

Ulrich Haeberlen



# Ulrich Haeberlen

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

*Ulrich Haeberlen*

## **Von der Kerninduktion zur MRT**

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

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

Zu mir:

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

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

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

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

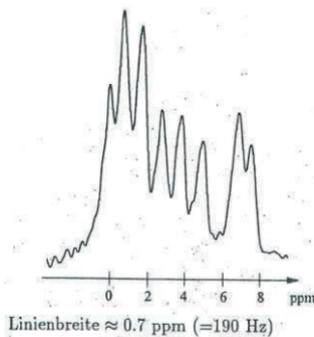
Nach der Promotion suchte ich Rat bei dem damals noch jungen Prof. Wolf. Der sagte mir: "Sie müssen so schnell wie möglich aus Stuttgart verschwinden". Wörtlich so, das habe ich behalten. Das war – so empfand ich es – brutal ausgedrückt, ich hatte mir in Stuttgart doch nichts zuschulden kommen lassen,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

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

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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

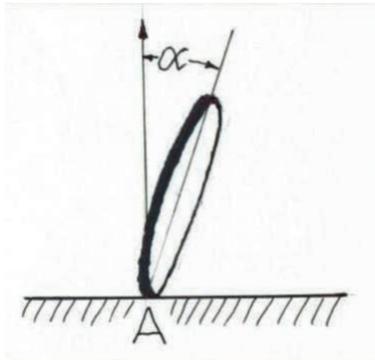
Zu den Aufgaben eines Praktikumsleiters gehörte es, die Versuchsprotokolle der Studenten durchzusehen und schließlich mit seiner Unterschrift zu testieren. Erst dann galt der Versuch als erfolgreich durchgeführt. Eines Tages meinte ich, einer Studentin das Testat verweigern zu müssen. Warum, das habe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

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

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

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

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



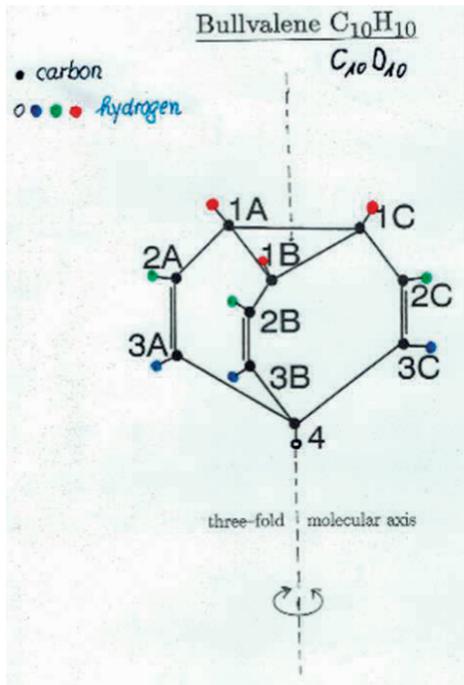
**Abbildung 2.** Auf einer Kreisbahn rollender Reifen.

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

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

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

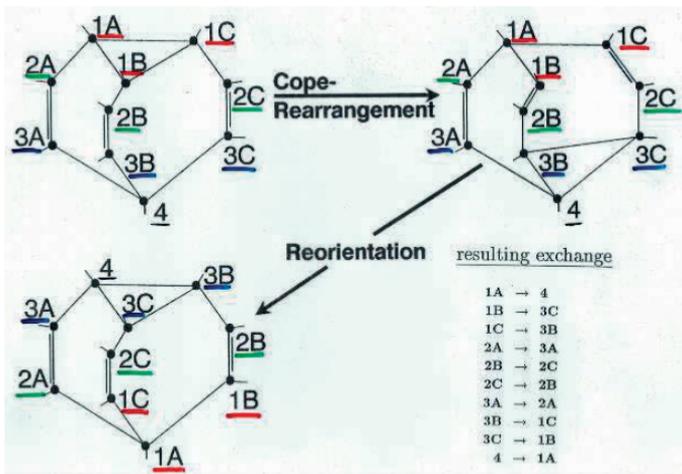
von protonierten und deuterierten Methylgruppen und Ammoniumionen. Diese Dinger tunneln bei Temperaturen unter etwa 20 K wegen der Permutationssymmetrie und verhalten sich deswegen ganz anders wenn diese Symmetrie durch andere Isotope gebrochen ist. Weil wir in aller Regel unsere Messungen an Einkristallen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



