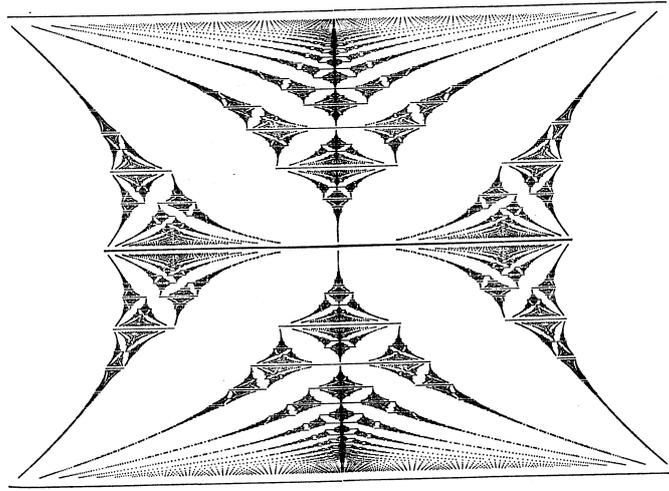


Schmetterlinge im Festkörper

Zur Geschichte des Hofstadter-Butterflys



**Christian Forstner
Douglas Hofstadter
Gustav Obermair
Alexander Rauh
Hans-Joachim Schellnhuber**

Regensburg 2004

**Nachdruck: Jörg Mertins
Regensburg 2017**

Dr. Jörg Mertins,
Fakultät für Physik, Universität Regensburg
www.physik.ur.de/fakultaet/mertins

joerg.mertins@ur.de

Nachdruck September 2017,

bis auf die Ergänzung dieser Umschlagseite textlich unverändert, bezahlt aus Mitteln für die Öffentlichkeitsarbeit der Fakultät für Physik, Universität Regensburg.

Ein nicht-kommerzieller Einsatz dieses Werkes, auch der elektronischen Version, ist für Bildungszwecke unter Beachtung der sogenannten „*Guten Wissenschaftlichen Praxis*“ der DFG kostenfrei möglich, siehe auch www.dfg.de .

Mit freundlicher Genehmigung von Herrn PD Dr. habil. Christian Forstner,
aktuell: Goethe-Universität Frankfurt am Main, www.christian-forstner.de
Herzlichen Dank!

Einer der Beiträge von 2004 ist in einer überarbeiteten und erweiterten Fassung erschienen: Christian Forstner, „Von Märchenfiguren und Schmetterlingen. Rumpelstilzchens helfende Hand bei der Genese des Hofstadter-Butterfly,“ in: Unsichtbare Hände. Zur Rolle von Laborassistenten, Mechanikern, Zeichnern u. a. Amanuenses in der physikalischen Forschungs- und Entwicklungsarbeit. Hrsg. Von Klaus Hentschel (Diepholz: GNT-Verlag, 2008), 205-216.

Anlass dieses Nachdruckes

ist der erste Besuch von Herrn Prof. Douglas Hofstadter in Regensburg seit seinen in diesem Heft geschilderten Arbeiten als Doktorand der Physik.

Herr Prof. Douglas Hofstadter (Indiana University, Bloomington, USA) besucht die Fakultät für Physik auf Einladung von Herrn Dr. Jörg Mertins am 19. und 20. Oktober 2017 anlässlich des Jubiläumsjahres „50 Jahre Lehre an der Universität Regensburg“. Neben einem öffentlichen Vortrag am 19.10. zum Thema „Einstein bei Licht - Licht bei Einstein“ wird am 20.10. ein wissenschaftliches Symposium zum Hofstadter Butterfly mit zahlreichen Gästen stattfinden.

Mehr Informationen erhalten Sie über Herrn Dr. Mertins, joerg.mertins@ur.de .

Redaktion:

Christian Forstner

Lehrstuhl für Wissenschaftsgeschichte

Universität Regensburg

D-93040 Regensburg

forstner@physikgeschichte.org

Druck mit finanzieller Unterstützung der Hans-Böckler-Stiftung,
Mitbestimmungs-, Forschungs- und Studienförderungswerk
des Deutschen Gewerkschaftsbundes

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	3
Schmetterlinge im Kopf?	5
Interview mit Gustav M. Obermair	19
Of Rumpelstilzchen and of Gplot	37
Wege zum Hofstadterschen Schmetterling	67
Interview mit Hans-Joachim Schellnhuber	73

Vorwort

Gustav M. Obermair, Physiker und ehemaliger Rektor der Universität Regensburg, wurde 2002 mit Abschluß seines 100. Universitätssemesters emeritiert. Bei der Auflösung seines Lehrstuhls feierte ein alter Tischrechner seine Wiederentdeckung. Mit ihm berechnete 1975 der spätere Pulitzerpreisträger Douglas Hofstadter den nach ihm benannten Hofstadter-Schmetterling der Festkörperphysik und schuf damit eines der ersten Fraktale in der Physik. Der Lehrstuhl für Wissenschaftsgeschichte gestaltete eine Ausstellung zu Hofstadters Arbeiten in Regensburg mit dem Tischrechner als zentralen Ausstellungsgegenstand. Zur inhaltlichen Begleitung dieser Ausstellung wurde diese Broschüre erstellt.

Herzlichen Dank an alle, die mich bei der Erstellung der Broschüre und der Gestaltung der Ausstellung unterstützten: Douglas Hofstadter, Gustav Obermair, Alexander Rauh und Hans-Joachim Schellnhuber mit ihren Beiträgen, Ulrich Rössler für die Hinweise auf die aktuelle Forschung, den Mitgliedern des Lehrstuhls Obermair: Florian Chmela, Rupert Faltermeier, Jakob Lamey, Lizy Lazar und Johannes Simon, den Mitgliedern des Lehrstuhls für Wissenschaftsgeschichte, insbesondere Christoph Meinel und Carsten Reinhardt für die inhaltlichen Anregungen und Angelika Mak für die Transkription der Interviews.

Regensburg, im Februar 2004

Schmetterlinge im Kopf?

Christian Forstner

Vor 30 Jahren berechnete Douglas Hofstadter an der Universität Regensburg das Energiespektrum von Blochelektronen in einem Magnetfeld. Die Ähnlichkeit des geplotteten Spektrums mit einem Schmetterling gab dem Graph seinen Namen. Der *Hofstadter-Butterfly* und mit ihm eines der ersten Fraktale in der Physik war geboren. Der Transfer lokaler Forschungsstile war ebenso wie das Durchbrechen des Forschungsstils einer Arbeitsgruppe die notwendige Bedingung, um zu dieser Entdeckung zu gelangen.

Hofstadter führte seine Berechnungen als Doktorand in der internationalen Arbeitsgruppe von Gregory Wannier an der University of Oregon, Gustav M. Obermair und Alexander Rauh an der Universität Regensburg durch. Die Arbeitsgruppe zeichnete sich durch einen hochgradig arbeitsteiligen Forschungsstil aus. Obermair eignete sich diesen Forschungsstil während seiner Zeit als Postdoc und Professor in Pittsburgh und Oregon an und führte ihn später in seiner Arbeitsgruppe in Regensburg fort.

Mit analytischen Verfahren hatte die Arbeitsgruppe versucht, die möglichen Energiewerte einzuengen ohne damit zu einer exakten Lösung zu gelangen. Erst als Hofstadter den vorgezeichneten analytischen Rahmen mit numerischen Methoden, dem Einsatz von Rechnern und zahlentheoretischen Überlegungen durchbrach, gelang es ihm das Spektrum zu berechnen. Diese Methodik entsprach nicht dem Arbeitsstil der Gruppe und führte zunächst zu Reaktionen auf Hofstadters Ergebnisse, die von Unverständnis bis hin zu schroffer Ablehnung reichten, bis es Hofstadter nach mehreren Monaten gelang, Wannier von der Richtigkeit seiner Ergebnisse zu überzeugen.

Die Viererbande

Die Arbeitsgruppe, bestehend aus Wannier, Obermair, Rauh und Hofstadter, wurde Mitte der siebziger Jahre zeitgemäß die *Viererbande* genannt, in Analogie zur chinesischen Viererbande, die entscheidenden Anteil an der Kulturrevolution hatte und nach Maos Tod 1976 beim Versuch, die Macht in China zu erlangen, scheiterte. Keimzelle der Regensburger Viererbande war die bereits seit Mitte der sechziger Jahre bestehende Zusammenarbeit von Gregory Wannier und Gustav Obermair.

An Wannier erinnern heute Namensgebungen wie die *Wannier-Exitonen* und die *Wannier-Funktionen* in der Festkörperphysik. Er promovierte 1935 in seiner Geburtsstadt Basel. 1936 verließ er Europa zu einem Forschungsaufenthalt in Princeton. Dort forschte er mit Eugene Wigner, machte die Bekanntschaft mit Robert Hofstadter, dem Vater seines späteren Doktoranden Douglas Hofstadter, und kehrte 1938-39 nach Europa zur Zusammenarbeit mit Hendrik A. Kramers in Bristol zurück. Er nahm 1943 die amerikanische Staatsbürgerschaft an und lehrte in Texas und Iowa. Seine produktivste Zeit verbrachte er 1949-1961 in den Bell Telephone Laboratories. 1961 nahm er einen Lehrstuhl an der University of Oregon in Eugene an, den er bis zu seinem Tod im Oktober 1983 innehatte.

Zahlreiche Forschungsaufenthalte führten Wannier nach dem zweiten Weltkrieg wieder nach Europa. Auf Einladung der Fakultät für Physik hielt er 1966 an der Technischen Universität München ein Seminar zur Wechselwirkung von Elektronen in Festkörpern und Magnetfeldern ab. An der Vorbereitung und Durchführung dieses Seminars beteiligte sich der Assistent Gustav Obermair. Wannier bot ihm daraufhin ein Postdoctoral Fellowship in Eugene an. Nach einem halben Jahr in Eugene erhielt Obermair durch Wanniers Unterstützung eine Einladung an die University of Pittsburgh, an der er zwei Jahre als Assistant Professor und zuletzt als Associate Professor forschte und lehrte.

An diesen beiden US-Universitäten lernte er einen stark auf Kooperation ausgerichteten Forschungsstil kennen, der sich wesentlich von dem der beiden Münchner Universitäten unterschied, an denen Obermair studierte und promovierte. In einem Interview schildert Obermair eine enge Kooperation zwischen Theoretikern und Experimentalphysikern als einen wesentlichen Bestandteil der Alltagsarbeit eines Physikers in den USA. Zahlreiche Theoretiker strebten nach einer experimentel-

len Überprüfung ihrer Ergebnisse. Als gegen Ende der 1920er Jahre die Theoretische Physik in den USA aus dem Schattendasein der Experimentalphysik hervortrat, blieb eine enge Verknüpfung der beiden Teilgebiete erhalten. In der Regel durchlief jeder Physiker eine experimentelle Grundausbildung, Forschungsseminare wurden gemeinsam durchgeführt. So verwundert es nicht weiter, dass Obermair viele Experimentalphysiker, die hervorragende Theoretiker waren, und umgekehrt Theoretiker, die großes Interesse an der Experimentalphysik hatten, kennen lernte. Das Interesse an einer experimentellen Überprüfung der Rechnungen ging so weit, dass es als Aufgabe des Theoretikers gesehen wurde, keine philosophischen Spekulation anzustellen, sondern ausschließlich Berechnungen durchzuführen, deren experimentelle Überprüfbarkeit gewährleistet war. Diese pragmatische Grundhaltung führte dazu, dass in den USA Physiker weit weniger häufig die philosophischen Aspekte ihrer Arbeit reflektierten als in Deutschland. [7, 3]

Im Winter 1970/71 übernahm Obermair einen der beiden Lehrstühle für Theoretische Physik an der noch jungen Reform-Universität Regensburg. Auf Wunsch Obermairs wurde der Lehrstuhl dem Institut für Festkörperphysik und nicht dem für Theoretische Physik zugeordnet. Dies hatte nur wenig praktische Konsequenzen, sollte aber seine Grundeinstellung auch nach außen hin deutlich machen, Theorie und Experiment nicht als zwei voneinander abgelöste Bereiche zu verstehen. Die Anlagen zu dieser Haltung lassen sich bereits in seiner experimentellen Diplomarbeit finden, entscheidend geprägt wurde sie durch die Forschungsarbeit in den USA.

Die Universität Regensburg nahm den Studienbetrieb im Wintersemester 1967/68 auf. Ausläufer der Studentenbewegung hatten auch Regensburg erreicht, ohne an die Intensität der Proteste in den Zentren heranzureichen. Der Wunsch, etwas Neues zu beginnen, spiegelte sich in modernen und großzügig gestalteten Bauten aus zeitgemäßem Beton wider. Sie repräsentierten den Aufbruch in eine Zeit, heraus aus den alt-ehrwürdigen Gemäuern der deutschen Universität. Dies schlug sich auch in der organisatorischen Struktur der Universität nieder. An der Reform-Universität Regensburg strebte man eine demokratische Gestaltung der Entscheidungsprozesse unter Beteiligung aller an der Universität vertretenen Gruppen an, bei Abstimmungen im Senat galt bis 1974 Viertelparität.

An der Gestaltung dieser neuen Universität wirkte Obermair von 1971 bis 1973 als Rektor aktiv mit. Physikalisch arbeiteten er und seine Arbeitsgruppe zur Theorie

der Phasenübergänge und zu Problemen des Kristalldiamagnetismus. Zu letzterem Themengebiet existierte ein reger Austausch zwischen den Arbeitsgruppen Obermairs in Regensburg und Wanniers in Oregon. Obermair reiste bis in die achtziger Jahre jedes Jahr mehrere Monate in die USA, Wannier machte Gegenbesuche. Bei einem dieser Besuche in Regensburg lernte Wannier Obermairs Assistenten Alexander Rauh und dessen Forschungsarbeiten kennen. Angetan von den Ergebnissen unterstützte Wannier einen DFG-Antrag Rauhs, so dass dieser von März 1973 bis März 1974 einen Forschungsaufenthalt in Oregon realisieren konnte. [3, 4, 6]

Rauhs Vorlesung in Oregon „Crystal Electrons in Magnetic Fields“ hörte auf Anraten Wanniers der junge Doktorand Douglas Hofstadter. Douglas Hofstadter plante zunächst wie sein Vater in der Teilchenphysik zu forschen, denn sie erschien ihm als einer der wenigen Teilbereiche der modernen Physik, die Antworten auf die fundamentalen Fragen des Universum lieferte. Später wandte er sich von ihr ab und fand Interesse am „periodischen Vakuum“ im Festkörper im Gegensatz zum „kontinuierlichen Vakuum“ der Teilchenphysik. Nach Anfragen bei mehreren Professoren entschied sich Hofstadter für eine Promotion bei Gregory Wannier zu einem Thema, das fünf Jahrzehnte nach der Begründung der Quantenmechanik immer noch ungelöst war: Die Wechselwirkung von Elektronen in einem Kristall mit einem Magnetfeld. Die seltsame Abhängigkeit der Energiewerte von der Rationalität oder Irrationalität des Verhältnisses von magnetischem Fluss p , der durch eine Einheitszelle tritt, zum magnetischen Flussquant q , erweckte Hofstadters Interesse. [6, 5]

Hofstadter begleitete Wannier, als dieser im Winter 1974/75 ein Stipendium der Alexander von Humboldt-Stiftung erhielt, um sechs Monate in Obermairs Arbeitsgruppe an der Universität Regensburg mitzuarbeiten. Aufgrund der damals noch guten Ausstattung mit Personalmitteln war Obermair in der Lage, Hofstadter eine Stelle als VDWA, Verwalter der Dienststelle eines wissenschaftlichen Assistenten, anzubieten. Ein Diplomand an Obermairs Lehrstuhl gab der Gruppe nun bestehend aus Hofstadter, Obermair, Rauh und Wannier ihren zeitgemäßen Namen: Die Viererbande.

Rumpelstilzchen und Zahlenmystik

Nach Wanniers und Hofstadters Ankunft in Regensburg, fand sich die Viererbande zu einem konstituierenden Treffen in Obermairs Büro ein, um die ersten Ergebnisse zu diskutieren. Jedes Mitglied der Gruppe trug zur Lösung bei. Wannier hatte das Problem bereits auf eine zweidimensionale Differenzgleichung zurückgeführt. Diese erhielt er durch Requantisierung der Energiedispersion für Blochelektronen gemäß der Peierls-Onsager Hypothese. Bei dem Versuch, die so erhaltene Differenzgleichung zu lösen, gelang es Rauh sie durch eine Eichtransformation auf eine eindimensionale Gleichung zu reduzieren, die von Hofstadter später als die Harper-Gleichung identifiziert wurde. Es war Hofstadters Aufgabe, die Eigenwerte der Gleichung zu ermitteln. Um dies zu erreichen, musste er für $p/q = 1/2$ eine quadratische, für $p/q = 1/3$ eine kubische Gleichung lösen. Ein von Obermair gefundenes Spurkriterium für die Matrix des Gleichungssystems schränkte den Bereich der erlaubten Lösungen ein. Für die beiden genannten Fälle war es einfach für Hofstadter eine analytische Lösung zu finden. Doch was geschah beispielsweise bei Verhältnissen von $1/5$ oder $2/5$? Mit Papier und Bleistift war dieses Problem kaum zu lösen. Hofstadter entschloss sich einen Computer einzusetzen. [3, 5]

Während heute der Einsatz von Computern in der Theoretischen Physik nicht mehr weg zu denken ist und neue Einsichten in bisher unerforschte Gebiete ermöglicht, so zählte zu Beginn der siebziger Jahre ein Rechner in Wanniers und Obermairs Arbeitsgruppe nicht zum Standardwerkzeug. Der Personal Computer war noch nicht entwickelt, die ersten Vorläufer bildeten programmierbare Tischrechner. Zumeist führten Theoretiker ihre Rechnungen an zentralen Großrechnern aus, die die Leistungsfähigkeit der Tischrechner übertrafen. Alle Mitglieder der Viererbande wuchsen in einer Forschungstradition auf, in der ein hoher Wert auf eine analytische Ausbildung junger Wissenschaftler gelegt und diese als Grundlage für die späteren wissenschaftlichen Arbeiten betrachtet wurde. Ein theoretischer Physiker hatte durch geschickte mathematische Umformungen und Transformationen ein physikalisches Problem auf eine Form zu reduzieren, für die bekannte analytische Lösungen existierten. War keine analytische Lösung des Problems möglich, so versuchte man zumindest Aussagen über die Natur der Lösungen zu beweisen. [5]

Hofstadter empfand zunächst ein wenig Scham, bei der analytischen Lösung des Problems gescheitert zu sein. Anstelle eines großen Mainframe, bot sich Hofstadter



Der Hewlett-Packard 9820A, genannt Rumpelstilzchen.

die Gelegenheit, einen Tischrechner von Hewlett Packard, den HP 9820A, einzusetzen. Der Lehrstuhl hatte diesen eben erst erworben, ohne dass konkrete Einsatzpläne für das Gerät existierten. Kein anderes Mitglied der Arbeitsgruppe nutzte ihn und so konnte Hofstadter einen „persönlichen Computer“ einsetzen. Später übernahm Obermairs Diplomand Hans-Joachim Schellnhuber den Rechner. Auch er berichtete von seiner Verärgerung, bei seiner Diplomarbeit an die Grenzen der Analytik gestoßen zu sein und nun einen Rechner einsetzen zu müssen.[5, 4]

