft zu Beginn ihrer Tätigkeit noch gar nicht als solche erkennbar waren. Diese Themen reichen von der Astrophysik bis zur Physik der elementaren Teilchen, von der Modellierung von "Hirngespinnsten" bis zur Erforschung von Klima und Umwelt. – Es gelten weiterhin die grundsätzlichen Ziele und das Format der Vortragsreihe, wie im Vorwort zu Band 1 der Serie beschrieben. Inzwischen zeichnet sich ab, dass alle Vorträge in Kürze auch als Video abrufbar sind, leicht zu finden, wenn mit den Stichworten heidICON oder youtube ergänzt. Wir sind zuversichtlich, dass die Vortragsreihe in einigen Jahren wiederaufgenommen wird.

Heidelberg, im Juni 2018

Die Herausgeber

Max Camenzind



Max Camenzind

Max Camenzind wurde 1944 in Luzern in der Schweiz geboren. Nach dem Schulbesuch in Luzern studierte er Physik an der Universität Bern, wo er 1973 mit einer Arbeit über Eichtheorien der Gravitation promovierte. Die Physik der Gravitation blieb auch in der Folgezeit sein zentrales Forschungsgebiet. Nach zwei Jahren als Assistent in Bern arbeitete er 1975 bis 1978 als Stipendiat des Schweizerischen Nationalfonds am Institut für Theoretische Physik der Universität Hamburg. Zwischen 1978 und 1985 war er wissenschaftlicher Mitarbeiter des Instituts für Theoretische Physik der Universität Zürich. Während der beiden folgenden Jahre arbeitete er als Gastwissenschaftler am Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching, ehe er ab dem Herbst 1986 dann als beamteter Wissenschaftler an der Landessternwarte Heidelberg-Königstuhl tätig war. Dort baute er eine sehr aktive und erfolgreiche Theoriegruppe auf, die sich insbesondere mit der numerischen Modellierung relativistischer Objekte und astrophysikalischer Prozesse mit Hilfe von Großrechnern beschäftigte. Wichtige Ergebnisse dieser Arbeiten waren die Ableitung von Mechanismen zur Bildung der relativistischen Plasmajets, die in der Umgebung rotierender Schwarzer Löcher ausgesandt werden, sowie grundlegende Beiträge zur Klärung der Massenakkretion bei der Entstehung von Sternen und Planetensystemen. Nach seiner Habilitation 1990 in Heidelberg war Camenzind als Privatdozent und apl. Professor auch intensiv in der Lehre tätig. Außerdem beteiligte er sich in leitenden Funktionen an mehreren nationalen und europäischen Forschungskoperationen. Nach dem Beginn seines offiziellen Ruhestandes in Heidelberg übernahm er 2009 eine Wilhelm-Conrad-Röntgen-Gastprofessur in Würzburg, wo er immer noch regelmäßig Vorlesungen abhält. Neben seiner Tätigkeit in Forschung und Lehre verfasste Max Camenzind verschiedene schöne Lehrbücher und Monographien, darunter das

Max Camenzind

Standardwerk "Compact Objects in Astrophysics", das 2007 beim Springer-Verlag erschienen ist. Da etwa eine Woche vor dem Vortrag der erste Nachweis von Gravitationswellen von Neutronensternen bekannt geworden war, war Camenzinds Thema und Arbeitsgebiet zum Zeitpunkt des Vortrags ganz besonders aktuell.

Max Camenzind

Faszination der Kompakten Objekte: Weiße Zwerge, Neutronensterne und Schwarze Löcher

Als Herr Appenzeller mit dem Vorschlag an mich herantrat, einen Vortrag in Ihrem Kreis zu halten, war nicht abzusehen, dass die Ereignisse der letzten Wochen mich derart überrollen würden – Gravitationswellen werden nachgewiesen, Schwarze Löcher verschmelzen, die LIGO-Entwickler bekommen den Nobelpreis in Physik 2017 und der erste Neutronenstern-Merger wird nachgewiesen. Das zwingt mich natürlich dazu, diesen Vortrag doch etwas anders zu gestalten, da Sie wahrscheinlich erwarten, dass ich zu diesen Entwicklungen Stellung beziehe. Ich werde daher weniger über meinen eigenen Werdegang erzählen als über die dramatische Entwicklung in der Astronomie der letzten Tage. Das ist wahrlich der Beginn einer neuen Ära in der Astronomie.

Es ist mir eine Ehre in Ihrem Kreis über ein Forschungsgebiet zu berichten, zu dem ich in meinem Forscherleben auch in Heidelberg einige Puzzlesteine hinzufügen konnte. Ich möchte insbesondere Herrn Appenzeller ganz herzlich danken, dass er mir die Möglichkeit eröffnet hat, auf diesem Gebiete zu forschen und eine Arbeitsgruppe an der Landessternwarte von 1986 bis 2009 zu installieren.

Mein Weg zur Gravitation

Schon im Gymnasium in Luzern, das ich von 1957 bis 1965 besuchte, inspirierten mich die Bücher von Fred Hoyle, insbesondere das Buch *Frontiers of Astronomy* (1955). Dies war wirklich das erste Buch über Astronomie, das mir ein Freund meines Vaters geschenkt hatte, als ich 1963 mehrere Wochen im Krankenhaus lag.

Dieses Buch verschaffte mir erste Einblicke ins Universum und hatte dann einen starken Einfluss auf meine spätere Denkweise, obschon ich die Idee des Steady State Universe damals schon sehr suspekt fand.

Ich habe meine Promotion in Physik 1973 an der Universität Bern abgeschlossen. In diesem Sinne bin ich eigentlich mitten in die Geburt der Eichtheorien geworfen worden. In den 1960er Jahren wurde die Eichtheorie der schwachen Wechselwirkung vollendet – 1964 wurde das Higgs-Boson von Peter Higgs postuliert, jedoch erst 2012 am LHC nachgewiesen. Anfang der 1970er Jahre wurde die Eichtheorie der starken Wechselwirkung entwickelt – die sog. Quantenchromodynamik QCD, insbesondere auch durch Herrn Heinrich Leutwyler an der Universität Bern. In meiner Promotion interessierte mich daher die naheliegende Frage, ob auch die Gravitation eine Eichstruktur aufweist. Meine Kollegen fanden die Beschäftigung mit dieser Frage gar nicht witzig – Einstein habe dies doch 1915 schon eindeutig geklärt. Diese Frage ist bis heute nicht geklärt. In der Folge habe ich dann eingesehen, dass die Beschäftigung mit dieser Frage zwar eine Lebensaufgabe darstellt, jedoch eher brotlose Kunst ist. Also wandte ich mich in der Folge den *relativistischen Objekten* zu, d.h. jenen Objekten im Kosmos, wo Einsteins Theorie der Gravitation eine Rolle spielt – den Weißen Zwergen, Neutronensternen und Schwarzen Löchern. Neutronensterne wurden kurz vorher gerade in Form von Radiopulsaren gefunden, und Schwarze Löcher waren als astronomische Objekte in jener Zeit überhaupt noch nicht etabliert. So wurde etwa die Existenz eines supermassereichen Schwarzen Lochs im Zentrum unserer Milchstraße noch sehr kontrovers diskutiert, und auch der Vorschlag eines supermassereichen Schwarzen Lochs mit einer Masse von einer Milliarden Sonnenmassen in der Galaxie Messier 87 wurde von den meisten Astronomen als Spinnerei abgetan. Beide Objekte sind heute voll rehabilitiert.

Die Grundlagen der relativistischen Astrophysik habe ich mir dann in meinen ersten Post-Doc Jahren bei Herrn Wolfgang Kundt in Hamburg angeeignet von 1975 bis 1978. Hier habe ich auch

gelernt, wie man Wissen in Gruppendiskussionen erarbeitet. Zum ersten Male bin ich vertraut geworden mit Objekten wie dem Krebsnebel und seinem Pulsar, der erst 1968 entdeckt worden ist, der Frage der Struktur von Pulsarmagnetosphären oder den Eigenschaften der Kerr-Lösung für Schwarze Löcher. Heftig debattiert wurde damals die Bedeutung der Bekenstein-Entropie Schwarzer Löcher. Ich erinnere mich, dass wir damals in unserer Gruppe in Hamburg zu keiner eindeutigen Interpretation kamen.

Diese Grundlagen habe ich dann in meinen Zürcher Jahren von 1979 bis 1985 versucht in zählende Publikationen umzumünzen. In der Arbeitsgruppe von Herrn Norbert Straumann an der Universität Zürich habe ich mich zum ersten Mal mit der relativistischen Magnetohydrodynamik beschäftigt und die Beschleunigung von Jets in rotierenden Magnetosphären um rotierende Schwarze Löcher untersucht, was seinen Niederschlag in einem Lehrbuch fand.¹

Albert Einstein hatte Gravitationswellen im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie vor etwa hundert Jahren vorhergesagt. Fast fünfzig Jahre haben Forscher erfolglos nach ihnen gesucht – bis im Herbst 2015 ein Gravitationswellensignal in den Daten der Advanced LIGO-Detektoren auftauchte. Im Februar 2016 publizierten die Wissenschaftler dann im Fachblatt *Physical Review Letters* die erste direkte Beobachtung von Gravitationswellen – und brachten damit den Server der Zeitschrift zum Absturz.²

¹ M. Camenzind, 2007: *Compact Objects in Astrophysics: White Dwarfs, Neutron Stars and Black Holes*, Springer-Verlag Heidelberg

² B.P. Abbott et al., 2016: *Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger*, *Phys. Rev. Letters* 116, 061102

Was sind kompakte Objekte?

Stellare Objekte, die ein geringes Radius-Masse Verhältnis aufweisen, nennt man kompakte Objekte.³ Genauer betrachtet man das Verhältnis von Schwarzschild-Radius $2GM/c^2$ zum Radius R des Objekts. Während Sterne Radien von über 50.000 Schwarzschild-Radien aufweisen – der Sonnenradius beträgt 233.000 Schwarzschild-Radien – liegen die Radien von Weißen Zwergen noch bei 2000 Schwarzschild-Radien und die von Neutronensternen bei gerade noch drei Schwarzschild-Radien. Rotierende Schwarze Löcher weisen einen Horizont auf, der sogar unter einem Schwarzschild-Radius liegt. Die Kompaktheit eines Sterns bestimmt dann auch die gravitative Rotverschiebung von Photonen, die von seiner Oberfläche entweichen. Diese wurde insbesondere bei Weißen Zwergen erfolgreich nachgewiesen.

Unsere Milchstraße beherbergt rund 300 Milliarden normale Sterne und Planetensysteme, etwa 10 Milliarden Weiße Zwerge, 100 Millionen Neutronensterne und rund eine Million Schwarze Löcher (Abb. 1). Nur sehr wenige dieser kompakten Objekte erscheinen in heutigen Katalogen. Im Unterschied zu normalen Sternen, die durch Fusionsenergie gefüttert werden, erzeugen kompakte Objekte keine Energie mehr. Weiße Zwerge und Neutronensterne enthalten jedoch noch viel innere Energie, so dass sie langsam über die Oberfläche auskühlen können. Schwarze Löcher enthalten überhaupt keine Materie, Schwarze Löcher sind reine Geometrie. Mit Schwarzen Löchern bin ich schon in meinen Berner Jahren in Kontakt gekommen. Brandon Carter hatte gerade die wesentlichen Eigenschaften der Kerr-Lösung herausgearbeitet (die Separierbarkeit der Geodäten-Gleichung) und die Relativisten beschäftigten sich vor allem mit der Natur der Singularität in der Kerr-Lösung. Dies machte mich damals schon skeptisch – Singularitäten sind für mich ein Zeichen, dass die Theorie hier überfordert ist und durch etwas Neues ersetzt werden muss. Dieses

³ Max Camenzind, 2016: Gravitation und Physik Kompakter Objekte: Weiße Zwerge, Neutronensterne und Schwarze Löcher, Springer Spektrum-Verlag, Heidelberg

Thema war jedoch damals tabu unter den Relativisten – sie glaubten und glauben noch immer an die Existenz von Singularitäten.



Abb. 1. Inventar der Milchstraße. [Grafik: Camenzind]

Weißer Zwerge sind bereits vor 150 Jahren entdeckt worden, jedoch wurden sie damals nicht verstanden. Neutronensterne und Schwarze Löcher traten in den 1960er Jahren in der Astronomie auf. Dies markiert das *Goldene Jahrzehnt in der Astronomie*, das mich dann in 1970er Jahren richtig elektrisiert hat:

1. 1961 haben Hamada und Salpeter die Theorie der Weißen Zwerge wiederbelebt.
2. 1963 hat Roy Kerr die allgemeine Lösung für rotierende Schwarze Löcher gefunden, die heute als Kerr-Lösung bezeichnet wird. Sie ist allein durch zwei freie Parameter gekennzeichnet – die Masse M und den Drehimpuls (Spin) S .
3. 1963 wurden auch die ersten Quasare identifiziert und 1964 die Energieerzeugung dieser Objekte durch Akkretion auf ein supermassereiches Schwarzes Loch postuliert.

- 1967 haben Radioastronomen zum ersten Mal Neutronensterne in Form von Radiopulsaren nachgewiesen. Der Pulsar im Krebsnebel wurde 1968 gefunden. Heute sind fast 3000 dieser Objekte in Katalogen aufgeführt.
- 1967 wurde auch der erste Gammastrahlenausbruch (kurz GRB für Gamma-Ray Burst) durch die amerikanischen Vela-Satelliten gemessen. Heute wissen wir, dass die Erde im Schnitt pro Tag von drei solchen Gammablitzen getroffen wird.
- Das erste stellare Schwarze Loch wurde mit der Röntgenquelle Cygnus X-1 1970 gefunden. Heute sind etwa zwei Dutzend dieser Quellen bekannt mit Massen zwischen 5 und 15 Sonnenmassen.

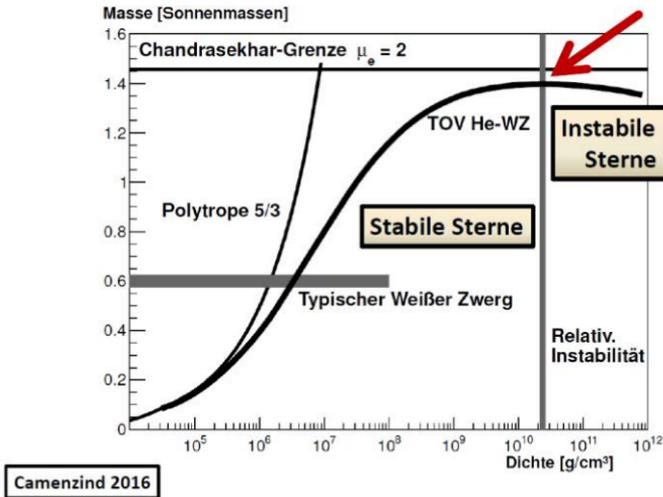


Abb. 2. TOV-Gleichgewichte für Weiße Zwerge als Funktion der Zentraldichte ρ . Das Maximum der Kurve $M(\rho)$ markiert die relativistische Instabilität (Pfeil). [Grafik: Camenzind 2016]

Weißer Zwerge und die relativistische Instabilität

Sirius, der hellste Stern am Nord-Himmel ($-1,5$ mag) hat einen Begleiter Sirius B, welcher 10 Größenklassen schwächer und damit mit bloßem Auge nicht sichtbar ist. Dieser Weiße Zwerg hat eine Temperatur von 25.000 Grad Kelvin, seine Größe beträgt aber nur $3/4$ des Erddurchmessers und umkreist Sirius A in engem Abstand in 50 Jahren.

Vor hundert Jahren waren nur drei Objekte dieser Art bekannt: 40 Eridani B, Procyon B und Sirius B – alle drei in visuellen Doppelsternen. Dies hat zur Konsequenz, dass ihre Massen heute sehr genau bekannt sind und dass sie damit als Testobjekte für die Theorie der Weißen Zwerge gelten (Abb. 2). Damals war der Aufbau dieser Objekte ein Rätsel.

Dies änderte sich schlagartig mit der Entdeckung der Fermi-Statistik für Elektronen. Es ist der Quantendruck der Elektronen, der die Weißen Zwerge im hydrostatischen Gleichgewicht hält und nicht der thermische Druck wie bei normalen Sternen. Echte Modelle wurden dann von Chandrasekhar 1930 und 1931 berechnet. Er fand auch heraus, dass dieses hydrostatische Gleichgewicht nur bis zu einer gewissen Massengrenze, der Chandrasekhar-Grenzmasse von rund 1,45 Sonnenmassen gilt. Diese ist eine Konsequenz der Relativitätstheorie von Einstein: nur wenn die Masse mit zunehmender Dichte auch zunimmt, ist das Gleichgewicht stabil, sonst instabil (s. Abb. 2). Man muss also selbst das Gleichgewicht von Weißen Zwergen mit der relativistischen Tolman-Oppenheimer-Volkoff-Gleichung (kurz TOV-Gleichung) von 1939 hochrechnen, und nicht mit dem Newtonschen hydrostatischen Gleichgewicht (Abb. 2). Chandrasekhar selbst hat damals eine post-Newtonsche Betrachtung angewendet, um die berühmte Beziehung $M_{\text{Ch}} \sim M_{\text{Planck}}^3 / m_p^2$ zu finden. $M_{\text{Planck}} = 10^{19}$ Proton-Massen ist die berühmte Planck-Masse, m_p die Protonenmasse.

Nach 40 Jahren Forschung auf diesem Gebiet können wir heute festhalten:

1. Der typische Weiße Zwerg besteht im Innern aus einem C/O-Gemisch, umgeben von einer Helium-Hülle und einer Wasserstoffatmosphäre (DA Typ), die auch fehlen kann (DB Typ).
2. Der Quantendruck der Elektronen gleicht die Gravitation aus (Fowler 1926, Chandrasekhar 1931, Hamada & Salpeter 1961).
3. Die typische Masse beträgt 0,6 Sonnenmassen mit einer Dichte von 10^6 g/cm^3 .
4. Der Radius dieser Sterne folgt genau der theoretischen Masse-Radius-Beziehung.
5. Die maximal mögliche Masse beträgt für C/O WZ 1,397 Sonnenmassen (Camenzind 2016). Verschmelzen zwei Weiße Zwerge, so entsteht eine Supernova vom Typ Ia.
6. Weiße Zwerge kühlen im Laufe von 12 Milliarden Jahren nicht unter 3000 Grad Kelvin. Sie dienen daher heute als Chronometer der Milchstraße.

Neutronensterne und die Neutronenflüssigkeit

Wenn Elektronen einen Quantendruck aufbauen, dann können dies natürlich Neutronen auch. Kurz nach der Entdeckung des Neutrons durch Chadwick wurde deshalb Anfang der 1930er Jahre spekuliert, dass es auch Sterne geben könnte, die durch Neutronen aufgebaut werden, sog. Neutronensterne. Baade und Zwicky hatten sogar eine Idee, wie diese Objekte in Supernovae gebildet werden können. Die Idee wurde in der Folge wieder vergessen, so dass diese Objekte erst 1967 zufällig entdeckt worden sind. Die Astronomen hatten nicht bedacht, dass diese Neutronensterne auch magnetisiert sein könnten, schnell rotieren und dann als Pulsare – besser eigentlich als Rotare – im Radiobereich strahlen.

Neutronensterne gehören zu den kompaktesten Objekten im Universum. Ihr starkes Gravitationsfeld zieht unweigerlich immer mehr Masse an. Doch diesem Prozess sind Grenzen gesetzt. Ist eine kritische Masse erreicht, so kollabiert der Neutronenstern zu einem Schwarzen Loch. Wie groß die Masse maximal werden darf, ist eine seit Jahrzehnten offene Frage und spielt heute bei den Neutronenstern-Mergern eine zentrale Rolle. Schon in der Hamburger Zeit

haben wir viel über die Eigenschaften der Neutronenflüssigkeit im Zentrum der Neutronensterne diskutiert – all diese Entwicklungen sind heute durch die Betrachtung der Quantenchromodynamik (QCD) obsolet geworden, die es nun erlaubt, die Zustandsgleichung der komprimierten Kernmaterie genauer zu berechnen. Daraus resultiert heute eine maximale Masse für Neutronensterne von 2,0 – 2,2 Sonnenmassen (Abb. 3). Dies ist recht gut in Einklang mit den gemessenen Massen von Neutronensternen in binären Neutronensternsystemen mit einem Pulsar als Partner. Danach ist kein Neutronenstern mit einer Masse über 2,0 Sonnenmassen gefunden worden.

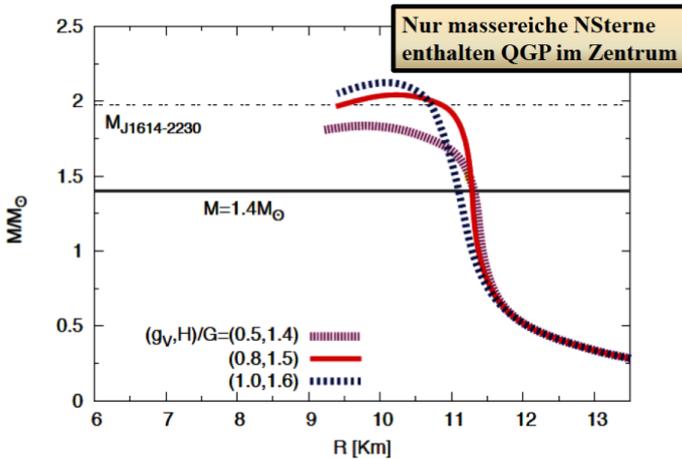


Abb. 3. Die Masse-Radius Relation für Neutronensterne, berechnet mit einer effektiven QCD-Wechselwirkung. QGP: Quark-Gluon Plasma. Neutronensterne mit einer Masse bis zu 1,6 Sonnenmassen enthalten eine Neutronenflüssigkeit im Core, angereichert durch Protonen, Elektronen und Myonen. [Grafik: nach arXiv:1707.04966]

Unklar bleibt nach wie vor die genaue Größe der Neutronensterne. Im Unterschied zu Weißen Zwergen ist die Bestimmung der Radien von Neutronensternen kein leichtes Geschäft. Leider emittieren die Atmosphären der Neutronensterne keine Linien, so dass sich das

Masse-Radius Verhältnis über die gravitative Rotverschiebung bestimmen ließe. Aus vielen photometrischen Messungen ergibt sich jedoch ein Radius im Bereich von 11 – 12 km, und nicht von 14 – 15 km.

Atmosphäre und Oberfläche eines Neutronensternes sind nur wenige Zentimeter dick und enthalten einen zu vernachlässigenden Anteil der Neutronensternmasse. Jedoch beeinflusst die Oberflächenschicht maßgeblich den Transport und die Abgabe thermischer Energie, während die Atmosphäre das ausgesandte Photonenspektrum festlegt. Sie besteht aus einem Plasma aus Wasserstoff, Helium, Kohlenstoff und Eisen, das den extremen Magnetfeldern bis zu 10^{13} G und einer enormen Schwerebeschleunigung standhalten muss. Die äußere Kruste besteht überwiegend aus Atomkernen, die von einem Elektronengas umgeben sind, sie ist einige hundert Meter dick. Innerhalb der ersten zehn Zentimeter Tiefe steigt die Dichte bereits um drei Größenordnungen von 10^3 g/cm³ auf 10^6 g/cm³ an. Diese Oberflächenschicht besteht aus Eisen-Kernen, die wie bei Festkörpern in einem Gitter angeordnet sind. Ab einer Dichte von 10^6 g/cm³ stellt Eisen allerdings nicht mehr den stabilsten Kern dar. Die Protonen des Eisenkerns fangen Elektronen ein und werden zu Neutronen. So entstehen Kerne mit immer höherem Neutronenanteil, die aus bis zu 200 Nukleonen (Neutronen und Protonen) bestehen. Dabei sind nur noch zehn bis zwanzig Prozent der Kernbausteine Protonen. Normalerweise würden Kerne mit einem so großen Neutronenanteil sofort wieder zerfallen - aber bei diesen hohen Dichten sind sie stabil. Die Tiefe, in der $4,3 \times 10^{11}$ g/cm³ erreicht wird, markiert den Übergang zur inneren Kruste. Diese Dichte wird als "neutron-drip-density" bezeichnet. Bei dieser Dichte ist die Fermi-Energie so hoch, dass es keine Energie mehr kostet, ein Neutron aus dem Kern zu entfernen. Die Neutronen beginnen deshalb, aus den Kernen herauszutropfen. Je weiter die Dichte ansteigt, desto mehr Neutronen verlassen die Atomkerne, bis beim Übergang zum Neutronensternkern in zwei Kilometern Tiefe die gesamte Materie als Flüssigkeit aus entarteten Protonen,

Neutronen, Elektronen und Myonen vorliegt. Der Kern macht etwa 99% der Neutronensternmasse aus. Am Übergang zwischen Kruste und Kern beginnen die Atomkerne, sich zu berühren: Die Dichte von Atomkernen ist erreicht. Der ganze Kern besteht aus einer neutralen Flüssigkeit aus Neutronen, Protonen, Elektronen und Myonen im Beta-Gleichgewicht. Der Quantendruck der Neutronen ist entscheidend für das Druckgleichgewicht.

In den letzten 30 Jahren sind etwa 2500 Neutronensterne als Radiopulsare gefunden worden, von denen viele auch in Doppelsystemen vorkommen. Als Partner kommen Neutronensterne, Weiße Zwerge und normale Sterne in Frage, jedoch auch Schwarze Löcher. Mit zukünftigen Radioteleskopen (z.B. SKA) erwartet man bis zu 20.000 Radiopulsare in der Milchstraße zu detektieren. Über relativistische Effekte lassen sich bei solchen Systemen die Massen der beiden Partner durch Analyse der Pulsankunftszeiten sehr genau messen. Die gemessenen Massen der Neutronensterne liegen alle im Bereich zwischen 1,1 und 2,0 Sonnenmassen. Dies lässt vermuten, dass die obere Massengrenze für Neutronensterne bei 2,0 Sonnenmassen liegt. Neutronensterne können auch in engen Doppelsternsystemen mit normalen Sternen zusammenleben. Dann strömt Materie vom normalen Stern auf den Neutronenstern ein und bildet eine Akkretionsscheibe. Damit erscheint der Neutronenstern als Röntgenstern. Allein stehende Neutronensterne strahlen ebenfalls weiche Röntgenstrahlung ab, wenn sie noch relativ jung sind. Der jüngste bekannte Neutronenstern in der Milchstraße ist der Zentralstern in der Supernova Cassiopeia A – er ist gerade gut 300 Jahre alt und weist eine Oberflächentemperatur von knapp einer Million Grad Kelvin auf, ob- schon sein Inneres immer noch 500 Millionen Grad Kelvin heiß ist.

Schwarze Löcher sind reine Geometrie

Schwarze Löcher stellen das Endstadium in der Entwicklung von massereichen Sternen mit über 25 Sonnenmassen dar. Weder Materie noch Licht können einem solchen Objekt entkommen (Abb. 4). Bisher konnte man nur unter bestimmten Annahmen

Ricci-flache RaumZeit, die asymptotisch flach ist und einen Horizont besitzt (Abb. 4). Mit andern Worten, auch das Innere des Schwarzen Lochs enthält keine Materie, sondern ist Vakuum. Schwarze Löcher sind erstaunlich einfache Himmelskörper: Sie lassen sich allein durch ihre Masse, ihren Drehimpuls und ihre elektrische Ladung charakterisieren. Aufgrund fehlender weiterer Eigenschaften prägte der Physiker John Archibald Wheeler die Aussage: "*Schwarze Löcher haben keine Haare*". Die Folgerungen aus dieser Entdeckung sind groß: Sie erlaubt den direkten Nachweis der Existenz Schwarzer Löcher mit Hilfe von Gravitationswellen.

Die vier bislang von der Detektoranlage aLIGO in den USA empfangenen Gravitationswellensignale stammen von Schwarzen Löchern in Doppelsystemen. Eine neue Analyse der Daten zeigt nun, dass die Rotationsachsen dieser Schwarzen Löcher nicht in die gleiche Richtung weisen, sondern relativ zueinander zufällig orientiert sind. Demnach seien diese Schwarzen Löcher vermutlich getrennt entstanden und erst später durch enge Begegnungen in einem dichten Sternhaufen zu einem Doppelsystem geworden.

Als Konsequenz des Glatzen-Theorems lassen sich astronomische Schwarze Löcher in einer Ebene mit Masse in einer Richtung und Drehimpuls in der andern Richtung darstellen (Abb. 5). Stellare Schwarze Löcher erstrecken sich von 5 bis 40 Sonnenmassen, dann folgt eine Lücke bis etwa 200 Sonnenmassen. Die massereichsten Schwarzen Löcher finden sich in den Zentren von Galaxien.

Stellare Schwarze Löcher besitzen eine Masse von 5 bis zu 40 Sonnenmassen. Sterne mit mehr als zwanzig Sonnenmassen enden in gewaltigen kosmischen Explosionen, sogenannten Supernovae und hinterlassen ein Schwarzes Loch. Ihre Hülle stoßen sie dabei als Gaswolke in den interstellaren Raum ab, ihr Kern kollabiert unter der starken Gravitation innerhalb weniger Sekunden bis Minuten zu einem Schwarzen Loch. Stellare Schwarze Löcher werden nur sichtbar, wenn sie Materie von einem Partnerstern akkretieren, die dann Röntgenphotonen abstrahlt (Cygnus X-1 ist bereits 1970 mit Uhuru entdeckt worden).