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

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

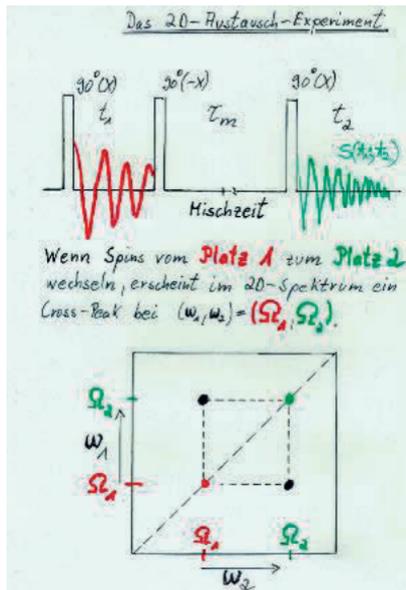
etwa 3 mm in jeder Dimension – gezüchtet. Das waren die einzigen Kristalle von deuteriertem Bullvalen, die es je im Universum gab. Das Molekül, Abbildung 3, hat eine dreizählige Achse – ein Dreieck mit Einfachbindungen zwischen den Kohlenstoffen und drei Flügel, Einfach-, Doppel-, Einfachbindung zum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



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

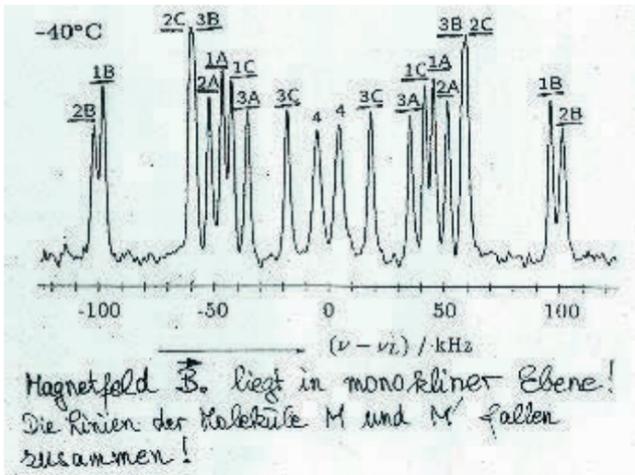
Gleichzeitig versetzt es die Doppelbindungen zwischen 2B, 3B und 2C, 3C nach 2B, 1B bzw. 2C, 1C. Das Resultat ist wieder ein ganz normales Bullvalen Molekül – aber es ist falsch orientiert. Also muß das Teufelchen das Molekül noch in die richtige Orientierung

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



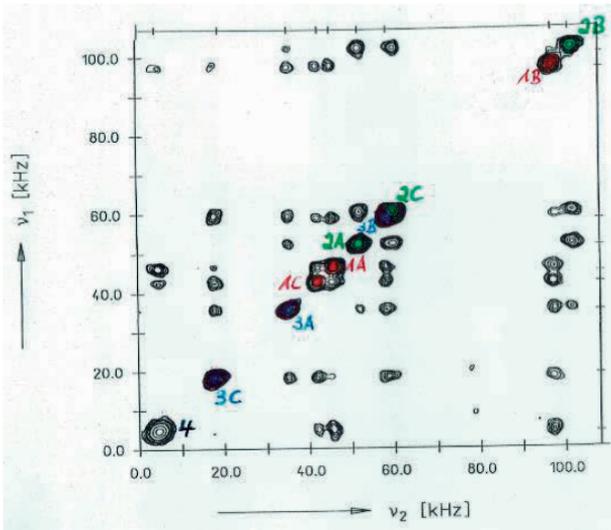
**Abbildung 5.** Prinzip der 2d-Austauschspektroskopie mit Deuteronen.

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



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

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



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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