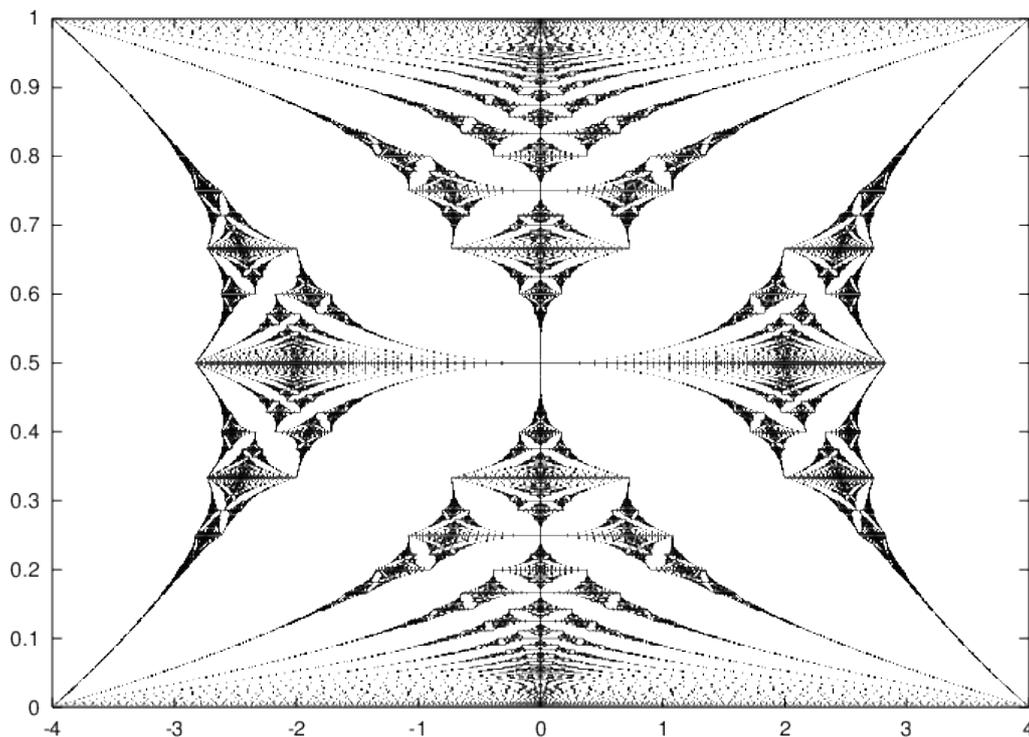
Das Ausbrechen aus dem traditionellen Forschungsstil bereite Hofstadter und Schellnhuber anfangs Probleme. Die Unterstützung, die sie durch ihre Kollegen erfuhren, war gering. Die einfache Computeralgebrasprache, mit welcher der HP 9820A programmiert wurde, eigneten sich die beiden selbst an. Im Gegensatz dazu erinnert sich Schellnhuber, dass Obermair ihm bei mathematischen Umformungen, wie dem Einsatz des Residuensatzes zur Berechnung komplexer Integrale, stets mit Rat zur Seite stand. Hofstadter schildert die Reaktionen noch deutlicher. Seine numerischen Experimente wurden mit Verwunderung und Befremden betrachtet: Betreibt dieser

junge Amerikaner tatsächlich Physik oder spielt er nur numerische Spielchen? Die Reaktionen der Kollegen waren zwiespältig. Obermair aber war überaus angetan von der Idee, einen Computer nachts arbeiten zu lassen, um am nächsten Morgen die Ergebnisse zu interpretieren. Seine Frau prägte den Spitznamen des Rechners: Da er in der Lage war, in langen Nächten Gold zu spinnen, wie die Tochter des Müllers im Märchen Rumpelstilzchen der Brüder Grimm, trug der HP 9820A fortan den Namen Rumpelstilzchen. [5, 3, 4]

Hofstadter zeichnete die erhaltenen Werte jeden Morgen in einen Graphen ein und erkannte, nachdem die Punkte ausreichend verdichtet waren, dessen hierarchische Struktur. Er setzte sich aus identischen Kopien seiner selbst zusammen, diese wiederum aus identischen Kopien ihrer selbst und so fort. Einen streng mathematischen Beweis für den fraktalen Charakter hatte Hofstadter noch nicht gefunden. Trotzdem entschloss er sich, die ersten Ergebnisse in einem Forschungsgruppenseminar zu präsentieren. Die Reaktionen auf das Bild waren unterschiedlich. Obermair und Rauh erschienen Hofstadter als interessiert, wussten jedoch nur wenig mit dem Bild anzufangen. Wannier wirkte auf Hofstadter etwas verblüfft und ein wenig verstört. Die Struktur des Graphen war für alle etwas Neues, Fraktale wurden in der Physik noch nicht diskutiert. Die Selbstähnlichkeit des Spektrums hatte auch Dieter Langbein an der Universität Chicago in einer Vorgängerarbeit noch nicht erkannt. [2, 5]

Wenige Tage nach dem Seminarvortrag zitierte Wannier Hofstadter in sein Büro und wies ihn ohne Umschweife darauf hin, dass aus seiner Dissertation wohl nichts werden würde. Hofstadter solle lieber eine Bibliotheksarbeit mit einer Zusammenfassung bereits bekannter Ergebnisse verfassen. Was er betreibe, sei Zahlenmystik, keine Physik und keine Naturwissenschaft. Wannier, Rauh und Obermair versuchten weiter, mit den Standardmethoden der mathematischen Physik der Gleichung ihr Geheimnis zu entlocken. An den Besprechungen der Gruppe nahm Hofstadter nur mehr schweigend Teil. [5]

Als sie nach Oregon zurückkehrten, stand Wannier den Ergebnissen Hofstadters immer noch ablehnend gegenüber. Zwischen beiden herrschte eine gespannte Atmosphäre. Wannier war als Wissenschaftler in klassischen Machtstrukturen aufgewachsen. Wissenschaftliche Qualität und Wahrheit erschienen ihm als höchstes Kriterium. Erfüllte ein Wissenschaftler diese Ansprüche nicht, so konnte Wannier gnadenlos mit seiner ganzen Autorität reagieren, was in der Erinnerung Schellnhubers bis zu massiver Kritik in Seminaren reichte, die einer öffentlichen Hinrichtung



Der Hofstadter-Schmetterling zeigt die erlaubten Energiewerte von Blochelektronen in einem homogenen Magnetfeld. An der x -Achse ist die Energie in Einheiten der Bandbreite angetragen, an der y -Achse der magnetische Fluss durch eine Elementarzelle in Einheiten des Flussquantums.

des Referenten gleichkam. Letztendlich gelang es Hofstadter aber, Wannier von seinen Ergebnissen zu überzeugen. [4]

In Eugene entdeckte Hofstadter im Superfluidity-Laboratory einen exakten Klon Rumpelstilzchens, nur dieses Mal mit einem Plotter ausgestattet. Mit diesem berechnete er über drei Wochen lang alle Energiewerte des Spektrums zwischen 0 und $1/2$ für $q < 50$ und ließ sich einen Graphen plotten. Zusätzlich wählte Hofstadter kleine Zonen aus dem Graph aus und plottete die kleinen Ausschnitte in einer Vergrößerung, um festzustellen, dass diese mit dem Graphen übereinstimmten. Mit diesen Graphen gewappnet, suchte er Wannier auf. Hofstadter erinnert sich an einen plötzlichen Umschwung bei Wannier. Dieser sah nun schlagartig die Selbstähnlichkeit des Spektrums. Er entschuldigte sich bei Hofstadter, dessen Ideen unterschätzt zu haben, und zeigte die Graphen unter seinen Kollegen herum. Bald darauf erschien Hofstadters Publikation in der *Physical Review B*. [1, 5]

Synthese und Ausblick

Schellnhuber schuf mit seiner Dissertation „First-Principles-Bandstruktur von Kristallelektronen im homogenen Magnetfeld und die Überprüfung der Peierls-Onsager-Hypothese“ die Synthese des Lehrstuhlprojekts. Ihm gelang es, die volle Schrödinger-Gleichung für den einfachsten Fall eines nicht-trivialen Potentials mit Hilfe eines Großrechners am Rechenzentrum der Universität Regensburg zu lösen. Um mit Matrizen der Dimension 300 rechnen zu können, nahm er den Rechner über mehrere Wochenenden hinweg völlig in Anspruch. Zum Vergleich: Rumpelstilzchen war mit Matrizen der Dimension 12 gut ausgelastet, wurde aber häufig für einfache Testrechnungen verwendet, bevor man den großen Mainframe nutzte. Schellnhuber gelang es, auch die quantenmechanische Begründung der Peierls-Onsager-Hypothese zu geben. Wannier fand Gefallen an Schellnhubers Arbeit und vermittelte ihn an das ITP nach Santa Barbara. Heute unternimmt Schellnhuber einen Spagat zwischen Umweltforschung und reiner physikalischen Forschung. Er wurde bekannt als Gründungsdirektor des *Potsdam Institut für Klimafolgenforschung* und hält zur Zeit mehrere Positionen in Forschung und Lehre inne.[4]

Douglas Hofstadter kehrte der Physik den Rücken und erhielt 1980 für sein Buch *Gödel, Escher, Bach* den Pulitzer-Preis in der Kategorie Nonfiction. Die ersten Vorarbeiten zu seinem Buch stellte er schon vor Beginn seiner Doktorarbeit an, aber erst nach deren Vollendung wandte er sich vollständig der Arbeit an seinem Buch zu. Bemerkenswert ist die Form der Darstellung, die Hofstadter wählte. Er präsentierte neue Begriffe zunächst in einem unterhaltsamen Dialog zwischen Achill und der Schildkröte, um sie im darauffolgenden Kapitel in abstrakter Form zu diskutieren. Das zentrale Thema in Hofstadters Buch ist die Selbstbezüglichkeit oder die *seltsamen Schleifen*. Hofstadter definierte die Bewegung auf einer seltsamen Schleife, über eine Bewegung auf Stufen innerhalb eines hierarchischen Systems nach oben oder unten, bei der man plötzlich wieder am Ausgangspunkt angelangt. Solche seltsamen Schleifen fand er in den unterschiedlichsten Bereichen wieder. In der Kunst in den Grafiken von Maurits Escher (1898-1972), in der Zahlentheorie in Kurt Gödels Satz von der Unvollständigkeit axiomatischer Systeme und in der Musik in Johann S. Bachs Variationen und Modulationen eines Themas, die den Hörer schließlich wieder zum Ausgangspunkt zurückführten und nicht zuletzt in der Selbstähnlichkeit seines Schmetterlings.[8]

Heute leitet Hofstadter das *Center for Research on Concepts and Cognition* an der Indiana University und ist College Professor of Cognitive Science and Computer Science sowie außerordentlicher Professor für Geschichte und Philosophie der Naturwissenschaft, vergleichende Literaturwissenschaft und Psychologie. Gregory Wannier verstarb 1983, zahlreiche Namensgebungen in der Festkörperphysik erinnern an ihn. Alexander Rauh erhielt eine Professur für Theoretische Physik an der Universität Oldenburg und wurde 2001 emeritiert. Gustav Obermairs Emeritierung erfolgte ein Jahr später.

Aus einer historischen Perspektive sticht insbesondere der hohe Grad der Arbeitsteilung innerhalb der Gruppe hervor. Die zwiespältigen Reaktionen der Gruppe auf Hofstadters „numerische Spielereien“ illustrieren die Probleme bei der Durchsetzung neuer Forschungsstile und -ergebnisse. Besonders deutlich wird dies an Wanniers zunächst ablehnender Reaktion und dem plötzlichen Wandel seiner Sichtweise, der nahezu als Idealbild eines Kuhnschen Gestaltwechsels erscheint. Obermairs Anspruch, Hierarchien zu minimieren, konnte innerhalb der Arbeitsgruppe nicht vollständig umgesetzt werden. Wannier war die unbestrittene Autorität in der Gruppe. Erst als Hofstadters Ergebnisse seine Zustimmung fanden, konnten sie in der *Physical Review* publiziert werden.

Ende der achtziger Jahre nahm Theo Geisel in der theoretischen Arbeitsgruppe von Joachim Keller an der Universität Regensburg das Thema erneut auf. Etwa zur gleichen Zeit unternahm die Arbeitsgruppe von Dieter Weiss am MPI für Festkörperforschung in Stuttgart die Messung des Magnetotransportes an lateralen Halbleiter-Übergittern. Hier standen zunächst die Probleme der klassischen nichtlinearen Dynamik im Vordergrund. Mit der Verbesserung des Probenmaterials, der Herstellung von Strukturen mit kleinerer Gitterkonstante und der Messung bei sehr tiefen Temperaturen wurden zusätzliche Strukturen im Magnetowiderstand mit quantenmechanischem Ursprung entdeckt. Klaus Richter lieferte hierzu im Rahmen einer semi-klassischen Beschreibung wichtige theoretische Beiträge. Die Idee des Nachweises des Hofstadter-Spektrums war eine Motivation der weiteren Untersuchungen, an denen auch die Arbeitsgruppe von Ulrich Rössler beteiligt war. Der direkte experimentelle Nachweis der Gap-Struktur des fraktalen Spektrums gelang schließlich Christian Albrecht, einem Doktoranden von Dieter Weiss. Keller, Richter, Rössler und Weiss lehren und forschen heute an der Universität Regensburg.

Literaturverzeichnis

- [1] D. Hofstadter, „Energy levels and wave functions of Bloch electrons in rational and irrational magnetic fields,“ *Phys. Rev. B* **14** (1976): 2239-2249.
- [2] D. Langbein, „The Tight-Binding and the Nearly-Free-Electron Approach to Lattice Electrons in External Magnetic Fields,“ *Phys. Rev.* **180**(1969): 633-648.
- [3] Interview mit Gustav M. Obermair, in dieser Broschüre.
- [4] Interview mit Hans-Joachim Schellnhuber, ebd.
- [5] D. Hofstadter, Of Rumpelstilzchen and Gplot, ebd.
- [6] A. Rauh, Wege zum Hofstadterschen Schmetterling, ebd.
- [7] S. Schweber, „The Empiricist Temper Regnant: Theoretical Physics in the United States 1920 1950,“ *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences* **17** (1986): 55-98.
- [8] D. Hofstadter, *Gödel, Escher, Bach: An Eternal Golden Braid* (New York: Basic Books 1979).

Interview mit Gustav M. Obermair

Christian Forstner: Gustav, Du hast im Alter von 18 Jahren begonnen, in München Physik zu studieren. Könntest Du in ein paar Worten erklären, warum Physik und warum in München?

Gustav Obermair: Warum Physik: Das war ein Berufswunsch und eine Berufsentcheidung, die im Grunde schon mindestens fünf Jahre vor meinem Abitur feststanden hat. Es war wohl ein Glück, dass ich schon relativ früh wusste: Das ist es – angeregt und gefördert durch meinen Vater mit seiner Passion für griechische Philosophie und Mathematik, meiner Mutter, die beträchtliche naturkundliche Kenntnisse hatte und meinem langjährigen Mathematik- und Physiklehrer Zeitlhack, der bei Sommerfeld studiert hatte. Der Wunsch Physik zu machen hat mich dann auch mein ganzes Leben über, mehr als 50 Jahre durchaus positiv begleitet.

Warum München: Das ist meine Heimatstadt und die Universität München genoss damals – auch was die Physik anbelangt – einen hervorragenden Ruf. Es war der große Walter Gerlach noch als Experimentalphysik-Chef da mit seiner brillanten Darstellung der Physik und es war bis kurz vor Beginn meines Studiums noch Arnold Sommerfeld wieder aktiv, nachdem ihn nach dem Krieg die Alliierten gebeten hatten seinen Lehrstuhl wieder zu übernehmen, nach seiner „Verabschiedung“ durch die Nazis, und sein Nachfolger Bopp hat sein Erbe weitergeführt und Physik in einer sehr breiten Weise vertreten, so dass ich es nicht bereut habe, München gewählt zu haben. Dazu kam ein hervorragendes Institut für stärker technisch und festkörperphysikalisch ausgerichtete Forschung unter Rollwagen, bei dem ich auch meine Diplomarbeit gemacht habe. Es war damals sicher ein sehr guter Platz in München zu studieren.

Zu welchem Thema hast Du Deine Diplomarbeit angefertigt?

Meine Diplomarbeit ging über spezielle Probleme des Ferromagnetismus. Eine bestimmte Technik zur Abtastung der Magnetisierung von weichmagnetischen Materialien mittels der Ablenkung von Strahlen im Elektronenmikroskop, heute Lorentz-Mikroskopie genannt, ist damals von Rollwagens Mitarbeiter Chr. Schwink entwickelt worden und ich habe dazu die Rechnungen gemacht, um die Auswertung durchzuführen.

Und anschließend?

Anschließend habe ich promoviert. Ich hatte beschlossen jetzt endgültig zur Theorie überzuwechseln. Es war sicher nicht schlecht, dass ich durch die vorangegangene Experimentalphysik-Arbeit ein Gefühl dafür bekommen hatte, was eigentlich messbar ist. So etwas soll ein Theoretiker, wenn er Physik macht, die nicht nur fundamentale Fragen betrifft, im Auge haben, wenn es darum geht, Vorhersagen einer Theorie auch einmal zu überprüfen. So kam ich zu Bopp und habe am Institut für theoretische Physik gearbeitet, zur Theorie des Ferromagnetismus, aber eben relativ grundlegend, nämlich über die quantenmechanische Begründung des berühmten Austausch-Operators oder Heisenberg-Operators. Das war das Thema, das Bopp interessierte, worüber vorher schon Herr Werner, der später hier in Regensburg auch einen Lehrstuhl für theoretische Physik hatte, seine Promotion in München bei Bopp gemacht hatte. Diese meine Arbeit aus der Festkörpertheorie war die eine Seite. Zum anderen aber waren diese Jahre geprägt durch das eigentliche tiefer liegende Interesse von Bopp für Fragen der Begründung der Quantenmechanik, für das Verhältnis der Quantenmechanik zur klassischen Physik und für neuere Entwicklungen, die sich damals in den sechziger Jahren in der Quantenfeldtheorie angebahnt haben. So war man dort als Doktorand, eigentlich immer dem ausgesetzt, dass vom Chef bis zu den Diplomanden über ein ganz breites Gebiet der damals neuesten theoretischen Physik, Quantenphysik, berichtet und diskutiert wurde.

Gab es internationale Kooperationen?