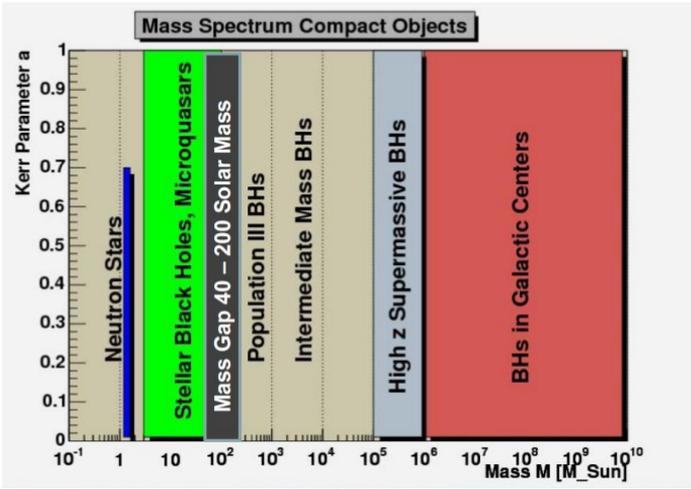


Abb. 5. Die "Glatzebene" der Schwarzen Löcher. Schwarze Löcher sind allein durch ihre Masse M und den Spin-Parameter a bestimmt. Stellare SL sind im Massenbereich von 5 – 40 Sonnenmassen zu finden, supermassereiche SL von 0,1 Mio. bis 10 Mrd. Sonnenmassen. Diese SL rotieren: $a = 1$ entspricht der extremen Kerr-Lösung, $a = 0$ der nichtrotierenden Schwarzschild-Lösung. [Grafik: Camenzind 2016]

Supermassereiche Schwarze Löcher haben eine Masse von etwa 10^5 bis 10^{10} Sonnenmassen. Bisher ist unklar, wie sie im frühen Universum entstanden sind und sich entwickelt haben. Forscher gehen davon aus, dass sich in beinahe jedem Galaxienzentrum ein supermassereiches Schwarzes Loch befindet. Auch das Schwarze Loch, das sich im Zentrum der Milchstraße gebildet hat, gehört mit 4,3 Millionen Sonnenmassen in diese Kategorie. Wird das Schwarze Loch von einer rotierenden Gas- und Staubscheibe umgeben, kann sich das Material aufheizen und beginnt extrem hell zu leuchten. Solche Erscheinungen werden als Seyfert-Galaxien oder Quasare bezeichnet. Sie waren wichtige Objekte meiner Studien an der LSW.

Forscher vermuten als weitere Gruppe *mittelschwere Schwarze Löcher*, die eine Masse von mehreren Hundert bis einigen Tausend Sonnenmassen besitzen sollten. Bislang ließen sich allerdings keine Objekte dieser Klasse eindeutig nachweisen. Erste Hinweise auf mittelschwere Schwarze Löcher haben Astronomen in jungen Sternhaufen, Kugelsternhaufen und Zwerggalaxien gefunden. Wir gehen davon aus, dass diese Objekte durch Kollisionen von mehreren Sternen in dichten Sternhaufen entstehen.

Kompakte Objekte in Binärsystemen erzeugen Gravitationswellen

Albert Einstein hatte Gravitationswellen im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie vor etwa hundert Jahren vorhergesagt. Seit den 1960er Jahren haben Forscher erfolglos nach ihnen gesucht – bis im Herbst 2015 ein Gravitationswellensignal in den Daten der AdvancedLIGO-Detektoren auftauchte. Gravitation ist nicht wie bei Newton eine Kraft, sondern eine geometrische Eigenschaft der RaumZeit. Jede Masse darin krümmt oder verformt sie und ändert so die Bahnen anderer Körper oder Teilchen.

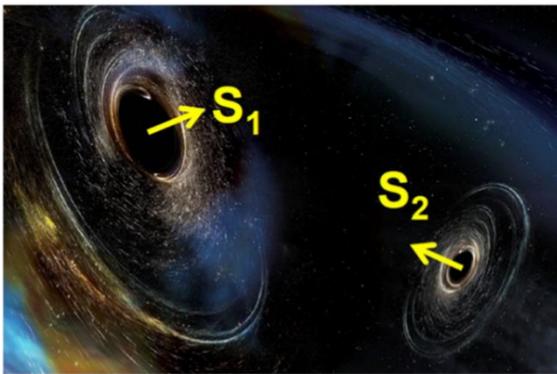


Abb. 6. Zwei Schwarze Löcher in einem Binärsystem strahlen Gravitationswellen ab. Dabei werden ihre Bahnen immer enger. Nach Milliarden von Jahren verschmelzen sie zu einem neuen Loch, das wiederum ein Kerr-Loch ist. [Grafik: Camenzind]

Bei engen Doppelsternsystemen aus Neutronensternen oder Schwarzen Löchern (Abb. 6), die einander umkreisen und dabei Energie verlieren, können die Frequenzen der ausgesendeten Gravitationswellen niedrig sein. Die Schwingungsdauer der Welle entspricht der Hälfte der Umlaufzeit, die Frequenz dem Doppelten der Umlauffrequenz, $f_{\text{GW}} = 2f_{\text{Kepler}}$. Je näher sich die Himmelskörper kommen, desto geringer wird die Wellenlänge und desto höher die Frequenz: Verschmelzende Doppelneutronensterne können bei sehr tiefen Frequenzen im Milli-Hertz-Bereich anfangen und sich dann in den letzten Sekunden bis zu wenigen Hundert Hertz hoch "zirpen".

Die ersten Schwarz-Loch Merger mit aLIGO

Am 14. September 2015 gelang der erste direkte Nachweis von Gravitationswellen (Abb. 7), wenige Monate später der zweite. Die Detektoren von aLIGO konnten ein System aus zwei Schwarzen Löchern beobachten, das etwa 1,3 Milliarden Lichtjahre von uns entfernt ist. Die Schwarzen Löcher besaßen 29 und 36 Sonnenmassen und sind zu einem Schwarzen Loch mit 62 Sonnenmassen verschmolzen. Die Energie der fehlenden drei Sonnenmassen wurde in Form von Gravitationswellen abgestrahlt – und das innerhalb des Bruchteils einer Sekunde. Im Juni 2017 vermeldeten die Wissenschaftler der LIGO-Kollaboration einen weiteren Fund GW170116: Genau wie bei den ersten beiden Signalen entstanden die beobachteten Gravitationswellen bei der Verschmelzung von zwei Schwarzen Löchern.

Zwei neue Aspekte dieser Messung sind entscheidend: Es gelang Gravitationswellen zum ersten Mal direkt zu beobachten – nicht nur den Energieverlust, sondern die tatsächliche Verzerrung des Raumes und die Längenänderung hier auf der Erde. Der zweite Aspekt ist, dass aLIGO zum ersten Mal ein solches System aus verschmelzenden Schwarzen Löchern beobachten konnte, von dem keine elektromagnetischen Signale ausgehen und auch keine gefunden worden sind.

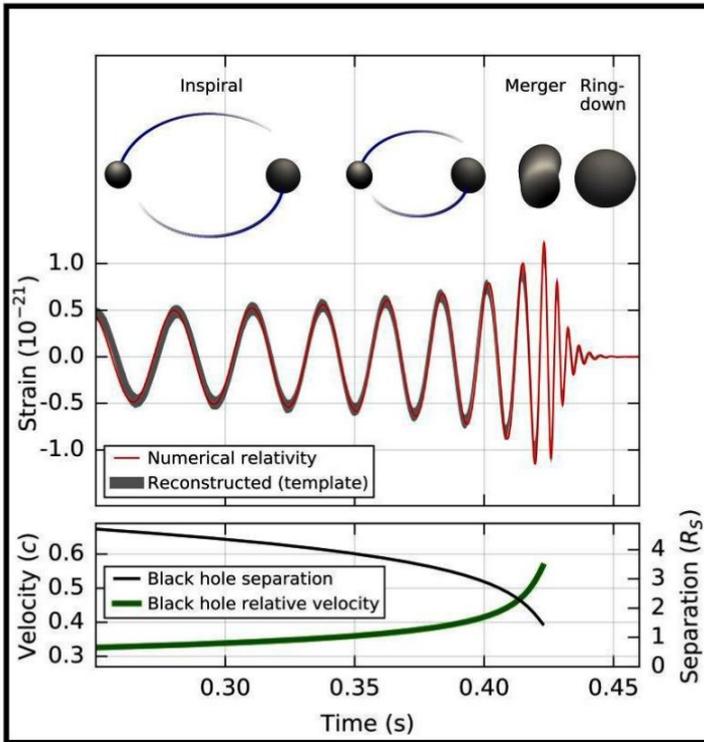


Abb. 7. Das Gravitationswellen-Signal $h(t)$ von GW150914 vom Verschmelzen zweier Schwarzer Löcher mit 29 und 36 Sonnenmassen in einer Entfernung von 1,4 Milliarden Lichtjahren. Man kann 3 Phasen unterscheiden: Inspiral, Merger und Ringdown. [Grafik: Abbott et al. 2016, Phys. Rev. Letters 116, 061102]

Anders als bei den bisherigen Funden wurde das neueste Signal – beobachtet am 14. August 2017 als GW170817 – gleichzeitig von drei Detektoren aufgezeichnet: neben den beiden Advanced-LIGO-Detektoren war dieses Mal auch der Advanced-Virgo-Gravitationswellen-Detektor in Italien beteiligt. Die dreifache Messung

verbessert signifikant die Genauigkeit, mit der sich Himmelsposition und Entfernung der Schwarzen Löcher bestimmen lässt.

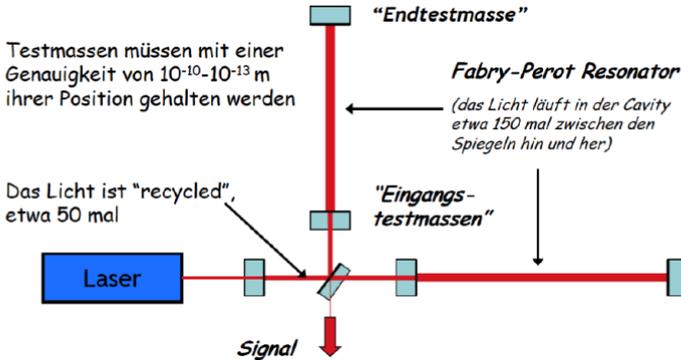
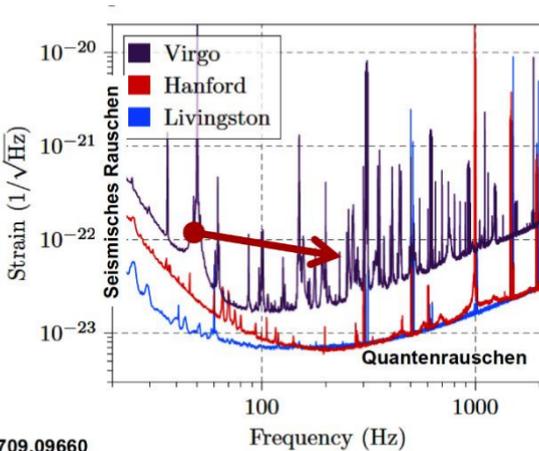


Abb. 8. Das Messprinzip der LIGO-, GEO600-, Virgo- und KAGRA-Detektoren. Eine auf den Detektor einfallende Gravitationswelle verschiebt periodisch die Abstände zwischen den Spiegeln im Interferometer. Der Laser bei aLIGO konnte 2017 nur mit einer Leistung von 25 W betrieben werden, ist jedoch auf 150 W ausgelegt. [Grafik: Camenzind 2016]

Die Nobelpreisträger in Physik 2017

Der Nobelpreis für Physik wird 2017 zur Hälfte an Rainer Weiss vom MIT verliehen, zur anderen Hälfte gemeinsam an Barry C. Barish und Kip S. Thorne vom Caltech für *entscheidende Beiträge zum LIGO-Detektor und die Beobachtung von Gravitationswellen*. Bereits in den 1970er Jahren untersuchte Rainer Weiss mögliche Störeffekte bei der Messung von Gravitationswellen und überlegte, wie der Nachweis eines Signals gelingen könnte. Als geeigneten Detektor schlug er ein sogenanntes Michelson-Laserinterferometer vor (Abb. 8). Dieses besteht aus zwei senkrecht zueinander verlaufenden Armen von 4 km Länge, durch die jeweils ein Laserstrahl mehrmals hin und her läuft. Spiegel am Ende der beiden Röhren werfen das Licht wieder zurück, um die beiden Strahlen

schließlich zu überlagern. Eine einlaufende Gravitationswelle sollte einen Arm des Interferometers strecken, während sie den anderen staucht. Dadurch verlängern beziehungsweise verkürzen sich die von den Laserstrahlen durchlaufenen Strecken und die beiden Lichtwellen schwingen nicht mehr im Takt, was sich messen lässt (Abb. 9).



arXiv:1709.09660

Abb. 9. Die Rauschkurve der drei Detektoren aLIGO und aVirgo im August 2017. Im niederfrequenten Bereich ist die Empfindlichkeit des Detektors durch das seismische Rauschen begrenzt, im hochfrequenten Bereich durch das Quantenrauschen. Die markanten Ausschläge sind Resonanzen im Detektorsystem. [Daten: LIGO und Virgo]

LIGO wird von der NSF finanziert und von Caltech und MIT betrieben, die LIGO konzipierten und die Initial und Advanced LIGO-Projekte leiteten. Finanzielle Unterstützung für das Advanced-LIGO-Projekt kam hauptsächlich von der NSF, wobei Deutschland (Max-Planck-Gesellschaft), Großbritannien (Science and Technology Facilities Council) und Australien (Australian Research Council) signifikantes Engagement und Beiträge leisteten. Mehr als 1200 Wissenschaftler und etwa 100 Forschungs-

einrichtungen aus aller Welt sind durch die LIGO Scientific Collaboration LSC – welche die GEO-Kollaboration und die australische OzGrav Collaboration beinhaltet – an der Unternehmung beteiligt.

Die Virgo-Kollaboration besteht aus mehr als 280 Physiker(innen) und Ingenieuren aus 20 verschiedenen europäischen Forschungsgruppen: 6 vom Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) in Frankreich; 8 vom Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) in Italien; 2 in den Niederlanden bei Nikhef; das MTA Wigner RCP in Ungarn; die POLGRAW-Gruppe in Polen; Spanien mit der Universität von Valencia; und das European Gravitational Observatory EGO, die Dacheinrichtung des Virgo-Detektors nahe Pisa in Italien, gefördert von CNRS, INFN und Nikhef.

GW170817 – Verschmelzen von zwei Neutronensternen

Seit Ende August 2017 kursierten bereits Gerüchte, dass aLIGO und aVirgo das erste Gravitationswellen-Signal vom Verschmelzen zweier Neutronensterne beobachtet hätten. Am 10. Oktober 2017 durften die Forscher endlich ihre Sensation verkünden. Und weil daran so viele beteiligt waren, sprengte die Präsentation alle normalen Maßstäbe. Die Pressekonferenz bei der NSF wurde zweigeteilt, weil auf einmal gar nicht alle Ergebnisse präsentiert werden konnten. In *Nature* und *Science* erschienen je sieben Artikel; ein weiteres Paper in *Physical Review Letters* war von rund 4000 Autoren unterzeichnet.⁴ Die genaue Analyse der Ligo-Daten ergab, dass die beiden Neutronensterne 1,1 beziehungsweise 1,6 Mal so viel Masse besaßen wie unsere Sonne und sich am Schluss fast 200 Mal pro Sekunde umkreisten. Bei diesem explosiven Ereignis wurde elektromagnetische Strahlung frei, die von über 70 Teleskopen auf der ganzen Erde beobachtet wurde. Zum ersten Mal ist es damit gelungen, Gravitationswellen aus einer anderen Quelle als Schwarzen Löchern zu detektieren.

⁴ B.P. Abbott et al., 2017: GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral, *Phys. Rev. Letters* 119, 161101

Das Signal der Gravitationswellen GW170817 konnte um 12:41:04 Weltzeit am 17. August 2017 mit aLIGO und aVirgo detektiert werden und dauerte ca. 100 Sekunden an. Es überspannte 3000 Zyklen, bei dem die Frequenz der Gravitationswellen auf mehrere hundert Hertz anstieg. Es erreichte zuerst den Virgo-Detektor in Italien, 22 Millisekunden später das LIGO-Observatorium in Louisiana, USA und nochmals 3 Millisekunden später den LIGO-Hanford Detektor in Washington, USA. Mit diesen drei Messungen konnte die Quelle auf einen Bereich von 28 Quadratgrad im südlichen Himmel mit einer 90 % Wahrscheinlichkeit bestimmt werden (Abb. 10). Der Fermi-Satellit zeichnete den Gammablitz um 12:41:06 UTC auf. Die Gamma-Strahlung erreichte die Erde also ca. 2 Sekunden nach den Gravitationswellen. Er dauerte auch nur 2 Sekunden und war damit ein sogenannter kurzer Gammablitz. Nach der Detektion der beiden Signale wurde der entsprechende Himmelsbereich von zahlreichen bodengebundenen und weltraumgestützten Instrumenten untersucht. Innerhalb weniger Stunden wurde das Objekt im optischen Bereich entdeckt und der Helligkeits- und spektroskopische Verlauf konnte in den nächsten Tagen und Wochen dokumentiert werden. Nach zwei Wochen wurden aus dem Bereich auch Röntgenstrahlung und Radiowellen gemessen. Ein Neutrinosignal konnte nicht gemessen werden.

Analysen der LIGO-Daten stellten eine relativ geringe Entfernung zur Neutronensternverschmelzung von rund 130 Millionen Lichtjahren zur Erde fest, in Übereinstimmung mit den 130 Millionen Lichtjahren zur vermuteten Ursprungsgalaxie NGC 4993. Im Gegensatz zu vorherigen Gravitationswellen-Beobachtungen berechneten die Wissenschaftler die Massen der verschmelzenden Objekte zu 1,1 bis 1,6-mal der unserer Sonne, vergleichbar mit denen bekannter Neutronensterne und nicht in Übereinstimmung mit denen von Schwarzen Löchern.

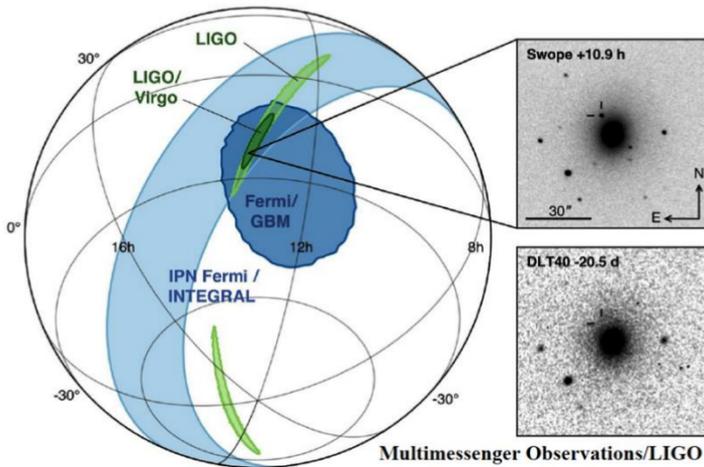


Abb. 10. Multimessenger Messungen des Gravitationswellen-Ereignisses GW170817. Beide LIGO-Detektoren beobachteten GW170817 für rund 100 Sekunden am 17. August 2017. Die Messungen des Virgo-Detektors verbesserten die Himmelslokalisierung signifikant und erlaubten es den Forschern, den Ursprung der Welle auf einen Himmelsfleck am Südhimmel von nur 28 Quadratgrad einzuschränken. Nur 1,7 Sekunden später registrierte der Gamma-Ray Burst Monitor GBM an Bord des Fermi Gamma-Ray Space Telescope einen Gammastrahlenblitz (GRB 170817A) aus ungefähr der gleichen Richtung wie das Gravitationswellensignal. 11 Stunden später wurde die Kilonova in der Galaxie NGC4993 mit Teleskopen am Südhimmel geortet (rechts). [Grafik: LIGO]

Während der größte Teil der Materie des zerrissenen Sterns aus einer Akkretionsscheibe auf den massereicheren Begleiter akkretiert wird (Abb. 11), werden 0,001 bis 0,1 Sonnenmassen des zerstörten Neutronensterns isotrop mit einer Geschwindigkeit vom 0,1- bis 0,2-fachen der Lichtgeschwindigkeit ausgestoßen.

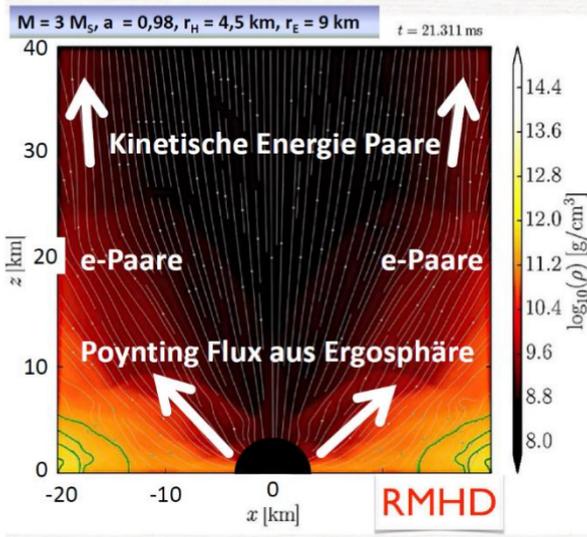


Abb. 11. Magnetosphäre (MS^2) um ein schnell rotierendes Schwarzes Loch, das durch Verschmelzen von 2 Neutronensternen entsteht. Die starke differentielle Rotation des Raumes um ein Schwarzes Loch mit Akkretionsscheibe baut eine achsensymmetrische MS^2 auf. Die Kühlung der heißen Akkretionsscheibe (gelb) durch Gamma-Photonen und Neutrinos füllt die MS^2 mit Elektron-Positron Paaren, die durch den Poynting-Fluss auf hohe Gamma-Faktoren beschleunigt werden und den Jet des Gamma-Bursters erzeugen. [Grafik: Camenzind]

Die neutronenreiche Materie wandelt sich innerhalb weniger Sekunden durch Fission und Beta-Zerfall in schwere Elemente um (vor allem in seltene Erden), die durch den r -Prozess entstehen. Die neu synthetisierten radioaktiven Elemente zerfallen und die dabei emittierte Strahlung kann als ein 0,5 bis 10 Tage dauernder Ausbruch mit einer Leuchtkraft von 10^{34} W bis $10^{35,5}$ W nachgewiesen werden (Abb. 12). Kilonovae werden als eine bedeutende Quelle für die schweren Elemente des r -Prozesses mit Atommassen von über 130 angesehen, da der Beitrag von Supernova-Ejekta zu

diesen Elementen zu gering zu sein scheint, um die gemessenen Werte in der interstellaren Materie zu erklären.

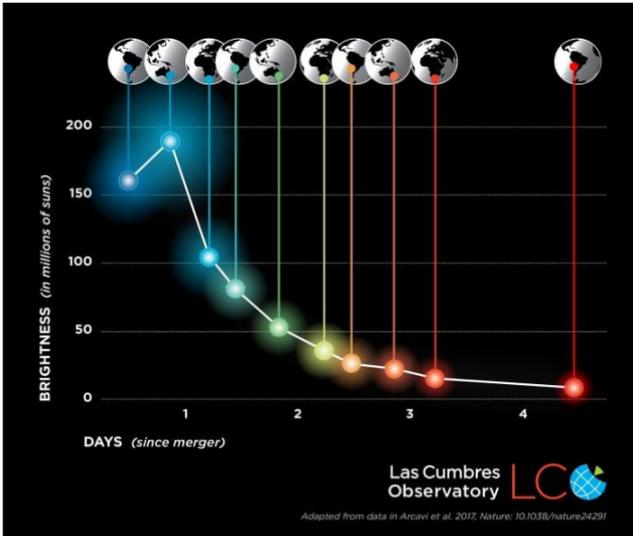


Abb. 12. Die Kilonova, die mit dem Merger GW170817 assoziiert wird. Mittels Teleskope in Chile, Australien und Südafrika gelang es, alle 8 Stunden die Helligkeit der Kilonova zu messen. Die Temperatur der Photosphäre sank im Laufe der Zeit von 10.000 K (blau) auf 2000 K (rot). [Lichtkurve: Sarah Wilkinson / LCO, nach Daten von I. Arcavi et al. 2017: Optical emission from a kilonova following a gravitational-wave-detected neutron-star merger; arXiv:1710.05843]

Gravitationswellen-Astronomie – Blick ins Dunkle Universum

In den letzten 40 Jahren habe ich eine unglaubliche Entwicklung auf dem Gebiet der kompakten Objekte erlebt. Ich konnte im Rahmen dieses Vortrages nur einige Aspekte meiner eigenen Forschung darstellen. Diese Entwicklung bestätigt noch einmal die Richtigkeit der Theorie der Gravitation von Albert Einstein aus

dem Jahre 1915. Weiße Zwerge, Neutronensterne und Schwarze Löcher sind heute als Objekte der Astronomie voll etabliert.

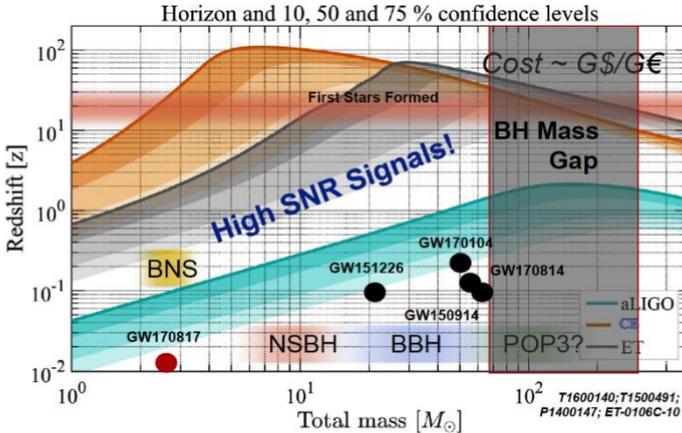


Abb. 13. Die Reichweite der Gravitationswellen-Detektoren in Rotverschiebung z als Funktion der Gesamtmasse M in Einheiten von Sonnenmassen. $z = 0,1$ entspricht einer Distanz von 445 Mpc. Nach heutiger Kenntnis sollten jenseits von etwa 60 Sonnenmassen keine Merger mehr auftreten. BNS: binäre Neutronenstern-Systeme, NSBH: Neutronenstern und Schwarzes Loch, BBH: Schwarz-Loch Merger, aLIGO: Vollausbau (ab 2022) von Advanced-LIGO, CE: Cosmic Explorer, das nächste GWellen-Observatorium der Amerikaner, ET: Einstein Teleskop der Europäer. [Grafik: aus LIGO Whitepaper LIGO-T1600119, modifiziert durch Camenzind]

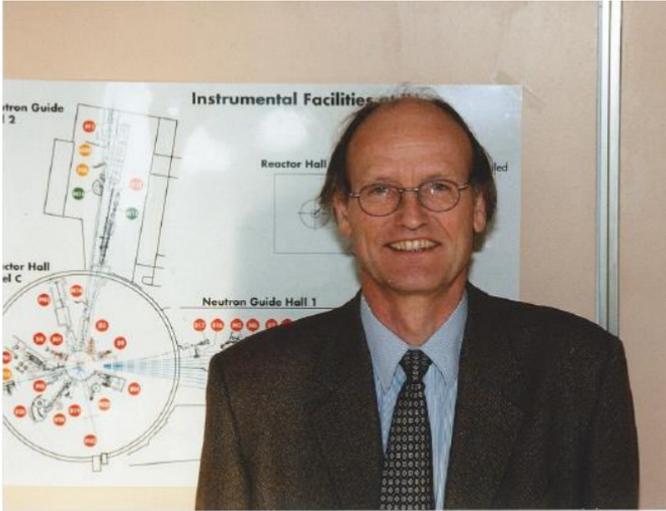
Die ersten Beobachtungen mit aLIGO haben insbesondere die Existenz von Doppelsternen bestehend aus zwei Schwarzen Löchern oder zwei Neutronensternen bestätigt. Der Nachweis eines Doppelsterns bestehend aus einem Neutronenstern und einem Schwarzen Loch steht noch aus. aLIGO vermag diese Objekte jedoch nur sozusagen in unserer kosmischen Nachbarschaft nachzuweisen (Abb. 13). Es werden bereits neue Gravitationswellen-Observatorien geplant – Cosmic Explorer in

U.S.A., das Einstein Teleskop ET in Europa und das Weltraum-Observatorium LISA durch die ESA.⁵ Diese neuen Observatorien sind imstande, das ganze Universum zu überblicken (Abb. 13). Damit sind aus dem ganzen sichtbaren Universum etwa 5 bis 10 Neutronenstern-Merger pro Tag zu erwarten mit entsprechendem Nachglühen im optischen Bereich. Von diesen Gravitationswellen-Ereignissen wird nur etwa ein kurzer Gammablitz pro Tag auftreten, da die Jet-Emission nicht isotrop erfolgt. Dies eröffnet einen neuen Bereich der Astronomie – Astronomie mit Gravitationswellen, die erst so etwa ab 2030 richtig in Gang kommen wird. Im Fokus dieser Astronomie stehen binäre Neutronenstern-Systeme (BNS), Systeme bestehend aus Neutronenstern und Schwarzen Loch (NSBH) und binäre Schwarz-Loch Systeme (BBH). Zusätzlich wird mit LISA auch die Beobachtung von supermassereichen Schwarz-Loch Systemen im frühen Universum neue Einsichten in die Entwicklung von Galaxien bringen.

Vortrag gehalten an der Fakultät für Physik und Astronomie der Universität Heidelberg am 26. Oktober 2017.

⁵ K. Danzmann, 2017: LISA – Laser Interferometer Space Antenna, [/www.elisascience.org/files/publications/LISA_L3_20170120.pdf](http://www.elisascience.org/files/publications/LISA_L3_20170120.pdf)

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 β -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 β -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 γ -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 β -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 (β -Asymmetrie, obere Kurve) und der nachfolgenden Tensorpolarisation (γ -Anisotropie, untere Kurve) am Fluor-20 (11 s) in einem MgF_2 -Einkristall wiedergegeben, die der Bestimmung des Vorzeichens des Quadrupolmoments diente. (Die Einbrüche in der β -Asymmetrie wurden später als resonante Kreuzrelaxationseffekte identifiziert, was zu einer weiteren Methode der Festkörperspektroskopie führte.) Rechts ist ein β -NMR-Spektrum zur Bestimmung des Quadrupolmoments von Lithium-8 (0.8 s) in einem $LiTaO_3$ -Einkristall gezeigt. Die

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

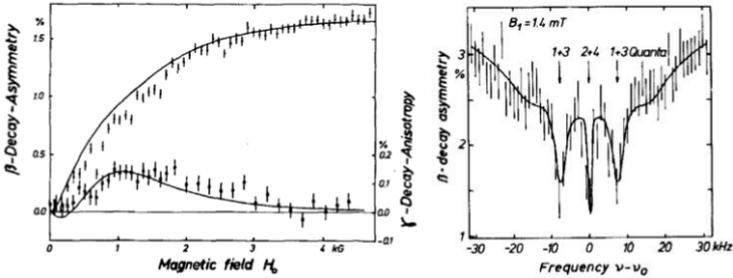


Abb. 2. Messungen und exakte Rechnungen zur β -NMR. *Links:* Reorientierung von Fluor-20 von einer Vektorpolarisation (β -Asymmetrie) zu einer Tensorpolarisation (γ -Anisotropie) unter Dipol- plus Quadrupol-Wechselwirkung. *Rechts:* Mehrquantenübergänge in der Quadrupolaufspaltung des NMR-Signals von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

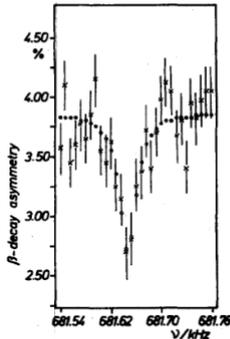


Abb. 3. Weltrekord an NMR Linienbreite in einem Festkörper, gemessen mit β -NMR an Lithium-8.

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 β -NMR Gruppe und startete als Privatdozent zwei neue Vorhaben.

Der Zerfall des freien Neutrons

Frühere Experimente zum β -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 β 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 β -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.

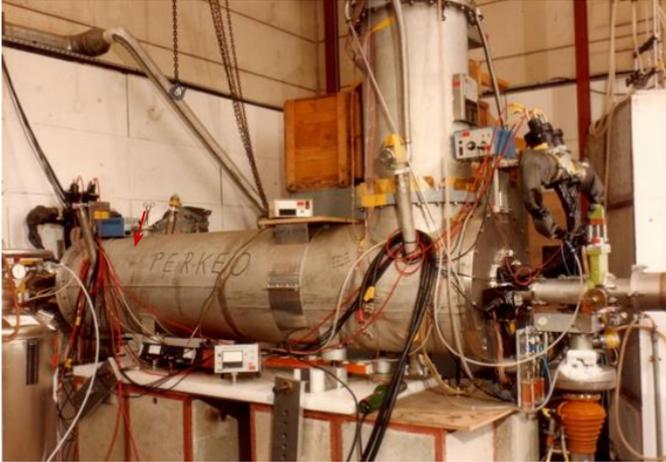


Abb. 4. Der β -Zerfall polarisierter Neutronen. Das Spektrometer PERKEO außerhalb der großen Neutronenleiterhalle des ILL (1982). Die Schere auf dem Instrument (roter Pfeil) zeigt das supraleitende Magnetfeld an, bei abgehängten Stromzuleitungen (schwarz).

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 unbekannte 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 β -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 Bahnhofvorsteher 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.

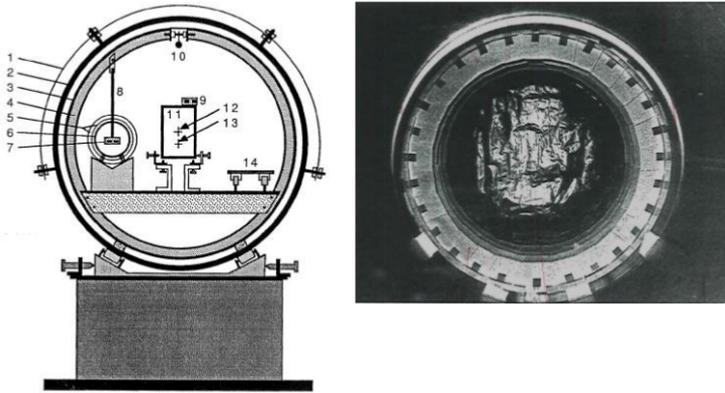


Abb. 6. Suche nach Neutron-Antineutron Oszillationen, Anfang und Ende des 75 m langen Strahlrohrs. *Links:* (2) Vakuumrohr (1.2 m \varnothing), (3) Mu-metallrohr, (7) Magnetometer in Parkposition, (11) divergierender Neutronenleiter (17 m lang), (14) Personentransportwagen. *Rechts:* Die Kohlenstoff-Annihilationsfolie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

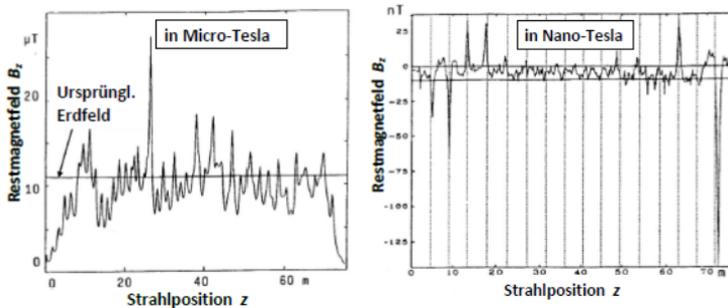


Abb. 8. Magnetfeld längs des 75 m langen n -bar Strahls, mit der Mumetall-Abschirmung installiert. Links *vor*, rechts *nach* Kompensation des Längsfelds. Das horizontale Band rechts ist 10 nT breit.

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} eV , bei einer mittleren Neutronenflugzeit von nur 0.2 Sekunden. Damit können diverse Modelle im 10^{+14} 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.

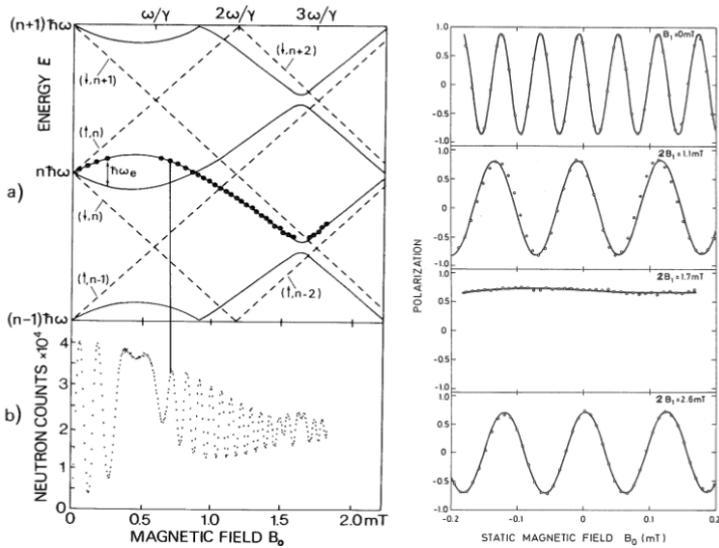


Abb. 10. Dressed-particle Effekte mit polarisierten Neutronen: *Links:* a) berechnetes und gemessenes dressed-neutron Energieniveauschema, letzteres rekonstruiert aus der in b) gezeigten Spinrotationskurve. *Rechts:* Unterdrückung der Spinrotation des Neutrons durch Bestrahlen mit Hochfrequenz einer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

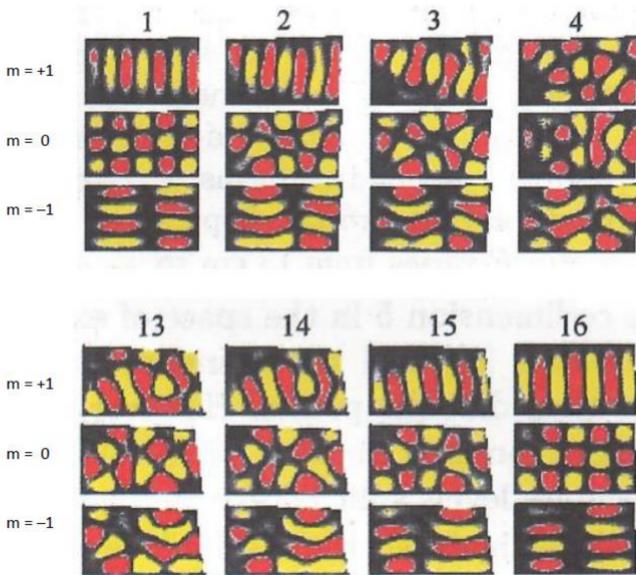


Abb. 12. Entdeckung der nichtdiagonalen Berryphasen in den stehenden Wellen eines fast rechteckigen Mikrowellenresonators, mit effektivem Spin-1. Nach einer zyklischen Veränderung der Form des Resonators, beginnend bei Bildchen 1 und endend bei 16, bleibt die Wellenfunktion mit $m = 0$ dieselbe, für $m = \pm 1$ 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.

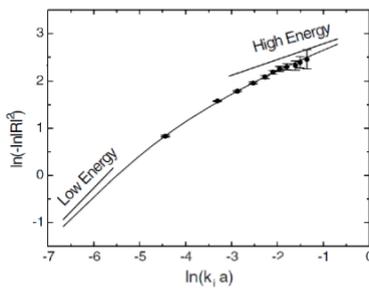


Abb. 13. Casimirkräfte zwischen Atomen und fester Materie, erstmals sichtbar gemacht im Helium-Streuquerschnitt bei kleinen Impulsüberträgen an Oberflächen.

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 β -, 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.

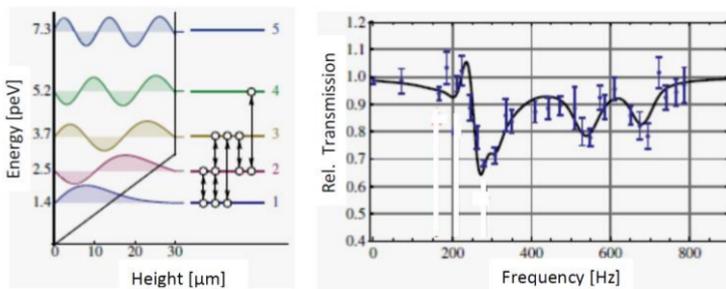


Abb. 14. Resonanzübergänge zwischen Quantenzuständen ultrakalter Neutronen (UCN) im Gravitationsfeld der Erde. *Links* das Energieschema (mit $E_{\text{pot}} = mgh$), *rechts* das Transmissionsspektrum der UCN, mit den Resonanzfrequenzen $\nu_{12} = 258$ Hz, $\nu_{23} = 280$ Hz, $\nu_{13} = 539$ Hz,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

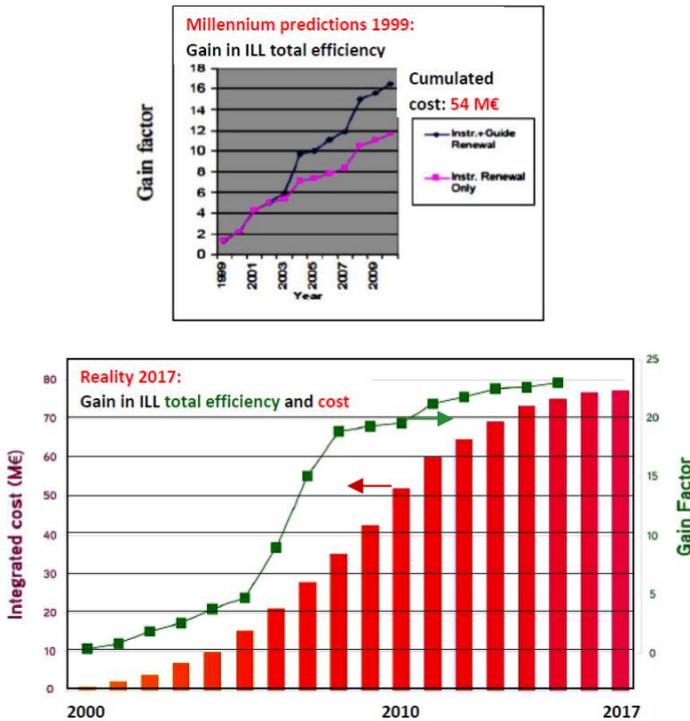


Abb. 15. Das ILL Millennium Programm. *Oberes Bild:* Vorhersagen von 1999 zum Neutronengewinn (Gain factor) und den Gesamtkosten für die Jahre 2000 bis 2010 (schwarz). *Unteres Bild:* Das Programm verlief wie vorausberechnet: Neutronengewinn (grün), Gesamtkosten (rot), aus ILL-Website von 2018. Nach 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 Instrumentenbauern 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 Paradeperde 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 CO₂-Ausstoß wohl weitergehen wird, weshalb auch keine Zeitung das haben wollte, nicht einmal das Physik Journal.

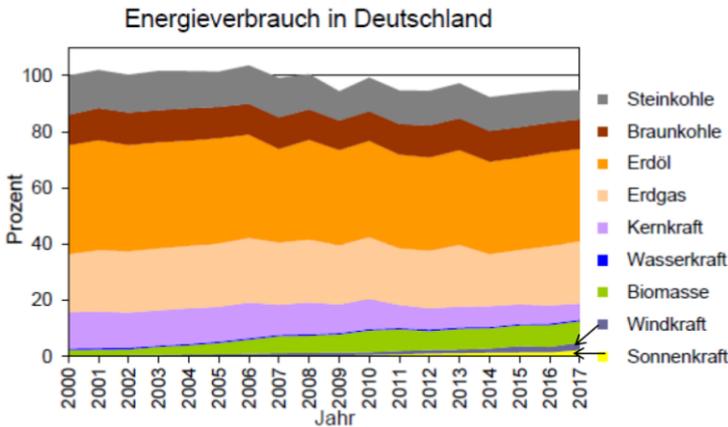


Abb. 17. Analyse der Energiewende: Anteil der verschiedenen Energieträger am Energieeinsatz, im Jahr 2000 auf 100% gesetzt. (Aus den Daten des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie 2018.)

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 β -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 β -Detektors bestimmt, wie er in PERC verwendet werden soll; publiziert 2018 als "Editor's Suggestion" in *Physical Review C*.

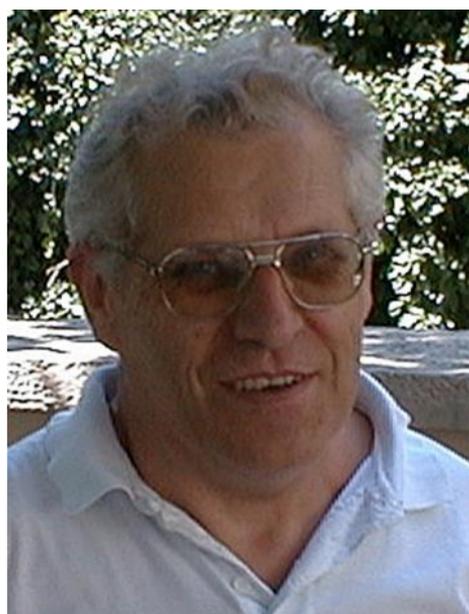
Über das vergangene, aktiv miterlebte halbe Jahrhundert hat sich die Physik fröhlich und rasant fortentwickelt. Ich habe immer noch das Gefühl, wir hätten gerade erst angefangen. Dem großen Teppich der Wissenschaft habe ich mit meinen Mitarbeitern einige hübsche Muster und eine Anzahl nützlicher Zahlen 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.

Franz Eisele



Franz Eisele

Franz Eisele wurde 1941 in Friedrichshafen geboren, wo er 1960 das Abitur ablegte. Er studierte Physik zuerst in Tübingen, dann an der FU Berlin. In seiner Diplomarbeit am Max-Planck-Institut für medizinische Forschung in Heidelberg verbesserte er signifikant die erreichbare Intensität des dortigen Zyklotrons. In seiner Doktorarbeit am Institut für Hochenergiephysik studierte er die semileptonischen Zerfälle von Σ^- - und Λ Hyperonen um den gerade erst postulierten 'Cabbibowinkel' der schwachen Wechselwirkung zu bestimmen. Herr Eisele gehört zu der glücklichen Forscher- generation, die die Entwicklung des Standardmodells von den Anfängen bis zu seiner Vollendung hautnah miterleben und mitgestalten konnten. Als Postdoc ging er 1969 zum CERN nach Genf, und studierte mit hoher Genauigkeit die CP-Verletzung im neutralen Kaon System. 1975 nahm Eisele eine Professur an der Universität Dortmund an, und arbeitete von dort aus am CDHS Neutrino Experiment am SPS des CERN, das von Jack Steinberger geleitet wurde. Das Experiment brachte Klarheit in verschiedene sich widersprechende Messergebnisse der Konkurrenz, auch aufgrund der von Eisele entwickelten genauen Kalibrations- und Analyseverfahren, und lieferte die erste präzise Messung des 'Weinbergwinkels' der elektroschwachen Wechselwirkung. Eisele spielte eine führende Rolle bei der Bestimmung der Struktur- funktionen der starken Wechselwirkung und deren Skalen- verletzungen, in dieser Zeit wichtig zur Etablierung der Quanten- chromodynamik. 1984 wechselte Eisele als leitender Wissen- schaftler an das Deutsche Elektron Synchrotron DESY nach Hamburg, wo er als Sprecher der H1 Kollaboration für den Aufbau des H1 Detektors am Elektron-Proton Speicherring zur Messung der inneren Struktur des Protons hauptverantwortlich war. Dem folgte 1992 ein Ruf an die Universität Heidelberg, von wo er am H1 Experiment arbeitete und am HERAB Experiment, welches

anschließend in das laufende CERN Experiment LHCb zur Messung zur CP-Verletzung im B-System mündete. In Heidelberg widmete er sich intensiv der Neuausrichtung der Physikausbildung, und insbesondere der Lehrerausbildung, wofür er 2007 im Anschluss an seine Emeritierung mit einer Wilhelm und Else Heraeus-Seniorprofessur ausgezeichnet wurde.

Franz Eisele

Von der Verifizierung des Standardmodells und der Suche nach neuer Physik

Die Zeit, als das Standardmodell etabliert wurde, war sicher die wichtigste und spannendste Phase in meiner Arbeit als Physiker. Dabei war das nur ein relativ kurzer Zeitraum von etwa 1971 bis 1984 aber es war eine echte Revolution in der Physik – wie sie nur sehr selten vorkommt. Ich hatte das große Glück, dass ich diese Periode in meiner aktivsten und kreativsten Phase als Physiker miterleben und auch etwas mitgestalten konnte.

Mein erster Kontakt zur Hochenergiephysik war vermutlich 1957, als unser Physiklehrer in der Oberstufe uns ziemlich aufgeregt zu erklären versuchte, dass wir jetzt Außerirdischen erklären könnten was links und was rechts ist – er bezog sich natürlich auf die experimentelle Entdeckung der Paritätsverletzung. Ich stamme aus einer Arbeiterfamilie. Meinen Vater hatte es als jungen Schlossergesellen nach Friedrichshafen gezogen um beim Zeppelinbau dabei zu sein. In meiner großen Verwandtschaft war ich der erste und in meiner Generation der Einzige der ein Gymnasium und eine Hochschule besucht hat. Nach dem Abitur 1960 wusste ich lange nicht, was ich studieren sollte, außer Jura hätte ich mir sehr viel vorstellen können und die Entscheidung zwischen Chemie und Physik fiel erst kurz vor Semesterbeginn.

Ich habe vier Semester bis zum Vordiplom in Tübingen studiert – das war damals die nächste Uni, dann zwei Semester an der FU Berlin, danach kam ich nach Heidelberg. Physik habe ich im Wesentlichen aus Büchern gelernt und habe Vorlesungen, die ich sehr selten gut fand, eher geschwänzt. Mein Studium war sehr chaotisch – nichts passte so recht zusammen und es gab viele

Lücken: so kamen z. B. Festkörperphysik, Teilchenphysik oder Elektronik nie vor. Das Beste an meiner Studienzeit war, dass ich Zeit hatte und mir viel Zeit nahm, um Neues auszuprobieren.

Diplomarbeit (1964/1965)

Meine Diplomarbeit machte ich am Max-Planck-Institut an der Jahnstrasse – heute das Institut für medizinische Forschung – an dem Gentner im Krieg 1943 den ersten Beschleuniger in Deutschland – ein Zyklotron - aufgebaut hatte. Meine Aufgabe war es, eine verbesserte Innengeometrie für das Zyklotron zu entwickeln. Die theoretischen Grundlagen dazu stammten aus der Theorie der Isozyklotrone, die damals an vielen Orten gebaut wurden. Die Arbeit, bei der ich weitgehend unabhängig war, bestand darin, das elektrische Feld im Bereich des Beschleunigungsspalts im elektrolytischen Trog auszumessen und dann die Teilchenbahnen für verschiedene Geometrien numerisch zu berechnen. Die Rechnungen führte ich am ersten Rechner des MPI, einer GIER Rechenanlage mit 5 kB Kernspeicher und der damals sehr hohe Rechenleistung von 10 kflops, durch.

Nach anderthalb Jahren war die neue Geometrie fertig und eingebaut und war ein voller Erfolg. Die Intensität im abgelenkten Strahl konnte erheblich gesteigert werden bei reduzierter Strahlenbelastung und es konnten erstmals auch Heliumkerne beschleunigt und extrahiert werden. Der Hauptvorteil der Arbeit bestand für mich darin, dass ich schon sehr früh mit Datenverarbeitung konfrontiert wurde.

Promotion (1965–1969)

Für meine Doktorarbeit suchte ich mir das Institut für Hochenergiephysik aus, das von Heinz Filthuth 1964 gegründet worden war. Dort sollte gerade das erste große eigenständige Experiment des Instituts starten, ein Blasenkammerexperiment am CERN zur Messung der semileptonischen Zerfälle von Σ^- und Λ Hyperonen. So kam ich 1965 zur Hochenergiephysik und fing an, mich ernsthaft mit Hochenergiephysik zu beschäftigen, was im Wesentlichen darin bestand CERN Reports, Berichte von den Sommerschulen

und Originalpublikationen zu lesen – es gab weder Lehrbücher noch Vorlesungen zum Thema.

Wie stellte sich die Hochenergiephysik für mich 1965 dar? Es gab immer mehr Hadronen(resonanzen) und nach der Bootstraptheorie waren sie alle gleichwertig. Isospin als Symmetrie der starken Wechselwirkung und viele Teilchen mit Strangeness waren bekannt. Es gab keine grundlegende Theorie der starken Wechselwirkung, nur verschiedene mathematisch-physikalische Konzepte wie z.B. current algebra, Reggetrajektorien, Dualität etc., die auch heute noch wichtig sind. Allerdings war auch der erst wichtige Schritt zum Standardmodell schon gemacht. Seit 1961 kannte man den 'eightfold way' von Gell-Mann und Ne'eman; eine Klassifizierung der Hadronen in Multipletts der durch kleine Masseneffekte gebrochenen Symmetriegruppe $SU(3)$ unter Isospintransformationen und Strangenessänderung. Die Quarkhypothese von Gell-Mann und Zweig 1964 war eine gewagte Erklärung des eightfold ways und initiierte viele Experimente zur Suche nach drittelladigen Teilchen, die alle erfolglos blieben. Das nichtrelativistische Quarkmodell der Hadronen von Dalitz erschien 1965 und erwies sich als wunderbar effektiv, nicht nur bei der Klassifizierung aller beobachteten Hadronen. Es erklärte auch empirisch gefundene Auswahlregeln bei Zerfällen zwanglos. Gleichzeitig machte es das Problem der starken Wechselwirkung noch viel größer. Was immer man über die starke Wechselwirkung damals wusste, konnte den Erfolg des Quarkmodells nicht erklären, stand sogar in eklatantem Widerspruch dazu. Auf einer Konferenz in Berkeley 1967 kam Gell-Mann daher selbst zu der Schlussfolgerung, dass angesichts der theoretischen Widersprüche die Quarks doch eher mathematische Entitäten seien.

Meine Doktorarbeit befasste sich ja zum Glück mit einem Thema der schwachen Wechselwirkung, die ich schon deswegen faszinierend fand, weil sie so viele Überraschungen bereithielt, insbesondere bei der Brechung von Symmetrien. Nach der Paritätsverletzung folgte 1963 die Entdeckung der CP-Verletzung.

Die Theorie der schwachen Wechselwirkung bestand 1964 aus der 4-Punkt V-A Wechselwirkung von Fermi, welche alle experimentellen Daten sehr gut beschrieb, da nur Prozesse bei kleiner Energie untersucht wurden. Dennoch war klar, dass sie gravierende prinzipielle Probleme hatte. Ein Teil der Probleme konnte durch die Postulierung schwerer geladener Vektorbosonen behoben werden, nach denen in jedem neuen Experiment gesucht wurde bei dem es eine Chance gab, sie zu finden. Eine Theorie mit massiven geladenen Vektorbosonen alleine ist jedoch nicht renormierbar, bereits die erste Ordnung Störungstheorie ergibt unendlich große Korrekturen. Die Frage nach einer renormierbaren Theorie der schwachen Wechselwirkung wurde daher jahrelang diskutiert und bearbeitet und führte letztendlich zu den Eichtheorien des Standardmodells.

Das Thema unseres Blasenkammerexperiments war die Messung der semileptonischen Zerfälle der Σ^- und Λ Hyperonen mit dem Ziel, die Cabibbotheorie (1964) der schwachen Wechselwirkung zu testen. Sie war ein weiterer wichtiger Schritt auf dem Weg zum Standardmodell da sie grundlegende Konzepte wie z.B. die Universalität der schwachen Wechselwirkung und den damit verbundenen ersten Mischungswinkel, den Cabibbowinkel, postulierte.

Parallel zu unserem Experiment haben übrigens Heintze und Soergel vom Physikalischen Institut mit Zählerexperimenten die semileptonischen Zerfälle des Λ und Ξ^- Hyperons gemessen.

Zu Beginn meiner Doktorarbeit mussten erst mal Millionen von K-Mesonen in der 80 cm Wasserstoffblasenkammer am CERN PS gestoppt werden und die Reaktionen fotografiert werden, ein Beispiel einer Aufnahme zeigt Abb. 1. Zur Auswertung der Blasenkammerbilder wurden 10 Messtische im Scankeller aufgebaut, die über eine PDP7 ausgelesen wurden. Da die semileptonischen Zerfälle $\Sigma^- \rightarrow n e^- \nu$ nur ein Verzweungsverhältnis von 2×10^{-3} haben, mussten ca. 1000 Σ^- Zerfälle gefunden und gemessen werden um einen interessierenden semileptonischen Zerfall zu finden. Die Scan- und Messarbeit erledigte eine Heer-

schar von Studierenden (Scanner). Leider gab es ein Riesensproblem: die Messrate war so lausig, dass ich mir ausrechnen konnte, dass die Doktorarbeit mindestens sechs Jahre dauern würde. Die Lösung dieses Problems war wohl mein wichtigster Beitrag zum Experiment – ich schlug vor, ein Akkordsystem einzuführen, bei dem jedes Ereignis das über der minimal erwarteten Zahl hinaus gemessen wurde extra honoriert werden sollte

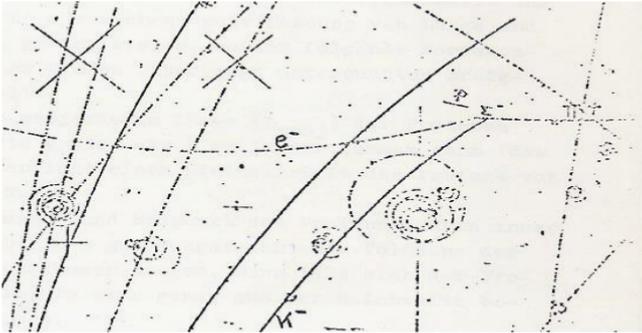


Abb. 1. Semileptonischer Zerfall eines $\Sigma^- \rightarrow n e^- \nu$ Zerfalls mit $n + p \rightarrow n + p$ zur Messung des Neutronimpulses. Für die Analyse in der Doktorarbeit konnten 57 solcher Ereignisse genutzt werden.

Innerhalb von drei Wochen nach Einführung dieses Systems steigerte sich die Messrate um einen Faktor 3. Das Analyseziel meiner Doktorarbeit war die Bestimmung von g_A/g_V im Sigma-betazerfall. Hierfür war auch die Messung des Neutronimpulses erforderlich was nur über die elastische Neutron-Proton Streuung möglich war. Es gelang insgesamt 57 Ereignisse zu finden, von denen allerdings etwa 24 Untergrundereignisse waren. Die Messung war nicht besonders genau, aber die beste zu der Zeit und sie stützte zusammen mit den anderen Messungen die Cabibbotheorie. Die Arbeit war für mich sehr wichtig, weil ich dabei Analysetechniken lernte, die zu dieser Zeit noch nicht so weit verbreitet waren: die Nutzung von MC Simulationen, Methoden zur

Untergrundbestimmung und statistische Methoden der Anpassung. Hierfür stand als Großrechner eine IBM/360 zur Verfügung. Die Zeit meiner Doktorarbeit war eine sehr schöne Periode, mit vielen Festen. Mein Arbeitsstil und Auftreten war chaotisch. Auf Tage, manchmal Wochen der Arbeitsunlust folgten – meist als Folge eines Einfalls – hektische Arbeit rund um die Uhr, bei der ich in kurzer Zeit viel zustande brachte, so dass nach einiger Zeit sich niemand mehr über meine sehr unregelmäßigen Arbeitszeiten aufregte.