Bopp hatte zwar persönlich wohl einige Kontakte zu anderen Gruppen auf der Welt, die sich für solche grundlegenden Fragen interessiert haben. Man muss aber bedenken, das war Ende der fünfziger Jahre, da war die internationale Kooperation noch nicht wieder voll in Gang gekommen. Internationale Kontakte gab es für mich eigentlich erst, als ich nach der Promotion für fast vier Jahre an die TU München

über gewechselt habe als Assistent. Dort war ich in einer Gruppe von sehr jungen Professoren, die intensive Kontakte ins Ausland, insbesondere natürlich in die USA hatten. Dadurch kam damals Mitte der sechziger Jahre eine ganze Menge von direkter Wechselwirkung und Besuche von Wissenschaftlern, vor allem aus den USA. So habe ich auch Gregory Wannier kennen gelernt, meinen späteren großen Meister, Anreger, Freund und Mentor, der im Jahr 1966 auf Einladung des Physik Departments der TU München für ein halbes Jahr nach München kam und ein Seminar über Festkörperphysik, speziell Elektronentheorie, speziell Elektronen im Festkörper in Wechselwirkung mit Magnetfeldern durchgeführt hat. An diesem Seminar habe ich mich von Anfang an und dann auch aktiv mit Vorbereitung und eigenen Referaten beteiligt. Das hat dann ausgelöst, dass Wannier mich ein Jahr später, nämlich im Sommer 1967 als Post Doctoral Fellow nach Oregon geholt hat. So begann eine Zusammenarbeit, die bis zum Tod von Wannier, also ziemlich genau 15 Jahre, meine Arbeiten und die unserer Gruppe entscheidend beeinflusst hat und wesentlich dazu geführt hat, dass es in Regensburg in den siebziger Jahren diese starke und erfolgreiche Gruppe gab, die sich mit dem Diamagnetismus von Blochelektronen beschäftigt hat. Dadurch kam auch Douglas Hofstadter als Doktorand von Wannier im Jahre 74 nach Regensburg und hat über ein halbes Jahr hier gearbeitet. Mit dem damals neuen Instrument eines programmierbaren Tischrechners, eben des berühmten Rechners von Hewlett-Packard, den meine Frau Rumpelstilzchen taufte, weil er die ganze Nacht Stroh zu Gold spinnt, hat er hier erstmals numerische Experimente gemacht, die dann letzten Endes von ihm, Douglas Hofstadter, in seine später berühmt gewordene Doktorarbeit umgesetzt worden sind.

Nochmal einen Schritt zurück zu Deiner Zeit in den USA. Zunächst eine rein formale Frage: War es ein Stipendium, mit dem Deine Stelle finanziert wurde? Oder war es eine Universitätsstelle?

In dem ersten Jahr, das ich in Oregon an der University of Oregon in der kleinen wunderschönen Universitätsstadt Eugene verbrachte, hatte ich ein Post Doctoral Fellowship, also eines von diesen in Amerika sehr gängigen Stipendien, die an ein Forschungsprojekt gebunden sind, das der Leiter der Arbeitsgruppe, in diesem Fall also Wannier, direkt von der National Science Foundation bekommen hat. An seinen Forschungsvertrag mit der National Science Foundation war über seine aktive Lebenszeit, also Zeit an der Universität, hinweg immer eine solche Postdoc-Stelle gebunden. Diese Postdoc-Stelle habe ich dann übrigens als letzter, weil er dann

keinen weiteren mehr angenommen hat, innegehabt und mein späterer Freund und Kollege Mike Garfunkel in Pittsburgh sagte „Naja, Gustav, Du hast eben einfach gezeigt, dass es auch ohne einen Postdoc geht“ [lacht]. Durch Vermittlung und massive Unterstützung von Wannier habe ich dann schon nach einem halben Jahr in Oregon die Einladung gehabt, mich zu bewerben an der Universität Pittsburgh und das hat auch relativ schnell geklappt. So war ich dann vom Sommer 1968 an für gut zwei Jahre als Assistant Professor und zuletzt Associate Professor an der University of Pittsburgh.

Wie würdest Du den Forschungsstil der USA im Vergleich zum Deutschland in den sechziger Jahren beschreiben?

Es war auffallend, dass die Einstellung von nahezu allen Leuten an diesen amerikanischen Physik Departments, die zwei wo ich selber gearbeitet habe, aber auch andere, die ich dadurch etwas näher kennen gelernt habe, viel stärker auf Kooperation angelegt war. Das war ein Arbeitsstil, der in Deutschland nie ganz erreicht wurde. Im Grunde die Gleichrangigkeit, was Wissenschaft und wissenschaftliche Möglichkeiten anbetrifft von allen Personen, sagen wir mal ab der Promotion oder insbesondere allen Leuten vom Assistant Professor aufwärts, da gab und gibt es hinsichtlich des miteinander Umgehens und hinsichtlich des Zugangs zu allen Ressourcen kaum eine Abstufung zwischen einem jungen Assistant Professor und einem berühmten alten Full-Professor. Das ist vielleicht das erste, was auffällt. Was damit natürlich Hand in Hand geht, ist auch eine andere Form des persönlichen Umgangs. Es ist ganz klar, dass alle Professoren einer Fakultät in Amerika sich mit Vornamen anreden, es ist nicht einer vorherigen ausdrücklichen Verabredung bedürftig, dass das so gehandhabt wird. Das sind Äusserlichkeiten. Aber die drücken natürlich etwas aus, nämlich die Selbstverständlichkeit eines freundschaftlichen, kooperativen, intellektuellen Klimas.

Die Kooperationen, von denen Du gesprochen hast, bezogen sich diese auf Experimentalphysik und Theoretische Physik über ganze Fachbereiche hinaus?

Ja! Es war sicher zum einen so, dass die Theoretiker untereinander, soweit sie fachlich miteinander irgend etwas zu tun hatten, natürlich kooperiert haben. Aber viel stärker war im Grunde noch zu spüren die Selbstverständlichkeit der Interaktion zwischen den sogenannten Theoretikern und den sogenannten Experimentalphysikern, wobei ich in Amerika eine ganze Reihe sogenannter Experimentalphysiker

kennengelernt habe, die glänzende Theoretiker waren und viele Theoretiker, die sich immer ganz stark für Experiment und für die Überprüfung ihrer eigenen Arbeit in Experimenten engagiert haben. Also diese Trennung ist in den USA sicher sehr viel weniger spürbar als in Deutschland.

Bei den deutschen Theoretikern kann man oft ein ausgeprägtes philosophisches Interesse an ihren Arbeiten feststellen. Wieder der Vergleich zu den USA: Könnte man im Bösen hier von Pragmatismus sprechen, - also dass das einzig Entscheidende ist, etwas zu berechnen, das man messen kann?

Gut. Im Großen und Ganzen trifft das sicher zu. Ich meine, Amerika hat nun einmal auch eine ganze Philosophie, nämlich eben den Pragmatismus, Anfang des 20. Jahrhunderts hervorgebracht und das ist schon ein bisschen die Leitschnur des wissenschaftlichen Denkens in Amerika. Das will ich nicht bestreiten, weil ich eben Pragmatismus keineswegs nur mit negativen sondern durchaus auch mit positiven Vorzeichen sehen möchte, als den Versuch sich ideologiefrei der Wirklichkeit anzunähern, was immer das im einzelnen heißen mag. Ideologiefreiheit ist natürlich an viele Prämissen gebunden, die selbst wiederum nicht frei von ideologischen Vorurteilen sein mögen, aber als Grundhaltung ist das gegenüber dem Erkenntnisgegenstand „Natur“ wohl begründbar. Wannier zum Beispiel, der ja doch ein Europäer war und blieb, obwohl er mehr als vierzig Jahre seines Lebens in Amerika gelebt und gearbeitet hat, Wannier und ich haben uns irgendwann einmal darüber verständigt, dass es Physiker gibt, die etwas verstehen wollen und solche, die etwas berechnen wollen. Und Wannier selber sagte: „Ich habe ja auch oft etwas berechnet, aber im Grunde interessiert mich natürlich mehr, die Dinge zu verstehen als sie zu berechnen.“ Und mit diesen wiederum sehr pragmatischen Unterscheidungen kann man vielleicht diese beiden Gesichtspunkte etwas illustrieren. Die Zahl der Physiker in Amerika, die sich mit den philosophischen Implikationen ihres Faches beschäftigen, ist vermutlich prozentual noch etwas kleiner als in Deutschland, wo sie ja auch nie so hoch war und tendenziell auch sicher abnehmend ist. Hier war mein Doktorvater Bopp schon ein Ausnahmefall, weil sein eigentliches Interesse sein ganzes Leben hindurch der Frage galt: Können wir aus den allgemeinsten Prinzipien der Betrachtung der Welt, also wenn man so will aus einer Erkenntnisphilosophie heraus, die modernen Entwicklungen der Physik verstehen und vielleicht sogar besser begründen? Ein solches Denken findet man in Amerika nicht sehr oft, obwohl es gerade in Pittsburgh, aber eben nicht bei den Physikern sondern bei den Philoso-

phen, eine Gruppe gab und gibt, die sich auch ganz intensiv mit Grundlagenfragen der Quantenmechanik beschäftigt hat; Leute, die ursprünglich Physiker waren und dann eben dies als Philosophen weiterbetrieben haben.

Zur Physik und Philosophie. Du hast ja, soweit ich weiß, in München zusätzlich zur Physik noch Soziologie studiert. Auch Philosophie?

Ich habe damals, wie es damals in Deutschland eigentlich mehr oder weniger üblich war, meine ersten 4, 5, 6 Semester eine ganze Menge von philosophischen Vorlesungen gehört und habe dann nach meinem Diplom, nämlich genau in der Zeit, wo ich promoviert habe, fast vier Jahre lang ein nicht formalisiertes, aber doch sehr intensives Soziologiestudium betrieben und konnte dann auch Soziologie als eines der Wahlfächer im Rigorosum wählen, damals gab es ja noch eine richtige Rigorosumsprüfung mit Einzelprüfungen in vier Fächern. 1963 habe ich also bei meinem sehr verehrten, später eng mit meiner Frau und mir befreundeten Soziologieprofessor F.K. Francis eine einstündige Soziologieprüfung in der Promotion abgelegt.

Dann folgte Dein Aufenthalt in den USA. Dieser ging zu Ende und Du bist aus einem Land, dessen Forschungsstil stark auf Kooperation ausgerichtet war nach Deutschland zurückgekehrt.

Gut. Dann zurück nach Deutschland, wobei man sagen muss, dass Regensburg im Winter 1970/1971, als ich hier angefangen habe, einen gerade erst aus dem Boden gestampften neuen Fachbereich Physik hatte, mit relativ wenigen Personen, die sich dadurch natürlich sehr schnell auch persönlich gut kennengelernt haben, so dass mich dann also mit den Kollegen und Doktoranden, die wie ich Leute der ersten Stunde der Physik in Regensburg waren, doch eigentlich bis zum heutigen Tag eine zumindest persönliche Freundschaft und auch immer ein gewisser Austausch verbunden hat. Aber in dem selbstverständlichen Maß und Umfang, wie ich es eben in den USA kennengelernt habe, hat es das wohl in Deutschland bis zum heutigen Tag nicht wirklich gegeben und es hängt dann immer noch eigentlich viel stärker von persönlichen Beziehungen, die man aufbaut, ab, wobei das natürlich überall auf der Welt so ist. Ich meine, man arbeitet mit den Leuten zusammen, mit denen man sich gut versteht und die einem sympathisch sind und mit denen einen mehr verbindet als nur, dass man einmal im Labor zusammensteht oder an der Tafel gemeinsam etwas ausrechnet und so ist es natürlich auch in Regensburg möglich. So hat etwa die jahrelange Zusammenarbeit mit dem Experimentalphysiker Prettl

für mich und für das, was ich getan habe, auch in Regensburg eine sehr wichtige Rolle gespielt mit sehr, sehr vielen gegenseitigen Anregungen und Förderungen der wissenschaftlichen Arbeit.

Daran anschließend: Zu was habt ihr beide gemeinsam gearbeitet, was waren die Hauptpunkte eurer gemeinsamen Arbeit?

Du meinst jetzt in Bezug auf Prettl? Na ja, mit Prettl hat die Zusammenarbeit im Grunde so vor 15 Jahren angefangen, als er eben auch anfing, sich sehr intensiv für nichtlineare Dynamik und chaotische Phänomene im Festkörper zu interessieren und da haben wir zu diesen Fragen: Was ist Chaos im Halbleiter?, eine Reihe von Publikationen gemeinsam gemacht und wir haben mit ihm und mit seinen Doktoranden zusammengearbeitet. Fragestellungen, die daraus hervorgegangen sind, sind wieder in Diplomarbeiten und Doktorarbeiten in die Arbeitsgruppe Obermair eingegangen. Das war also vielleicht die stärkste wirklich funktionierende Kooperation, die ich hier in Regensburg mit einem Regensburger Kollegen hatte, wie man an den Namen auf den Veröffentlichungen aus den 80er und 90er Jahren ablesen kann.

Von den Regensburger Kooperationen zu den internationalen Kooperationen. Ein Punkt, der natürlich zentral ist: Die Zusammenarbeit mit Gregory Wannier. Wie lief der Kontakt weiter, nachdem Du in Regensburg warst?

Ich habe seit dem Jahr 1970 oder 1971, als ich nach Regensburg kam, bis Anfang der 80er Jahre fast jedes Jahr mindestens zwei Monate in den USA verbracht und zwar abwechselnd in Pittsburgh, wo ich noch enge Kontakte hatte und dann eben auch immer wieder in Oregon bei Wannier. Die Zusammenarbeit mit Wannier war dann eigentlich auch immer die fruchtbarste und die für unsere Gruppe und die Leute, die aus unserer Gruppe hervorgegangen sind, auch maßgebliche. Douglas Hofstadter, auf den wir ja dann auch noch zu sprechen kommen werden, war natürlich der erste und vielleicht wichtigste in dieser Reihe von Personen, an denen sich diese Zusammenarbeit dann tatsächlich festgemacht hat. Mein Mitarbeiter, Alexander Rauh, der durch Vermittlung von Wannier auch für ein Jahr nach Oregon ging und mein inzwischen als Gründer und Direktor des Potsdam Instituts für Klimafolgenforschung sehr bekannt gewordener langjähriger Mitarbeiter, der vom ersten Semester an bis zur Promotion hier in Regensburg war, Hans-Joachim Schellnhuber, hat auch seine damals schon höchst erfolgreiche wissenschaftliche Arbeit genau in dem Arbeitsgebiet, das Wannier und ich nach Regensburg gebracht hatten, gemacht; 1980-82

konnten Schellnhuber und ich dann zeigen, das Hofstadters Ergebnisse auch unter viel allgemeineren Voraussetzungen zutreffen.

Was ist aus Alexander Rauh und John Schellnhuber geworden?

Alexander Rauh hat sich in Regensburg habilitiert, schätzungsweise Ende der 70er Jahre, um das Jahr '80 herum und hat seit Anfang der 80er Jahre einen Lehrstuhl für Theoretische Physik an der Universität Oldenburg. Schellnhuber aus Ortenburg in Niederbayern hat dort auch das Abitur gemacht im Jahr 1970 oder 1971 und hat als Klassenbester natürlich die Abitursrede gehalten, worauf die Hälfte des Lehrerkollegiums aufstand und empört den Saal verlassen hat. Das war ein bisschen zu seiner Charakterisierung. Schellnhuber hat dann auch in den USA in La Jolla in Südkalifornien gearbeitet, am berühmten Institut von Walter Kohn, der vor ein paar Jahren als großer alter Mann noch den Nobelpreis bekommen hat; von dort ist er über Oldenburg vor etwa 15 Jahren nach Berlin gegangen oder genauer gesagt, nach Potsdam als Gründungsdirektor des durch seine Arbeiten für die Weltklimakonferenzen mittlerweile sehr bekannte Potsdam Institut für Klimafolgenforschung. Er hat die nichtlineare Dynamik als Arbeitsgebiet praktisch auf die globalen Fragen des Weltklimas und der Einflüsse des Weltklimas auf menschliche Gesellschaften übertragen.

Wieder zurück zur Arbeitsgruppe in Regensburg, damals noch das Institut für Festkörperphysik?

Es nannte sich Institut für Festkörperphysik und unsere Zugehörigkeit dazu war vielleicht eine Marotte von mir: Ich wollte eben gerne betonen, dass das, was wir da machen nicht reine Theorie ist, sondern dass das zwischen Theorie und Experiment steht und habe deswegen ganz entschieden dafür optiert, dass mein Lehrstuhl nicht dem Institut für Theoretische Physik, sondern dem Institut für Festkörperphysik zugeordnet wird, was letztenendes nur ein Name ist und nicht tiefe weitere Folgen hatte, aber ich wollte damit eine Einstellung sichtbar machen. Und in diesem Institut für Festkörperphysik, da gab es die starke und gute experimentelle Halbleitergruppe um Gebhardt herum und die Gruppe von Hoffmann mit intensiver Forschung über Magnetismus und magnetische Phasenübergänge. Da hat es immer wieder relativ enge Kooperationen, zumindest was Forschungsseminare anbetrifft, gegeben. Das Buch, von Krey und Gebhardt über Phasenübergänge ist im Grunde auch eines der Ergebnisse von so einer Kooperation, in der wir uns viele Jahre lang in den 70er

Jahren mit Phasenübergängen beschäftigt haben und wo ich als Theoretiker ein bisschen mitgemischt habe.

Nun zum zentralen Punkt unseres Gesprächs: Douglas Hofstadter und seine Arbeit mit Rumpelstilzchen.

Hofstadter und Rumpelstilzchen! Ja, Wannier kam auf mein Betreiben hin im Winter 74/75 mit einem Stipendium der Humboldtstiftung für ein halbes Jahr nach Regensburg und brachte seinen besten Doktoranden, den jungen Douglas Hofstadter nach Regensburg mit. Damals waren wir ja noch mit Personalmitteln sehr gut ausgestattet, da kann man sich heute nur noch mit Wehmut daran erinnern. Das war ja damals noch eine kleine Universität mit relativ kleinen Studentenzahlen, zwei Theorielehrstühlen, denen je vier volle wissenschaftliche Mitarbeiterstellen, also entweder BAT II A oder wissenschaftlicher Assistent zugeordnet waren, also A 13 Bezahlung. Das ist mittlerweile auf die Hälfte geschrumpft bei weitaus größeren Studentenzahlen. Damals war es ohne weiteres möglich, Doug Hofstadter eine von diesen Assistentenstellen anzubieten. Das hat sicher auch dazu beigetragen, dass die Zusammenarbeit sehr reibungslos war, weil man nicht das Gefühl hatte, dass man jemand ausnützt, wenn er für 8 Monate in Regensburg arbeitet.