Nach der Promotion wusste ich erst mal nicht, was ich tun sollte. Inzwischen erschien mir die Physik zu wenig 'soziale Relevanz' zu haben. Eine Option war ein zusätzliches Medizinstudium – zu lange und zu teuer. Schließlich bewarb ich mich auf verschiedenen Stellen und bekam gute Angebote. Mit Sicherheit hatte ich nie die Idee, dass ich zum Professor berufen wäre – damals galt ja für uns das Motto: "unter den Talaren Muff von 1000 Jahren".

K⁰ Experiment (1969–1973)

Schließlich ging ich als Postdoc zum K⁰ Zählerexperiment ans CERN, das Heinz Filthuth zusammen mit seinem alten Kumpel Jack Steinberger neu aufgebaut hatte. Sie kannten sich, wie viele andere HEP-Pioniere, vom Jungfrauoch wo Experimente mit Höhenstrahlung mit Emulsionen und einer Cloudchamber durchgeführt wurden. Jack Steinberger, der schon in den USA wichtige Experimente zur CP Verletzung gemacht hatte, war kurz davor zum CERN gekommen und es war sein erstes Experiment. Die Begegnung mit Jack Steinberger und das Privileg, mit ihm 15 Jahre lang eng zusammen zu arbeiten, war für mich in vielerlei Hinsicht extrem wichtig. Er war der erste Physiker, und bis heute der wichtigste, der mich wirklich beeindruckte. Ich habe sehr viel von ihm gelernt, einfach indem ich zusah, wie er Probleme anging. Er war in der Lage, mit Hilfe eines Briefumschlags oder auch nur im Kopf ein physikalisches Ergebnis auf typischerweise 20% abzuschätzen und er hatte eine sehr effektive und originelle Art an Probleme heranzugehen und physikalisch zu argumentieren. Es

stellte sich später heraus, dass er viel davon bei Fermi abgeschaut hatte, der sein Doktorvater gewesen war.



Abb. 2. Jack Steinberger (rechts) und René Turlay (links).

Abb. 2 zeigt ihn zusammen mit René Turlay, den ich erst im nächsten Experiment kennen lernte. René gehört allerdings in die Geschichte der CP Verletzung, da er, wie er mir erzählte, der erste Mensch war, der den experimentellen Beweis für die Verletzung der CP Symmetrie sah. Als visiting scientist im Experiment von Fitch und Cronin in Brookhaven sollte er nach CP-Verletzung suchen, an die keiner glaubte. Er brütete drei Monate lang über seinen Ergebnissen, bis er sich traute, sie der Kollaboration zu präsentieren.

Das Hauptziel des Experiments am CERN war es, alle für die CP-Verletzung relevanten Verteilungen bei den geladenen Zerfällen von K_S^0 und K_L^0 als Funktion der Eigenzeit zu messen, also den Zerfall in $\pi^+\pi^-$ und die semileptonischen Zerfälle. Da ich zu spät zum Experiment stieß, trug mir Jack die Aufgabe an, den Formfaktor im Zerfall $K_L^0 \rightarrow \pi^+ e^- \nu_e$ als Funktion von Q^2 zu messen. Das fand ich anfangs als keine spannende Aufgabe – schließlich ging's im Experiment um so tolle Fragen wie CP-

Verletzung und die 5. Kraft. Bald wurde mir aber dann doch klar, warum es sich lohnte. Erstens waren die K_{l3} Formfaktoren für Theoretiker zu der Zeit eine sehr wichtige Frage, da sie eine der wenigen experimentell zugänglichen Messgrößen waren, für welche die current algebra dezidierte Voraussagen machte und die bis dahin verfügbaren experimentellen Messungen in krassem Widerspruch zu diesen Vorhersagen standen. Zum anderen war die Messung dieses Formfaktors wohl die schwierigste Analyse im Experiment, da es Statistik im Überfluss gab und das Problem allein in der technischen Bewältigung der Datenmenge und noch wichtiger im Kampf gegen auch kleine systematische Fehler lag. Der Zugriff auf den CERN Großrechner (CDC6000) war so schlecht, dass ich ein eigenes Analyse- und Plotsystem entwickelte um die Analyse in einem vernünftigen Zeitraum durchführen zu können. Viele Jahre später lernte ich bei DESY, dass ich eine frühe Variante von n -tupeln erfunden hatte. Schließlich konnte ich überzeugende Messergebnisse präsentieren, die nicht nur in kompletter Übereinstimmung mit den Vorhersagen der current algebra standen sondern auch klar aufzeigten, wo die Probleme der alten Messdaten lagen. Nebenbei konnte ich einige Fehler im Experiment aufdecken und beheben, was auch den anderen Analysen zu Gute kam. Die K_{l3} Formfaktoren waren dann auch Thema meiner Habilitationsschrift in Heidelberg (1973).

Zu Beginn meiner Arbeit im Experiment war Jack nicht sehr begeistert, dass weitere Postdocs aus Heidelberg neben Konrad Kleinknecht mitmachen sollten. Im Laufe der Zeit lernte Jack aber meine Analysefähigkeiten schätzen, und entwickelte so etwas wie 'väterliches Wohlwollen' mir gegenüber. Hilfreich war dabei sicher auch, dass wir zusammen viele Skitouren und auch Wanderungen im Jura gemacht haben. Im Experiment habe ich mich neben Jack insbesondere mit Peter Steffen, Günther Zech, Friedrich Dydak und Vera Lüth sehr gut verstanden und wir haben in unseren Analysen voneinander profitiert und auch viel gemeinsam unternommen.

Die Ergebnisse des Experiment zusammen mit den experimentellen Ergebnissen zu den neutralen 2π Zerfällen waren sehr genau

und blieben 12 Jahre lang das Maß aller Dinge. Allerdings konnten die Ergebnisse als perfekte Bestätigung von Wolfenstein's "super-weak model" interpretiert werden, in dem die CP-Verletzung das Resultat einer 5. Kraft ist, die sich sonst nirgends bemerkbar machte – ein sehr unbefriedigender Zustand.

CDHS Neutrinoexperiment (1976–1984)

Ab Herbst 1972 hatte ich Zeit für neue Aufgaben und die lagen in der Vorbereitung eines Experiments für den neuen CERN Beschleuniger SPS, der 1976 in Betrieb gehen sollte. Jack wollte ein Neutrinoexperiment aufbauen und suchte dafür Mitstreiter – dafür war ich Feuer und Flamme.

Dortmund

Dann kam was dazwischen: ich bekam im Sommer eine Einladung zu einem Vortrag in Dortmund, wohin Konrad Kleinknecht ein Jahr zuvor als C4 Professor berufen worden war. Zu meinem Erstaunen entpuppte sich das Nachkolloquium als Interview mit einer Berufungskommission für eine C3 Professorenstelle und ich musste überlegen, ob ich nach Dortmund wollte. Die Entscheidung dafür war letzten Endes eine Entscheidung gegen CERN – ich konnte mir nicht vorstellen, auf Dauer am CERN zu arbeiten. So sagte ich in Dortmund zu unter der Bedingung, dass die Gruppe sich am Neutrinoexperiment beteiligte. Jack sagte später einmal: 'This experiment has put Dortmund on the map of high energy physics'.

In Dortmund fühlte ich mich sehr wohl. Die Physik in Dortmund war ein bemerkenswerter Fachbereich. Ich bekam als C3 Professor die Hälfte der Ausstattung eines C4 Professors. Zudem hatte Dortmund das System der integrierten Kursvorlesungen von Experiment und Theorie, das mich sehr überzeugte. Insofern gab es in Dortmund sehr wenig 'Muff' sondern die Fakultät war geprägt von Aufbruchsstimmung. Die Ausbildungsverpflichtungen hielten sich in Grenzen. Zudem erweckte ich in der Fakultät den Eindruck, dass ich für praktische Aufgaben für Fakultät oder Institut eher nicht geeignet war und diesen Eindruck

wollte ich auch gar nicht zerstreuen – allen jungen Kollegen zur Nachahmung empfohlen. So konnte ich relativ viel Zeit in das Neutrinoexperiment investieren.

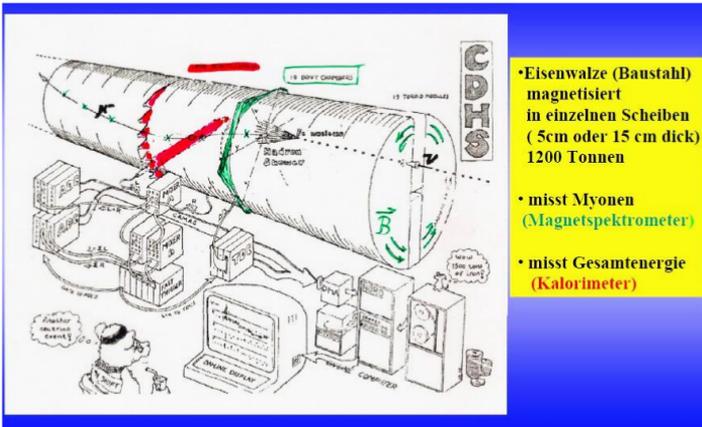
Neutrinoexperiment

Der neue CERN Beschleuniger, das SPS mit 400 GeV, hatte sich in der Konkurrenz mit Fermilab leider um drei Jahre verzögert, weil sich die Mitgliedsländer darum gestritten hatten, wo er gebaut werden sollte. So waren bereits Neutrinoexperimente bei Fermilab in Betrieb als wir noch nicht mal die Genehmigung zum Bau hatten.

Jack gelang es für unseren Experimentvorschlag mit der Saclay-Gruppe und deren Boss René Turlay (Abb. 2) die Kerntruppe aus dem K^0 -Experiment entscheidend zu verstärken. René Turlay wurde für mich ein sehr guter Freund. Er war nicht nur ein sehr guter Physiker sondern auch jemand, der junge Leute gezielt förderte und sich nie selbst ins Rampenlicht stellte. Neben Jack und René war Friedrich Dydak für mich der wichtigste Partner in der Kollaboration. Wir teilten uns ein Zimmer am CERN und waren anfangs gemeinsam für die Analyse neutraler Ströme hauptverantwortlich. Er war nicht nur ein sehr guter Analysephysiker sondern auch ein Experte in Elektronik, was nun gar nicht meine Stärke war. Im Laufe des Experiments haben wir gemeinsam einige größere Aktionen geplant und durchgeführt wie z.B. die Hadronkalibration des Neutrinodetektors und ein beam dump Experiment.

Ende 1972 kam es zum Showdown im zuständigen Komitee mit zwei konkurrierenden Experimentiervorschlägen und am Ende wurde keiner der Vorschläge genehmigt. Allerdings wurde unser Myonspektrometer für gut befunden und wir wurden ermutigt einen verbesserten Vorschlag einzureichen. Dabei war eine Forderung insbesondere der Theoretiker um John Ellis zu 'beweisen', dass wir diagonale schwache Leptonströme messen können – das war damals ein Hauptinteresse vieler Theoretiker. Dieser ‚Beweis‘ kostete mich einen Monat Simulations- und Analysearbeit.

Diagonale schwache Prozesse waren auch ein wichtiges Ziel des Hauptneutrinoexperiment am Fermilab HPW von Rubbia et al. gewesen. Experimentell zugänglich ist der Prozess $\nu_\mu + e^- \rightarrow \mu^- \mu^+ \mu^-$ im Kernfeld (trident production), dessen Wirkungsquerschnitt quadratisch von Z abhängt. Also sollten Bleiplatten als Targetmasse dienen in Tanks mit flüssigem Szintillator. Als der Betriebsbeginn des Beschleunigers bei Fermilab Ende 72 bevorstand, stellte es sich heraus, dass das Szintillationlicht von den beschichteten Bleiplatten absorbiert wurde. Also mussten die Bleiplatten raus und was blieb waren große Tanks voller Flüssigszintillator, die nur eine Targetmasse von 40 to darstellten. Damit konnte das Experiment die Hadronenergie und damit auch die Neutrinoenergie eines Ereignisses nicht messen. Das 2. Fermilabexperiment von Barish und Sculli war ein kleineres Explorationsexperiment. Dessen Hauptziel es war, das W-Boson bis zu einer Masse von 40 GeV zu finden und nach geladenen schweren Leptonen zu suchen.



- Eisenwalze (Baustahl) magnetisiert in einzelnen Scheiben (5cm oder 15 cm dick) 1200 Tonnen
- misst Myonen (Magnetspektrometer)
- misst Gesamtenergie (Kalorimeter)

Abb. 3. Prinzip des CDHS Neutrinodektors. (Zeichnung J. Rander). Die Hadronenergie wird mit Hilfe der Szintillatorebenen zwischen den Eisenscheiben gemessen. Der Myonimpuls durch Messung seiner Helixbahn in den Eisentoroiden mit Driftkammern.

Das Detektorkonzept von Jack, Abb. 3, war genial und allein danach konzipiert, die experimentellen Möglichkeiten, die der Neutrinostrahl am CERN bot, möglichst ergebnisoffen zu maximieren und zudem eine sehr hohe Targetmasse zu generieren (1200 to).

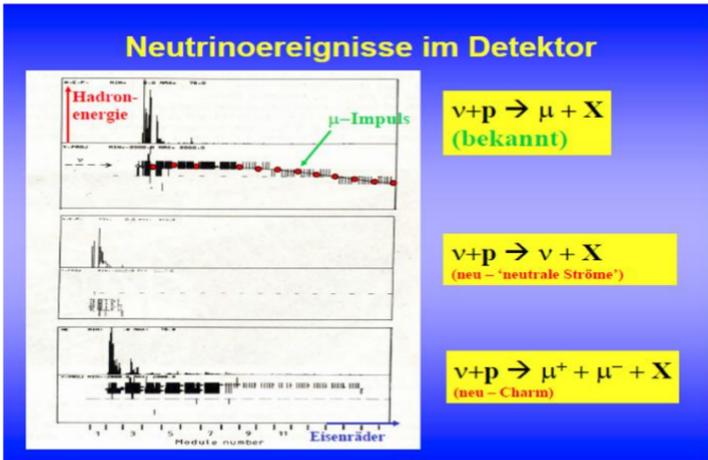


Abb. 4. Ereignisrekonstruktion im CDHS Detektor für 3 verschiedene Reaktionstypen. Im oberen Teil ist jeweils die Pulshöhe in den Szintillatorebenen der Eisenmodule gezeigt, die ein Maß für die Hadronenergie ist. Darunter sind als Funktion des Orts entlang der Strahlachse die Spurkoordinaten in den Driftkammern, die rekonstruierte Myonspur, sowie alle Szintillatoren gezeigt, welche ein Signal lieferten.

Unser Experiment wäre perfekt gewesen, um die neutralen Ströme und Charm innerhalb eines Monats zu entdecken. Leider war es dazu zu spät. Trotzdem wartete jeder gespannt auf unsere Messergebnisse, Abb. 4, weil andere Experimente ein heilloses Durcheinander angerichtet hatten mit zweifelhaften Ergebnissen, die eine Unmenge theoretischer Papiere generiert hatten und vor allem die Theoretiker vom heutigen Standardmodell weg- statt zu

ihm hingeführt hatten. Parallel zu CDHS wurden im gleichen Neutrinostrahl auch Daten in der Big European Bubble Chamber BEBC und in Gargamelle genommen, deren Stärke die Rekonstruktion von hadronischen Endzuständen und der direkte Nachweis von hochenergetischen Elektronen war. Drei Jahre später kam dann noch CHARM dazu.

1945	Quantenelektrodynamik	
1956	Paritätsverletzung	
1961	eightfold way	
1963	CP Verletzung	
1964	Quarks Gell-Mann, Zweig	
1965	Dalitz: nicht relativistisches Quark Modell	
1967	Cabibbo Theorie der schwachen WW	
1967	Weinberg-Salam Eichtheorie	
1969	Partonen in tiefinelastischer Streuung	SLAC
1970	GIM Mechanismus	
1971	t'Hooft: renormierbare schwache Wechselwirkung	
1973	Neutrale Ströme	CERN
1973	Quantenchromodynamik Gell-Mann, Gritsch, Leutwyler	
1973	Wilczek, Gross, Politzer	asymptotische Freiheit
1973	Parton Modell Tests	
1974	Novemberrevolution: Charm und Tau	SLAC, Brookhaven
1975-1978	elektroschwache Theorie: Experimentelle Verifizierung	
1976	QCD Tests in tiefinelastischer Streuung	und GIM- Mechanismus
1982	Paris Konferenz: QCD weitgehend akzeptiert	, Gluonen bei Petra
1983	W und Z Bosonen, Jets	CERN
1989	SLC, LEP: es gibt nur 3 Generationen	
1995	Top Entdeckung	Fermilab
2004	Neutrino Oszillationen	

Abb. 5. Zeittafel wichtiger theoretischer Fortschritte und experimenteller Entdeckungen in der Hochenergiephysik.

Die Etablierung des Standardmodells

Ich selbst, und ich glaube die meisten meiner Kollegen, wurden von der elektroschwachen Theorie, der Entdeckung der neutralen Ströme, von Charm und später der QCD vollkommen überrascht.

Wir haben sie sozusagen parallel zur Datenanalyse gelernt, als wir sie brauchten. Dabei war die elektroschwache Theorie bereits 1971 und die QCD 1973 komplett entwickelt, wie die Zeittafel (Abb. 5) zeigt. Eichtheorien wurden von den meisten Theoretikern erst ernst genommen, als t'Hooft und Veltmann die Renormierbarkeit von Yang-Mills Theorien bewiesen und von den Experimentalphysikern noch später nach der Entdeckung der neutralen Ströme am CERN durch das Blasenkammerexperiment Gargamelle am PS.

Im Falle der elektroschwachen Theorie war die Wahl der Eichgruppe völlig offen. Die Wahl von Weinberg und Salam $SU(2)_L \times U(1)$ war nur die einfachste und langweiligste Realisierung. So waren z.B. Links- Rechts-symmetrische Modelle bei Theoretikern sehr beliebt, die rechtshändige Quarks und Leptonen vorhersagen, andere Eichgruppen brauchten zusätzliche schwere Leptonen und es gab auch renormierbare Eichtheorien ohne neutrale Ströme, die dafür schwere Leptonen vorhersagten. Welche Eichgruppe die Natur gewählt hatte, konnte nur das Experiment bestimmen. Es gab also viel Raum für neue Physik. Von der QCD bekam ich bis 1975 überhaupt nichts mit.

In einem historischen Rückblick von 1984 schreibt Bjorken: Es gab das Standardmodell in seiner ganzen Schönheit aber es gab halt auch viele andere theoretische Ansätze und falsche experimentelle Resultate – noise – wie er schreibt. Deshalb dauerte es so lange, die richtige Theorie zu finden. So hatten z.B. frühe Neutrinoexperimente am CERN die Existenz neutraler Ströme praktisch bereits ausgeschlossen. Das Interesse an diagonalen leptonen Wechselwirkungen speiste sich z.T. aus einer Veröffentlichung von Reines und Gurr, die für den Prozess $\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$ einen Wirkungsquerschnitt angaben, der 100 Mal größer war, als ihn das Standardmodell vorhersagt – und natürlich gab es auch dazu theoretische Modelle.

Die Hochenergiekonferenz in London 1974 gilt als Wendepunkt und gleichzeitig Höhepunkt der Konfusion. Leider war ich nicht dort aber in den Proceedings fand ich den Rapporteurstalk von John Illiopolis zu Eichtheorien, in dem er erstmalig die gesamte

Theorie des Standardmodells und die Grundideen der Grand Unified Theories mit einer unglaublichen Überzeugungskraft ausbreitete. Bjorken schrieb dazu in einem historischen Rückblick: "Ich fand den Vortrag sehr faszinierend und gleichzeitig vollkommen verrückt". Am Ende seines Vortrags bot Illiopoulos übrigens eine Wette darauf, dass Charm innerhalb von zwei Jahren im Massenbereich um 2 GeV gefunden werde. Er war dabei beflügelt durch eine gewonnene Wette mit Jack Steinberger zur Existenz neutraler Ströme, der "sich nicht vorstellen konnte, dass es einem so mittelmäßigen Experiment wie Gargamelle erlaubt sein sollte, eine so wichtige Entdeckung zu machen" – wie er mir auf einer Wanderung im Jura erklärte. Ich lernte Jean Illiopoulos, einen engen Freund von René Turlay, später persönlich kennen, und kann mir seine 'magische' Wirkung auf die Zuhörer lebhaft vorstellen. Dann kam der November 1974 und die Entdeckung des J/ψ bei Brookhaven und am SLAC. Das schlug ein wie eine Bombe und etablierte sowohl das Quark-Partonmodell als auch den GIM Mechanismus als zu testende Ideen. Ich hatte das Glück an der Lepton-Photon Konferenz am SLAC 1975 teilzunehmen. Es war die aufregendste Konferenz, die ich jemals erlebte. Dort wurde die Entdeckung des Tau-Leptons durch Pearl et al. bekannt gegeben, was im Rahmen der elektroschwachen Eichtheorie automatisch die Existenz eines zusätzlichen Neutrinos und von zwei neuen Quarks erforderte. Zum ersten Mal hörte ich den Begriff Teilchenfamilien und es wurden die ersten Jetanalysen vorgestellt, die zeigten, dass die Hadronen bei der e^+e^- Vernichtung tatsächlich eher 'gebündelt' waren.

Experimentelle Ergebnisse der Neutrinoexperimente bis 1977

Das wichtigste Experiment war das Blasenkammerexperiment Gargamelle am CERN PS (10 GeV) mit seiner Entdeckung der neutralen Ströme. Es lieferte aber auch erste erfolgreiche Tests des Quark-Partonmodells. Die Neutrinoexperimente am 300 GeV SPS am Fermilab spielten dagegen eine eher bescheidene Rolle. Das HPW Experiment am Fermilab zeichnete sich dadurch aus, dass es

besonders viel 'noise' als Folge des verunglückten Experimentaufbaus lieferte. Besonders viel Aufregung erzeugte eine Publikation, die als high- γ anomaly bekannt wurde welche auf die Existenz rechtshändiger Quarks hinzuweisen schien. Auf vielen Tagungen und Konferenzen Beobachtung von Neutrinoereignissen mit 2 und 3 Myonen berichtet. Die ersten waren wahrscheinlich Charmerzeugung, was sich aber nicht beweisen ließ. Ich erinnere mich an 6 Ereignisse mit 3 Myonen, die in Preprints und Konferenzberichten als mögliche Evidenz gleich zweier neuer schwerer Leptonen verkauft wurden. Das alles verursachte eine Flut theoretischer Papiere. Jack war über diese Aufführung extrem erbost und sagte mir mal auf einer Wanderung: "You know, these guys take a rifle, shooting in the air, hoping a pigeon will fall down." Er hatte vollkommen Recht, es herrschte Goldgräberstimmung, es gab so vieles zu entdecken.



Abb. 6. Titelblatt der ersten CDHS Publikation

Der Spuk war ziemlich schlagartig zu Ende, als wir unserer ersten Ergebnisse 1977 präsentierten.

Das erste und umstrittenste Papier unserer Kollaboration zeigte zweifellos, dass es keine rechtshändigen Quarks gab – die high- γ anomaly war nicht existent. Abb. 6 zeigt das Titelblatt mit der Autorenliste und der Zusammenfassung. Interessant ist die, im Verhältnis zu heutigen Experimenten, kleine Zahl von Autoren, die nie höher als 35 war. Die Aussage des Papiers, es gibt keine high- γ Anomalie, hatte Bestand. In der Publikation waren aber auch γ -Verteilungen veröffentlicht, die grob falsch waren, weil die angenommene Hadronkalibrationskurve falsch war. Zudem heizte das Papier unnötigerweise einen längeren Streit zwischen den Vertretern der 'etablierten' Neutrinoexperimente und Jack Steinberger an, der dabei gerne die gesamte Kollaboration hinter sich gesehen hätte.

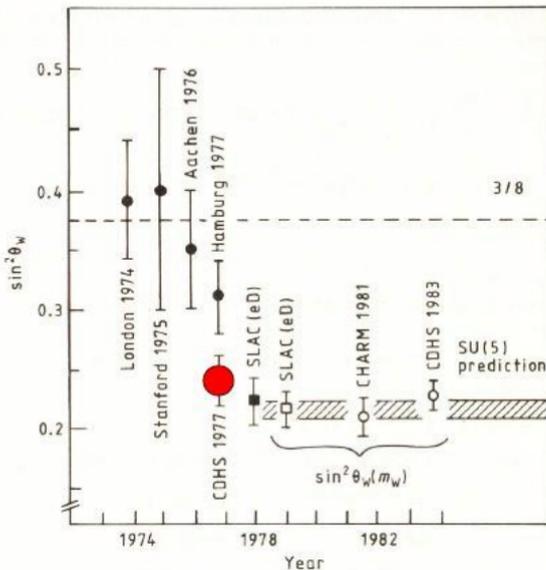


Abb. 7. Messungen des Weinbergwinkels als Funktion der Zeit.

Ein weiteres wichtiges Ergebnis war die erste präzise Messung des Weinbergwinkels $\sin^2\theta_W = 0.23 \pm 0.03$, Abb. 7. Dieser Wert (ohne radiative Korrekturen) war kompatibel mit den Vorhersagen von grand unified theories.

Auf der Hochenergiekonferenz in Hamburg, die ich 1977 besuchte, beklagte sich prompt ein Theoretiker in der Diskussion bitterlich darüber, dass er alle Papiere zu grand unified theories in den Papierkorb geworfen hätte, weil die Experimente 3/8 gemessen hätten, und plötzlich sei $\sin^2\theta_W$ doch 0.2 !

Schließlich erlaubten es die registrierten Ereignisse mit 2 Myonen unterschiedlichen Vorzeichens, die aus Charm-erzeugung stammten, den GIM-Mechanismus im Detail zu testen und zu verifizieren. Gezeigt wurde auch, dass es keine Charm ändernden neutralen Ströme gab.

Im Herbst 77 schlug ich vor, unsere Kalorimeter in situ zu kalibrieren, indem wir Pionstrahlen variabler Energie direkt ins Experiment schickten um das Problem der γ -Verteilungen in den Griff zu bekommen. Das Ergebnis der Kalibration ergab eine stark nichtlineare Kalibrationsfunktion mit der die Probleme der γ -Messung verschwunden waren und die detaillierte Analyse der Daten beginnen konnte.

Nach der Kalibrationsarbeit wollte ich eigentlich an der Analyse der Multimyonereignisse arbeiten – darin sah ich die Chance neue Physik zu finden – wir sahen inzwischen auch Ereignisse mit 3 und 4 Myonen. Dann aber überredete mich Jack, in die Analyse der geladenen Ströme einzusteigen. So arbeitete ich bis Ende 1982 an der Messung von Strukturfunktionen, Skalenverletzungen und letztendlich Tests der QCD. Das war die schwierigste und frustrierendste Analyseaufgabe, die das Experiment zu bieten hatte, da es wieder mal um die Beherrschung und Behebung systematischer Fehler ging.

Die ersten Analysen waren noch einfach. Es ging um den Test des Quark Parton Modells. Danach kam das echte Problem, die Messung der Strukturfunktionen und deren Skalenverletzungen. Dies erwies sich als sehr mühsam, nicht nur, weil die Analyse

schwierig war, sondern auch, weil fünf unabhängige Analysen zum Teil sehr unterschiedliche Ergebnisse lieferten. Damit die Ergebnisse von der Kollaboration akzeptiert wurden, musste daher auch noch geklärt werden, was in welcher Analyse schief gelaufen war. Die schließlich veröffentlichten Daten zeigten starke Skalenverletzungen mit hoher Signifikanz, die ich 1978 auf einer Neutrino-Konferenz in Oxford erstmals vorstellen konnte. Bis dahin hatte bei hohen Werten von Q^2 nur ein Fermilab Myonstreuexperiment Skalenverletzungen gemessen.

Ende 1978 war die elektroschwache Theorie von Weinberg-Salam allgemein akzeptiert. Einen entscheidenden Anteil hatte daran das SLAC e-D Streuexperiment mit polarisierten Elektronen, welches zeigte, dass links- und rechtshändige Elektronen unterschiedliche Wirkungsquerschnitte haben und das damit den Nachweis erbrachte, dass der elektromagnetische und der schwache Strom interferieren. Zudem maß das Experiment auch einen genauen, kompatiblen Wert des Weinbergwinkels (Abb. 7). Wie Sakurai 1978 schrieb: "nature has chosen the most simple and least attractive gauge model of weak interaction – what a pity". So fehlten nur noch das W und Z Boson, deren Eigenschaften allerdings genau vorhergesagt waren. Und dann musste natürlich noch das Higgs Boson gefunden werden, was erheblich schwieriger war, da seine Masse unbekannt war.

Nach der Oxfordkonferenz begann ich mich mit den Vorhersagen und Tests der QCD zu beschäftigen und schon bald konnten wir erste erfolgreiche QCD Analysen und eine erste Messung der starken Kopplungskonstanten präsentieren. Erstaunlicherweise waren die QCD Vorhersagen zu den Skalenverletzungen die ersten quantitativen experimentellen Tests der QCD, die durchgeführt werden konnten. Das war damals wichtige Pionierarbeit. Die Etablierung der QCD als Teil des 'Standardmodells' dauerte noch einige Jahre, insbesondere weil lange Zeit nur Vorhersagen erster Ordnung Störungstheorie möglich waren, so dass direkte Vergleiche verschiedener harter Streuprozesse nur sehr eingeschränkt möglich waren. Die ersten Messungen der Struktur-

funktionen mit hoher Statistik konnten wir 1980 abschließen und die QCD Analyse der Skalenverletzungen erlaubte es zum ersten Mal die Strukturfunktion des Gluons und den Wert von $\alpha_s(Q^2)$ gleichzeitig mit den Quark- und Antiquarkverteilungen zu messen (Publikation 1981). Inzwischen lieferten auch die beiden Myonstreuexperimente EMC und BCDMS am CERN Messungen der Strukturfunktion F_2 mit hoher Statistik und ausgeprägten Skalenverletzungen in Übereinstimmung mit den QCD Vorhersagen. Die Übereinstimmung zwischen den Experimenten innerhalb der angegebenen Fehler war allerdings nicht ganz zufriedenstellend. Ein weiterer wichtiger Schritt zur Etablierung der QCD war die direkte Beobachtung von Gluonjets in 3 Jet Ereignissen am e^+e^- Speicherring PETRA (DESY) 1979 und der damit mögliche Nachweis, dass das Gluon Spin 1 hat.

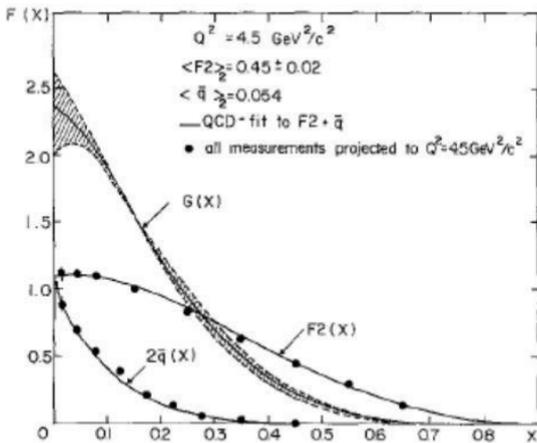


Abb. 8. Partonverteilungen aus der QCD Anpassung

Das Jahr 1982 kann wohl als das Jahr bezeichnet werden, in dem sich die QCD als von (fast) allen akzeptierte Theorie der starken Wechselwirkung durchsetzte. Dies war weniger das Resultat

einzelner Analysen als die Erkenntnis, dass es keine Alternative gab, die eine immer größer werdende Flut experimenteller Daten von harten Streuprozessen mit Hadronen kohärent erklären konnte. Die große Hochenergiekonferenz in Paris im Sommer 1982 trug wesentlich zu diesem Durchbruch bei. Auf dieser Konferenz konnte ich als Rapporteur sämtliche Ergebnisse zu Strukturfunktionen, deren QCD Analysen und Vergleiche mit anderen harten Streuprozessen wie z.B. dem Drell-Yan Prozess und der Zweijetproduktion zusammenfassen und Günther Wolf vom DESY berichtete über die e^+e^- -Ergebnisse – zusammengekommen eine beeindruckende Bestätigung der QCD.

Die präsentierten Messungen der Strukturfunktionen von CDHS und der Myonexperimente lieferten für lange Zeit die Partonverteilungen, welche zur Analyse der Daten an den $p\bar{p}$ -collidern am CERN und am Fermilab gebraucht wurden. Deren Extraktion in höherer Ordnung wurde in den folgenden Jahren von zwei Gruppen von Theoretikern durchgeführt und ihre Anwendung auf harte Streuprozesse in Hadronkollisionen zeigte, dass die Parton-verteilungen in der Tat universell waren.

Der Schwerpunkt der QCD Analysen verlagerte sich nach 1982 zu den e^+e^- Experimenten und an die Hadron Collider. Daher stellte ich 1982 meine Arbeiten zu Strukturfunktionen ein und ich war mir damals sicher, dass ich trotz erfolgreicher Arbeit nie wieder in meinem Leben Strukturfunktionen messen und analysieren wollte.

Es gab aber ja immer noch die von uns beobachteten Multi-myonereignisse. Es gab also durchaus die Möglichkeit, dass noch neue Physik außerhalb des Standardmodells existierte und in unserer Reichweite war. Bereits 1978 brachte mich dies auf die Idee, ein Beam Dump Experiment vorzuschlagen, in dem normale Neutrinos kaum erzeugt werden konnten weil die im Target erzeugten Pionen und Kaonen schnellstmöglich gestoppt wurden und daher nicht bei hohem Impuls zerfallen konnten. Falls aber neue kurzlebige Teilchen existierten, würden sie vielleicht Neutrinos oder neue Arten durchdringender Teilchen erzeugen.

Dieser Vorschlag fand bei allen Experimenten großen Anklang und wurde sehr schnell realisiert. Leider fanden wir keine neue Physik, aber alle Neutrinoexperimente am CERN sahen ein promptes Signal, das durch Elektronneutrinos erzeugt wurde. Das Signal erwies sich als hadronische Charmerzeugung mit nachfolgendem semileptonischen Zerfall. Zu meiner großen Verwunderung war der Preprint zu diesem 'Abfallprodukt' der Neutrino-Physik mit Abstand der am meisten zitierte und nachgefragte von CDHS – die meisten Physiker befassen sich halt am liebsten mit der Physik, die sie am besten kennen. Letztendlich konnten die Multimyonenereignisse Jahre später im Rahmen des Standardmodells zufriedenstellend erklärt werden.

Das CDHS Neutrinoexperiment wurde 1984 abgeschaltet, nach dem es noch nach Neutrinooszillationen gesucht hatte. Tatsächlich haben wir am Ende der Laufzeit auch noch, wie versprochen, die diagonale leptonische Wechselwirkung (trident production) gemessen, die für die Genehmigung des Experiments so wichtig war – es hat niemanden mehr interessiert. Jack Steinberger meinte auf der Feier zur Stilllegung des Detektors: 'this experiment started with a bang and ended in a sizzle'. Insgesamt war es aber ein sehr erfolgreiches Experiment, das wichtige Beiträge zur Etablierung des Standardmodells machte. Sein Effekt beruhte anfangs hauptsächlich darin, dass es falsche Resultate korrigierte und die Theorie wieder auf den Weg zum Standardmodell lotste. Es leistete aber auch Pionierarbeit bei der Etablierung der QCD als Theorie der starken Wechselwirkung.

Neue Experimente

Ab Ende 1982 war ich an der Planung eines Experiments für LEP beteiligt – des späteren ALEPH-Experiments. Da LEP aber noch so lange hin war wollten wir uns die Zeit bis dahin mit einem 'kleinen' K^0 -Experiment vertreiben, das zeigen sollte, ob die CP-Verletzung eine Eigenschaft des Standardmodells ist. Dazu war der Nachweis der 'direkten' CP-Verletzung erforderlich - eine sehr diffizile und anspruchsvolle Messung. Zwei Jahre nach Beginn der Datennahme

musste ich mich aber Mitte 1986 aus dem Experiment zurückziehen, als ich zum Sprecher des HERA-Experiments H1 gewählt wurde. Das kleine Zwischenexperiment war letztendlich länger in Betrieb als LEP. Es zeigte tatsächlich, zusammen mit einem ähnlichen Experiment am Fermilab, dass es direkte CP-Verletzung gibt. Damit war das Ende des superweak model besiegelt. Für mich waren diese Projekte eine gute Schulung darin, wie die Planung eines neuen Experiments angepackt werden muss.

Suche nach neuer Physik

Anfang der 80er Jahre schien der Himmel wieder goldene Zeiten zu versprechen: Grand Unifies Theories und die Suche nach dem Protonzerfall, Supersymmetrie mit all ihrer Wunderwelt an neuen Teilchen, magnetische Monopole, Neutrinooszillationen. Und dann fehlten ja auch noch die W- und Z-Bosonen, das Top und das Higgs. Es folgte wieder eine recht wilde Zeit mit vielen zweifelhaften und falschen Resultaten. 'Gefunden' wurden unter anderem das Top Quark, das Higgsteilchen, supersymmetrische Teilchen etc. Bis 1995, dem Jahr in dem das Top Quark am Fermilab entdeckt wurde, überlebten davon nur das W- und das Z-Boson die am Proton-Antiprotonkollider des CERN 1983 entdeckt wurden, mit genau den vorhergesagten Eigenschaften. Im Jahr 1998 folgte dann die Entdeckung der Neutrinooszillationen.

DESY und H1 (1984–1992)

Obwohl mir die Fakultät in Dortmund sehr gut gefiel hatte ich so ab 1983 das Gefühl, dass mir eine neue Herausforderung gut täte und es gab auch persönliche Gründe für einen Ortwechsel. Also habe ich mich bei DESY beworben und nahm das Angebot einer Stelle als leitender Wissenschaftler Anfang 1984 an, unter dem Vorbehalt, dass HERA genehmigt würde. DESY war für mich komplettes Neuland, bis auf meinen besten Freund Peter Steffen, der dort arbeitete. DESY war in vielfacher Weise anders als CERN. Wo am CERN zwei bestbezahlte Leute für eine Aufgabe bereitstanden, gab's bei DESY bestenfalls einen eher schlecht bezahlten. Dennoch funktionierte alles erstaunlich gut. Sehr positiv war die

Politik der offenen Tür – die führenden Leute waren immer kurzfristig ansprechbar wenn sie am DESY waren.

Mein erster Arbeitstag bei DESY war zufällig der Tag der Grundsteinlegung für HERA mit Forschungsminister Riesenhuber. Der e-p Speicherring HERA sollte die lange Tradition der Lepton-Nukleon Streuexperimente fortsetzen, die auch am Anfang von DESY stand. Allerdings hätten die meisten Physiker bei DESY lieber den nächsten e^+e^- Beschleuniger gebaut, der aber zum CERN ging, so dass sie zumindest anfangs HERA eher als Trostpflaster empfanden.

Die Grundsteinlegung war auch der Startschuss für die Bildung von Kollaborationen zur Planung und zum Bau eines Detektors für HERA. Als ich ankam gab es drei Proto-Kollaborationen, die sich um drei ältere Herren gruppierten, die zuvor bei verschiedenen PETRA Experimenten mitwirkten. Gus Weber leitete eine Gruppierung, die mir am besten gefiel. Den Kern bildete die JADE-Gruppe bei DESY ergänzt um Gruppen, die davor tiefinelastische Myon- oder Neutrinostreuung am SPS gemacht hatten.

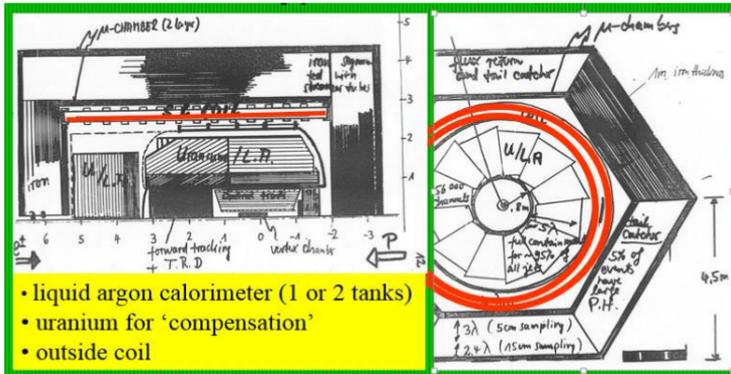


Abb. 9. Skizze des Experimentivorschlags unserer Protokollaboration (Vortragsfolien). Er enthält bereits alle wesentlichen Ideen des späteren H1 Detektors.

Im Herbst 84 stellten die Gruppen ihre Experimentideen auf einem Treffen in Genua vor. Unser Experimentivorschlag – zu dem ich viel beitragen konnte, da ich sowohl Erfahrung in tief-inelastischer Streuung als auch im Kalorimeterbau hatte, basierte auf einem Flüssigargon Kalorimeter mit Uran als Absorbermaterial, das sich innerhalb einer großen Spule befand, Abb. 9. Bemerkenswert ist, dass alle Gruppen 'kompensierende' Kalorimeter mit Uran bauen wollten. Die grundlegende Physik der Kompensation war aber noch nicht verstanden. So stellte es sich z.B. erst später heraus, dass ein Urankalorimeter mit flüssigem Argon als AuslesemEDIUM gar nicht kompensierend sein kann.

Unmittelbar nach dem Genua Meeting bildeten sich die beiden Kollaborationen, die letztendlich die HERA Detektoren bauen sollten. Basierend auf den Erfahrungen der Gruppen bei PETRA fanden sich alle Gruppen, die bei Jade, Pluto und CELLO gearbeitet hatten, mit den bis dahin gefundenen Kollaborateuren in der H1 Kollaboration zusammen unter dem Motto 'alle gegen Tasso' – die Gruppierung, die zweifellos die 'Hausmacht' bei DESY hatte. Ein gemeinsamer Gegner ist eine gute Basis für eine Kollaboration von Gruppen, die ansonsten sehr unterschiedliche Kollaborationsstile gepflegt hatten und lange Konkurrenten waren. In der Folge wurde gemeinsam ein Letter of Intent (LOI) auf der Basis eines Flüssigargonkalorimeters innerhalb einer großen supraleitenden Spule ausgearbeitet. Nach langen Diskussionen gaben wir die Idee eines kompensierenden Kalorimeters auf und schlugen Blei/Kupfer als Absorbermaterial vor, im Rückblick eine sehr glückliche Wahl. Das zweite HERA Experiment ZEUS realisierte dagegen ein kompensierendes Uran/Szintillator Kalorimeter.

Auf dem Weg zum technischen Proposal wurde dann schnell klar, dass unsere Kollaboration zwar ein gutes Detektorkonzept hatte, aber zu wenig Kollaborateure und zu wenig Geld, um ihn zu bauen. Um doch genehmigt zu werden wurde der Detektor als Erstes 'optimiert' d.h. wir vereinfachten den Detektor und verschoben den Bau einzelner Komponenten, die nicht sofort gebraucht wurden, auf später. Danach musste ein Sprecher und ein

technischer Koordinator gewählt werden um der neuen Kollaboration eine effektive Leitung zu geben. Ich hatte nie vorgehabt Sprecher zu werden und es fehlte mir auch jegliche Erfahrung für diesen Job. Die Alternative wäre für mich allerdings gewesen, von DESY wieder weg zu gehen. Also wurde ich zum Sprecher gewählt und leitete 6 Jahre lang als ‚Wissenschaftsmanager‘ ohne Weisungsbefugnisse eine Kollaboration von ca. 450 Physikern aus 11 Ländern. Zur Überraschung aller, die mich von früher kannten, lief das erstaunlich gut.

Eine große internationale Kollaboration ist ein sehr merkwürdiges Gebilde. Eine Gruppe von Physikern mit wenig administrativer und organisatorischer Erfahrung versucht einen extrem anspruchsvollen und teuren Detektor (im Fall von H1 ca. 95 Millionen DM reine Investitionskosten) mit vielen Komponenten und sehr zerfaserten Verantwortlichkeiten zu bauen. Das funktioniert natürlich nur deshalb, weil alle ein gemeinsames Ziel haben: jedes Kollaborationsmitglied will einen funktionierenden Detektor mit dem er oder sie Physik machen kann. Es mag auf den ersten Blick so aussehen, als ob sich 450 Physiker und ca. 100 Ingenieure und Techniker, die ich fast alle kannte, im Weg stehen würden. Tatsächlich aber gab es immer mehr dringende und wichtige Aufgaben als geeignete Leute. So wurden viele wichtigen Aufgaben von jungen Doktoranden und Postdocs selbstständig übernommen. Ohne sie hätten wir den Detektor und die Software niemals fertig stellen können. Meine erste Aufgabe war, die richtigen Leute an die entscheidenden Positionen zu setzen. Mit einiger Mühe gelang es, Friedhelm Brasse als technischen Koordinator durchzusetzen. Er war der wichtigste Mann für den Detektorbau, eine große Stütze und ein exzellenter Physiker. Obwohl er bei vielen als ‚schwierig‘ galt, harmonisierten wir sehr gut. Viel Unterstützung kam auch von Rolf Felst, und von Joel Feltese, der Koordinator für den Bau des Kalorimeters wurde.

Auf der eher politischen Seite waren Erwin Gabathuler, Gus Weber und V. Soergel sehr hilfreich, wobei es Herrn Soergel

offensichtlich ein Anliegen war, bei HERA zwei etwa gleich starke Experiment-gruppen zu haben.

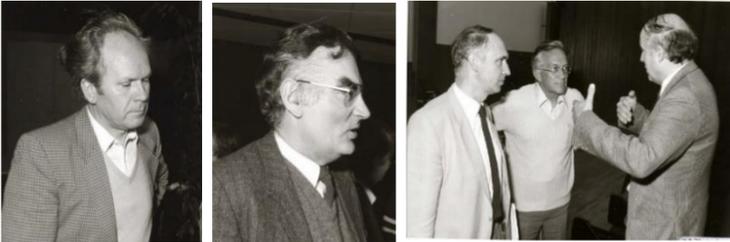


Abb. 10. Friedhelm Brasse (technischer Koordinator, links), Rolf Felst (Mitte), V. Soergel, G. Weber und E. Gabathuler (rechts).

Die Kollaboration brauchte dringend mehr Kollaborateure – damit war ich dann ca. ein Jahr beschäftigt. Es gelang, einige Gruppen aus dem Westen neu zu gewinnen. Die größten Ressourcen gab es aber in den Ostblockländern, wo Hochenergie-gruppen nach langer Zeit bei HERA wieder die Erlaubnis erhielten, als eigenständige Gruppen im Westen zu arbeiten. De facto haben uns die Gruppen des Lebedev Instituts und des ITEP aus Moskau und die Gruppen aus Prag, Kosice, Krakau und Zeuthen gerettet, die nicht nur wichtige Komponenten zum Detektorbau beisteuerten und damit eine glaubhafte Finanzierung ermöglichten, sondern insbesondere sehr engagierte junge Physiker und Techniker zum DESY brachten, um beim Detektoraufbau zu helfen. Zwischen 1986 und 1992 besuchte ich diese Gruppen mehrfach, so dass ich die Zeit kurz vor der Perestroika und dem Mauerfall und die Zeit danach hautnah mitbekam – aufregende und denkwürdige Erfahrungen, die ich nicht missen möchte.

Während der Bauzeit bestand meine Hauptaufgabe darin, den Gesamtdetektor und seine Gesamtperformance im Blick zu behalten und bei Konflikten zu moderieren. Detaillierter musste ich mich um Elektronik, Trigger, Datennahme und Software kümmern, die nicht in Friedhelm Brassess's Verantwortungsbereich

fielen. Insbesondere die Software und die Verarbeitung der großen Datenmengen waren ein Riesenproblem. Es galt, wie auch in anderen Kollaborationen, das Motto: wer nicht zum Detektorbau taugt, sollte wenigstens bei der Software helfen. Diese fehlende Wertschätzung von Physikern, die gute Software entwickeln und schreiben können, war ein großer Fehler. Zum Glück hatten wir mit Volker Blobel einen exzellenten Softwarephysiker dessen gute Ideen und Beiträge nur durchgesetzt werden mussten. Einige Zeit übernahm ich selbst die Koordinierung der Softwarearbeit.

Es gab mehrere Beinahekatastrophen, die das ganze Experiment hätten lahmlegen können. Aber schließlich ging alles bis auf kleinere Macken gut. Und pünktlich zum Start der Maschine Ende 1991 war der Detektor fertig und auch die Software.

Erste Ergebnisse des Experiments konnte ich auf der HEP Konferenz in Dallas 1992 berichten. Das war meine letzte Tat als Sprecher von H1, danach ging ich nach Heidelberg.

Die Zeit bei DESY war für mich sehr interessant und lohnend aber auch enorm anstrengend, zumal ich inzwischen auch eine Familie mit 3 Kindern hatte.

Heidelberg ab Herbst 1992

Die letzte und längste Zeit habe ich in Heidelberg verbracht. Eines Tages rief mich Klaus Tittel an und fragte mich ob ich mir vorstellen könnte nach Heidelberg zu kommen. Da Herr Wagner ganz unplanmäßig plötzlich zum DESY gegangen war und Herr Heintze emeritiert wurde, war die Hochenergiephysik des Instituts verwaist bis auf eine kleine Gruppe um Herrn Bock und von Krogh, die sich mit Opal-Physik befasste.

Ein merkwürdiger Zufall war, dass zur gleichen Zeit drei Physiker von DESY nach Heidelberg berufen wurden: Christoph Wetterich kannte ich als Mitglied der Friedensbewegung, die damals heftig gegen das Nachrüstungsprogramm mit Pershing Raketen protestierte, wusste aber nicht welche Physik er machte. Herrn Maier kannte ich gut von H1.

In Heidelberg fand ich ein sehr gut organisiertes Institut mit interessantem Forschungsspektrum vor, das allerdings in die Jahre gekommen war sowohl äußerlich als auch was die Ausstattung anging. Daher ging der Großteil der Erstausrüstung in die Infrastruktur der Werkstätten. Herr Dubbers machte es bald danach nochmals so, danach war dieses Problem vorerst gelöst. Das Institut war allerdings hervorragend organisiert mit sehr kompetenten Mitarbeitern und einem Direktor, der freie Hand für Entscheidungen hatte, solange er seine Kollegen nicht gegen sich aufbrachte. Das minimierte den administrativen Aufwand im Vergleich mit früheren Stationen in meiner Karriere erheblich. Ich fand zudem exzellente Mitarbeiter im Institut aus der Ära Heintze vor, mit herausragenden Fähigkeiten im Detektorbau.

Die Fakultät arbeitete gut zusammen und hatte exzellente Verbindungen zu den benachbarten Instituten. Im ersten Jahr in Heidelberg lernte ich mehr über allgemeine Physik als in 8 Jahren bei DESY wozu insbesondere auch das exzellente Kolloquium beitrug. Merkwürdig war es, dass mir fast jeder Kollege ungefragt und mit dem Brustton der Überzeugung erzählte, dass in Heidelberg alles bestens sei, insbesondere in der Ausbildung, und keinerlei Bedarf für Änderungen existiere.

Kurzfristig hatte ich zwei Ideen, für die ich Herrn Meier und Herrn Hofmann vom MPI als erste überzeugen konnte. Erstens ein Graduiertenkolleg zu experimentellen Methoden der Teilchenphysik zu beantragen und zweitens ein ASIC Labor aufzubauen um moderne Elektronik für die nächste Generation von Hochenergieexperimenten zu entwickeln. Beide Ideen wurden schnell realisiert. Herr Meier, der sich im Gegensatz zu mir mit Elektronik sehr gut auskannte, übernahm die Projektleitung für das ASIC-Labor. Sie wissen was daraus geworden ist. Mich persönlich interessierten immer nur Chips für Hochenergieexperimente und wir haben die Experimente HERAB, H1 und LHCB mit sehr anspruchsvollen Chips ausgestattet, die lange nur von Großforschungslabors geliefert werden konnten.

Ideen zur Forschungsarbeit

Für die Forschungsarbeit war mir wichtig, den Schwerpunkt der Aktivität in Heidelberg am Institut zu haben. Dazu brauchte ich einen Partner um Präsenz am Beschleunigerlabor und in Heidelberg gleichzeitig zu gewährleisten – das Duo Heintze-Soergel war da für mich ein gutes Vorbild – und mehrere parallel laufende Experimente. So war H1 das Experiment, das Daten zur Analyse lieferte, HERAB wurde das Experiment das anspruchsvolle Detektorentwicklungen sofort erforderte und LHCb war das Zukunftsprojekt für LHC. Die hohe fachliche Kompetenz der Institutswerkstätten und der Mitarbeiter im Bereich Detektorentwicklung, die hauptsächlich Herrn Heintze zu verdanken war, wollte ich unbedingt nutzen. Für die Analyse brachte ich zwei vielversprechende Postdocs von DESY mit, Herrn Schleper und Herrn Erdmann und schnell kamen die ersten Diplomanden und Doktoranden. Zwei Jahre später kam dann die der erhoffte Partner in Person von Ulli Straumann, der eine große Verstärkung der Hochenergie am Institut war und insbesondere auch meine Defizite im Bereich des Detektorbaus und der Elektronik kompensieren konnte.

Etwa zur selben Zeit wurde ich dann gleichzeitig Institutsleiter und Dekan. Institutsdirektor war ich mit Unterbrechungen insgesamt sieben Jahre. Es war weitgehend ein Vergnügen, das in normalen Zeiten nur einen geringen Zeitaufwand erforderte, da das Institut bestens funktionierte und ich nur bewährte Strukturen pflegen und weiterführen musste.

Forschungsarbeit bei H1

Bei H1 lag der Schwerpunkt der Analysen auf dem Studium der diffraktiven Ereignisse (Struktur des Pomerons) und der Photonstruktur sowie der Suche nach neuer Physik. Die Ergebnisse waren nicht spektakulär aber zum Teil durchaus originell.

Natürlich hofften wir auch bei H1 auf Signale neuer Physik und viele Aspekte des Detektors waren auch darauf ausgelegt Signalen für neue Physik möglichst gut zu messen. Und kurzzeitig

glaubten wir tatsächlich, das Glück hätte uns den Schlüssel zu neuer Physik geschenkt. Eine Beobachtung, die auf neue Physik deutete, schaffte es sogar auf die Frontseite der New York Times. Leider erwiesen sich die 'Leptoquarks' mit ca. 3.2 Sigma Signifikanz dann doch als statistische Schwankung, produzierten aber mehr als 100 theoretische Zitate. H1 hatte zudem im Laufe der Zeit 9 Ereignisse mit Myon und fehlender transversaler Energie nachgewiesen – die perfekte Signatur für Supersymmetrische Teilchen. Leider sah das Parallelexperiment ZEUS kein einziges. Natürlich war das eine hektische Zeit mit vielen Gerüchten und großer Nervosität. So ähnlich erging es allen anderen großen Experimenten in dieser Zeit bei LEP und bei den Proton-Antiproton Kollidern. Je genauer die Messungen wurden, desto solider stand das Standardmodell da.

Neue Experimente

Nach längerem Nachdenken hatte ich mich dafür entschieden, bei LHC zurück zur schwachen Wechselwirkung und insbesondere zur CP-Verletzung zu gehen – mich also für ein zukünftiges B-Experiment zu engagieren. Die Zeit bis dahin war aber noch sehr lang, so dass ich beschloss ich, bei HERAB mitzumachen, einem Vorläuferexperiment bei DESY, das experimentell extrem anspruchsvoll und herausfordernd war und ähnliche Anforderungen stellte wie spätere LHC Experimente. Große R&D Gruppen am CERN hatten Detektoren für LHC über Jahre entwickelt und getestet, so dass es anfangs so aussah, als wären die Detektorprobleme für HERAB schon gelöst. Wir wollten multistrip gaseous chambers (MSGC) bauen, eine im Prinzip gloriose Idee von der alle begeistert waren. Wir – inzwischen war Bernhard Schmidt als versierter Detektorbauer mit an Bord – hatten das ideale akademische Studienobjekt gefunden, an dem viele Diplomanden und Doktoranden sehr viel lernen konnten. Das Projekt entwickelte sich allerdings zu einem Albtraum; wir stolperten von einem Problem zum nächsten und mussten uns schließlich überzeugen, dass MSGC's ungeeignet waren für HERAB und damit auch für LHC. Für HERAB wurde das

Projekt gerettet durch den Einsatz von GEM-Folien als Vorverstärker, die Sauli am CERN erfunden hatte. Bei anderen Detektor-komponenten von HERAB sah es nicht viel besser aus. So wurde das HERAB Projekt physikalisch ein Flop. Wir waren immer weit davon entfernt CP Verletzung im B-System zu messen. Am Institut aber haben in diesem Projekt viele Doktoranden und Diplomanden sehr wertvolle Erfahrungen im Detektorbau erworben und waren danach sehr gefragt. Schließlich klappte über das Graduiertenkolleg auch der Technologietransfer. Die Gruppe von Herrn Dubbers bekam die Inspiration für einen innovativen Neutronendetektor und konnte von unseren Entwicklungen profitieren.

Nach dem Desaster mit den MSGC's, die ich natürlich auch im LHC Proposal geschrieben hatte, beschloss ich, bereits in Absprache mit Ulli Uwer, zum outer tracking System zu wechseln. Ulli Strauman war inzwischen an die Universität Zürich berufen worden. So bauten, entwickelten und testeten wir in Heidelberg Strawtube Kammern und die zugehörigen Auslesechips. Da Ulrich Uwer schnell die Projektleitung übernahm – das Experiment konnte absehbar nicht mehr in meiner Amtszeit starten - will ich dazu wenig sagen – außer dass das Experiment sehr erfolgreich läuft.

Physikausbildung in Heidelberg

Ziemlich viel Zeit und Energie investierte ich als Dekan und später als Studiendekan in Änderungen und Verbesserungen – zumindest in meinen Augen - der Physikausbildung in Heidelberg. Anfangs weil ich die existierende Ausbildung nicht gut fand, später weil die Studiengänge auf das Bachelor/Mastersystem umgestellt werden mussten. Ich erinnere mich noch sehr gut wie viele Kollegen im Fakultätsrat sehr entgeistert schauten als ich erklärte, dass die Physikausbildung in Dortmund viel besser sei als die in Heidelberg. In meiner Zeit als Dekan gelang es mit engagierter Unterstützung durch Herrn Hüfner als Studiendekan, eine große Studienreform durchzusetzen mit für Heidelberger Verhältnisse geradezu revolutionären Änderungen. Später als ich noch drei Semester

Studiendekan war gelang es, ein brauchbares Bachelor- und Masterkonzept zu entwickeln und zu beschließen, das nicht nur eine Fortsetzung des Diplomstudiengangs in neuen Gewändern war, sondern m.E. auch Defizite der Diplomausbildung behob, und dazu noch eine neue Lehrerausbildung. Dem allgemeinen Gejammer, dass das Bachelor-Masterstudium das Studium zu sehr verschule und zu großen Leistungsdruck erzeuge, kann ich mich nicht anschließen – es gibt genügend Flexibilität in den Regeln, um das zu vermeiden. Im Rückblick haben wir davon noch zu wenig Gebrauch gemacht und insbesondere einen zu hohen Leistungsdruck in den ersten Semestern erzeugt – das muss ich mir als Fehler auf meine Kappe nehmen.