Hofstadter hatte ja ein nicht ganz einfaches Leben als junger Physiker, denn der Sohn eines Physik-Nobelpreisträgers zu sein und dann in dem selben Fach zu arbeiten, das ist sicher eine biographische Belastung, mit der man fertig werden muss. Und deswegen hat er sich eben wohl auch ganz bewusst nicht in dem Gebiet betätigt, in dem sein Vater gearbeitet hat, nämlich der experimentellen Hochenergiephysik. Robert Hofstadter hat ja als erster mit Elektronenstreuexperimenten bei sehr hohen Energien den sogenannten Formfaktor des Protons und des Neutrons untersucht, Dinge, die bis zum heutigen Tag aktuell sind. Über die Theorie zu diesen Experimenten hatte ich 1961-63 bei Bopp viel gelernt. Wenn man heute Vorträge aus dem Bereich der Quantenchromodynamik hört, da geht es immer wieder um diese Frage, nach der inneren Struktur der schwereren Elementarteilchen. Hofstadter sen. war der erste, der darauf eine experimentelle Antwort gefunden und eben gezeigt hat, dass das Proton kein Punktteilchen ist, sondern dass die Ladungsverteilung und wie dann später gezeigt wurde auch die Spinverteilung des Protons eine endliche räumliche Ausdehnung hat, die man heute mit der Dynamik von Quarks und Gluonen zu berechnen versucht. Gut, Douglas Hofstadter hat bewusst nicht in Kalifornien,

wo sein Vater war, sondern in Oregon promoviert und hat bewusst zunächst einmal eben Festkörpertheorie gewählt und ist dadurch zu Wannier gekommen. Die Arbeiten, die Wannier mit mir und einige mit Alexander Rauh zwischen 1972 und 1974 gemacht hatte, waren dann der Ausgangspunkt auch von Dougs Dissertation über ein fast 50 Jahre nach Entstehung der Quantentheorie (um 1925) noch immer ungelöstes Problem: Ein Elektron in einem Festkörper, das einem doppelten Einfluss ausgesetzt ist, nämlich einerseits dem periodischen Potential, das durch das Kristallgitter vorgegeben ist und zum anderen dem homogenen äußeren Magnetfeld, das dem System auch eine Länge aufprägt, nämlich durch die Quantisierung der Zyklotronbahnen, also der Kreisbahnen des freien Elektrons im Magnetfeld. Durch die Quantisierung dieser Zyklotronbahnen gibt es neben der Gitterkonstanten eine weitere Länge, nämlich genau den Radius der verschiedenen zulässigen, nach Bohr-Sommerfeld-Quantisierung sogar ganz einfach elementar nachrechenbaren, Kreisbahnen. So hat man hier mit einem Problem zu tun, in dem es auf das Verhältnis von zwei verschiedenen dem Elektron aufgeprägten Schrittlängen ankommt, nämlich Gitterkonstante versus quantisierter Zyklotronradius. Als erster hatte der amerikanische Physiker E. Brown Mitte der 60er Jahre schon herausgefunden, dass die seit 30 Jahren bewährte Anwendung der Gruppentheorie auf quantenmechanische Systeme in diesem Fall auf eine zahlentheoretische Fragestellung hinausläuft, nämlich: Sind diese beiden Zahlen, der Radius der quantisierten Zyklotronbahn und die Gitterkonstante, zueinander in einem rationalen Verhältnis, sind sie also kommensurabel, so dass das Elektron sich bewegen kann wie ein Kind, das z.B. bei jedem zweiten Schritt auf die nächste Platte eines mit großen Platten belegten Weges tritt und niemals verbotener Weise auf eine Ritze, oder sind sie inkommensurabel, d.h. in einem irrationalen Verhältnis. An der Stelle ist zum ersten Mal eine Verbindung der Physik über die Quantenmechanik mit der Zahlentheorie sichtbar geworden, einiges später, nämlich in den späten 70er Jahren, ist ja dann endgültig durch das sogenannte KAM-Theorem der nichtlinearen Dynamik auch gezeigt worden, dass es in der Tat in der Physik eine ganze Menge von Fragestellungen gibt, sogar in der Klassischen Physik, wo die Frage, ob zwei physikalische Größen zueinander in einem rationalen Verhältnis, also wie 1 zu 2 oder wie 5 zu 7 stehen oder in einem irrationalen Verhältnis, wie zum Beispiel im Verhältnis des ‚Goldenen Schnitts‘ von 1 zu $(\sqrt{5} - 1)/2$, dass diese Frage tatsächlich einen entscheidenden Einfluß auf das Verhalten eines Systems haben kann. Was wir wussten, als wir im Jahr '74 angefangen haben, Gregory Wannier, Alexander Rauh, Douglas Hofstadter und ich erschien

bizar: bei einem Wert des Magnetfeldes, das etwa einem Verhältnis der Schrittlänge von 7 zu 5 = 1.4 entsprach, sollte das Verhalten von Elektronen – und damit letztlich eine messbare Größe wie die diamagnetische Suszeptibilität eines Metalls – vollständig anders sein als bei einem nur unmerklich größeren Wert, der etwa dem Verhältnis von $\sqrt{2}$ zu 1 = 1.41421... entspricht und wieder vollständig anders als bei 71 zu 50 = 1.42 usw. Es gab eine Gleichung, die, – muss man fairer Weise sagen –, nicht von uns erfunden worden war, sondern die als erster ein Amerikaner namens Harper, schon im Jahre 1953 glaube ich, aufgestellt hatte, nämlich eben die unter bestimmten vereinfachenden Annahmen hingeschriebene Schrödinger-Gleichung für ein Elektron im periodischen Potential des Gitters plus angelegtes Magnetfeld. Man kannte diese Gleichung, aber man kannte keine brauchbaren Lösungen dazu. Und was Hofstadter dann angefangen hat, ist, dass er mit numerischen Experimenten und mit einer unglaublich geschickten Ausnutzung der gar nicht so beschränkten Möglichkeiten von diesem Hewlett-Packard Tischrechner erst einmal einfach viele, viele Fälle durchgerechnet hat und damit einen Atlas der möglichen Lösungen für verschiedene rationale Verhältnisse dieser beiden von mir genannten Größen aufgestellt hat. Als dieser Atlas einigermaßen fertig war, da hat er dank seiner Kenntnisse in der Zahlentheorie gesehen, dass da bestimmte komplexe Einflussfaktoren in der Struktur liegen, die das Spektrum erklären lassen. Auf der Basis dieser numerischen Experimente konnte eine Systematik der Entwicklung des Spektrums, also der erlaubten Energiezustände eines Systems mit dieser zweifachen Schrittlänge angegeben. Damit hat er wohl als erster gesehen, dass in quantenmechanischen Systemen solche Phänomene auftreten, wie man sie dann später in klassischen chaotischen Systemen auch untersucht hat. Dabei spielen sogenannte Fraktale eine Rolle, das Spektrum der Kristall-Elektronen im äußeren Magnetfeld bildet eben als Ganzes gesehen ein Fraktal, das heißt also ein Gebilde, das im allgemeinen aus überabzählbar vielen Punkten besteht, die aber hierarchisch in einer endlichen Zahl von Häufungen angeordnet sind. Naja, so viel vielleicht zu dem wesentlichen Inhalt dieses Hofstadter-Ergebnisses, das sogenannte Hofstadter-Spektrum, das als Graph so ein bisschen aussieht wie ein Schmetterling mit Bänderungen auf den Flügeln und das auch unter dem Namen Hofstadter-Schmetterling, Hofstadter-Butterfly, in die Literatur eingegangen ist.

Noch einmal einen Schritt zurück. Als Du 1971 nach Regensburg kamst, bist Du kurze Zeit später zum Rektor der Uni gewählt worden. Gleichzeitig hattest Du einen

neuen Lehrstuhl aufzubauen. Inwieweit hat Dich die Tätigkeit als Rektor eingeschränkt in der aktuellen Forschungsarbeit? Wie lief die Forschungsarbeit während der Zeit als Rektor?

Naja. Zum Glück hatte ich eben doch die Möglichkeit, in den ersten 10 Monaten, bevor ich – nolens-volens mit 100 zu 99 Stimmen gewählt – das Rektorat angetreten habe, schon eine Gruppe einigermaßen aufzubauen. Ich hatte als Doktoranden und Assistenten, – aus Amerika mitgebracht –, einen jungen brasilianischen Physiker, der sich 1963 bis 1965 zu Beginn der später viele Jahre herrschenden brasilianischen Militärdiktatur sehr stark in der brasilianischen Studentenbewegung engagiert hatte und deshalb allen Grund hatte die Möglichkeit zu benutzen, die er, glaube ich, im Jahr 1966 bekam, als Graduate Student in die USA zu entkommen. Diesen Luis Carlos de Menezes habe ich in Pittsburgh kennengelernt und konnte ihn dann im Herbst 1970 hier nach Regensburg mitbringen. Er war eine sehr wichtige Figur an dem Lehrstuhl in diesen ersten drei Jahren. Er hat eben nicht nur gute Physik gemacht, sondern hat uns auch ein Stück Welt und ein Stück der Probleme der anderen Welt hier in Regensburg immer wieder ins Bewusstsein gebracht. Als er schon sehr gut Deutsch konnte, hat er einige wirklich brillante Vorträge gehalten über die Geschichte Brasiliens als Prototyp einer ehemaligen Kolonie unter dem treffenden Titel: „Die Entwicklung der Unterentwicklung“. Er hat unsere Gruppe immer wieder mit den wichtigen Autoren zu diesen Fragen, wie Frantz Fanon und den Arbeiten von Herbert Marcuse konfrontiert. In einer langen Reihe von Seminaren unter dem Obertitel „Das Projekt des Imperialismus“ haben wir gemeinsam an diesen Problemen gearbeitet.

Gut. Es gab schon eine kleine Gruppe von sehr guten Leuten, die in der Zeit, wo ich durch mein Rektorat sehr wenig Zeit hatte mich um Physik zu kümmern, einfach weitergearbeitet haben. Es sind ja insgesamt glaube ich doch vier Promotionen ein gutes Stück vorangekommen in den Jahren 1971 bis 1973, in denen die Leute einfach gut für sich allein gearbeitet haben und sich von mir manchmal einen Rat holen können.

Welche internationalen Kooperationen hatte Deine Arbeitsgruppe noch in den 70ern?

Naja, ich habe dann immer wieder in den 70er Jahren natürlich auch Gäste aus meinen anderen US-Verbindungsstellen nach Regensburg geholt, Fred Keffer, damals

sehr bekannt, heute noch nachlesbar als Autor des Bandes „Ferromagnetismus“ in dem großen Springer Handbuch der Physik, in diesem mehr als 35bändigen Werk, das in den 60er Jahren entstanden ist. Fred Keffer, einer der Spezialisten unter anderem für Spinwellen und für andere Fragen der Theorie des Ferromagnetismus, war hier in Regensburg für einige Monate und hat Seminare über die Anwendung der Transfermatrizen, die man eigentlich aus der Theorie des Magnetismus kannte, auf Molekularbiologie gehalten; das war der Ausgangspunkt einiger Arbeiten in unserer Gruppe. Das war so zu sagen die eine Schiene, Zusammenarbeit und regelmäßiger Austausch mit Pittsburgh, und die andere Verbindung war die schon mehrfach angesprochene nach Oregon, die natürlich am intensivsten war durch die Zusammenarbeit mit Wannier, der regelmäßig auch nach diesem einen guten halben Jahr, wo er als Humboldt-Stipendiat hier war, nach Regensburg zu Besuch kam. Ich war dann in den späteren 70er Jahren bis zum Jahr 1982 eigentlich fast jedes Jahr einmal bei Wannier in Oregon, so dass dann eine Reihe von weiteren Arbeiten entstanden sind, die wiederum mit Doktoranden von Wannier aus Oregon ausgearbeitet wurden. Eine Arbeit, die nach wie vor sehr viel zitiert wird, in der es um die Zustandsdichte des Hofstadter-Spektrums geht, die trägt drei Namen, nämlich Ray, ein Inder, der damals bei Wannier gearbeitet hat und Wannier und meinen Namen. Ja, soviel zu den internationalen Kooperationen in dieser Zeit.

Gut. Wir haben bis jetzt sehr viel über andere gesprochen. Die internationalen Kooperationen sind natürlich auch mit Deinen Forschungsinteressen verknüpft. Mit welchen weiteren Fragen hattest Du Dich beschäftigt?

Das andere zwischen 1960 und 1980, auch sehr heiße Thema war Theorie der Phasenübergänge, die Frage der sogenannten Universalität. Also, kann man verstehen, dass das Verhalten von realen Gasen in der Nähe des kritischen Punktes, wo man sie also erstmals verflüssigen kann und das Verhalten von Ferromagneten in der Nähe des Curie-Punktes, wo sie anfangen, aus dem paramagnetischen in den ferromagnetischen Zustand überzugehen und das Verhalten von Ferroelektrika, die einen ferroelektrischen Phasenübergang zeigen und vieler anderer Systeme, die eben bei einer ganz bestimmten Temperatur aus einer Phase in die andere Phase übergehen, kann man verstehen, dass deren Verhalten in Bezug auf bestimmte charakteristische Größen, die man an so einem Phasenübergang messen kann, durch genau die selben Zahlen charakterisiert wird, die sogenannten kritischen Exponenten. So nehmen die kritischen Exponenten für ein Stück Eisen am Curiepunkt und für Luft bei

der Verflüssigung mit hoher Genauigkeit den selben Wert an, obwohl es sich offenbar um vollkommen unterschiedliche Phänomene handelt, obwohl vollkommen andersartige Kräfte in einem wie im anderen Fall wirksam sind – bei Gasen sind es im wesentlichen die van-der-Waals-Kräfte zwischen den Gasmolekülen, im Falle des Ferromagnetismus sind es die quantenmechanischen Austauschkräfte, die einen vollkommen anderen Charakter, andere Abstandsabhängigkeit usw. haben und dennoch kommt dieses universelle Verhalten heraus. Diese Universalität der kritischen Exponenten war eine der interessantesten Forschungsfragen in den 70er Jahren und das war eine der Sachen, mit der sich unsere Arbeitsgruppe damals beschäftigt hat. Wir haben so ein paar etwas exotischere Modelle untersucht, bei denen teilweise eben auch dieses selbe universelle Verhalten herauskam, aber es gibt dann auch Modelle, die in einer anderen Universalitätsklasse sind. Einen Zoo der verschiedenen Universalitätsklassen aufzustellen und auch zu versuchen zu verstehen, warum da diese dann doch im Grunde sehr drastischen Unterschiede sind, das war eine der Geschichten, an denen wir da gearbeitet haben. In Pittsburgh hatte ich die erste Vorarbeit dazu gemacht, indem ich das sogenannte sphärische Modell des Ferromagnetismus, das auf den berühmten australisch-amerikanischen Physiker Katz, Anfang der 50er Jahre zurückgeht, genau auf diese Frage der kritischen Exponenten hin wohl als erster untersucht habe und dann haben wir dazu beigetragen, einigermaßen zu verstehen, warum eigentlich dieses Auseinanderfallen von solchen Wechselwirkungen in Systemen in verschiedene Universalitätsklassen zustande kommt und wie man das begründen kann.

Es fällt mir auf, dass Du immer von Deiner Arbeitsgruppe sprichst und das Wort „ich“ nur sehr selten verwendest. Das ist wohl zum einen die wissenschaftliche Bescheidenheit. Zum anderen deutet der Begriff „Arbeitsgruppe“ wieder auf einen Forschungsstil hin, der stark auf Kooperation ausgerichtet ist. Ist das etwas, was Du aus den USA mitgenommen hast? Hängt es mit Deinem gewerkschaftlichen Engagement, Du bist ja Vertrauensdozent der Hans Böckler-Stiftung, zusammen?

Ja, Du hast im Grunde schon ein paar Punkte genannt, die da sicher zusammenkommen. Also. Gut, da gibt es den Zeitgeist..., man sollte sich noch einmal an das Klima, das in vielen Teilen der Welt so um das Jahr '70 herum an den Hochschulen entstanden war, erinnern. Nämlich weg von der Alleinherrschaft der großen Ordinarien und das war ja im Grunde auch einer der Gründungsideen, eine Idee, die damals ja doch relativ viele, vor allem jüngere Naturwissenschaftler auch in

Regensburg vertreten haben. Wir wollten eine kooperative Universität und nicht eine Ordinarien-Universität hier in Regensburg aufbauen und bis zu einem gewissen Grad hat diese Gründungs idee bis zum heutigen Tag, glaube ich, die Universität Regensburg positiv geprägt. Speziell in den Naturwissenschaften, glaube ich, ist dieser Arbeitsstil eigentlich bis zum heutigen Tag mehr oder weniger eingeführt und ich stelle mit großer Freude fest, dass es doch auch bei den Medizinern mittlerweile eine ganze Reihe von jüngeren Ordinarien am Klinikum in Regensburg gibt, die genau diesen kooperativen Forschungsstil pflegen und keine Halbgötter in Weiß sind. Soviel zu der allgemeinen Einbettung dieser Geschichten. Dass ich mich persönlich immer darum bemüht habe kooperativ zu arbeiten und immer davon überzeugt war, dass auch am meisten herauskommt, wenn Leute mit möglichst wenig Hierarchie miteinander über die Dinge, die sie gemeinsam wichtig finden, kommunizieren, das kommt sicher hinzu. Der gute Stil, den es in Amerika im Grunde auch schon lange gab, nämlich dass eben bei einem Artikel, der mehrere Verfasser hat, diese Verfasser in alphabetischer Reihenfolge erscheinen oder der jüngste, der den entscheidenden Beitrag geleistet hat als erster Autor auf dem Papier steht, diesen Stil haben wir versucht halt auch in Deutschland durchzuhalten.

Als abschließende Frage der Begriff der Solidarität. Du hast vor kurzem den Gedanken der Solidarität angesprochen, der am Lehrstuhl immer gepflegt wurde und auch die Beziehung zu den arbeitenden Menschen in diesem Land, die die Werte schaffen und damit überhaupt erst die akademische Arbeit ermöglichen. In welcher Form war so etwas präsent in Deiner wissenschaftlichen Tätigkeit? Naturwissenschaftler betonen ja immer wieder die Objektivität, die Notwendigkeit der Ideologiefreiheit. Bei manchen Punkten ist es weniger offensichtlich, manche andere Punkte besitzen unmittelbaren gesellschaftlichen Bezug wie die Kernenergie. Könntest Du bitte zu diesem Komplex noch ein paar Worte sagen?