Nach meiner Pensionierung habe ich mich dann noch intensiv um die Lehrerausbildung gekümmert. Während der aktiven Zeit konnte ich nie genügend Zeit sowohl in der Lehre als auch in die Forschungsprojekte stecken; es blieb immer ein Gefühl des Ungenügens. Als Pensionär und kurz danach als erster Seniorprofessor der W. und E. Heraeus-Stiftung, konnte ich mich dann ca. fünf Jahre lang ausschließlich der Lehre und dem Aufbau eines neuen Lehramtsstudiengangs widmen, insbesondere dem Aufbau eines Lehramtspraktikums, und hatte sehr viel Spaß dabei.

Die Zeit in Heidelberg war für mich schön und aufregend, auch wenn die großen Forschungserfolge im Vergleich zu den achtziger Jahren ausblieben. Es ist ein Vergnügen für mich zu sehen, was aus den vielen Doktoranden geworden ist, die in 15 Jahren in der Gruppe promoviert haben. Im Rückblick bin ich sehr froh, dass ich mich für Physik als Studienfach entschieden habe – die Beschäftigung mit der Physik ist und bleibt ein großes Vergnügen.

Vortrag gehalten an der Fakultät für Physik und Astronomie der Universität Heidelberg am 18. Mai 2017.

Heinz Horner



Heinz Horner

Heinz Horner wurde 1938 in Böhmisches-Leipa geboren. Nach Kriegsende ging es 1946 mit dem letzten Flüchtlingstransport nach Rosenheim in Bayern, wo er 1958 am humanistischen Gymnasium das Abitur machte. An der Technischen Universität München folgte er seiner Vorliebe für Thermodynamik und statistische Physik. Er promovierte 1968 bei Brenig zum Thema Theorie der Quantenkristalle, wobei es ihm erstmals gelang, die Phononenspektren der kristallinen Phasen der Helium Isotope samt Mehrphononenprozessen zu berechnen. Diese Rechnungen, inklusive Linienformen, wurden später durch Neutronenstreuexperimente gut bestätigt. Diese Arbeiten setzte Horner in den USA während zweier Jahre als Assistenzprofessor an der Universität von Minnesota fort. Anschließend arbeitete er am Institut für Festkörperforschung des Forschungszentrums Jülich und habilitierte sich 1973 an der RWTH Aachen. 1975 wurde er nach Heidelberg an das Institut für Theoretische Physik berufen, um dort zusammen mit seinem Jülicher Kollegen Franz Wegner (Band 3) die Statistische Physik und Festkörperphysik zu etablieren. Horner wechselte daraufhin zu dem ungemein anspruchsvollen Thema der Spingläser, mit ihrer Vielzahl metastabiler Zustände und divergierender Zeitskalen, und verband dieses Thema sehr erfolgreich mit der damals neu entwickelten Theorie der lernfähigen Neuronalen Netze. Dies führte ihn zu physiologisch-anatomischen Themen der Hirnforschung und dem berühmten Zusammenhang "Spingläser und Hirngespinnsten". Ab 1997 machte er sich als Prorektor für Forschung verdient um zeitgemäße Projekte wie die dezentrale Ressourcenverantwortung, leistungsorientierte Mittelvergabe und das kaufmännisches Rechnungswesen, eine wahre Herkulesaufgabe. 2004 wurde Horner emeritiert.

Heinz Horner

Spingläser und Hirngespinnste

Kindheit und Schule 1938–1958

Geboren wurde ich Ende August 1938 in Böhmisches-Leipa, einer nordböhmischen Kleinstadt, die kurz nach meiner Geburt "Heim ins Reich" geholt wurde.



Abb. 1. Postkarte aus meiner Geburtsstadt Böhmisches Leipa (Ceská Lípa) in Nordböhmen.

Ein Jahr nach Kriegsende ging es 1946 mit dem letzten Flüchtlingstransport in die amerikanische Zone nach Rosenheim. Inzwischen war ich mehrfach wieder zu Besuch in Leipa, auch mit meinen Kindern. Es war interessant die Häuser meiner Eltern und Großeltern zu sehen, oder die Schule, die ich für ein Jahr besucht hatte, Wehmut oder Heimatgefühle kamen aber nicht auf.



Abb. 2. Rosenheim mit Blick auf die Voralpen.

In Rosenheim kam ich dann, nach einjähriger Unterbrechung, wieder in die Schule und machte 1958 am dortigen Humanistischen Gymnasium das Abitur. Die ersten Fremdsprachen waren Latein und Griechisch. Englisch kam erst später dazu und hatte wenig Bedeutung. Das war zwar nicht ganz nützlich, aber am Humanistischen Gymnasium war man ja etwas Besonderes.



Abb. 3. Rosenheim in typischer Inn-Salzach-Bauweise.

Meine Vorliebe galt aber nicht so sehr den alten Sprachen. Interessanter waren da schon Biologie und Physik. Tatsächlich hatte unser Mathematik- und Physiklehrer wenig Interesse an der

Physik, aber wir waren eine Gruppe von vier Schülern, die ihre eigene Arbeitsgemeinschaft bildeten, und unser Physiklehrer war froh, wenn wir neue Demonstrationsexperimente vorschlugen, kauften und einrichteten. Alle Vier studierten wir später Physik.

Noch viel interessanter war jedoch der Bau von Modellflugzeugen. Immerhin brachte ich es zum Rosenheimer Stadtmeister, was bei der geringen Zahl von Mitbewerbern keine besondere Leistung war. Es war aber auch bedeutend für meine spätere Berufswahl. Ich fing an, mich für die Aerodynamik von Vögeln und Flugzeugen zu interessieren, und mir wurde gesagt, dass das eher ein Gebiet für Physiker und nicht für Ingenieure war. Das Interesse für Aerodynamik blieb, und eine meiner späteren Lieblingsvorlesungen war immer die Hydrodynamik. Rosenheim bot daneben noch viele andere Möglichkeiten für einen Jugendlichen mit seinen nahegelegenen Seen und Bergen. Zu Oper oder Konzert fuhr man nach München.

Studium und Promotion in München 1958–1967

Im Herbst 1968, ging es zum Studium nach München. Physik konnte man an der Universität oder auch an der Technischen Hochschule studieren. Nachdem meine Noten für den dortigen Numerus Clausus ausreichend waren, wählte ich die Technische Hochschule. Nachträglich gesehen war das wohl die bessere Wahl. Zu Vorlesungen von Heisenberg an der Uni konnten wir trotzdem gehen, was nicht allzu viel Bedeutung hatte, da wir sowieso fast nichts verstanden. Das Studium bis zum Vordiplom war straff organisiert, und wir konnten, im Gegensatz zu den Kommilitonen an der Uni, die Prüfung nach dem vierten Semester ablegen. Die Physik Grundvorlesung, die auch für Ingenieure gedacht war, wurde von Georg Joos mit vielen Experimenten und durchaus unterhaltsam gehalten. Er konnte aber auch wütend werden, besonders wenn jemand im abgedunkelten Hörsaal die Tür nach aussen öffnete. Einen hohen Vertreter des Kultusministeriums hat er beispielsweise mit den Worten "*und wenn Sie der Kaiser von China sind, ich sage: Raus da!*" begrüßt. Das von ihm verfasste

Lehrbuch der Theoretischen Physik war ein weit verbreitetes und hoch geschätztes Standardwerk mit Schwerpunkt auf klassischer Physik.



Abb. 4. Stammgelände der Technischen Hochschule München (heute Technische Universität).

Die Modernisierung der Physik an der Technischen Hochschule, wurde mit der Berufung von Heinz Maier-Leibnitz im Jahr 1952 eingeleitet. Er war allerdings für Studenten vor dem Vordiplom unsichtbar. Erst später konnten wir seine oft sehr originellen Vorlesungen über recht unterschiedliche Fragestellungen genießen. Erinnern kann ich mich an eine Vorlesung zur Technik des Skilaufs. Die darin vorgestellte Technik einen Bogen zu fahren, habe ich natürlich umgehend praktisch erprobt. Überzeugt war ich danach nicht. Neben seinen herausragenden Verdiensten bei Bau und Instrumentierung der Neutronen-Forschungsreaktoren in Garching und später Grenoble hat er die Umwandlung einzelner monolithischer Lehrstühle in ein Physik Department bewirkt. Im

Bereich der theoretischen Physik wurden Wilhelm Brenig und Wolfgang Wild und später Hans Jörg Mang berufen.

Wild und Mang kamen aus Heidelberg, wie auch schon vorher Maier-Leibnitz.

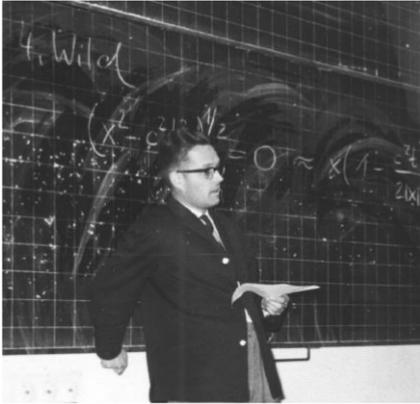


Abb. 5. Die neuen Professoren für theoretische Physik: Wilhelm Brenig (links) und Wolfgang Wild (rechts).

Mit den Neuberufenen änderte sich der Stil ganz wesentlich. Nicht nur der Inhalt wurde aktueller, im Sommer erschien Wilhelm Brenig zur allgemeinen Verwunderung in einem Buschhemd.

Wild kam allerdings immer noch im Anzug mit Krawatte. Besonders angetan war ich von Brenigs Vorlesung zur Statistischen Physik und Wärmelehre. Diese Vorlesung hat mein andauerndes Interesse an diesem Gebiet geweckt und war auch später die Grundlage meiner eigenen Arbeiten. Die Statistische Physik war auch immer meine liebste Kursvorlesung in Heidelberg.

Quantenkristalle

In meiner Diplomarbeit, aber besonders in meiner Doktorarbeit bei Brenig beschäftigte ich mich mit sogenannten Quantenkristallen. Darunter verstand man vorwiegend die Helium-Isotope ^3He und

^4He , die nur bei sehr tiefen Temperaturen und unter Druck kristallisieren.

Das Problem bestand darin, dass die zweite Ableitung des Wechselwirkungspotentials für nächste Nachbarn negativ ist. Damit war die harmonische Näherung als Ausgangspunkt zur Berechnung von Phononenspektren unbrauchbar, was zu Zweifeln an der Existenz von Phononen und zu anderen Spekulationen Anlass gab. Die Lösung bestand in einer störungstheoretischen Partialsummation, die letztlich darauf hinauslief, die Quantennatur der Gitterbausteine ernst zu nehmen und sie durch oszillierende Wellenpakete zu beschreiben, wobei die starke Abstoßung bei kleinen Distanzen berücksichtigt werden musste.

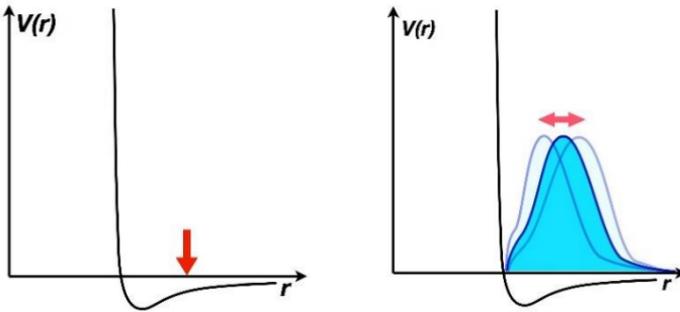


Abb. 6. Wechselwirkungspotential für Quantenkristalle. Die Position nächster Nachbarn ist durch den Pfeil angedeutet (links). Die Gitterbausteine werden durch oszillierende Wellenpakete beschrieben (rechts).

Die notwendigen numerischen Rechnungen konnte ich auf einer damals neuen Telefunken TR4 durchführen. Fehlersuche war noch etwas abenteuerlich. Ich erinnere mich, dass ich zusammen mit dem Operator einen ganzen Abend lang mit einem Transistorradio an dem kleiderschrankgroßen Gerät entlang suchte, um heraus zu finden welche Rechenoperationen gerade durchgeführt wurden.

Immerhin fand ich dabei heraus, in welcher Schleife das Programm hängen geblieben war.

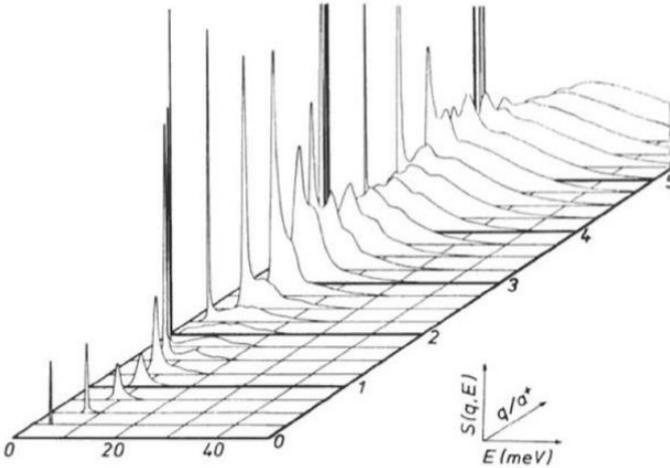


Abb. 7. Dynamische Strukturfunktion $S(q, \Omega)$ für festes ${}^4\text{He}$. Mit wachsendem Wellenvektor q ist der Übergang von Phononenlinien zu wachsender Bedeutung von Mehrphononprozessen und schließlich dem Spektrum freier Teilchen.

Als Resultat erhielt ich zunächst nur Phononenspektren. Damit wurde ich Anfang 1966 promoviert.

In weiteren Rechnungen konnten zum Beispiel auch Linienformen berechnet werden, wie sie bei inelastischer Neutronenstreuung zu erwarten sind. Bei kleinen Impulsüberträgen zeigen sich relativ scharfe Phononenlinien. Bei größeren Impulsüberträgen wächst der Beitrag von Mehrphononprozessen bis hin zu sehr breiten Linien, die der Streuung an freien Teilchen entsprechen. Dieses Verhalten ist charakteristisch für Quanten kristalle und ist in Kristallen der schwereren Edelgase weit weniger ausgeprägt. Die Ergebnisse dieser Rechnungen wurden durch Neutronenstreuexperimente in Brookhaven gut bestätigt. Erwähnt

sei, dass ich obiges Bild bereits schon einmal vor 45 Jahren hier gezeigt habe. Damals waren diese Ergebnisse aktuell, heute ist das Interesse an Phononenspektren weitgehend verschwunden.

Ein wichtiges jährliches Ereignis war immer die Nacht der Kernbohrer (NAKEBO), ein mehrtägigen Faschingsfest, für dessen Organisation und Dekoration jeweils ein Institut zuständig war. 1966 war die theoretische Physik dran. Das bedeutete mehrere Wochen Arbeit. Das Fest war dann immer recht schön und lustig. Wolfgang Wild kam gerne aufwendig als historische Person verkleidet und spielte diese Rolle dann auch sehr überzeugend.

Zufällig, am Rosenmontag 1966, hatten wir Prof. Lewis Nosanow aus Minneapolis, *den* Experten für Quantenkristalle, zu Besuch. Er war sehr erstaunt was da so vor sich ging. Wir fanden aber auch Zeit uns fachlich zu unterhalten, aber auch darüber, ob irgendwann einmal eine Postdoc-Stelle in Minneapolis zur Verfügung stünde.

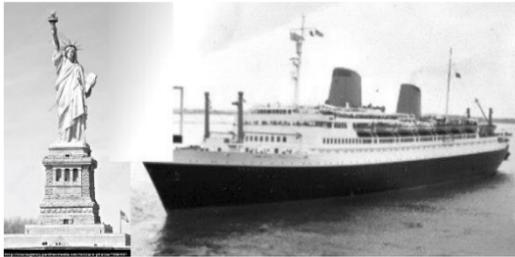


Abb. 8. Mit dem Schiff (Europa) ins gelobte Land.

Minneapolis-Minnesota 1967–1969

Im folgenden Jahr war es dann so weit. Mit "Green Card" und zwei Überseekoffern ging es per Schiff ins damals für uns gelobte Land. In Minneapolis wurden wir herzlich von der Fakultät aufgenommen. Als *Assistant*-Professor hatte ich eine sehr angenehme Zwischenstellung zwischen *Graduate Students* und *Faculty*. Eine wichtige Rolle spielte auch der *Faculty Club*. Leider existiert bei uns keine entsprechende Einrichtung.

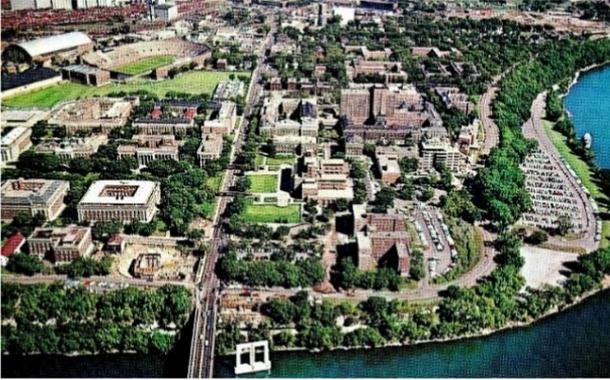


Abb. 9. Campus der University of Minnesota am Mississippi in Minneapolis.

Ich beschäftige mich weiter mit Quantenkristallen. Ich war aber auch Teil einer recht aktiven Tieftemperatur Gruppe mit vielen interessanten Besuchern und Gästen.



Abb. 10. Logo der University of Minnesota (links) und "Boundary waters" im Norden von Minnesota (rechts).

Vermutlich hatte die Existenz dieser Gruppe nichts mit den winterlichen Temperaturen in Minnesota zu tun. Tatsächlich war der Winter sehr schön, mit langen sonnigen, aber bitter kalten Perioden. Der Winter konnte allerdings auch recht lang sein. Im ersten Jahr hatten wir für 5 Monate Schnee. Der Übergang zum

Sommer ging dann sehr schnell, innerhalb weniger Wochen. Da konnten wir dann die 10 000 Seen im Norden von Minnesota genießen. Minneapolis war aber auch ein gewisses Zentrum im Norden des Mittleren Westens mit einem sehr guten Orchester und einer Reihe kleinerer interessanter Bühnen. Wir haben diese Zeit sehr genossen. Obwohl wir die Gelegenheit hatten zu bleiben, entschlossen wir uns nach zwei Jahren wieder zurück zu kehren. Ein Grund dafür war unsere dort geborene Tochter, die wir nicht als amerikanisches *Kid* groß werden lassen wollten. Das erste Jahr zurück im alten Kreis mit all den Problemen und Einschränkungen war jedoch nicht ganz einfach.



Abb. 11. Hexentor in Jülich (links), Herbert Wagner (rechts),

KFA-Jülich 1970–1974

Im Jahr 1970 wurde das Institut für Festkörperforschung an der Jülicher Kernforschungsanstalt (KFA), heute Forschungszentrum Jülich, stark ausgebaut. Herbert Wagner, den ich als Assistent in München bereits kannte, war als Leiter eines neuen Teilinstituts berufen. Seine Arbeitsgruppe rekrutierte er vorwiegend aus Münchner Ressourcen. Franz Wegner war ebenfalls dabei. Das Klima in dieser Gruppe war sehr gut und, dank Herbert Wagner, sehr anregend. Dort sind auch viele langdauernde Freundschaften entstanden. Man fand ja schnell ein gemeinsames Gesprächsthema. Man schimpfte auf das Kaff Jülich und wie schön es doch in München war. Tatsächlich war die KFA das Beste an Jülich, auch

wenn Aachen, Köln und Düsseldorf gut erreichbar waren. In dieser Zeit kam meine Beschäftigung mit Quantenkristallen zum Abschluss. Andere Themen, zum Beispiel Wasserstoff in Metallen, waren am IFF von Interesse. Darauf möchte ich aber hier nicht näher eingehen.



Abb. 12. Seekasino der Kernforschungsanlage Jülich, heute Forschungszentrum Jülich.

Heidelberg 1975 –

Nach einer drei monatigen Gastprofessur in Florida erhielt ich den Ruf nach Heidelberg. Man hatte dort beschlossen die Statistische Physik und Festkörperphysik als neues Arbeitsgebiet am Institut für Theoretische Physik einzurichten, und man hatte zwei Lehrstühle dafür vorgesehen. Nachdem zunächst Franz Wegner berufen wurde hatte ich wenig Hoffnung. Trotzdem scheute man sich offensichtlich nicht, zwei Kandidaten aus dem gleichen Stall zu berücksichtigen. Etwas später gab es dann noch eine weitere Professur in der Angewandten Physik, die mit Siegfried Hunklinger besetzt wurde. Hier entwickelte sich später eine enge und fruchtbare Zusammenarbeit zwischen meiner Arbeitsgruppe und der Hunklinger'schen Gruppe, die an Tunnelsystemen in Gläsern bei tiefen Temperaturen arbeitete.

Auch hier war die Aufnahme in der Fakultät herzlich und hilfsbereit. Man war eine große Familie und es entstanden gute anhaltende Freundschaften. Das Institut für Theoretische Physik war ursprünglich im Philosophenweg 16 untergebracht. Kurz vor meinem Amtsantritt Anfang 1975 kam die Villa Philosophenweg 19 dazu, in der Jörg Hufner, Franz Wegner und ich mit unseren Mitarbeitern Platz fanden. Einen gewissen Ersatz für den fehlenden *Faculty Club* bildete das tägliche Butterbrotessen im Seminarraum des Instituts. Hier war Zeit für gute Gespräche mit vielfältigen Teilnehmern. Der Kern, bestehend aus unserem Triumvirat, war fast immer dabei. In den ca. 30 Jahren unserer gemeinsamen Tätigkeit wurden geschätzte 3 Tonnen Butterbrot umgesetzt.



Abb. 13. Blick aus meinem Bureau im Philosophenweg 16.

Es war bei uns üblich, dass jeder jede Kursvorlesung zu halten hatte. Ich habe das immer gerne getan, hatte aber durchaus meine Lieblingsvorlesung, die Statistische Physik und Thermodynamik. Neben der Herausforderung, Grundlagen immer neu zu überdenken, konnten aus dem Kreis der Hörer auch immer wieder gute Diplomanden und Doktoranden gewonnen werden. Daneben gaben Spezialvorlesungen die Gelegenheit, sich selbst in neue

Themenkreise einzuarbeiten. Die Verknüpfung von Lehre und Forschung halte ich immer noch für ganz wesentlich. Das wurde mir besonders bewusst, da ich ja vorher vier Jahre an einem reinen Forschungsinstitut, der KFA Jülich, tätig war.

Von den Forschungsthemen, die im Laufe der Jahre für mich und meine Gruppe von Interesse waren, möchte ich nur auf einen Themenkreis genauer eingehen:

Spingläser und Hirngespinnste (Neuronale Netze)

Unter **Spingläsern** versteht man zunächst verdünnte magnetische metallische Legierungen in denen aufgrund der oszillierenden RKKY-Wechselwirkung Frustration auftritt und auch bei tiefen Temperaturen keine magnetische Ordnung vorhanden ist. Das Auffinden von Grundzuständen in entsprechenden Modellen ist ein *NP-complete* Problem. Grob gesprochen sind das Probleme, die nicht in einer Zeit gelöst werden können, die polynomial mit der Größe des Systems, in unserem Fall der Zahl N der Spins, anwächst. In dieser Klasse finden sich viele Beispiele kombinatorischer Optimierungsprobleme, zum Beispiel das *Traveling Salesman Problem*. Ein beliebter Algorithmus zur Behandlung derartiger Probleme ist *Simulated Annealing*. Das ist aber genau der Prozess, den ein physikalisches System beim langsamen Abkühlen durchläuft. In Spingläsern, aber auch in realen Gläsern, existiert ein enger Temperaturbereich, oder sogar eine scharfe Übergangstemperatur, unterhalb der die notwendige Zeit bis zum Erreichen des Gleichgewichts divergiert. In speziellen Modellen, zum Beispiel dem *Sherrington-Kipkpatric (SK)* Modell, einem Modell für einen ungeordneten Magneten mit langreichweitiger Wechselwirkung, zeigt sich in der Tat ein Phasenübergang, an dem das System aus einem ergodischen in einen nicht ergodischen Zustand übergeht. Entsprechend der von Parisi 1979 vorgeschlagenen Lösung des *SK*-Modells wird im Rahmen einer sogenannten *Replica*-Rechnung eine Permutationsgruppe mit n Elementen im Grenzfall $n \rightarrow 0$ ultrametrisch gebrochen.

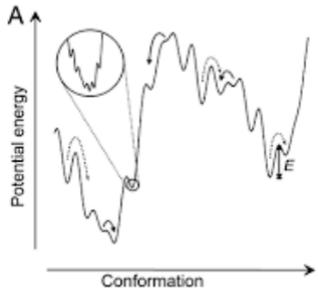


Abb. 14. Energielandschaft eines Spinglases (schematisch).

Als Alternative zu dieser Rechnung kann man die Dynamik derartiger Systeme untersuchen und findet divergierende Zeitskalen unterhalb einer charakteristischen Temperatur. Diese Temperatur kann in ähnlichen Modellen höher sein als die kritische Temperatur aus der *Replica*-Rechnung. Das erinnert an den Glasübergang, bei dem die Einfriertemperatur T_g höher ist als die sogenannte Kauzmann-Temperatur T_K in Gläsern

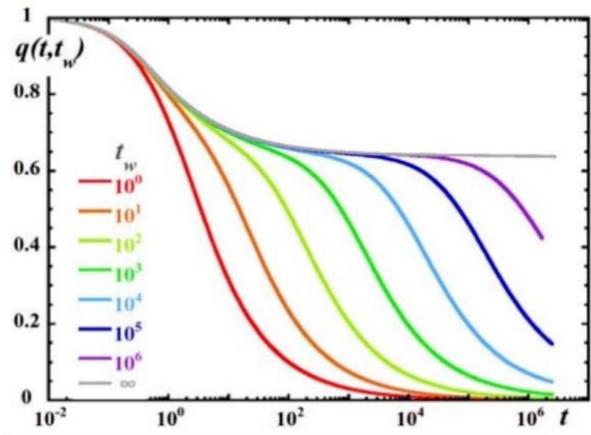


Abb. 15. Der Zerfall der Korrelationen in Spingläsern hängt von der Wartezeit t_w zwischen Abkühlen und Beginn der Messung ab.

Betrachtet man die Dynamik derartiger Systeme, zeigt sich dass zum Beispiel der Zerfall von Korrelationen von der Wartezeit zwischen Abkühlen und Beginn der Messung abhängt. Das alles deutet darauf hin, dass im Phasenraum derartiger Systeme eine Vielzahl metastabiler Zustände existiert, die durch eine Hierarchie von Barrieren getrennt sind.

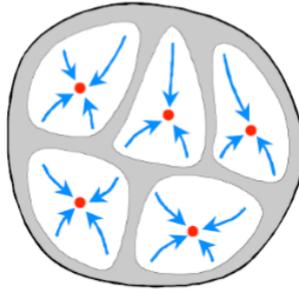


Abb. 16. In einem rückgekoppelten Neuronales Netz, dem Hopfield-Modell eines assoziativen Speichers, werden Muster in Form von Attraktoren gespeichert.

Im Jahr 1982 stellte *John Hopfield* ein vollständig rückgekoppeltes **Neuronales Netz** vor, das als assoziativer Speicher funktioniert. Man betrachtet dabei abstrakte Muster in einem System von binären Neuronen. Die Aufgabe besteht darin, dass man dem System einen Teil eines eingprägten Musters vorgibt, und dass das System das vollständige Muster rekonstruiert. Die Idee ist nun, die Wechselwirkungen zwischen den Neuronen so zu programmieren, dass die vorgegebenen Muster metastabile Zustände im Sinn von Spingläsern werden.

Bis dahin verstand man unter Artifizialen Neuronales Netzen (**ANN**) vorwiegend vorwärts gerichtete Netzwerke, die hauptsächlich das Interesse von Mathematikern und Informatikern fanden. Mit dem Hopfield Modell wurde das Gebiet auch für Physiker mit Hintergrund in statistischer Physik, speziell aus der Spinglas Gemeinde, also auch für uns, interessant.

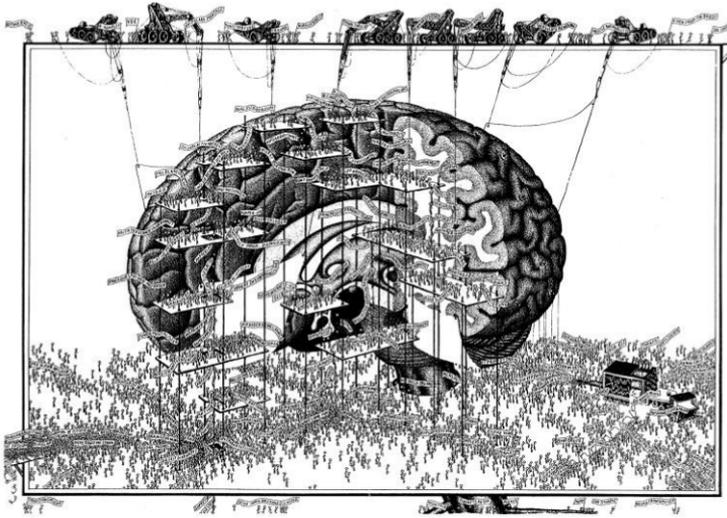


Abb. 17. So sieht der Göttinger Graphiker Uwe Brandi die Aktivitäten der Hirnforscher (© Uwe Brandi und GEO-Wissen, mit freundlicher Genehmigung des Verlags).

Diese Aktivitäten waren vorwiegend auf Europäische Länder konzentriert und über viele Jahre hinweg, bis 2003, waren wir in gemeinsamen Projekten im Rahmen des *EC-Twinning Programs* und im Program SPHINX der ESF organisiert. Wir trafen uns regelmäßig auf gemeinsamen Veranstaltungen, und das Programm förderte den Austausch von Mitgliedern. So konnte ich selbst mehrfach ein Sabbatical in Oxford, London, Paris und Rom verbringen.

Neuronale Netze, nicht nur vorwärts gerichtete, sind inzwischen eines der wichtigsten Instrumente der künstlichen Intelligenz geworden. Sie sind aber auch zentral für Projekte in der Hirnforschung, zum Beispiel bei den beiden Großprojekten, der *US Brain Initiative* und dem *EU Human Brain Project*, an dem Karlheinz Meier mit *Neuomorphic Computing* ganz wesentlich beteiligt ist.

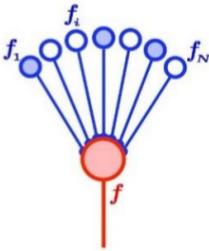


Abb. 18. Perzeptron, Grundbaustein Neuronaler Netze (links). Nervenbahnen zwischen verschiedenen Arealen im Gehirn (rechts).

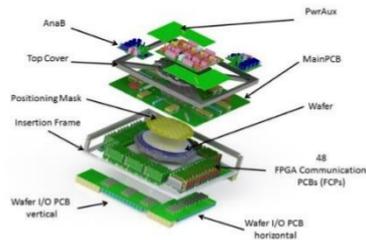


Abb. 19. Hardware zum Neuromorphic Computing in Jülich (links) und Heidelberg (rechts).

Da stellt sich natürlich die Frage, ob Spielzeugmodelle, wie sie in den 1980er Jahren in Mode kamen, Beiträge zum Verständnis der Funktionsweise des Gehirns leisten können. Ich möchte dies an einer einfachen Fragestellung erläutern.

In einem Computer sind Zahlen in einem binären Code gespeichert. 1 und 0 treten dabei mit gleicher Wahrscheinlichkeit auf. Auch im Hopfield Modell eines assoziativen Speichers wurden zunächst symmetrische Zufallsmuster angenommen. Betrachtet man binäre Zufallsmuster mit mittlerer Aktivität a , ist deren Informationsgehalt pro Knoten:

$$I / N = -\log_2(a) - (1 - a) \log_2(1 - a),$$

also für $a = 1/2$ maximal.

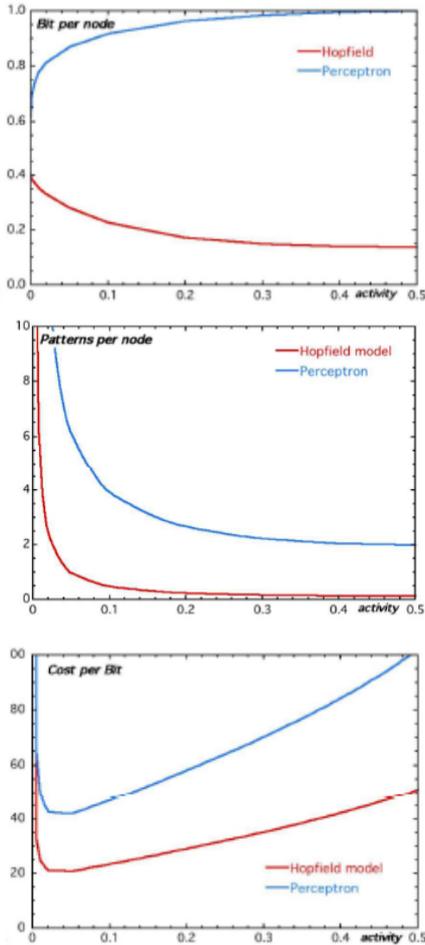


Abb. 20. Verschiedene Kenngrößen eines Perzeptrons (blau) und eines Hopfield-Modells (rot) als Funktion der mittleren Aktivität der verarbeiteten Muster.

Im Gehirn findet man typische Feuerraten, die nur 1/10 bis 1/100 der maximal möglichen Feuerrate betragen. Das legt es nahe, dass

das Gehirn tatsächlich mit spärlich kodierten Mustern, also Mustern mit $a \ll 1$, arbeitet.

Betrachten wir das Hopfield Modell als assoziativen Speicher von Mustern mit Aktivität a , oder ein Perceptron, einem Modell zur Klassifikation von Zufallsmustern mit Aktivität a . Das Perceptron ist das wohl einfachste Neuronale Netz, bestehend aus einem einzigen Schwellwert-Neuron und einer Eingangsschicht mit N Elementen.

Wie erwähnt nimmt der Informationsgehalt eines Musters mit kleiner werdender Aktivität ab. Es zeigt sich aber, dass die maximale Zahl der Muster, die von dem jeweiligen Netzwerk verarbeitet werden kann, zunimmt. Die gesamte Information, die verarbeitet werden kann, also die Information per Muster mal der maximalen Zahl der Muster, hängt nicht allzu sehr von der Aktivität ab und nähert sich einem Wert von $1/2$ Bit pro Synapse. Schließlich kann man versuchen, die Kosten für ein derartiges Netzwerk abzuschätzen. Diese bestehen aus einem konstanten Beitrag pro Neuron und einem Beitrag, der proportional zur Aktivität ist. Die Kosten pro abgerufene Bit zeigen ein Minimum bei niedriger Aktivität. Das könnte ein Argument für spärliche Kodierung sein.

Eine ganz zentrale Komponente Neuronaler Netze ist die Fähigkeit zu Lernen, also die Stärke von Synapsen, den Wechselwirkungen zwischen Neuronen, zu modifizieren. Man nimmt an, dass dies auf der Basis der Hebb'schen Regel geschieht. Diese Regel wurde von Donald O. Hebb 1949 formuliert, findet sich aber auch schon bei Sigmund Freud 1888. Sie besagt, dass die synaptische Verbindung zwischen einer Zelle A und einer Zelle B verstärkt wird, wenn Zelle B durch das Feuern der Zelle A wiederholt angeregt wird und selbst feuert. Vereinfacht bedeutet dies, dass beide Neuronen gleichzeitig aktiv sein müssen, um eine Veränderung der Synaptischen Stärke zu bewirken.

Lernen in abstrahierter Form besteht darin, dass die zu lernenden Muster dem Netzwerk aufgeprägt werden und die Synapsen entsprechend der Hebb'schen Regel modifiziert werden.

In einem Netzwerk der Größe N werden $P \sim N/a$ Muster mit Aktivität a gelernt. Bei einem Lernschritt werde die Synapse zwischen A und B bei Erfüllung der Hebb'schen Regel um einen Betrag Δ geändert. Sie hat also nach Präsentation von P Mustern, einen typischen Wert $W \sim Pa^2\Delta \sim aN\Delta$. Die damit notwendige Genauigkeit ist:

$$\Delta / W \sim \frac{1}{aN}$$

Setzt man für N die typische Zahl von Synapsen 10^4 ein, und eine Genauigkeit von etwa 1%, ist eine Aktivität $a < 0.01$, also spärliche Kodierung, erforderlich.

Im Rahmen derartiger Untersuchungen lassen sich weitere Argumente für *Sparse Coding* finden. Die Beschränkung aufgrund der notwendigen Genauigkeit bei Lernvorgängen erscheint mir jedoch ganz wesentlich.

Dies möge für den Moment genügen. Neben der Beschäftigung mit Modellen hat mir aber besonders das Kennenlernen von physiologischen und anatomischen Aspekten der Funktion des Gehirns Spass gemacht und Bewunderung für diese phantastische Maschinerie hervorgerufen. Als Folge dieser Aktivitäten habe ich auch mehrfach Vorlesungen über physiologisch-anatomischen Hintergrund und einfache Modelle Neuronaler Netze gehalten.

Rektorat Siebke 1997–2001

Als Rektor ab Wintersemester 1997 wurde der Professor für Volkswirtschaft, Jürgen Siebke gewählt. Er bat mich als Prorektor für Forschung in seinem Rektorat mit zu wirken. Als Dekan und gewähltes Mitglied des Senats hatte ich bereits vorher Erfahrung mit der Universitätsleitung gewonnen. Mit etwas gemischten Gefühlen sagte ich zu. Sein Arbeitsstil kam mir sehr entgegen. Er konnte Aufgaben delegieren, und wir hatten von Anfang an ein gegenseitiges Vertrauensverhältnis. Als Prorektor für Forschung wurde ich durch Ulrike Albrecht, der Leiterin des Forschungsdezernats, auf höchst kompetente Weise unterstützt.



Abb. 21. Alte Universität, Sitz des Rektorats.

Im vorausgehenden Rektorat Ulmer hatte die Universität im Rahmen des Programms "Leistungsfähigkeit durch Eigenverantwortung" der Volkswagenstiftung ein Projekt gewonnen. Dieses wurde mit 5 Mio DM gefördert. Die tatsächliche Arbeit begann mit dem IMPULSE-Projekt Anfang 1998. Ich war als Vertreter des Rektorats daran beteiligt, was sich als fordernd und arbeitsintensiv, aber auch sehr interessant erwies. Ziel des Projektes war es eine weitgehend dezentrale Ressourcenverantwortung im Rahmen von Globalhaushalten zu erreichen und die dafür notwendigen Maßnahmen, wie der Einrichtung eines kaufmännischen Rechnungswesens, oder der Implementierung von Mechanismen zur leistungs- und bedarfsorientierten Mittelvergabe, umzusetzen.

Wichtig war für mich aber auch die Erkenntnis, dass die Universität nicht am Philosophenweg endete, und dass man auf der Straße Kollegen aus anderen Fakultäten treffen konnte. Daneben hat der Rektoratsbetrieb die Begegnung mit vielen interessanten Menschen mit sich gebracht. Auch im Rückblick waren die vier Jahre eine Zeit, die ich nicht missen möchte. Die daraus erwachsene Freundschaft mit Jürgen Siebke wurde leider durch seinen Tod vor wenigen Wochen beendet.

Emeritierung 2004

Den Preis, den ich dafür gezahlt habe, war die Auflösung meiner Arbeitsgruppe am Institut für Theoretische Physik. Ich habe keine neuen Doktoranden angenommen, laufende Projekte wurden beendet und Mitarbeiter fanden andere Aufgaben. In den drei Jahren bis zur Emeritierung war es nicht angebracht, eine neue Gruppe aufzubauen. Geblieben ist aber das Interesse an Wissenschaft und dem Leben am Institut, mit Vorträgen, gelegentlicher Beteiligung an Promotionen und ohne Verpflichtungen.

Mein ehemaliger Chef und Freund, Herbert Wagner, hat es mal so ausgedrückt: Er kommt sich vor wie ein alter Grubengaul. Er tragt immer noch im Kreis herum, weil er das so gewohnt war. Es macht Spass, aber es kommt schon lange kein Wasser mehr.

Wichtig ist mir zum Schluss mein Dank an Universität, Fakultät und Institut, besonders aber auch an meine Familie, die oft viel Geduld aufbringen musste.



Vortrag gehalten an der Fakultät für Physik und Astronomie der Universität Heidelberg am 18. Januar 2018.

Ulrich Platt



Ulrich Platt

Ulrich Platt wurde 1949 in Eberbach am Neckar geboren. Er studierte Physik in Heidelberg, wo er 1977 mit einer Dissertation zur mikrometeorologischen Bestimmung der Schwefeldioxid-Abscheidung am Boden promoviert wurde. Ab 1977 untersuchte er an der Kernforschungsanlage (dem heutigen Forschungszentrum) Jülich Spurengase in der Troposphäre. Er entwickelte die Methode der Differentiellen Optischen Absorptions-Spektroskopie (DOAS), die heute von fundamentaler Bedeutung für den Nachweis und die Messung von Schadstoffen und Spurengasen in der Erdatmosphäre ist. Zwischen 1980 und 1982 arbeitete er zeitweise an der University of California, Riverside, wo er sich mit den nach wie vor sehr aktuellen Themen der Nitrat-Radikale in der Atmosphäre und der Smogchemie beschäftigte. Im Jahre 1984 habilitierte er sich an der Universität Köln mit einer Arbeit zur Chemie der Stickoxide in der Luft. 1989 folgte Ulrich Platt einem Ruf an die Universität Heidelberg, wo er als Direktor am Institut für Umwelphysik wirkte, und wo er immer noch wissenschaftlich aktiv ist. Für seine wichtigen Beiträge zur Atmosphären-Physik wurde ihm 2010 der Robert-Wichard-Pohl-Preis der Deutschen Physikalischen Gesellschaft verliehen. Er ist Mitglied der Heidelberger Akademie der Wissenschaften, der Deutschen Akademie der Naturforscher Leopoldina und der Academia Europaea.

Ulrich Platt

Von Höhenstrahlquarks zur Atmosphärenforschung – Ein Weg zur Umweltphysik

Chemische und physikalische Experimente – innerhalb und außerhalb der Schule - faszinierten mich schon früh. Auch sehr interessant fand ich die Elektronik und die damals aufkommende Halbleitertechnik. Die Reparatur von (Röhren) Radios besserte mein Taschengeld auf. Auf der Seite der Physik gelangen scharfe Fotos von Pistolenkugeln im Flug mit dem damals neu aufkommen- den "Computerblitz" als Kurzzeitlichtquelle. Meine Eltern haben diese Experimente mit Geduld ertragen und hatten offenbar großes Vertrauen, dass ich wusste was ich tat.

Elektronische Datenverarbeitung war in den 1960er Jahren ein neues und (nicht nur) für mich faszinierendes Thema. Außer einem logarithmischen Digitalrechner, der die vier Grundrechenarten beherrschte, konstruierte ich einen autonomen Roboter ("Schildkröte"). Die Elektronik beider Projekte musste ich noch mühsam aus (Germanium) Einzeltransistoren zusammenlöten. Die Schildkröte brachte mir einen Preis bei dem damals noch neuen Wettbewerb "Jugend forscht" ein. Im Herbst 1968 begann ich mein Studium an der Universität Heidelberg, zunächst der Chemie, wechselte dann aber bald zur Physik. In der Anfangszeit meines Studiums verbrachte ich mehrere Semesterferien als Werkstudent bei BBC (heute ABB) und der BASF. Bei beiden Firmen war ich mit Arbeiten der Datenverarbeitung und elektronischen Entwicklungen (z.B. Elektronik für Leuchtstofflampen) beschäftigt. Das Diplom in Physik an der Universität Heidelberg erhielt ich 1974 mit einer experimentellen Arbeit aus der Hochenergiephysik, der "Suche nach Quarks in der Höhenstrahlung". Die Idee dabei war,

den Ionisationsenergieverlust von Höhenstrahlteilchen zu messen. Da dieser (bei hinreichend hochenergetischen Teilchen) proportional zum Quadrat der Ladung ist, sollten sich Teilchen mit $2/3$ bzw. $1/3$ Elementarladung gut finden lassen. In der Praxis waren allerdings viele "Dreckeffekte" zu beseitigen, bis das Höhenstrahlteleskop auf dem Dachboden des Physikalischen Instituts am Philosophenweg vernünftig lief. Quarks konnte ich in mehreren Monaten Messzeit allerdings nicht finden. Mittlerweile ist natürlich auch klar warum.

Nach meinem Diplom entschied ich mich für eine Doktorarbeit auf dem Gebiet der Umweltphysik, damals war auch gerade das Institut für Umweltphysik der Universität Heidelberg neu gegründet worden, es war damals das erste seiner Art in Deutschland, wenn nicht weltweit.

Der Begriff "Umweltphysik" wurde damals geprägt und ist bis heute etwa so definiert:

Als Teilgebiet der Physik beschäftigt sich die Umweltphysik mit Fragestellungen im Zusammenhang mit dem Fluss von Energie und Materie in unserer Umwelt, d.h. innerhalb der klassischen Umweltsysteme Wasser, Boden, Luft und Ökosysteme, sowie zwischen diesen Systemen. Das Wort Physik weist auf die spezielle Methode hin, quasi auf den Blickwinkel, unter dem die Probleme betrachtet werden. Ein methodischer Aspekt der Umweltphysik ist die Modellbildung, die dem Systemcharakter der Umwelt Rechnung trägt.

Vereinfacht ausgedrückt: Umweltphysik will die Physik hinter den Phänomenen, die in unserer Umwelt auftreten, verstehen, damit tut sie das, womit die Physik als Wissenschaft einmal angefangen hat. Natürlich sind Phänomene wie Lauf der Sonne, Ebbe und Flut oder die Entstehung von Wind und Wetter heute in (fast) allen Einzelheiten verstanden, die Umweltphysik wendet sich daher neuen Fragen zu.

Damals ging ich "zunächst" an das Institut für Atmosphärische Chemie (ICH-3) der Kernforschungsanlage Jülich (heute: Forschungszentrum Jülich, KFA) zu dem damals frisch berufenen

Direktor dieses Institutes, Dieter Ehhalt. Akademischer Betreuer der Arbeit war der Direktor des neuen Heidelberger Institutes, Karl Otto Münnich. Diese beiden akademischen Lehrer haben meinen Blick auf die Wissenschaft – zusammen mit Jim N. Pitts, von dem gleich noch die Rede sein wird - stark geprägt. Insbesondere habe ich von ihnen gelernt, dass auch komplexe Systeme in der Regel so weit vereinfacht werden können, dass man sich ein physikalisches Modell davon machen kann, das noch die wichtigsten Aspekte des Systems wiedergibt. Gerade in der Umweltforschung, in der ja in der Regel komplexe Zusammenhänge herrschen, erwies sich das als wertvoll.

Bei der Arbeit ging es darum herauszufinden durch, welche Prozesse das SO_2 , das damals auch in Deutschland noch reichlich in die Atmosphäre emittiert wurde, wieder aus der Atmosphäre entfernt wird. Es stellte sich heraus, dass die direkte Ablagerung des Gases am Boden, die "trockenen Deposition", die Hauptsenke für SO_2 darstellt. Ich begann daher mit der Untersuchung dieses Prozesses. Die Messungen von SO_2 nahm ich auf Anraten der Fachleute zunächst mit nasschemischen Methoden vor, fand aber bald, dass dies höchst mühsam ist, vor allem da ich bis zu acht mal am Tag den Jülicher Messturm (Höhe 120m) erklettern musste um auf drei Plattformen die Proben zu wechseln. So begann ich auf Anregung von Dieter Perner in Jülich mit der spektroskopischen Messung von Spurengasen. Diese Methode erlaubt die "Fernerkundung" von Eigenschaften der Atmosphäre, hier dem Spurengasgehalt, aus größerer Entfernung. Fernerkundung ist die Alternative zu in-situ Messungen von z.B. Spurengaskonzentrationen durch Einsaugen von Luft und Analyse im Gerät. Beide Methoden sind uns Menschen sehr geläufig: Unsere Nase erlaubt "in-situ" Messungen von Spurengasen, unsere Augen ermöglichen "Fernerkundung", z.B. des Aerosolgehalts der Atmosphäre.

Es stellte sich schnell heraus, dass spektroskopische Labormethoden nicht ohne weiteres für die Atmosphäre geeignet sind, zumindest nicht für schwache Absorber wie SO_2 und viele andere interessanten Gase; so kamen wir zur Entwicklung der optischen

Langpfad-Spektroskopie. Die Idee war nicht die totale Absorption des Gases zu messen, sondern stattdessen die Änderung der Absorption mit der Wellenlänge, im einfachsten Fall die Differenz der Absorption in Bereichen, in denen das Molekül schwach absorbiert, und der Absorption etwa im Zentrum einer Absorptionsbande zu analysieren. Die Methode wurde daher bald unter dem Namen "Differenzielle Optische Absorptions-Spektroskopie", DOAS, weltweit bekannt. Im Detail ist das Auswerteverfahren komplizierter: Es werden Ausschnitte des Absorptionsspektrums (Spektralintervalle von einigen 10 bis einigen 100 nm) aufgenommen. Dann wird durch Aufsummieren der (bekannten) Absorptionen aller in diesem Spektralbereich absorbierenden Gase ein synthetisches Spektrum erstellt und möglichst genau an das gemessene Spektrum angepasst, dabei werden kontinuierliche Absorber in der Regel durch ein Polynom (oder eine andere "glatte" Funktion) beschreiben, zudem müssen bei Messungen mit Sonnenlicht auch die Raman-Streuung in der Atmosphäre und eine Reihe weiterer Effekte berücksichtigt werden (Details des Verfahrens sind bei Platt und Stutz 2008 und auch bei Platt et al. 1997 beschrieben). Es zeigte sich bald dass das DOAS-Verfahren viel leistungsfähiger war, als wir zunächst annahmen. Die Natur war offenbar auf unserer Seite, die Absorptionsspektren vieler für die Atmosphäre wichtiger Gase sind – wie in Abb. 1 zu sehen – sehr unterschiedlich, daher können die Beiträge einzelner Komponenten in überlagerten Spektren auch dann unterschieden werden, wenn mehrere Gase gleichzeitig in der Luft vorkommen. Zudem ist das Verfahren fast völlig immun gegen breitbandige Absorption, etwa durch Aerosole (Feinstaub), oder gegen Alterung der Optik. Gleichzeitig ist das "Residuum" der DOAS-Auswertung, also die Differenz zwischen dem gemessenen und dem modellierten Spektrum, neben dem Fehler der Anpassung ein sehr gutes Maß für die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Spurengasbestimmungen. Insbesondere gibt ein großes Residuum eine Warnung, dass bei der Messung Probleme aufgetreten sein könnten.

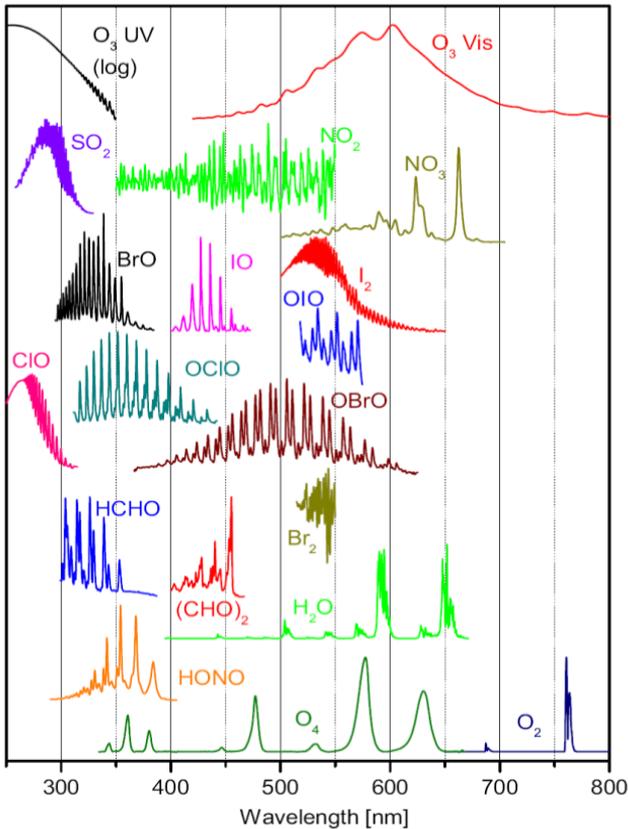


Abb. 1. Referenzspektren einiger Gase, die für die Atmosphärenforschung von Bedeutung sind. Beispiele: Ozon (O_3), Schwefeldioxid (SO_2), Stickstoffdioxid (NO_2), Salpetrige Säure ($HONO$) und Brommonoxid (BrO).

Generell kann das DOAS Verfahren „aktiv“ oder „passiv“ betrieben werden. Bei der aktiven Variante werden künstliche Lichtquellen, anfangs Glühlampen oder Bogenlampen, heute LEDs oder Laserangeregte Lichtbogen (Laser Driven Light Source, LDLS) verwendet. Die Strahlung wird durch ein kleines Teleskop kollimiert

(also in einer Scheinwerfer-Optik gebündelt) und über die Meßstrecke zum Empfänger geschickt.

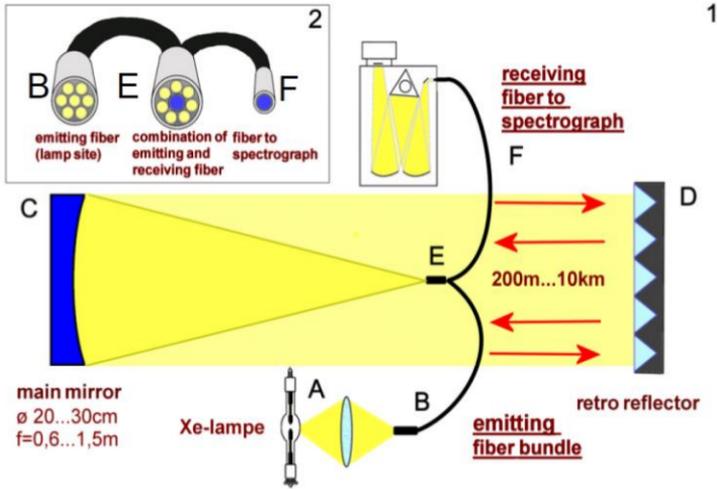


Abb. 2. Schematische Darstellung eines modernen aktiven DOAS Systems. Die Messstrecke wird zweimal durchlaufen, und alle komplexen und elektrische Leistung benötigenden Teile sind an einem Ende der Messstrecke von typischerweise einigen 100m bis einigen km Länge zusammengefasst (nach A. Merten et al. 2009).

Anfangs verwendeten wir fast immer diese Anordnung, heutige Systeme haben dagegen Retro-Reflektoren (z.B. Katzenaugen) um das Licht zur Quelle zurückzuwerfen, wo es dann typischerweise vom gleichen Teleskop aufgefangen und dem Detektor (Spektrograph) zugeführt wird. Ein modernes aktives DOAS System ist Abb. 2 schematisch dargestellt. Aktive DOAS Instrumente bestimmen demnach den Mittelwert der Spurengaskonzentrationen über die Messstrecke.

Von Höhenstrahlquarks zur Atmosphärenforschung

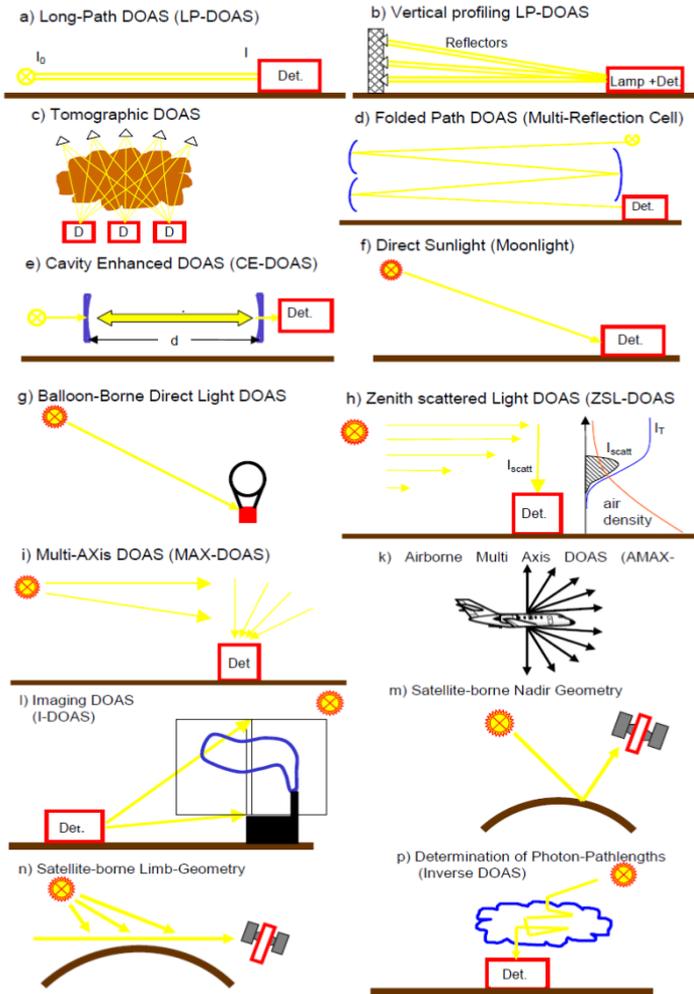


Abb. 3. Die vielen Varianten der aktiven, a) – e), und passiven, f) – p), DOAS – Anwendungen.

Im Gegensatz dazu verwenden passive DOAS Instrumente natürliche Lichtquellen, in aller Regel die Sonne. Das eröffnet eine ganze Reihe interessanter Anwendungen (siehe Abb. 3), z.B. können bei Messung von in der Atmosphäre gestreutem Sonnenlicht die Emission von Gasen aus Punktquellen (Schornsteine, Vulkane, etc.) oder auch Vertikalprofile von Spurenstoffkonzentrationen bestimmt werden (MAX-DOAS).

Eine weitere wichtige Anwendung der passiven DOAS ist auch die Messung von Spurenstoffen von Flugzeugen oder Satelliten aus, davon wird später noch die Rede sein.

Doch nun zurück zum Jülicher Messturm: Mit der neuen DOAS waren die Messungen dann recht einfach, ich installierte Spiegel auf drei Plattformen (30, 80 und 120 m Höhe) des Turms und richtete dann den Lichtstrahl der Reihe nach auf die Spiegel, etwa wie in Abb. 3b dargestellt. Die spektrale Analyse des reflektierten Lichtes ergab die SO₂ Konzentrations-Mittelwerte über die drei Höhenintervalle, die sich leicht in mittlere Konzentrationen in den drei Höhen umrechnen ließen. Damit waren dann quasi-kontinuierliche Messungen möglich, deren Auswertung u.a. ergab, dass ein Großteil des emittierten SO₂ tatsächlich nicht in der Atmosphäre abgebaut wird sondern direkt (innerhalb etwa eines Tages) mit dem Erdboden reagiert. Mit diesen und anderen Ergebnissen promovierte ich im Jahre 1977 (Platt 1977).

Nach der Promotion wechselte ich endgültig nach Jülich, wo ich mich der Untersuchung weiterer atmosphärischer Spurengase, (OH-Radikale, Formaldehyd), mit der DOAS-Methode widmete.