Naja. Also, es geht um die Anerkennung dieser Grundidee, die ich versucht habe mein Leben lang nicht zu vergessen, nämlich dass eben die akademische Welt nur ein Überbau eines allgemeinen gesellschaftlichen Systems ist, in dem andere Leute ihre Haut sehr viel mehr zum Markt tragen müssen, um ihren Lebensunterhalt und den Wohlstand der Gesellschaft zu schaffen. Das ist das eine, diese Idee; das andere ist ihre Realisierung im Alltag und da kann man natürlich nicht davon absehen, dass es in einer hochentwickelten und hochdifferenzierten Gesellschaft einfach eine starke Trennung zwischen der Welt der Arbeit, um es einmal sehr verkürzt zu

sagen, und der Welt der Akademiker gibt und die lässt sich durch keine dezisionistische Setzung aufheben. Wo ich versucht habe mitzuwirken, ist zum Beispiel auch in Regensburg einen gewerkschaftlichen Arbeitskreis Universität zu schaffen, wo man zumindest regelmäßig mit aktiven Gewerkschaftlern, mit den regionalen Betriebsratsvorsitzenden usw. zusammen kam und Probleme ausgetauscht hat. Das hat nur an wenigen Stellen dann wirklich zu Aktivitäten geführt, außer dass man sich vielleicht ein bisschen besser kennengelernt hat und mehr Verständnis für die Probleme der jeweils anderen Seite bekommen hat. In einem Fall haben wir zusammen mit den Stipendiaten der Hans Böckler-Stiftung versucht, auf die Weiterentwicklung der Zellstofffabrik in Kelheim Einfluss zu nehmen; der Betriebsrat hat unseren Sachverstand und den Sachverstand von Chemikern, die wir da noch dazu holen konnten, benutzt, die Zukunft der Zellstofffabrikation in Kelheim auf einem möglichst schadstofffreien Produktionsniveau zu sichern. Das hat am Schluss dann leider die Konzernspitze nicht davon abgehalten, das Kelheimer Werk einfach zu machen, weil die Umweltauflagen dem Konzern zu teuer waren. Aber das war so ein Beispiel, wo es einmal handgreiflich wurde. Man kann tatsächlich in ganz konkreten Situationen eine Zusammenarbeit zwischen Wissenschaftlern an der Hochschule und Praktikern in Betrieben zustande bringen. Ansonsten hast Du ja schon den Punkt Kernenergie in Deutschland genannt und da muss ich auch noch einmal den Alexander Rauh, den ich vorhin schon ein paar mal erwähnt habe, hervorheben, der relativ früh und mit mir vollkommen einig und an vielen Stellen auch gemeinsam sich gegen den weiteren Ausbau der Kernenergie in Deutschland gestellt hat. Seit Mitte der 70er Jahre haben wir versucht, die Argumente nicht nur zu formulieren sondern auch unter die Leute zu bringen, weshalb Kernenergie keine menschengerechte Technologie darstellt – mal sehr verkürzt gesagt. Und das Engagement gegen die Weiterentwicklung der Kernenergie hat dann ja in den späteren 80er Jahren in Regensburg und Ostbayern eine besondere Akzentuierung erfahren durch das Projekt der Wiederaufarbeitungsanlage Wackersdorf; da bin ich dann schon viele Jahre lang im Grunde wie ein Wanderprediger von einem SPD Ortsverein zu einer ÖTV Versammlung in ganz Bayern gereist und habe versucht den Kolleginnen und Kollegen die Argumente nahe zu bringen, weshalb Kernenergie insgesamt eine sehr problematische Technologie in einer demokratischen Gesellschaft ist und weshalb insbesondere die Wiederaufarbeitung von Kernbrennstoffen sowohl unter Umweltsichtspunkten wie letzten Endes vor allem unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten einfach eine vollkommene Fehlentwicklung ist. Diese Argumente, die natürlich

nicht nur von mir sondern von vielen, vielen, vielen Leuten kamen, der ganze Einsatz gegen die Plutoniumwirtschaft hat dann zum Schluss ja auch dazu geführt, dass die Betreiber unter der Federführung des damaligen Chefs von VEBA, also einem der größten Energiekonzerne, gesagt haben: Es ist wirtschaftlich unsinnig, die Leute sind dagegen, wir haben bürgerkriegsähnliche Zustände in der Oberpfalz, wir lassen dieses Projekt doch lieber fallen.

Jetzt sind wir schon bei einem anderen Themenbereich angelangt, der ebenfalls sehr spannend ist, aber ich möchte ihn hier nicht weiter ausbauen. Zum Abschluß möchte ich Dich doch noch um eine Anekdote bitten. Du hast in München noch Sommerfelds Sekretärin kennengelernt, die Dir einmal eine überaus nette Anekdote erzählt hat in Bezug auf den Humanitätsanspruch von Sommerfeld und den Prüfungsbetrieb. Dieser Humanitätsanspruch war für Dich ja auch immer etwas Leitendes.

Hm. Na, ja, das ist, . . . Ich liebe diese Anekdote und ich habe ja auch versucht in diesem Punkt immer dem Sommerfeld nachzueifern. Sie erzählte eben, – damals hieß man ja noch Fräulein, eine ältere Dame von 60 Jahren hieß noch Fräulein, nicht mehr ganz junge Dame, vorsichtig. Fräulein Hutzler erzählte mir: Sommerfeld hat jedes Semester einmal in der gemeinsamen, auch für Studenten zugänglichen Bibliothek des Instituts für Theoretische Physik einen Karteikasten stehen lassen, in dem er sorgfältig auf Karteikärtchen alle Prüfungsfragen, die er typischerweise in Diplomprüfungen und in mündlichen Lehramtsprüfungen stellte, aufgeschrieben hatte. „Und dann ist Herr Professor Sommerfeld zu mir gekommen und hat gesagt: Fräulein Hutzler, der alte Geheimrat war wieder so vergesslich; morgen früh holen Sie doch bittschön so gegen Mittag den Karteikasten aus der Bibliothek ab. Ich hoff, dass die Studenten bis dahin alle Karteikarten abgeschrieben haben, dann lernen sie doch wenigstens das, was wirklich wichtig ist.“ Und diese Idee, dass eben Prüfungen ein Gespräch über wichtige Fragen sind, in dem im günstigsten Fall der Prüfling und der Prüfer etwas lernen und miteinander reden über Dinge, von denen sie beide ein bisschen was verstehen und dass die Prüfung eben nicht ein Willkürakt eines Überlegenen gegenüber einem Unterlegenen sein sollte, diese Grundidee hat mir außerordentlich eingeleuchtet und so habe ich es auch versucht immer zu handhaben. Eines der schönsten Komplimente, das ich in der Hinsicht bekommen habe, war von einem damaligen Studenten, der zu mir nach der Diplomprüfung sagte: Ich habe jetzt zwei Prüfungen bei Dir gemacht und in jeder von diesen beiden Prüfungen habe ich mehr Physik gelernt als manchmal in einem ganzen Semester.

Of Rumpelstilzchen and of Gplot

Douglas Hofstadter

This is the strange-but-true story of how a funny little machine named Rumpelstilzchen spun metaphorical straw into metaphorical gold night after night after night in a solitary dark office in the Lehrstuhl of Obermair in the Fachbereich of Physik in the town of Regensburg in the state of Bavaria in the land of Germany in the season of autumn in the far-off year of nineteen hundred and seventy-four.

Struggles with Physics

In the spring of that year, I was a disillusioned graduate student of elementary particle physics at the University of Oregon in Eugene. I had tried for several years to find meaning and beauty in the theory of elementary particles, but everywhere I looked I saw only ugliness – and since I am a person whose core is defined by a belief in beauty, when I saw all this ugliness, I was sure I was seeing falsity, and hence I despaired that the field was riddled by false ideas and theories. My despair was exacerbated by the strange fact that the wise people in whom I confided were all sympathetic with my complaints about the pervasive ugliness in the discipline, but each one of them said consolingly to me, "However, Doug, there is *one* thing that is truly beautiful in this sadly pockmarked field, and I will now tell you about it. Look!" Then they would each tell me something that I found hideously ugly, and at the end they would each beam at me and ask, "Now, could anybody deny that this is truly beauty incarnate?" All I could do was to thank them for their kindness and look elsewhere.

This sad process repeated itself several times, and in the end I was forced to abandon particle physics – but by that point, I had invested something like six years of my life in graduate school in physics, and I realized that if I were to abandon the pursuit of a Ph.D., I would go away empty-handed and without the crucial "passport" for obtaining an academic job. I deeply loved physics and mathematics, and my only hope for studying them during the rest of my life was through being a professor. And so I struggled with my dilemma.

You see, I had entered physics with a prejudice, which was that the only *deep* part of physics was particle physics, since it dealt with the fundamentals and universals of the universe (oh, and perhaps Einstein's general relativity, too, was respectable, since it would be hard to argue against the fundamentality and universality of space and time and gravitation). To me, by contrast, solid-state physics seemed like "applied physics" – almost engineering – and I scornfully looked down my nose at such lowly things, even though some of my close friends in graduate school were studying it.

A Closed Mind Opens

But after six years of struggle, with the door of particle physics finally solidly shut, I became desperate, and as a consequence I had to become more open-minded, and had to look down hitherto unexplored avenues. I recall two crucial things that helped to open my mind towards solid-state physics.

The first was that I was in those days just beginning to sketch out my book "Gödel, Escher, Bach", and I was deeply interested in thinking about and writing about how certain mysterious high-level phenomena, such as life and consciousness, can emerge out of completely different low-level substrates, such as cells or inanimate molecules or, ultimately, elementary particles. The fantastic difference between the phenomena on the low level and those on the high level seemed to require explanations that "bridged" the two levels, perhaps analogous to the bridge that links the microphenomena of statistical mechanics with the macrophenomena of thermodynamics. With my close friend Francisco Claro, who had recently gotten his Ph.D. in solid-state theory, I started musing about this crucial need for explanatory bridges in science, and he helped me to realize that the jump from atoms to solids is precisely

that kind of thing. I could see that the macroscopic properties of solids that we know come somehow, nearly magically, out of the microscopic properties of tiny entities that we know not. (At least we do not know them directly.) And so, thanks to Francisco's friendly and persistent prodding, I came to see that there could be found a kind of romance and a kind of poetry not solely in the single low level of particles, but also in the vertical bridge-building of solid-state physics, which I had earlier looked down upon.

The second thing that helped me greatly was a casual remark made by a physics grad student at Stanford to whom I once spoke about my despair. He said to me, "You know, solid-state physics is very much like particle physics, but the difference is that instead of a continuous vacuum, it has a discrete vacuum. In other words, a crystal lattice is to empty space as the lattice of integers is to the real line." Now this was a radically new perspective to me. I had never conceived of a crystal as a kind of "anisotropic, periodic vacuum", but as soon as I heard this statement, I thought it was a beautiful, poetic way of perceiving a crystal, and this charmed me enormously.

Sniffing an Alluring Enigmatic Aroma

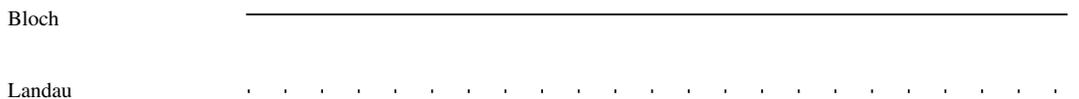
With my mind thus liberated from old prejudices, I went and did the previously unthinkable: I approached three non-particle physicists in the department at Oregon about potential thesis topics! However, none of the projects they mentioned excited me in the least.

The fourth and final professor whom I approached was Gregory H. Wannier, perhaps the department's most distinguished member. Wannier had been strongly suggested to me by two people, of whom one was my father, Robert Hofstadter, who had been a co-graduate student with Wannier at Princeton in the late 1930's. My father thought Wannier was very smart, although he described him as (and I quote) "an odd duck". The other person who admired Wannier deeply was Francisco Claro, who had gotten his Ph.D. under Wannier, and who had great respect for the latter's powerful and instinctive insight into physics. Given these recommendations, I was very hopeful when I went to Wannier's office to talk to him, and I recall that he had three potential topics that he told me about, but to the first two I had no reaction at all. It was the third that turned the trick, however.

Wannier told me that one of the most fundamental, natural, and simple questions about solids was still almost a complete mystery after 40 years of attacks from all sides. This was the question of how a crystal interacts with a magnetic field in which it is immersed – in particular, what is the energy spectrum of a Bloch electron (an electron of the crystal)?

The analogous question with an electric field had been answered early on, with the Stark effect – but almost no similar deep insights had been found in the magnetic case. This troubled Wannier, and he went on to tell me that not only was it an unsolved problem, but there was a deep mystery connected with it. This sounded intriguing to me. He then began to describe this mystery, and he started talking about something he called "rational magnetic fields" and "irrational magnetic fields". Although I didn't fully follow what he was talking about, I got the main idea, which was first of all that people had found that, thanks to the existence of certain fundamental constants whose product is a natural unit of magnetic flux (the "flux quantum", as it is called), there is a way of stating the value of a magnetic field in a crystal that is independent of any specific system of units – in other words, there is a "pure number" (i.e., dimensionless) associated with any magnetic field in a crystal. (It is, in fact, the amount of magnetic flux passing through a unit cell of the crystal, divided by the flux quantum. Since it's a ratio of two fluxes, the units cancel out and you get a pure number.) This in itself was not so surprising, but what was truly mind-boggling was the next fact that Wannier told me, which was that apparently, when this dimensionless number was *rational*, a certain kind of Bloch-electron spectrum was found, whereas when it was *irrational*, a totally different kind of spectrum was found.

Wannier reminded me that a solid normally has energy bands called "Bloch bands", and so one wanted to see what happened to a single Bloch band when the magnetic field was turned on and slowly increased. Would it shift, or break up into sub-bands, or what? He also reminded me that in the absence of a crystal, an electron in a magnetic field takes on so-called "Landau levels", which are perfectly sharp, evenly-spaced energy levels, like the rungs of a ladder. So how does nature reconcile these deeply contrasting behaviors – a continuous Bloch band, on the one hand, and a discrete series of Landau levels, on the other? Turned sideways, you have these two pictures:



They certainly are very different in appearance.

As a total novice to the question, I certainly didn't have the foggiest idea what would

happen when the magnetic field was turned on, but Wannier told me that the answer was that the Bloch band would always split up into sub-bands, whose number depended on the value of the magnetic field. This sounded eminently plausible to me, but then he went on, saying that the number of sub-bands in the case of a "rational" magnetic field p/q was exactly equal to the integer denominator q , and that when the field was irrational, all bets were off. "Irrational" magnetic fields, according to Wannier, seemed to be totally intractable mysteries.

My reactions were both incredulity and fascination. To me, it seemed impossible that nature could "know" whether the decimal expansion of a magnetic-field value was periodic or not – and when you considered that arbitrarily close to any irrational number there are infinitely many rationals (and vice versa), this idea seemed even sillier. If there were a qualitatively different kind of behavior depending on whether some continuously varying quantity were rational or irrational, that would imply that physics could not even be continuous. And anyway, how could nature know if a magnetic field was equal to $1/2$ or $2/4$ or $50/100$? Nature doesn't reduce fractions to their lowest terms! Nature doesn't think about the numerators and denominators of fractions, but about *magnitudes*! The more I thought about what Wannier was telling me, the more it sounded like utter nonsense.

Though an instinctive disbeliever in what I was hearing, I was also fascinated. Firstly it was fascinating to me, even seductive, precisely because it seemed so crazy! (It wasn't ugly as sin, like elementary particle physics had been – it was just bizarre as hell.) And secondly it was fascinating to me because I, as an undergraduate mathematics major at Stanford some ten years earlier, had studied many recursive sequences of integers on my own, and my long branching pathway of research had inevitably led me into contact with central questions about rational versus irrational numbers.

Back in those days, I had even invented a strange but extremely elegant function of a real number that was continuous at all irrationals and took a discontinuous jump at all rationals. Despite its remarkably counterintuitive behavior, I came to understand this function extremely deeply, first through observing its properties empirically, with the aid of a large computer, and later by proving those properties rigorously. The most important property of my function INT was that its graph (between $x = 0$ and $x = 1$) was a filigree-ish shape that consisted of an infinite number of smaller,

and slightly distorted, copies of itself. Naturally, those smaller copies themselves consisted of nothing but yet smaller copies of INT, and so on, ad infinitum. It was an infinite regress to end all infinite regresses! (And please understand that the terms "fractal" and "Mandelbrot set" had not yet been invented, let alone become household buzzwords. This function was truly a new kind of thing.) INT was perhaps the mathematical discovery of which I was most proud.

And now back to the University of Oregon and my physics tale... My ears perked up when I heard Wannier talking about "rational" and "irrational" magnetic fields, because I said to myself, "Gee, Doug, you love those kinds of things, and you know quite a bit about them. Of course it seems crazy that such things should turn up in the middle of physics, but if they do, it's just the kind of thing that would appeal to you – so why not give it a try?"

And so I told Wannier that this was the problem for me. I didn't try to explain to him why I was drawn to it through connections with my old number-theory research from ten years earlier; I just said I liked the problem.

Saved by Azbel'

Wannier immediately set me to work reading a set of papers on this problem written by many physicists from all around the world. I tackled this challenge with great hope and energy, but to my disappointment, I soon found that I was getting mired in huge technical swamps, just as I had gotten bogged down in the vast and ugly swamps of particle physics. It was very scary, because it seemed as if this, my last chance ever for a Ph.D. in physics, was just going to go up in smoke.

However, just as I was losing all hope, I came across an article by a Russian theoretician named Mark Azbel', in which he speculated that perhaps the continued-fraction expansion of the magnetic field value (in its dimensionless form, of course) contained the key to the nature of the energy spectrum of the Bloch electrons. Azbel' gave some handwaving arguments as to why this could be true, but I didn't follow them and eventually saw that they could not be valid. Nonetheless, this suggestion was crucial in my story, because in my earlier undergraduate incarnation as a number-theorist, I had studied continued fractions in great detail, and I loved them. If it should turn out, as Azbel' implied, that they had relevance to the

magnetic mystery, then I might have just the right "tools" in my mind to attack the problem. And so, just as I was about to quit physics forever, I had been given a key boost of encouragement. Thanks to Mark Azbel's marvelous article, I had gotten a reprieve from my scheduled beheading!

Reise nach Deutschland

This Russian-granted reprieve arrived in the spring of 1974, and right around then, Wannier informed me that he had just received a prestigious Humboldt Fellowship to go to Regensburg, Germany for six months to work on exactly this problem with Gustav Obermair and Alexander Rauh, both of whom I had met in Eugene in previous years and liked very much. Now, as it happened, I had lived in Europe several times earlier in my life, and I loved Europe, I loved languages, I had studied German some years earlier, and I truly longed to have the opportunity of returning for some time to Europe, especially to a country whose language and culture I already knew something of, but which I realized I could get to know far better. So I asked Wannier if I might be able to accompany him to Regensburg, and he said he would look into it. I got very excited.

Within a short time, Wannier told me he had heard back from the Lehrstuhl Obermair at the Universität Regensburg, and Gustav had said that there would be no problem for me to come – I could have an office, and I could be supported by teaching a laboratory course, as a "VdWA", or "Wissenschaftlicher Assistent". I was truly thrilled, and of course I started reviewing my German immediately.

I might mention that Gregory and his wife Carol were always extremely hospitable to me. Even before I had started working with him, they had had me over to their house for dinner once or twice over the years, and then, once I had become Gregory's official doctoral student (and he had become my "Doktorvater-to-be"), they invited me several times more. I will never forget those evenings in their house, for they were characterized by the liveliest and most wide-ranging of intellectual discussions, and were very frequently punctuated by lookups of this or that in the Encyclopaedia Britannica or the dictionary or the atlas, all of which were right on hand, on a shelf in the dining room itself. And one wonderful thing was that Gregory was a history buff, and he boasted that you could name any year and he could

tell you something that happened in that year. I remember I named some random year in the 1400's, and sure enough, he instantly named some fact of Swiss history that took place in that year, and it was confirmed in the encyclopedia. These were such lovely times.

In September of 1974, I flew to Germany and arrived in Regensburg, all set to start my research in this truly unfamiliar but, to me, quite magical setting. A room for me had been found in a very strange dormitory that housed both university students and manual laborers. It was right by the banks of the Danube, and since I knew from careful staring at maps that the Danube reached its northernmost point in Regensburg, this was very charming to me. I walked to the Fachbereich Physik every morning, and returned home every night in the dark. I remember vividly how I practiced my German all the time in my head as I walked in both directions.

The Eigenvalues of Harper's Equation

As soon as I arrived in Regensburg, I started my own personal "attack" on this mysterious problem of the rational versus the irrational fields. One key piece of the work had been done for me already – namely, Wannier and others had shown that the Schrödinger equation – normally a differential equation – became, in this situation, a so-called "difference equation". That is, instead of involving spatial *derivatives* of the wave function ψ , Harper's equation (as this equation was called) involved *differences* between the values of ψ at discrete lattice points.