Ausgangspunkt war damals die Frage, welche chemischen Reaktionen sich in verschmutzter Luft eigentlich abspielen und wie die in die Atmosphäre emittierten Gase umgewandelt und letztlich wieder abgebaut werden. Damals war schon klar, dass es zwei verschiedene Arten von Luftverschmutzung gibt, den "Londoner Smog", der schon im 19. Jahrhundert bekannt war und in den 1950er Jahren in London Tausende von Todesopfern forderte. Damals entstand auch der Name aus "Smoke" + "Fog". Es stellte sich heraus, dass dieser Smog überwiegend aus Schwefelsäure-Aerosol

bestand; der Schwefel kam durch Holz- und Kohleheizung als SO_2 in die Atmosphäre. Dagegen war der seit den 1960er Jahren bekannte "Los Angeles Smog" komplexer zusammengesetzt, die wirksamen Bestandteile waren Kohlenmonoxid, Stickoxide, Ozon und organisches Aerosol, zudem spielte Photochemie eine Rolle. Die ersten beiden Spezies entstammten zusammen mit Kohlenwasserstoffen überwiegend aus Kraftfahrzeug-Abgasen. Ozon und organisches Aerosol bildete sich dann durch photochemische Prozesse in der Atmosphäre.

Leider war das Vorkommen beider Smog-Varianten nicht auf London bzw. Los Angeles beschränkt, im Gegenteil, fast alle westlichen Großstädte (so auch Mannheim und Heidelberg) litten in verschiedenen Graden unter dem Problem. Im Gegensatz zum "London Smog" bereitete der "Los Angeles Smog" den Forschern doch einige Verständnisprobleme. So war bis in die 1970er Jahre die Lehrmeinung, dass das Ozon in der Troposphäre (also den untersten ca. 10 km der Atmosphäre) seinen Ursprung nur in der Stratosphäre haben kann. Denn nur bis in diese Höhe dringt genügend kurzwellige UV-Strahlung vor, die ein O_2 -Molekül spalten kann. Die entstehenden Sauerstoffatome rekombinieren dann mit O_2 zu O_3 . Im Übrigen interessierte man sich damals wenig dafür, was mit den in die Atmosphäre emittierten Spurenstoffen geschah. So ging zu dieser Zeit durch die Presse, dass mittlerweile schon am Südpol Kohlenmonoxid (CO) in der Atmosphäre nachzuweisen war. Es war klar, dass Verbrennungsmotoren CO abgeben (damals einige 10 g pro km), und eine einfache Rechnung (die aber offenbar vorher niemand angestellt hatte) zeigte, dass die insgesamt durch Automobile emittierte Menge auf die ganze Atmosphäre verteilt bereits nach wenigen Jahren zu lebensgefährlichen Konzentrationswerten führen würde. Darüber hatte sich vorher niemand Gedanken gemacht, aber offenbar hatten wir Glück und es gab einen Mechanismus, der CO wieder aus der Atmosphäre entfernte. Es war aber vor 1970 noch recht unklar wie dieser Prozess verlaufen könnte.

Natürlich ist CO brennbar, d.h. bei hoher Temperatur reagiert es mit O_2 zu CO_2 . Allerdings wurde schnell gezeigt, dass die Reaktion bei Zimmertemperatur unmessbar langsam ist und für den Abbau von CO keine Rolle spielt; das gleiche ergab sich für die Reaktion mit O_3 und mögliche direkte photochemische Oxidation. Ähnliche Erklärungsprobleme bestanden bezüglich des Abbaus von Kohlenwasserstoffen und Stickoxiden. Dazu kam noch ein Problem: Im "Los Angeles Smog" bildeten sich große Mengen von Ozon, die nicht aus der Stratosphäre stammen konnten, wie war das zu erklären?

Die Lösung wurde schließlich von Hiram Levy III und Paul Crutzen (der später u.a. dafür den Nobelpreis erhielt) gefunden. Die Theorie der beiden war dass sich durch UV-Photolyse von Ozon angeregte Sauerstoff Atome ($O(^1D)$) bilden können, die mit atmosphärischem Wasserdampf zu OH "Radikalen" reagieren. Freie Radikale sind Molekülbruchstücke, die ein ungepaartes Elektron aufweisen (in den Worten der klassischen Chemie eine nicht-abgesättigte Bindung) und damit sehr reaktiv sind. Es ist schon mehr als ein Jahrhundert bekannt, dass fast alle komplexen Reaktionen (z.B. die Knallgas Explosion oder die Verbrennung von Kohlenwasserstoffen) durch Kettenreaktionen freier Radikale bewirkt werden. Auch das OH-Radikal war schon seit den 1930er Jahren bekannt, aber nicht seine Rolle in der Atmosphäre.

Die neue Theorie erklärte fast alles in der Atmosphärenchemie:

- Die Oxidantienbildung in der Troposphäre. O_3 etwa entsteht durch die Reaktion $HO_2+NO \rightarrow NO_2+OH$, gefolgt von der NO_2 Photolyse zu NO und O, wobei das Sauerstoff Atom (in einer druckabhängigen Reaktion) entsprechend $O+O_2 \rightarrow O_3$ zur Ozonbildung führt. OH-Radikale werden ihrerseits durch zahlreiche Reaktionen in HO_2 Radikale überführt. Selbstreaktion von HO_2 führt auch zur H_2O_2 -Bildung.
- Den Abbau von Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffen. In der Folge angestellte Messungen zeigten, dass die verschiedenen Kohlenwasserstoffe in Abgasfahnen von Städten

gerade entsprechend ihrer OH-Reaktivität (die im Labor bestimmt wurde) abgebaut wurden.

- Die Bildung von Formaldehyd und weiteren Aldehyden
- Den Abbau von Stickoxiden durch $\text{NO}_2 + \text{OH} \rightarrow \text{HNO}_3$ (druckabhängig).

Soweit war nun alles wunderbar, zumal Labormessungen und Beobachtungen zunehmend bewiesen, dass das Bild auch quantitativ stimmt.

Zum Beispiel sagen die Modellrechnungen die Ozonbildung als Funktion von Stickoxid- und Kohlenwasserstoffkonzentration so voraus wie sie in aufwendigen Messreihen vorher bestimmt wurde. Auch bestimmte Eigenheiten der OH-getriebenen Selbstreinigung der Atmosphäre wurden richtig modelliert. So etwa, dass mit zunehmender Luftbelastung durch Schadstoffe (z.B. durch Stickoxide) die OH-Konzentration zunächst erheblich ansteigt, die Atmosphäre also auf zunehmende Verschmutzung mit beschleunigtem Abbau der Schadstoffe reagiert. Ab einer bestimmten Grenzbelastung nimmt die OH-Konzentration aber mit steigender Belastung wieder ab, das erklärt, dass der Smog relativ "plötzlich" einsetzt wenn die Emissionen einen bestimmten Grenzwert überschreiten.

Nur eine Kleinigkeit fehlte bei diesen Betrachtungen, niemand hatte je OH-Radikale (oder HO_2 Radikale) in der Atmosphäre nachgewiesen. Natürlich war das auch keine einfache Aufgabe, denn das vorhergesagte (Volumen) Mischungsverhältnis von OH-Radikalen betrug nur 10^{-13} (entspricht einigen 10^6 Molekülen/ cm^3 , zum Vergleich: O_3 kommt in Bodennähe in Mischungsverhältnissen von 10^{-8} bis 10^{-7} vor).

Diese Lücke im Weltbild der Atmosphärenchemiker eröffnete einen Wettstreit um den Nachweis von OH-Radikalen an dem sich zahlreiche internationale Arbeitsgruppen mit verschiedenen Nachweismethoden beteiligten. Der damalige Leiter des Institutes in Jülich, Dieter Ehhalt, war an dem Thema sehr interessiert und unterstützte uns ganz außerordentlich. Wir versuchten es natürlich mit DOAS. Das hätten wir vermutlich nicht getan, wenn wir gleich

um die Schwierigkeiten gewusst hätten; so war (ausnahmsweise) ein Laser (Ar-Ionen Laser gepumpter frequenzverdoppelter Farbstofflaser) als Lichtquelle notwendig, und neue Verfahren zum Nachweis sehr geringer optischer Dichten mussten erfunden werden.

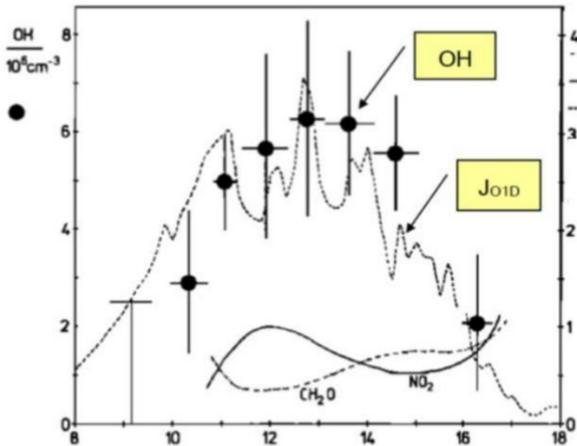


Abb. 4. Aktiv-DOAS Messungen von OH Radikalen am Schauinsland im Schwarzwald (schwarze Punkte, linke Skala). Tagesgang der OH-Konzentration und der Photolysefrequenz von Ozon (zur Bildung von $O(^1D)$) am 25. Juni 1984 (rechte Skala). (U. Platt et al. 1988).

Letztendlich konnten wir aber gegen Ende der 1970er Jahre den Nachweis der Existenz von OH-Radikalen in der Atmosphäre führen. Ein Beispiel des OH Tagesganges in Reinluft ist in Abb. 4 dargestellt, man erkennt deutlich die Parallelität von UV-Strahlung und OH-Konzentration. Heute gilt der OH-Nachweis durch DOAS als "Gold Standard", obwohl andere Methoden (vor allem Laser-Induzierte Fluoreszenz) sich in der Folge als technisch einfacher erwiesen.

Die folgenden Jahre (1979 bis 1981) verbrachte ich überwiegend als Gastwissenschaftler am "Statewide Air Pollution Research Center (SAPRC)" an der University of California/Riverside (UCR). Riverside, etwa 100 km östlich von Los Angeles gelegen, war damals einer der globalen Brennpunkte des "Los Angeles" Smogs, dessen Untersuchung dem damalige Direktor des SAPRC, James N. Pitts, sehr am Herzen lag. Dort fand ich in der Tat neue Anwendungen des DOAS Prinzips, erstmals gelang der Nachweis von Nitrat-Radikalen (NO_3) in der Troposphäre. Dieses freie Radikal war zwar im Labor bereits untersucht worden und seine starke Oxidationsfähigkeit war bekannt. NO_3 ist zwar ein um Größenordnungen schwächeres Oxidationsmittel als OH (gemessen an der Reaktionsgeschwindigkeit etwa mit Kohlenwasserstoffen), aber sein Mischungsverhältnis (bis etwa 10^{-10}) in verschmutzter Luft kann auch um Größenordnungen höher werden als das von OH. Ein interessantes Detail ist auch, dass OH als direkt photochemisch erzeugte Spezies seine maximale Konzentration um die Mittagszeit annimmt (vergl. Abb. 4), während NO_3 sehr rasch photochemisch zerstört wird und daher bei Nacht höhere Konzentrationen erreicht als am Tage. In gewisser Weise repräsentieren die beiden Radikale also die Tag- bzw. Nachtseite der Atmosphärenchemie.

Eine weitere "lichtscheue" Verbindung, deren erstmaliger Nachweis uns gelang, ist die Salpetrige Säure (HONO bzw. HNO_2), die sich durch bis heute im Detail nicht restlos aufgeklärte Prozesse an Oberflächen (von Gebäuden oder Feinstaubpartikeln) aus Stickoxiden bildet. Da bei derartigen Reaktionen zwei Phasen (in diesem Fall die Gasphase und die feste Phase) beteiligt sind werden sie auch "heterogene" Reaktionen genannt. Was beobachtet wird ist jedenfalls, dass die HONO-Menge in der Atmosphäre im Laufe der Nacht kontinuierlich zunimmt und dann nach Sonnenaufgang innerhalb etwa einer Stunde auf sehr niedrige Werte abfällt. Dieser Abfall ist durch Photolyse leicht zu erklären, interessanterweise geschieht dies nach der Formel $\text{NONO} + \text{Licht} \rightarrow \text{OH} + \text{NO}$. Damit wird am Morgen ein Puls von OH freigesetzt, der dann wiederum

zu Ozonbildung und weiterer OH-Produktion führt. Ein Prozess, der auch als "Morgenwäsche" der Atmosphäre bekannt wurde. Darüber hinaus ergaben die Untersuchungen beider Spezies (NO_3 und HONO) erste Hinweise auf wichtige, nicht-photochemische Prozesse in Smogsituationen.

Wieder zurück in Jülich habilitierte ich mich 1984 in Geophysik am Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Köln über oxidierte Stickstoffverbindungen in der Atmosphäre (Platt 1984). Dieses Arbeitsgebiet bildete in den folgenden Jahren den Schwerpunkt meiner Forschungen, in der Tat arbeitet meine Arbeitsgruppe bis heute auch an diesem zentralen Thema der Luftchemie.

Nach meiner Berufung 1989 an die Universität Heidelberg auf einen Lehrstuhl für Experimentalphysik und als Direktor am Institut für Umweltphysik stand allerdings zunächst ein ganz anderes Thema im Vordergrund. Im Jahr 1985 schlug eine Veröffentlichung dreier britischer Forscher (Farman et al. 1985) wie eine Bombe ein. Die Drei beschrieben den jährlich im antarktischen Frühling wiederkehrenden fast vollständigen Verlust der stratosphärischen Ozonschicht. Dieses Phänomen, das in der Öffentlichkeit rasch als antarktisches "Ozonloch" bekannt wurde, kam für die Wissenschaft völlig überraschend und war der Startschuss für eine Reihe groß angelegter Forschungsvorhaben. Die Theoretiker überboten sich zunächst mit den erstaunlichsten Theorien zur Erklärung der Ursachen des Ozonverlustes. Erfreulicherweise konnte durch den experimentellen Großeinsatz in den folgenden Jahren relativ rasch Licht in das Dunkel gebracht werden und Anfang der 1990er Jahre war klar, dass halogen-katalysierte Reaktionen zum Ozonabbau führten, wobei Chlor- und Bromverbindungen die Hauptrolle spielen. Als Quellen der Halogenverbindungen wurden vollhalogenierten Methane und Ethane (FCKW bzw. CFM) identifiziert, die als Treibgas in Sprühdosen und als Arbeitsmittel in Kältemaschinen und Klimaanlage in gewaltigen Mengen produziert und auch in die Atmosphäre entlassen wurden.

Hierzu ist zu sagen, dass seit den 1970er Jahren eine an Intensität zunehmende Diskussion über die Schädigung der stratosphärischen Ozonschicht durch Kältemittel (FCKW) geführt wurde. Es ging um die vorhergesagte Ausdünnung der Ozonschicht, die den ganzen Globus umspannt und alle auf dem Land lebenden Pflanzen und Tiere vor der kurzwelligen UV-Strahlung (zwischen 200 und 300 nm) schützt. Die Hochrechnungen der Chemiemodelle gingen von damals wenigen Prozent Abnahme der O₃-Schichtdicke aus, was rein rechnerisch aber zu tausenden von zusätzlichen Hautkrebs Erkrankungen pro Jahr führte. Wie auch in anderen Fällen (saurer Regen, Benzinblei, Smog, Klimaerwärmung) riefen die zur Abhilfe vorgeschlagenen Maßnahmen, in diesem Falle ein Ersatz der FCKW durch andere Stoffe, Interessenten auf den Plan, die die Folgen der FCKW-Emissionen herunterzuspielen suchten (so wie wir das heute bei Treibhausgasen oder Stickoxidemission beobachten). Der Streit wurde zum Teil in großer Schärfe geführt, eine Beschreibung findet sich u.a. in dem Buch "Ozone War" von Lydia Dotto und Harold Schiff (Dotto und Schiff 1978). In dieser Situation waren natürlich wissenschaftlich belastbare Daten und Erkenntnisse gefragt. Die konnten erfreulicherweise relativ rasch vorgelegt werden, und bis Anfang der 1990er Jahre war der Sachverhalt (wie wir heute wissen) in allen wesentlichen Zügen klar. Die FCKW werden in der Stratosphäre photochemisch abgebaut und setzen die Halogene frei; die bilden zunächst gegenüber O₃ inerte Halogenwasserstoffe (also HF, HCl, HBr). Reaktionen an der Oberfläche von polaren stratosphärischen Wolkenpartikeln wandeln diese dann in reaktive Halogene (Cl₂, Cl-Atome bzw. Br₂, Br) um, die dann den Ozonabbau katalysieren. Der Nachweis von reaktiven Cl- bzw. Br-Verbindungen in der polaren Stratosphäre konnte wiederum u.a. durch passive DOAS-Messungen geführt werden (siehe z.B. Abb. 3i).

Das "Ozonloch" Phänomen war nicht von der Wissenschaft vorausgesagt worden (obwohl der Prozess des stratosphärischen O₃-Abbaus durch FCKW prinzipiell durchaus bekannt war). Offenbar allgemein übersehen worden war die Möglichkeit von

Reaktionen an der Oberfläche von stratosphärischen Wolken-
teilchen – also wieder heterogene Reaktionen. Dieses Beispiel lehrt
uns einmal mehr, dass die Vorgänge im Erdsystem sehr komplex
sein können und dass das System durchaus große Überraschungen
für uns bereithalten kann. Allerdings war das Ozonloch, bei dem
im antarktischen Frühling mehr als 2/3 der Ozonsäule ver-
schwanden, ein so dramatisches Phänomen, dass fast allen
Akteuren der Ernst der Lage klar wurde. Die Folge war, dass
aufgrund mehrerer internationaler Abkommen (Montreal Proto-
koll und Folgevereinbarungen) die FCKW mittlerweile praktisch
vollständig durch andere – weniger ozonschädliche – Stoffe ersetzt
wurden. Die FCKW sind allerdings sehr langlebig und man
erwartet, dass sich das Ozonloch erst in der zweiten Hälfte des 21.
Jahrhunderts wieder schließen wird.

Für uns war die Ozonlochforschung nicht nur eine aufregende
Zeit mit Flugzeugmessungen in der Arktis, sondern auch eine
Anregung, die damals völlig unbekannte Halogenchemie der
Troposphäre (also der untersten Atmosphärenschicht, die bis
ca. 12 km reicht) näher unter die Lupe zu nehmen. Um die Jahr-
tausendwende kam dieses ebenfalls bis heute aktive Forschungs-
gebiet in Heidelberg dazu.

Es wurde nach und nach klar, dass die Freisetzung reaktiver
Halogenverbindungen zwar nicht global erfolgt, aber in großen
und vor allem höchst unterschiedlichen Bereichen der Tropo-
sphäre eine wichtige Rolle spielt:

- In der polaren unteren Troposphäre
- In Küstengebieten
- Über Salzseen
- In Vulkanfahnen

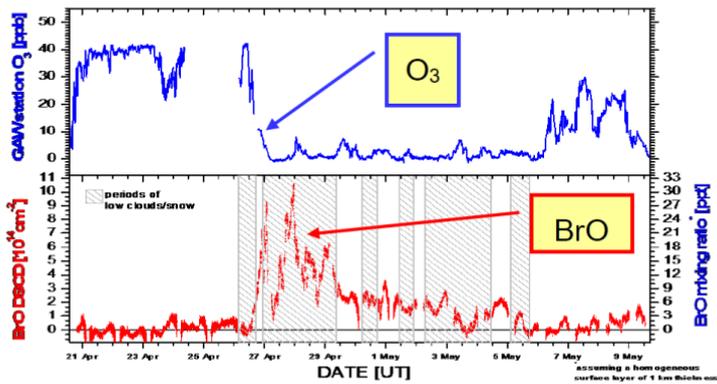


Abb. 5. Eine Episode mit hohen Konzentrationen von reaktivem Brom (BrO) in der Hocharktis (Alert, Kanada), nach G. Hönninger und U. Platt (2002).

Interessant war die Frage nach Gemeinsamkeiten dieser ganz verschiedenen Bereiche der Atmosphäre. Offenbar waren es die Verfügbarkeit von Halogeniden in Form von (See)Salz bzw. Halogenwasserstoffen (in Vulkanfahnen) und eine saure Umgebung. In Küstengebieten spielen offenbar auch biologische Prozesse eine Rolle. Genauere Untersuchungen im Rahmen zahlreicher Messexpeditionen zeigten, dass in den meisten Bereichen ein einziger Prozess für den Löwenanteil der Halogenfreisetzung verantwortlich ist. Dabei bildet sich aus flüchtigen Bromverbindungen Hypobromige Säure (HOBr), die in der Lage ist, Bromid (aus Salz bzw. HBr) zu Br_2 zu oxidieren. (Hypobromid oder Hypochlorid (z.B. NaOCl) ist bekannt als aktiver Bestandteil von Schnuller- und Gebissreinigern und dient auch zur Desinfektion von Schwimmbadwasser.) Sonnenlicht spaltet molekulares Brom (Br_2) in zwei Atome, die sich gleich darauf wieder in zwei HOBr Moleküle umwandeln. Solange dieser Prozess läuft wächst die Br-Konzentration in der Gasphase exponentiell (natürlich auf Kosten des Bromid-Reservoirs). Die Ähnlichkeit zu chemischen Explosionen, bei denen die Konzentration freier Radikale ebenfalls

exponentiell anwächst, führte zur Bezeichnung "Bromexplosion" für diesen Vorgang. Ein Beispiel aus der Arktis ist in Abb. 5 zu sehen. Ähnliche Vorgänge spielen sich auch am Toten Meer ab, im gesamten Becken verschwindet im Sommer ab der Mittagszeit das Ozon vollständig.

In den 1990er Jahren kam die Satellitenfernerkundung der Atmosphärenzusammensetzung hinzu (siehe Abb. 3m, n). Nachdem das DOAS Verfahren sich als so erfolgreich erwiesen hatte, konnten wir die European Space Agency (ESA) überzeugen, dass passive DOAS Messungen sich hervorragend für die Erkundung der unteren Atmosphäre vom Weltraum aus eignen müssten. Dass dies gelang ist vor allem der Hartnäckigkeit meines Kollegen John Burrows (damals in Mainz, heute in Bremen) und der engagierten Fürsprache von Paul Crutzen, der das Gewicht seines Nobelpreises in die Waagschale warf, zu verdanken. Dem ersten höchst erfolgreichen Instrument Global Ozone Monitoring Experiment (GOME), das 1995 an Bord des Earth Research Satellite-2 (ERS-2) gestartet wurde, folgten bis heute ein halbes Dutzend ähnlicher Instrumente. Sie liefern kontinuierlich Weltkarten der Luftverschmutzung (Stickoxide, Aldehyde, Kohlenmonoxid, etc.), der Kohlendioxid und Methanverteilung sowie viele andere Daten über atmosphärische Spurenstoffe (ein Beispiel der NO₂ Verteilung ist in Abb. 6 zu sehen). Insbesondere durch die Verfügbarkeit der globalen Spurenstoffverteilungen wurde eine Revolution in der Modellierung der Atmosphärenchemie eingeleitet, die viel zu unserem heute viel besseren Verständnis der Atmosphärenchemie beiträgt.

Wir fanden auch heraus, dass sich das vorherrschende religiöse System einer Region vom Weltall aus feststellen lässt, indem wir den mittleren Wochengang der Luftverschmutzung beobachteten. Am jeweiligen Ruhetag (Sonntag, Freitag oder Samstag für christlich, muslimisch bzw. jüdisch geprägte Gesellschaften) ist die Emission und damit die Luftbelastung deutlich geringer.

Auch die Freisetzung von Halogenen in Polargebieten lässt sich sehr gut von Satelliten aus verfolgen (siehe u.a. Burrows et al. 2011).

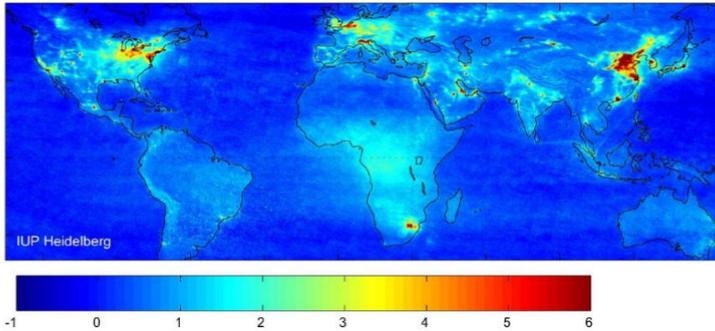


Abb. 6. Weltkarte der mittleren troposphärischen NO_2 Säulendichte (in 10^{15} Molekülen/ cm^2), Januar 2003 – Juni 2004, (S. Beirle, U. Platt, T. Wagner, Institut für Umweltphysik, Universität Heidelberg).

Was die Halogenfreisetzung angeht so entwickelte sich eine explorative Expedition auf die Monserat Insel zum Soufrier Hills Vulkan zu einem weiteren Forschungsgebiet unserer Gruppe.

Zunächst war die Idee nur, mittels – natürlich – DOAS die Bromemission von Vulkanen zu bestimmen, was auch gelang (vergl. Bobrowski et al. 2003). Danach zeigte sich dass diese Messungen eine ideale Methode sind (quasi) kontinuierlich die Gasemission von Vulkanen (und auch anderen Punktquellen wie Schornsteinen) mit guter Genauigkeit zu messen. Diese Anwendung ermöglichte eine Reihe von Untersuchungen zum vulkanischen Entgasungsverhalten und führte schließlich in Zusammenarbeit mit meinem Göteborger Kollegen Bo Galle und vielen Vulkanobservatorien weltweit zum Aufbau des "Network for the Observation of Volcanic and Atmospheric Change (NOVAC)", das mittlerweile mehr als hundert automatisch arbeitende Spektrometer an 36 Vulkanen umfasst (siehe Karte in Abb. 7).



Abb. 7. Das "Network for Observation of Volcanic and Atmospheric Change" (NOVA-C Netzwerk) umfasst mittlerweile mehr als 100 Spektrometer an 36 Vulkanen in 21 Ländern (ergänzte Karte nach B. Galle et al. 2010).

Zum Schluss möchte ich noch bemerken, dass ich es immer als ein großes Privileg ansah mit intelligenten und kreativen jungen Menschen zusammenarbeiten zu dürfen. Dabei war es uns auch vergönnt, das eine oder andere Mosaiksteinchen zur Aufklärung der Prozesse in unserer komplexen Umwelt beizutragen.

Literatur

- Bobrowski N., Hönninger G., Galle B., and Platt U. (2003), Detection of Bromine Monoxide in a Volcanic Plume, *Nature* 423, 273-276.
- Burrows J. P., Platt U., and Borrell P., Eds. (2011), *The Remote Sensing of Tropospheric Composition from Space*, 158 Figures and 23 Tables, Springer, Heidelberg, ISBN 978-3-642-14790-6, DOI 10.1007/978-3-64214791-3.
- Dotto L. and Schiff H. (1978), *The Ozone War*, Doubleday, 342 Seiten.

- Farman J. C., Gardiner B. G., and Shanklin J. D. (1985), Large losses of total ozone in Antarctica reveal seasonal ClO_x/NO_x interaction, *Nature* 315, 207-210.
- Galle B., Johansson M., Rivera C., Zhang Y., Kihlman M., Kern C., Lehmann T., Platt U., Arellano S., and Hidalgo S. (2010), Network for Observation of Volcanic and Atmospheric Change (NOVAC) – A global network for volcanic gas monitoring: Network layout and instrument description, *J. Geophys. Res.* 115, D05304.
- Hönninger G. and Platt U. (2002), The Role of BrO and its Vertical Distribution during Surface Ozone Depletion at Alert, *Atmos. Environ.* 36, 2481-2489.
- Merten A., Tschirter J., and Platt U. (2011), New Design of DOAS-Long-path Telescopes based on fiber optics, *Applied Optics* 50, (5), 738-754.
- Platt U. (1977), Mikrometeorologische Bestimmung der SO_2 -Abscheidung am Boden, Doktorarbeit, Universität Heidelberg.
- Platt U. (1984), Neue Erkenntnisse zur Chemie der Stickoxide in der Atmosphäre, Habilitationsschrift, Universität Köln.
- Platt U., Rateike M., Junkermann W., Rudolph J., and Ehhalt D. H. (1988), New tropospheric OH measurements, *J. Geophys. Res.* 93, 5159-5166.
- Platt U., Marquard L., Wagner T., and Perner D. (1997), Corrections for zenith scattered light DOAS, *Geophys. Res. Lett.* 24, 1759-1762.
- Platt U. and Stutz J. (2008), Differential Optical Absorption spectroscopy, Principles and Applications, XV, Springer, Heidelberg, 597 pp, 272 illus., 29 in color. (Physics of Earth and Space Environments), ISBN 978-3-540-21193-8.

Vortrag gehalten an der Fakultät für Physik und Astronomie der Universität Heidelberg am 16. November 2017.

Mit diesem Band endet die Reihe „Heidelberger Physiker berichten“ vorläufig. Mit einer Fortsetzung in einigen Jahren kann aber gerechnet werden, wenn ein neuer Kreis von Emeriti nachgewachsen ist. Der vorhergehende Band 4 hatte den Fokus auf wichtigen Anwendungen, die aus der Physik hervorgegangen sind. Der vorliegende Band 5 hingegen dokumentiert noch einmal die volle Breite der in Heidelberg betriebenen Physik: von den allergrößten Dimensionen im Kosmos zu den allerkleinsten Skalen der Elementarteilchen, von den höchsten Energien machtvoller Beschleuniger zu den niedrigsten Energien ultrakalter Neutronen, von den (nur scheinbar) einfachen Systemen des Nukleons zu den höchst komplexen Systemen der Umwelt und des menschlichen Gehirns.



**UNIVERSITÄT
HEIDELBERG**
ZUKUNFT
SEIT 1386

ISBN 978-3-946531-85-2



9 783946 531852