This was precisely what that Stanford grad student, one year earlier, had told me about! The continuous vacuum of empty space (with a wave function that varied smoothly as you moved through space) had been replaced by a discrete vacuum (with a wave function defined only here and there, and jumping from value to value as you jumped from lattice point to lattice point). The passage from the Schrödinger equation to Harper's equation was actually a very beautiful example of the profound connection between discrete and continuous worlds.

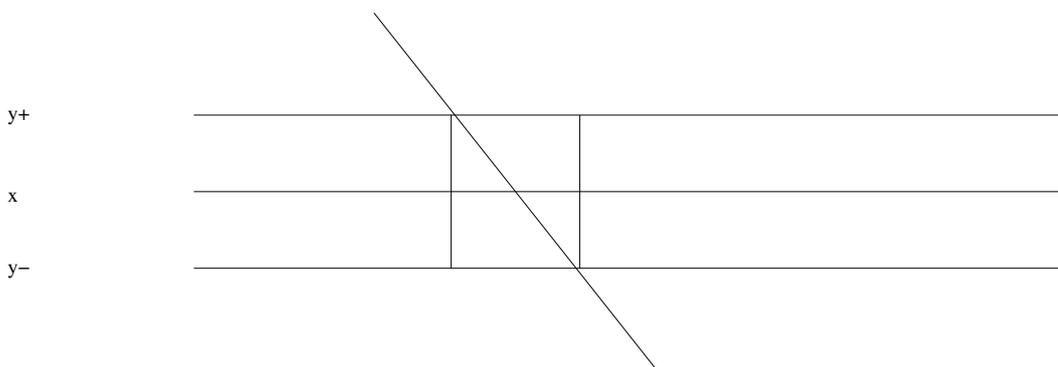
As I was saying, others had already established that this difference equation was the equation to look at, and what we wanted to know was which energy values would keep the wave function bounded throughout an infinite crystal. These were the energy eigenvalues. All other energy values would make the wave function blow up

as you moved farther and farther from the origin. And Wannier and company had even found a method for converting the search for these eigenvalues into the search for the roots of a polynomial function. Each value of the magnetic field – or rather, each *rational* value – defined a specific polynomial. The degree of the polynomial was just the denominator q of the magnetic field p/q .

A Fat Axis and Fat Roots

Actually, when I say it was a search for the roots of a polynomial, I am oversimplifying it just a little bit. The truth is that what we wanted to find was what I'll humorously call the "fat roots" of the polynomial. The difference between a root and a fat root is as follows.

A root of a polynomial is the (x -coordinate of the) spot where the function crosses the x -axis. Now imagine a "fat x -axis", which is to say, a horizontal stripe between the lines $y = 2$ and $y = -2$ (see below). It's like a horizontal line, only it's got thickness. Now imagine how the polynomial swoops down from above, sails through this stripe (the "fat x -axis"), emerges below it, turns around like a diver under water and comes back up and shoots through it like a porpoise leaping out of the sea, and so on. The x -values where the polynomial function is passing through the fat axis are the "fat roots" of the polynomial. So each fat root is a segment of the x -axis containing a standard root somewhere inside it.



In the picture below, the precise point on the x -axis where the diagonal line crosses the x -axis is the ordinary root, while the segment of the x -axis surrounding that point (delineated by the two vertical bars) is the "fat root".

For the polynomial associated with the rational field value p/q , there will be q such segments – one surrounding each of its q roots – and these fat roots are the q sub-bands belonging to the magnetic field value p/q . (By the way, it happens that these polynomials never turn around inside the fat axis – they always go through it all the way. The worst case is that a polynomial might turn around precisely at the top or bottom edge of the fat axis – but it always reaches such an edge before flipping back in the other direction.)

Looking at Specific Cases

I decided that the first thing I had to look at was the eigenvalues of the Harper equation in the simplest nontrivial case – namely, when the dimensionless magnetic field was equal to $1/2$. This gave rise to a polynomial of degree two whose fat roots I had to find. To do this, I merely had to solve a quadratic equation, which was a piece of cake. This simple equation's two distinct fat roots defined two distinct energy sub-bands located inside the Bloch band that we were starting with. (These two fat roots happen to "kiss" – that is, touch each other – because the polynomial turns around just as it hits the bottom edge of the fat axis, but despite kissing, they are conceptually distinct bands.) Finding these two sub-bands was fine, but hardly a revelation.

The next step was to see what happened when the magnetic field was equal to $1/3$ (or, for that matter, equal to $2/3$ – it turned out that the spectrum was identical for field-values equidistant from the field-value $1/2$). This gave a cubic equation, and I looked up how to find the roots of a cubic, and solved it – or more accurately, I found its three fat roots (no kissing this time). Each of these constituted a sub-band of the Bloch band. Again, no surprise – and in fact it was in a way confirming the puzzling speculations that I had heard from the very beginning – namely, that the number of sub-bands in the case of a rational field p/q was exactly equal to the integer q . Now how could this possibly give rise to a continuous behavior, when you had very close values of the field such as $1/3$, $10/31$, $100/301$, $1000000/3000001$, and so forth? Although these values are numerically very close to each other, one of them would possess 3 sub-bands, another would possess 31 sub-bands, another 301 sub-bands, and so forth. It seemed absurd that such hugely different numbers of sub-bands would belong to arbitrarily close values of the magnetic field.

But I continued this exploration undaunted. The fourth-degree equation for magnetic field value $1/4$ (and $3/4$) I was able to solve as well, and I found – no surprise here! – four sub-bands, the central pair of which "kissed" again.

Jumping over the Quintic Barrier with a Idea

At this juncture, unfortunately, I banged up against a big problem. I knew well, having been a student of mathematics, that there is no solution in radicals of a fifth-degree (or any higher-degree) polynomial, which meant that there was no easy way for me to see what happened in the first really interesting cases – namely $1/5$ as opposed to $2/5$. I was sort of stuck.

It was at this point that I hit upon an extremely simple idea, but one that at that time was quite a radical suggestion: why not study the properties of the solution *computationally* rather than *analytically*?

It is perhaps hard for physicists and physics students today to put themselves in the position of people back then. At that point, although computers were around, physicists seldom used them. The standard style of theoreticians was to employ very sophisticated mathematical tools – various kinds of transforms and clever manipulations that would lead them from one type of equation to another to another, and eventually they would be able to formally solve one of the equations that turned up, or if not solve it totally, then at least prove some theorems about the nature of its solutions. This was the standard *modus operandi* back in those days, and I had grown up in it, and believed in it, and respected it. Therefore I even felt a bit ashamed of my idea to give up on the analytic method and just throw a powerful computer at the equation, but on the other hand, many years earlier, as a math undergraduate, "throwing a computer at the problem" was just what I had done, and with tremendous success, when I wanted to understand the behavior of my beloved recursive sequences and bizarre recursive functions.

I had always been, in short, an "experimental mathematician" – so why could I not become, in effect, an "experimental physicist", not in the conventional sense of doing laboratory experiments on entities in nature, but in the novel, even radical, sense of doing computer investigations of the numerical behavior of theoretical equations?

I Get a New Office-Mate

This, then, became my plan of attack. I first thought that I would have to make use of some gigantic mainframe computer belonging to the Uni as a whole, but one day, Gustav pointed out a Hewlett-Packard computer sitting idly on a rolling table in a corridor, explained that it had just been purchased by his Lehrstuhl, and then kindly said to me, "Doug, if this machine interests you, nobody is using it at the present time, and in fact nobody has any plans to use it, so you could even take it into your office. It is of course not nearly as powerful as a big computer, but then on the other hand, you wouldn't have to share it with anybody!"

I – the one-time experimental mathematician – was delighted with this prospect, and I decided to take up Gustav's offer. So we rolled this little computer into my office, picked it up, and placed it on my desk. Then I set about to learn how to program it. The language it employed was both extremely simple and extremely intuitive. It took me only an afternoon to recalculate the sub-bands that I had found by hand in the preceding weeks, and then, of course, I decided to look at what happened for the unsolved cases of $1/5$ and $2/5$.

The Clustering of Sub-Bands

Well, something beautiful happened. I found, in both cases, that there were indeed 5 sub-bands, since $q = 5$ for both values. But these sub-bands were distributed in two entirely different manners inside the Bloch band. I noticed that in the $1/5$ case, they were roughly equally spaced, whereas in the $2/5$ case, there were two sub-bands clustered very near each other, then a large empty gap, then one isolated sub-band in the middle, and then two more sub-bands clustered symmetrically on the far side. Schematically, the two different spectra looked rather like this:



And when I looked at the continued fraction for $2/5$, I saw something that seemed

perhaps slightly related to this. Namely,

$$\frac{2}{5} = \frac{1}{2 + 1/2}$$

It was that inner "1/2" (inside the parentheses) that I found suggestive, for you see that it has a denominator of 2, which is the "size" of the little clusters on left and right sides. This seemed somehow promising and exciting.

And so I pressed on. The first thing I did was to add these newly-found spectra for 1/5 and 2/5 (and, without any extra work, 3/5 and 4/5) to my growing graph, with each individual spectrum oriented horizontally (as are the above two), and with all the different spectra stacked one above the other, the order of course determined by the sizes of the magnetic field values.

In order to go yet further, I needed to have more spectra belonging to more field values. Well, it turned out to be quite a challenge to write a program to solve for the eigenvalues of the Harper equation as q (the denominator of the rational p/q) grew higher, because it involved finding all of the q distinct roots (luckily, all of them are real!) of a particular polynomial of degree q . Such a polynomial of course grows extremely fast even when q is a fairly small integer, such as 17. When $q = 100$, it is much harder.

Eine kleine Nachtmathematik

So it took quite a bit of ingenuity to pack into the tiny memory of that H-P computer an "intelligent" program – one that would be able to "ride the bucking bronco" of a wildly fluctuating polynomial, a polynomial that in a very short space crossed the x-axis q times, and between crossings sailed immensely high into the sky. How to make the search very sensitive and slow when in the neighborhood of a zero, and yet deal with astronomically huge values located just a tiny distance away?

This was a very fun challenge for me, and I spent a long time thinking about how to make my little program cleverer and cleverer. Indeed, I would say that this root-searching program was, in a way, the first "artificial intelligence" project that I ever undertook.

Once I had written my program, then I could launch the computer on it, and at first, it would take a few seconds to solve a typical eigenvalue problem with a smallish q -value, such as 7 or 8. Then I wanted to try higher values, such as 10 or 12, but they took minutes. And I realized that in order to really get a clear picture of the phenomena that I was investigating, I would have to look at q -values that were considerably higher. For instance, I wanted to know the spectra for all of the following fractions:

$$1/17, 2/17, 3/17, \dots, 14/17, 15/17, 16/17.$$

Now, being a reasonable human being, I could not just sit around twiddling my thumbs and waiting forever for the computer to calculate these spectra, so what I decided to do was to write a "meta-program" that I could start in the evening and leave overnight and come back to in the morning. During the night, so ran my plan, the little H-P machine would sit on my desk and patiently and obediently (and very cleverly!) calculate the spectrum of one rational value after another, and print all its results on a piece of thin paper that emerged, like an adding-machine tape, from a little slot in the computer.

I tried this out, and after a bit of experimentation, it actually worked like a charm! Now in general I was keeping to myself, because what I was doing was so strange and unusual that I felt people would think that I myself was a little odd. However, a few people in the Lehrstuhl caught wind of what I was doing, and pretty soon it was public knowledge that this weird American visitor, instead of doing *physics*, was playing *numerical games* with the computer in his office. I feared that there would be general ridicule of me, but actually, people were split. And in fact, Gustav himself was delighted with the idea of a machine working overnight to produce a pretty mathematical result, and one day he spontaneously baptized the machine "Rumpelstilzchen", reminding us all of the the Grimm brothers' fairy tale in which the odd little man with that extremely strange name spins straw into gold overnight. And that's what everyone started calling it.

Das wunderschöne von Rumpelstilzchen gesponnene Gold

What I did with Rumpelstilzchen's "gold" – that is, the numbers that I would find printed out each morning on its long scroll of paper – was to convert them into a two-dimensional graph (something like what I showed above for $1/5$ and $2/5$, but with many more field values, and far more precision). The horizontal axis was energy – in fact, it was the Bloch band of the crystal in zero magnetic field. The vertical axis was the magnetic field in those dimensionless units, running from zero to one (after which the spectrum was known to repeat itself in a precisely periodic fashion, and so that finite portion of the vertical axis was all that I needed to show). For reasons that I don't recall, I used colored pens instead of just black, and so the graph that I was producing was really very eye-catching.

One of the telling moments came when I looked at the pattern of the spectrum for the magnetic field value of $5/17$. Here is how it looked, schematically:

- - - - -

Notice that it has a hierarchical structure. Roughly, its pattern or "spatial rhythm" could be denoted this way: 2-1-2, 2-3-2, 2-1-2.

What struck me here was that on the left and right sides, there was some sort of imitation of the spectrum I had already observed in the case of $2/5$. In fact, when I thought about this carefully, I came to see that the spectrum belonging to $5/17$ was describable as consisting of two miniature copies of the spectrum of $2/5$, flanking one miniature copy of the spectrum belonging to $2/7$. And what was even more suggestive was the continued fraction for $5/17$:

$$\frac{5}{17} = \frac{1}{3 + \frac{2}{5}} = \frac{1}{3 + \frac{1}{2 + \frac{1}{2}}}$$

From qualitative observations like this, I started to get an intuitive feel for how the spectrum belonging to a "complicated" rational number such as $5/17$ was made out of miniature (though slightly distorted) copies of the spectra of "simpler" rational numbers, such as $2/5$ or $1/2$.

These wonderful discoveries involving specific individual values of the magnetic field were very exciting to me, but what I was really aiming at was a more global understanding. Namely, I was obsessed with visually seeing the pattern that would emerge when the spectra belonging to *all* the values of the magnetic field were plotted together in a single plot. (I don't really mean "all values", of course, but just many different rational numbers – enough to suggest what would happen if you could do it for "all values".)

This was the metaphorical pot of gold (or should I say "plot of gold"?) at the end of the rainbow that beckoned me, and so, in order to approach it, I kept on asking Rumpelstilzchen to calculate yet more values, and I have to say most gratefully that Rumpelstilzchen always obliged me without any complaints whatsoever.

Magnetified by the Plot of Gold

I don't recall exactly how long it took for the full visual pattern to start becoming recognizable to me, but I know that one day I took a look at the entire picture that I had graphed, and I did an amazed double-take. What I saw was essentially a very, very fancy version of my INT function from ten years earlier. This discovery absolutely electrified me. (I know that I should say that this discovery "magnetified" me, but unfortunately that verb does not exist in English as of yet. On the other hand, perhaps this is the perfect occasion on which to coin it and suggest its use! Consider it done, reader!)

In particular, what I saw, as clear as day, was that this graph consisted of smaller copies of itself, each of which was somewhat distorted, and each of which of course consisted of yet smaller copies, and so on and so forth, level after tinier level, down to dust, down to electrons, and on and on, world without end. It was so fantastic, so complex, so mystical. Just privately, for myself alone, I dubbed this graph that my faithful pal Rumpelstilzchen was producing "Gplot", with the "G" sometimes standing in my mind for "gold" and other times for "God". That was how beautiful I thought this graph was. "Deus ex machina", one might say.

Well, before too long – I'd say sometime in mid-November of 1974, roughly – I felt that I had gotten a very clear graph plotted of Gplot, and I decided to run it by the three other scientists in the Lehrstuhl – Gregory, Gustav, and Alexander – who

were studying the problem of the crystal immersed in a magnetic field. Excitedly, I brought my colored graph to a meeting of the group, and tried to explain its nested, or recursive, structure to them. However, strange though it may sound to you in this fractal day and age, none of them had ever been exposed to anything remotely like this kind of a structure, and each of them reacted to it in their own idiosyncratic fashion. Gustav and Alexander were intrigued but didn't say anything very strong either pro or con. Wannier, on the other hand, appeared baffled and disturbed.

Slap in the Face

A few days later, Wannier called me into his office to have a private conversation with him. What he said to me was like a slap in the face that I have never forgotten. He said this, almost verbatim: "I saw what you showed us the other day, Doug, and I have given it considerable thought. I regret to say that I have come to the conclusion that what you are doing is pure *numerology*. It is not physics, it is not science. I can see that you love it, but unfortunately it will not lead to a possible thesis for you. If you wish to obtain a Ph.D. by working on this problem with me, then the only possibility that I see for you is to write a library thesis."

At this point, my cheeks were starting to redden and to grow very hot, but I tried to stay calm. I replied, stammeringly, "I don't know what you mean by 'library thesis'..." To this, Wannier flatly declared, "Oh – what that is is a compendium or summary of work by other people. It's not anything original, but it can have some kind of value nonetheless. And if you really insist, you can even mention some of your numerological ideas – as long as you do so only in an appendix."

Well, I could not believe my ears. I knew as deeply as I could know anything in life that I had just made a sensationally beautiful discovery – I had found a new kind of structure in physics, a structure that nobody had ever suspected existed, and I had seen that this structure was infinitely complex and yet completely regular and completely explicable, using the new ideas of recursion and continued fractions and such things. Although I had not *proven* that Gplot had analogous properties to my beloved function INT, I knew in my bones that it was true. And here was this elder physicist, this extremely distinguished man whom I had always respected very highly, insulting me brutally, telling me that my work was effectively worthless, was garbage, was pseudo-science at best.

Reeling in hurt and confusion, I went to each of Gustav and Alexander privately, looking for some kind of support, and although neither of them said anything remotely as negative as Gregory had, they weren't able to lend me any genuine support either, because to them this was completely alien territory – they simply had no experience with recursive structures, and didn't know if my claims were right or wrong.

I well recall the irony that I felt at this juncture. I had been to many meetings of the small group, in which I would always sit totally silent while Gustav and Alexander and Gregory would present new results on the magnetic problem – the mystery of the spectra of Harper's equation – and each time, I observed that what the presenter had done was to take some standard technique of mathematical physics and apply it to Harper's equation in one clever way or another, and using an impressive kind of virtuosity, they would manage to twist the equation back and forth a sufficient number of times until finally it would say "Uncle!" and yield up some well-protected little secret of its nature. But these little secrets were always small, isolated results, and they never yielded anything remotely like the global understanding that my far more simple-minded approach of pure computation had yielded.

I think that Gregory in particular deeply resented the fact that, in some sense, this computer-using youngster (I was nearly 30 but Gregory was nearly 70) was claiming to have "one-upped" him. It seemed outrageous to him that while he, Gregory Wannier, a sophisticated physicist with great knowledge of Bessel functions and hypergeometric functions and dozens upon dozens of other sophisticated mathematical tools, had not yet found the secret of this spectrum, some young upstart with no such knowledge whatsoever – a cocky computer cowboy! – could have the audacity to claim to have unraveled the whole thing – and, to cap it all off, by using some completely unrigorous, unscientific trickery and purely intuitive, visual hocus-pocus.

I am perhaps overstating the case here, but it certainly reflects how I felt in those bitter days. I felt totally isolated and rejected, and yet at the same time I knew in my heart of hearts that what I had found was not only true and beautiful, but even significant. But I also knew that it was going to take a lot of further work in order to convince Gregory and the others.

Seeking Relief in Gauss's Shadow

At first, my hope was naturally to prove these results in a rigorous fashion, just as I had done many years before with INT. After all, if the Gplot/INT analogy really existed, then I should by all rights be able to somehow convert my proof for INT's recursivity into a proof for Gplot. The trouble was, the analogy between the two was extremely subtle and hard to decipher. In fact, in a certain sense, the analogy held along just one of the two dimensions of Gplot, and that made things very thorny indeed.

I tried to think as carefully as I could about these matters, and when the American holiday of Thanksgiving came along, I made a train trip up to Göttingen to meet my very close friend Robert Boeninger, who was living at the time in Hamburg, and who likewise came down by train. Robert was very knowledgeable about physics and mathematics, but unlike the members of the Regensburg group, he knew a great deal of number theory and he was INTimately familiar with my function INT and its recursive properties. So Robert and I were able to communicate INTuitively and easily about all sorts of things, and in those two brief days that we spent together in Göttingen, we thought up all sorts of potential approaches to proving Gplot's properties rigorously.

That visit with Robert to Göttingen had its own magic as well, in that we wandered all over this hallowed university town, which held resonances of people like Gauß and Hilbert and van der Waerden and Heisenberg and Born and on and on and on. It was truly wonderful to be able to walk along the streets of a place with a "David-Hilbert-Straße" and to know that this was really a place where such a name made perfect sense!

Robert and I took one especially memorable long hike up, up, up through a steep woods, climbing, climbing, climbing, until, all at once, we broke out of the woods into a clearing at the summit, and found ourselves at a beautiful teahouse, where we sat down and ordered tea and pastries and thought of all the famous physicists and mathematicians who surely must also have eaten at these very tables!

Chess and Jazz

From my two days with Robert in Göttingen, I returned to Regensburg revitalized and full of hopes, but to my deep frustration, the positive mood slowly slipped away. I wasn't able to convert any of our ideas into a proof of any sort. I worked and worked away at it, and I remember how incredibly hard I thought. Never had I tried so hard in my life to penetrate to the core of a mysterious mathematical phenomenon, and though I applied every ounce of my brainpower to this enigma, it just wouldn't yield. I became extremely dejected and downcast, and started once again to doubt that I would ever get a Ph.D. in anything, and wondered what my future would bring. It was a very discouraging time for me.

One of the great things that helped lift my mood periodically during those gloomy autumn days of 1974 was the fact that Alexander Rauh invited me to come up to his house each Sunday morning for a wonderful brunch with delicious apple strudels and marvelous aromatic coffee, after which he and I would square off against each other in a very serious game of chess. I have the vague memory that Alexander won each time, but that's not important – what I remember with so much delight is how well-fought the battle was, how much enjoyment we each took in the other's intellect, and how kind his wife Merwe was to me each time that I came to visit. Those Sunday mornings became a lovely ritual for me, and made me feel truly part of the community there.

Christmas and New Year's came, and I took a long train trip to Amsterdam, Paris, and Geneva, visiting friends and doing my very best to not think about my Gplot blues. In this context, I cannot resist telling just one tiny anecdote about my brief stay in Amsterdam. I was met at the train station by Conrad de Vries, a Dutch physicist whom I knew through my father, and Coen told me he'd like to take me out for dinner. I was delighted, and he said, "I know a good place – in fact, it's a very nice jess club" (or maybe he said "chazz club" – I'm not sure). Frustratingly, I couldn't figure out if Coen meant we would be playing chess or listening to jazz as we ate, but I decided that instead of explaining my linguistic confusion to him, I'd just wait and be surprised. Well, when we arrived at the club, we were seated and immediately a chess board was brought to our table. This seemed to lift the degeneracy, except that just a few moments later, the strains of a live jazz band started emanating from the next room, and I realized that my uncertainty would

never, ever be resolved...

Sad Ice-Skating in Munich

After my visits to these various great cities, I returned by train to Regensburg, once again fresh for a new attack on the Gplot problem. This time, I set a deadline for myself – February 15, 1975 – since that day was my 30th birthday. I declared to myself, "I absolutely *have* to have found a proof of Gplot's infinitely recursive nature by that day!" And so, day and night, I would struggle with the subtle matrices and trigonometric functions that Harper's equation gave rise to, and I would take ideas from my old number-theory days at Stanford, and from Azbel's paper, and from Rumpelstilzchen's explorations of various related graphs that I produced – "cousins" of Gplot, so to speak – and I tried in every way I could possibly think of to gain the key insight into the phenomenon of Gplot. What lay behind it? What was the trick that I couldn't see?

I remember that as my dreaded birthday inexorably approached, although I had lots and lots of ideas, none of them was panning out. Finally, the very last day before I was to turn 30, the last day on which I would ever be a youthful 29, I took a very long, solitary walk in the lovely fields on the hills high above Regensburg, hoping to find inspiration in the magic of nature. I remember all the ideas I batted about in my head, and I remember going back to my office and making one last desperately flailing attempt, using all of Rumpelstilzchen's computational powers – and getting nowhere. Finally midnight arrived, and I walked home in the chilly night wind to my dormitory, disheartened, depressed, and defeated.

The next day I took the train to Munich and spent the day ice-skating with some old friends, trying not to think about the fact that I was growing older, that I had failed to prove what I had set out to prove by that date, that I had no idea if I would ever get a Ph.D., that my future as a researcher in physics or mathematics was now truly up in the air...

Reconciliation of Rationals with Irrationals

The remainder of my time in Regensburg was spent in two fashions. First, I made some more attempts to rigorously prove the properties of Gplot that I had discovered empirically, but these attempts led nowhere. Secondly, I tried to make a far more rigorous and precise characterization of the nature of the infinite recursion that defined Gplot's essence. At the latter, I succeeded very well.

In particular, what I was able to show rigorously was that *if* Gplot had the recursive structure that I had observed and studied so carefully in a visual manner, *then* the spectrum, rather than being divided into two different types of behavior called "rational" and "irrational", was homogeneous and in fact perfectly continuous. Moreover, a special type of continued fraction (not the kind that Azbel' had used, but something closely related called "nach nächsten Ganzen Kettenbrüche" or "nearest-integer continued fractions") correlated perfectly, level by level, with the clusters inside clusters inside clusters (etc.) of sub-bands that I had observed. Specifically, for any rational field value, its nearest-integer continued fraction (which always terminated after a finite number of steps) dictated a hierarchy of sub-bands, sub-sub-bands, and so forth. And for any irrational field value, its nearest-integer continued fraction never terminated, which meant that instead of having a finite number of sub-bands, it had an *infinite* number (uncountably infinite, in fact!) of separate *points* making up its spectrum. But the key thing was that the spectra belonging to any two numbers that were close to each other (no matter whether they were rational or irrational) would always resemble each other, and the closer the two numbers came, the more their spectra would look alike. This very Azbel'ian idea was the secret to the problem Wannier had proposed to me to look at.

In short, all of my earliest intuitions about the impossibility of there being a fundamental distinction between "rational" and "irrational" field values had been vindicated, and in an incredibly beautiful manner – as long, that is, as my hypothesis of Gplot's overall, global recursion was true (and I was absolutely sure it was, whether or not I could find the proof).

A Magical Visit to Poland

All of this was most fortunate for me, because I had received an invitation from a physicist friend named Marek Demianski in Warsaw to come to Warsaw in March and give a talk about my research at the Institute of Theoretical Physics of the University of Warsaw. Now at that time, I had never in my life delivered a colloquium on any topic anywhere, and so this was a personal milestone – but of course anticipating it was very nerve-wracking for me.

The trip that I made to Poland from Regensburg was in itself a deeply poetic experience in my life. In the first place, I had always felt tied to Poland because my father's parents were Polish – or at least they were Polish Jews, and to me this meant they were Polish (though to some Poles, it meant nothing of the kind!). In the second place, I had loved Chopin extremely deeply for my whole life, and to make a pilgrimage to the land of Chopin was one of the most meaningful things I could possibly imagine. To add to this feeling of magic, I had discovered, early on in my stay in Regensburg, a nightly radio program, emanating from Radio Warsaw at midnight, of nothing but Chopin's music, and I had taped dozens of broadcasts of this show, and in my little dorm room by the Danube, I had listened over and over again to beautiful Polonaises and Impromptus and Etudes and Sonatas and so forth and so on. Indeed, Frederic Chopin, during those very lonely months of my life, had been, in a very real sense, my closest companion – and so when I boarded the train in the Regensburg Bahnhof to set off for Prague and then Kraków, en route to Warsaw, I could scarcely contain myself, I was so excited. And, I should add, I had also spent the previous three months learning Polish (through German) from a book I had bought called "Mówimy po polsku", and I was thrilled at the prospect of trying to communicate, for the first time in my life, in the native language of Frederic Chopin.

Crossing the border into Poland was an unforgettable moment in my life, and then I spent a couple of days with Jewish relatives in Kraków, and since they had a piano in their apartment, I was able to play some of my favorite Chopin pieces. It was an amazingly intense time.

Then I took the train to Warsaw and was met by Marek at the station. Not only did we talk lots of physics together, but he also took me to a special concert at

the Chopin Foundation inside Warsaw as well as to Zelazowa Wola, the village where Chopin was born, some fifty miles west of Warsaw. All of this drenchedness in Poland and especially in Chopin provided the emotional backdrop to my first physics colloquium, which I delivered at Marek's institute (not in Polish, of course, but in English!).

Imagine my trepidation as I, a mere graduate student from America, presented, for the first time ever to an audience of physicists, the extremely strange graph that I had just discovered, doing my best to convey its unprecedented recursive nature to the assembled audience. I had no idea if I was going to be eaten alive, in the fashion of Gregory Wannier, or given a sympathetic reception. In the end, to my huge relief, my talk was received extremely well. No one criticized it, although there were many questions that I was completely unable to answer. Certainly there were no accusations of "numerology" or anything of the sort. It was a crucial test for me, and I had passed it.

Irrationality versus Rationality in Eugene

When I returned by train to Regensburg, my time in Germany was nearly up. The six months of the Humboldt Fellowship had passed, and Wannier and I were both scheduled to return to Oregon. I was very sad to leave Germany for many reasons. One was that I had made quite a few new friends, including John Schellnhuber and Petra Balzer. Another was that my German had improved enormously over the course of those few months, and I was just getting to the point where I could say almost anything I wanted in German, and I truly wanted to continue developing it. Another was that I loved the European environment – the wonderful castles, the wonderful pastries, the ubiquitous sense of history, the mixture of languages and cultures, and on and on and on. But it was not to be.

When I returned to Eugene, I still had a long debacle ahead of me, since Wannier was still dead-set against my ideas. Things in fact grew rougher rather than easier. One day, for instance, just after I gave a talk explaining my Regensburg discoveries, Gregory came storming into my office and, in front of my three office-mates, shouted furious accusations at me of having insulted him and his ideas, and then he slammed the door and disappeared. We were all bewildered at the wild behavior

of this distinguished professor, whom we so respected. In my talk, I had not said a word about Gregory's ideas or about his skepticism of my ideas, so how could I have insulted him? Or, perhaps, it was that very absence of mention that he considered such an affront to his dignity. In any case, I instantly sat down and wrote him a very gentle letter and placed it in his mailbox in the Physics Department, and soon things had blown over, and at least on the surface we got along again together.

But this blow-up of Gregory's was just one symptom of the terrible tension between us. Deep down, we both liked and respected each other, but we saw things in such a fundamentally different manner. It was a very hard time for us both.

Rumpelstiltskin to the Rescue

One day late in that spring, I dropped in to chat with a friend in the superfluidity laboratory of Russell Donnelly, and I chanced to espy a perfect clone of Rumpelstilzchen on some desk. What a coincidence! Moreover, I saw that it even had a mechanical plotter attached to it. "Oh, boy!" I said to myself, "With this baby, I could really produce a fantastic picture of Gplot!" I asked Donnelly if I could use his machine, and he very generously said I was welcome to use it as much as I liked. And so I effectively co-opted this computer, which I shall now retrospectively dub "Rumpelstiltskin" (the English spelling for the fairy-tale figure), and over a continuous period of three weeks, that little machine worked its head off, calculating all the bands for all fractions between 0 and $1/2$ with denominators less than 50. That was one big job for one little machine!

After it had done me that great favor, I asked Rumpelstiltskin if it wouldn't mind making plots of a few carefully selected small zones inside Gplot, "undistorting" them in such a way as to show very clearly how they were identical to the full graph. It did so willingly – and as a last touch, I even had it go down two levels in one case, just to show very explicitly that Gplot's recursivity or visual self-replication was not an illusion, but continued indefinitely, *ad infinitum*.

And then, one fateful day, armed with this powerful empirical evidence of the essential nature of Gplot, but nonetheless full of trepidation, I went to Gregory Wannier's office and showed him everything. Well, to his eternal credit, Gregory suddenly saw the light. Despite all of his previous dislike and distrust of what I had said, he

realized I was right. I don't know how or why, I don't know what it was that turned the trick, but all at once, he was a believer. And this changed everything. He apologized for his underestimation of my ideas, he apologized for his calling my work "numerology", and he started touting my work to his colleagues as being among the most exciting things he'd ever seen in physics! The turnaround was absolutely incredible, and my years of suffering as a physics student were finally over.

I wrote up my thesis in the summer and fall of 1975, and to my delight, it worked out very naturally for Gplot to appear on page 137 – that is, the magic number 137, the reciprocal of the mystical fine-structure constant. I guess this shows that I am a numerologist, after all!

A Fine Ending to the Story

I had my Ph.D. defense in December of 1975, which came off without a hitch, and at just about that time, I submitted an article on my work to the Physical Review. I soon received back two referees' reports, both very favorable, and one was in fact quite glowing – it said that reading the article was like listening to a Mozart symphony, of all things! I was most flattered, needless to say. (Many years later, the eminent physicist Leo Falicov told me that it was he who had written that comment.)

I also gave a couple of talks in physics departments here and there on my work, with a lovely series of transparencies showing Gplot and its recursive structure. To my delight, my audiences were uniformly wowed by the sheer beauty and the amazing intricacy of the graph I had found, and I got the clear impression that I would have no trouble at all, even in those job-poor days, getting a tenure-track job in a physics department at a high-quality institution in America. On top of that, when my "Phys Rev" article came out, it started being referenced all over the place, and I saw Gplot being referred to everywhere as the "Hofstadter butterfly". I preferred "Gplot", but I wasn't going to protest.

The Key Role of Luck in Life

Despite all the flourish of interest in my discovery, I made what some might consider a highly irrational decision at that point – namely, to bow out of physics. Why on

earth would I do that, just at this moment of triumph? Well, I suppose there are two main components to the answer.

One clear reason for my bowing out of physics was that over the years, I had discovered that doing physics was, for me, an enormous struggle. My style didn't seem to be that of a typical physicist, for some reason or other, and I found myself almost constantly in conflict with the taste of others, whether it was in particle physics or solid-state physics or any other branch. Even if I were to get a good job, it wasn't in the least clear to me that I would be able to continue doing good physics, or even, for that matter, be able to come up with a second discovery at all! I felt, rather, that I was pretty likely to find myself quickly drifting into that very same morass of confusion, skepticism, and discouragement that I so often had found myself in as a graduate student. That would be a terrible, and very ironic, fate.

I realized that the key to my success, such as it was, was simply that I had been very lucky – I had been, as they say, the right person in the right place at the right time. I was very lucky to have gone to graduate school at the university where Gregory Wannier was a professor. I was very lucky to have studied continued fractions and to have discovered and unraveled INT when younger. I was very lucky because I not only knew how to program but even loved playing the game of "experimental mathematics". I was lucky to have gone to Regensburg and to have been given Rumpelstilzchen as my office-mate, and I was lucky to have found a Rumpelstilzchen clone when I returned to Oregon. And, last but not least, I was very lucky in one extremely crucial way – namely, no one else had yet stumbled across the beautiful mathematical object called "Gplot". It was lying out there to be found, a beautiful shell on the beach, but nobody before me had seen it. Whew!

Ironically, I found out several years later that a physicist named Dieter Langbein (who, interestingly, had been working in Chicago with Leo Falicov) had, in 1968, calculated and published a somewhat coarse-grained graph of half of Gplot, but despite having it right there in front of him, Langbein didn't perceive the crucial fact that his graph consisted of copies of itself, and he therefore missed the essence of what he had produced. Of course, he had never seen INT and he had probably never studied recursive patterns either, so his eyes were not properly trained! Dieter Langbein came very, very close, but he missed his golden opportunity. I was luckier.

Bowing out with Grace

The second main reason for my decision to bow of physics was, of course, that by that time, I had found another passion, which was embodied in the book that I was writing, which came to have the title "Gödel, Escher, Bach". Some of the main ideas that my evolving book was about were consciousness, the riddle of the self, the nature of intelligence and creativity, and the connection of these issues with physics, machines, programs, and formal systems. By the time I had finished my Ph.D., I was so immersed in this book and these issues, and so convinced that this is where I could really contribute something original of my own to human knowledge, that I felt that I simply should turn a page and let physics become a closed chapter of my life – a chapter with many good memories but also, unfortunately, with an equal or possibly even larger number of bad ones.

In short, I decided that I should "quit while I was ahead", as the saying goes. Or to use another saying, I could "go out in a blaze of glory" – for indeed it was true that in working on the mysterious magnetic problem and in going to Regensburg and in being part of the Lehrstuhl Obermair with Gregory and Gustav and Alexander, I had had as intense and human and rich a scientific experience as one could hope to have, and it had concluded with as great a moment of satisfaction as I could reasonably expect to experience.

And as you now know, it was all due to that marvelous mathematical gold that a funny little machine named Rumpelstilzchen had spun night after night after night in a solitary dark office in the Lehrstuhl of Obermair in the Fachbereich of Physik in the town of Regensburg in the state of Bavaria in the land of Germany in the season of autumn in that far-off year of nineteen hundred and seventy-four.

Wege zum Hofstadterschen Schmetterling

Alexander Rauh

Meine Zeit am Lehrstuhl Obermair, zunächst als Wissenschaftlicher Assistent danach als Oberassistent, erstreckte sich über fast zehn Jahre (1971-1981); sie war bereichert um einen einjährigen Forschungsaufenthalt an der University of Oregon in Eugene (1973/74) bei Gregory Wannier und zwei mehrmonatige Aufenthalte als Gastdozent an der Staatsuniversität von São Paulo. Die folgenden Anmerkungen beziehen sich im wesentlichen auf die erste Hälfte meiner Regensburger Zeit. Dabei will ich mich auf das so erfolgreiche Projekt Kristalldiamagnetismus konzentrieren, das mit der von Douglas Hofstadter – überwiegend am Lehrstuhl – durchgeführten Dissertation „The Energy Levels of Bloch Electrons in a Magnetic Field“ in dem wissenschaftlich wohl bedeutensten Beitrag des Lehrstuhls auf diesem Gebiet kulminierte. Das in der Dissertation begründete „Hofstadtersche Schmetterlingsspektrum“ wurde weltberühmt.

Die Hofstadter-Arbeit war nur durch die Vorgaben von Gustav Obermair, Gregory Wannier und mir möglich. Dies soll weiter unten kurz begründet werden. Hofstadter hat dies u.a. in der Danksagung der Dissertation mit einer Photographie, auf der er selbst zusammen mit den eben genannten abgebildet ist, angedeutet. Hans-Joachim Schellnhuber, John genannt, der später hinzukam, sprach zeitgemäss von der „Viererbande“. John hat mit seiner Dissertation „First-Principles-Bandstruktur von Kristallelektronen im homogenen Magnetfeld und Überprüfung der Peierls-Onsager-Hypothese“ zur Klärung erstrangiger Probleme des Kristalldiamagnetismus beigetragen und die Synthese des Lehrstuhlprojekts geschaffen. Seine Dissertation habe ich angeregt und mitbetreut, was mir John in einer Widmung mit dem,

wie ich meine, sehr ehrenvollen Titel „illegitimer Doktorvater“ anerkannt hat. Die Arbeiten zum Kristalldiamagnetismus waren wesentlich sowohl für meine eigene wissenschaftliche Karriere wie auch für die von John, sie waren u.a. Grundlage für meine Habilitation 1975 in Regensburg und wichtige Komponente der Johnschen Habilitation 1985 bei mir in Oldenburg.

Ich kam 1971 als Postdoc nach Regensburg. Welch ein Kontrast zu meinem früheren Institut in München! Mit Gustav Obermair und Ullrich Schröder waren hier junge, unkonventionelle, dynamische Professoren der Theoretischen Festkörperphysik, die auf dem Stand der aktuellen Forschung waren und beste internationale Kontakte vorwiesen. Ich erinnere mich sehr gut an das herzliche und anregende Gespräch, mit dem mich die beiden in Regensburg aufgenommen haben. Gustav Obermair hielt 1971 eine Vorlesung mit dem Thema „Aktuelle Probleme der Festkörperphysik“ oder ähnlich, in der gleich eine Handvoll hochrangiger Dissertations- oder Habilitationsthemen aufgezeigt und sowohl verständlich als auch begeisternd dargestellt wurden. Eine interessantere Vorlesung habe ich weder vorher noch später gehört. Schon im Hinblick darauf, dass wir befürchteten, auf solche Vorlesungen verzichten zu müssen, waren wir Mitarbeiter wenig begeistert, als Gustav Rektor der Universität Regensburg wurde (es gab damals noch die Doktoranden Karlheinz Jüngling und Lothar Kalok, zu denen später der Brasilianer Luis Carlos de Menezes hinzukam.)

Aus der denkwürdigen Gustavschen Vorlesung hat mich das Thema Kristalldiamagnetismus am meisten gefesselt. Ich arbeitete mich in die Gruppentheorie ein und produzierte erste Ergebnisse zu sogenannten irrationalen Magnetfeldern. Die Ergebnisse beeindruckten Gregory Wannier, der zu einem Besuch am Lehrstuhl vorbeigekommen war. Wannier unterstützte einen DFG-Antrag für einen Forschungsaufenthalt bei ihm an der Universität von Oregon in Eugene, der genehmigt und von mir und der Familie von März 1973 bis März 1974 wahrgenommen wurde. In Oregon trat nun Douglas Hofstadter, Doug genannt, auf die Bildfläche. Er hatte mit Wannier Kontakt aufgenommen, da er sich thematisch neu orientieren wollte. Wannier empfahl ihm, meine Vorlesung/Seminar „Crystal Electrons in Magnetic Fields“ zu besuchen. Wannier hatte ein emotionalisiertes Verhältnis zu diesem Thema: Einer seiner Studenten, D.R. Fredkin, hatte die Gruppentheorie rationaler Magnetfelder ausgearbeitet, lange bevor E. Brown und H.J. Fischbeck mit ihren Publikationen zum gleichen Thema Aufsehen erregten. Wannier hatte die Ergebnisse Fredkins seinem Kollegen Lars Onsager gezeigt und aufgrund von Onsagers Einwand „every

body knows that“ von einer Veröffentlichung abgeraten.

Kurz nach meiner Rückkehr aus Oregon kamen Gregory Wannier und Douglas Hofstadter zu einem längeren Forschungsaufenthalt an den Lehrstuhl. In einer Sitzung mit Gustav und Gregory hatte ich eine Liste möglicher Themen zum Kristalldiamagnetismus vorgelegt, u.a. die Untersuchung des einfachsten nichttrivialen Kristallpotentials, das dann in den Dissertationen von Doug und John verwendet wurde. Ich glaube, nur einen Tag nach dieser Sitzung, rief Gregory zu einem Treffen in Gustavs Dienstzimmer, und trug Gustav und mir auf der Tür, die als Tafel benutzt werden konnte, seine ersten Ergebnisse vor; er war wie üblich aufgeregt wie ein junger Wissenschaftler. Er hatte das Problem des Modellpotentials auf eine zweidimensionale Differenzgleichung reduziert.

Ich erinnere mich noch sehr deutlich, dass ich aufstand, die Kreide nahm, und behauptete, diese Differenzgleichung mit einem Ansatz sofort exakt zu lösen. Das ging schief (glücklicherweise), aber der Ansatz, eine Art Eichtransformation, reduzierte das Problem immerhin von einer zweidimensionalen auf eine eindimensionale Differenzgleichung; die im Prinzip schon lange bekannte Harper-Gleichung, wie später Doug herausfand. Die Lösung dieser Differenzgleichung, auf die Doug auf einem eigenen Weg nochmals gelangte, lief auf ein Eigenwertproblem hinaus, das, abhängig vom Magnetfeld, eine beliebige Dimension annehmen konnte und numerisch zu lösen war. Hierfür stand ein HP-Tischrechner zur Verfügung, der beste Tischrechner seinerzeit, aber verglichen mit heutigen Möglichkeiten eher ein steinzeitliches Werkzeug. Doug ließ die Maschine oft tagelang durchlaufen, und wenn er morgens bei Ankunft am Lehrstuhl Ergebnisse vorfand, sagte er „Rumpelstilzchen hat wieder Gold gesponnen“. Der Erfolg des Tischrechners lag jedoch weniger an der Länge der Rechenzeit, sondern war vielmehr wesentlich bedingt durch die Verwendung des „Spur-Kriteriums“, das Gustav gefunden hatte und die Ausnutzung einer Reihe exakter Eigenschaften des Spektrums der Harper-Gleichung, die Doug und Gregory bewiesen hatten. „Rumpelstilzchens Gold“ bildete allerdings nur das Rohmaterial der Hofstadterschen Dissertation. Die eigentliche intellektuelle Leistung bestand in der Analyse der Computerdaten: Der Synthese von drei elementaren Eigenschaften aus dem „beobachteten“ Energiespektrum und der strengen Herleitung nichttrivialer Sätze aus diesen Eigenschaften, die die Selbstähnlichkeit des Spektrums demonstrierten und Aussagen auch über irrationale Magnetfelder erlaubten, die zu einem unendlich dimensionalen Eigenwertproblem führen. Auch die

Physik kam nicht zu kurz, z.B. wenn erörtert wird, wie sich die endliche Messgenauigkeit auf das Energiespektrum auswirkt. Nichtzuletzt möchte ich den bewunderten Stil der Hofstadterschen Dissertation erwähnen, der das Potential des künftigen Verfassers von „Gödel, Escher, Bach“ und Pulitzer-Preisträgers andeutet.

Gegen Ende seines Aufenthaltes in Regensburg machte Doug eine Reise nach Polen. Teile seiner Berichte haben sich in meinem Gedächtnis unauslöschlich eingepägt. Die Reise führte über Krakau, den Ort seiner Vorfahren. Er hat dort Verwandte angetroffen, die durch Flucht in die Wälder und dort in Erdlöchern hausend den Holocaust überlebt hatten. Endpunkt der Reise war Warschau, wo von Radio Warschau eines Tages um Mitternacht ein Interview mit Doug Hofstadter gesendet wurde. Zu dieser Nachtzeit hatte Doug regelmässig auf seinem einsamen Zimmer in Regensburg die von Radio Warschau ausgestrahlte Chopin-Musik gehört.

Ich möchte noch auf die grosse Bandbreite von Themen und Aktivitäten am Rande der Physik kurz eingehen, die den Lehrstuhl Obermair kennzeichnet. Bei Gustav klar ausgeprägt z.B. durch seine zwei Rektoratsperioden und seine Projekte gemeinsam mit Ökonomen. Auch John Schellnhuber, der u.a. das Gebiet der Klimafolgenforschung in Potsdam so erfolgreich aufgebaut hat, bewegt sich wohl teilweise in dieser Lehrstuhltradition. Ähnlich ist es bei mir: In meiner Regensburger Zeit hatte ich die Atomenergie als Hobby, und reiste für die Umweltbewegung als Vortragender durch die Lande. Zum Beispiel war ich von der Österreichischen Bundesregierung als Experte bei der Zwentendorf-Kampagne bestellt und zwar in der Diskussionsgruppe 5 „Beurteilung des Risikos“ (das Kernkraftwerk Zwentendorf wurde bekanntlich aufgrund dieser Kampagne nie in Betrieb genommen). Den Anstoss zu dieser Aktivität gab unbewusst Gregory Wannier. Gegen Ende meines Aufenthaltes in Oregon kam er eines Tages zu mir und sagte, er habe noch Kontraktmittel für einen Konferenzbesuch; eigentlich, so meinte er, sollten wir an der APS-Jahreskonferenz für Festkörperphysik teilnehmen, aber in Chicago gäbe es eine höchst interessante Konferenz zum Energieproblem, das genau zu diesem Zeitpunkt in Oregon wegen der sogenannten „Gas Shortage“ jedem unter die Haut ging. Also flogen wir, ich glaube es war im Februar 1974, nach Chicago. Auf dieser Konferenz war ich Zeuge eines spannungsgeladenen Vortrags über das Risiko von Kühlmittelverlusten bei Kernkraftwerken. In meiner Sitzreihe gab es gezischelte böse Kommentare gegen den Sprecher, gewürzt mit Nixonschen Invektiven. Offenbar war dieses Risiko vorher noch nicht vor einem so breitem Publikum erörtert

worden. Ich selbst war schockiert, weniger über die möglichen Risiken als über die Tatsache, dass ich darauf nie den geringsten Gedanken verschwendet hatte, obwohl ich durch Spezialvorlesungen in München mit Reaktorphysik vertraut war.

Es war eine aufregende, kreative und erfolgreiche Zeit, die ich am Lehrstuhl Obermair und auf dem, von diesem ausgehenden, Auslandsaufenthalt bei Wannier in Oregon erleben durfte. Ich möchte Gustav Obermair bei dieser Gelegenheit ganz herzlich danken und meine besten Wünsche übermitteln.

Interview mit Hans-Joachim Schellhuber

Christian Forstner: *Sie haben 1970 ihr Abitur abgelegt und anschließend in Regensburg ihr Physikstudium aufgenommen. Könnten Sie ein paar Worte zu den Studienbedingungen in Regensburg, Anfang der 70er Jahre sagen? Die Physik war zu diesem Zeitpunkt noch im Aufbau, die Uni Regensburg eine Reform-Uni, Beispielsweise die Viertelparität im Senat, um nur ein Schlagwort zu nennen.*

Hans-Joachim Schellhuber: Zunächst einmal hatte ich günstige Bedingungen, da ich mein Abitur mit dem Notendurchschnitt 1,0 abgelegt und dadurch ein Hochbegabten-Stipendium bekommen hatte. Für damalige Verhältnisse erhielt ich viel Geld, etwa 500 oder 600 Mark im Monat auf die Hand. Außerdem waren zwei Dinge bemerkenswert: Die Uni war im Aufbau, was damals bedeutet hat, dass man etwas wirklich Neues beginnen wollte. Dies drückte sich bereits durch die Gebäude aus: Es waren großzügige Anlagen, was man vorher nicht gewohnt war, von Schulen und dergleichen, und dann waren da natürlich die Wellen der Studentenbewegung, die in abgemildeterer Form auch nach Regensburg hinein schwappten. Die Aggressivität war allerdings wesentlich geringer. Es ging alles so ein bisschen bajuwarisch gedämpft zu, aber es war doch eine große Aufbaustimmung: Eben eine neue Universität mit vielen jungen, ehrgeizigen und für mein Gefühl außerordentlich engagierten Professoren und dann natürlich die Vorstellung, dass jetzt auch im Umgang zwischen Autoritäten und den Studenten, bzw. denjenigen, die keine Machtpositionen besitzen, alles anders werden würde, dass man die Verfahren wesentlich „partizipatorischer“ (damals sagte man „demokratischer“) durchführt. Ich habe mich natürlich eifrig an diesen Diskussionen beteiligt.

Andererseits betrieb ich ein sehr intensives Physik- und Mathematikstudium. In den ersten Semestern habe ich mich mehr auf Mathematik als auf Physik konzentriert.

Inhaltlich hat man extrem hart gearbeitet, aber wir haben uns in der Fachschaft Physik, die damals eine wesentliche Rolle bei der Studentenvertretung gespielt hat, dennoch ganz massiv mit den Reformgedanken auseinandergesetzt. Das war auch der Punkt, wo ich mit Gustav Obermair relativ früh in Berührung kam. Er als Hochschullehrer und wir als Studenten haben damals schon begonnen, viele Dinge miteinander zu diskutieren.

Mathematik und Physik nebeneinander zu studieren, war eine ganz schöne Herausforderung. Ich kann mich noch erinnern, dass ich im ersten Semester Lineare Algebra und Analysis I parallel hörte. Das waren vier Vorlesungen pro Woche und dann noch Übungsaufgaben in beiden Fächern, dazu natürlich Physik. Man hat von Morgens 8 bis Abends 12 fast ununterbrochen gearbeitet. Das war eine extrem intensive Übungszeit. Dabei erhielt man dafür allerdings das formale Training für die gesamte wissenschaftliche Laufbahn. Wie schon erwähnt, habe ich meine Professoren, vor allem in der Mathematik, mehr noch als in der Physik, als extrem engagiert und fähig empfunden, z.B. Jaenich und Forster. Das heißt, wir haben als Studenten die Professoren zwar als Autoritäten herausgefordert in ihren formalen Position, aber wir haben doch ungeheuer profitiert von deren Engagement. Umgekehrt haben sie die Studenten, die wirklich hart arbeiten wollten, auch anerkannt, selbst wenn man über die Formen der Regelung, der Leitung, der Lenkung, der Verwaltung einer Universität geteilter Meinung war. In der Physik ist dieses Engagement von Seiten der Lehrer auch da gewesen, aber nicht so stark zu spüren gewesen wie in der Mathematik. Gustav Obermair war von Anfang jemand, der mir aufgefallen war als jemand, der glänzend Sachverhalte darstellen konnte, der immer versucht hat, didaktisch anspruchsvoll zu arbeiten, der das Gespräch mit den Studenten von sich aus gesucht hat. Dadurch hat ihn sehr schnell ein Nimbus umgeben von jemanden, der die neue Zeit an der deutschen Universität repräsentiert.

Sie hatten schon sehr früh Kontakte zu Gustav Obermaier in Zusammenhang mit Fachschaftsarbeit, zum anderen in den Physikvorlesungen. Liegt hierin auch der Grund für die Entscheidung, Ihre Diplomarbeit bei Gustav zu machen?

Zunächst einmal war klar, dass ich „Theorie“ betreiben würde. Meine Mathematikausbildung war wirklich exzellent und es ist klar, dass dann nur Theoretische Physik in Frage kommen würde. Ich hatte auch Angebote, in der Mathematik meine Diplomarbeit zu schreiben, habe ich mich letztlich doch für Physik, aber eben

Theoretische Physik, entschieden. Soweit ich weiß, gab es damals nur zwei Theorielehrstühle, das waren Schröder und Obermair. Erst später kamen andere Lehrstühle hinzu. Schröder, der erste Lehrstuhlinhaber in Theorie, hielt sehr gute Vorlesungen, und er war ein sehr angenehmer Mensch. Aber diese zusätzliche Qualität der Diskussion an einem Lehrstuhl, nämlich über alle Dinge, ob es nun Reform-Uni oder die Kultur anderer Länder ist – ich habe ja auch während des Studiums viele Reisen nach Afrika unternommen – zeichnete den Lehrstuhl Obermair aus. überhaupt schienen am Lehrstuhl Obermair die interessanteren Persönlichkeiten zu sein. Mit Gustav Obermair habe mich oft unterhalten, ob über Physik oder über Politik, und wir haben festgestellt, denke ich, dass wir einander ziemlich gute Gesprächspartner waren. Er hat mich wohl schon als Studenten in Diskursen sehr geschätzt. Meine Entscheidung war deshalb relativ klar. Ich hatte mir aber fast schon überlegt, ob es nicht besser wäre, zu einem Professor zu gehen, wo eben nur die fachliche Nähe da ist und ansonsten eher eine persönliche Distanz, so dass die Dinge erst gar nicht durcheinander kommen. Der Betreuer der Diplomarbeit muss einen schließlich auch bewerten, das lässt sich nicht verhindern. Er muss benoten, er muss kritisieren, das kann zu Konflikten führen. Aber ich habe mich dann doch entschlossen, meine Diplomarbeit am Lehrstuhl Obermair durchzuführen.

Sie haben im Herbst 1974 ihre Diplomarbeit aufgenommen?

Ja. Ich habe meine Diplomarbeit, mehr oder weniger, im Alleingang begonnen, weil mir Gustav Obermair eine Arbeit von einem amerikanischen Wissenschaftler gegeben hat, der ein Problem von gekoppelten Spinwellenzuständen im Heisenberg-Ferromagneten ohne Berücksichtigung der Oberfläche mit einem Greensfunktionsansatz exakt lösen konnte. Gustav dachte immer, man könnte das auch mit Oberfläche rechnen, wobei man möglicherweise Fredholmsche Integralgleichungen benutzen könnte, von denen er hoffte, dass sie einen zerfallbaren Kern besitzen würden. Zunächst habe ich die Arbeit von diesem amerikanischen Physiker studiert, ebenso die Geheimnisse der Fredholmschen Integralgleichungen. Allerdings musste ich schnell erkennen, dass das, was Gustav sich vorstellte, nicht machbar sein würde. Das Problem war aber immerhin auf ein eindimensionales Variationsproblem zu reduzieren, so dass man zu Näherungslösungen kommen konnte. Das habe ich dann weitgehend im Alleingang durchgeführt. Gustav hat mir allerdings mehrfach geholfen, mathematische Tricks anzuwenden, zum Beispiel den Residuensatz einzusetzen, um bestimmte Summen auszuwerten.

Als ich das entscheidende Gleichungssystem dann gefunden hatte, habe ich es näherungsweise numerisch auf „Rumpelstilzchen“ gelöst. Dazu musste ich mir die ganze Programmierung anlesen, aber das hat sehr viel Spaß gemacht. Damals haben außer mir auch andere Studenten Diplomarbeit gemacht, zum Teil über das Ising-Modell. Doug Hofstadter war hier, mit dem ich mich relativ bald befreundet hatte. Wir sprachen eigentlich weniger über Physik als über Gott und die Welt. Wir interessierten uns beide sehr für Sprachen und wir hatten sehr gute Gespräche über Politik, Kultur und Kunst. Ich kann mich noch gut erinnern, dass Douglas Hofstadter einmal einen sehr interessanten Vortrag gehalten hat, wo er das Problem der Harpergleichung und der Peierls-Onsager-Hypothese vorgestellt hat. Ich fand den Vortrag ausgezeichnet aufgebaut, er hat eine sehr tiefe Einsicht gegeben. Ich kann mich allerdings auch erinnern, dass sich Gustav Obermair und Gregory Wannier eines Tages berieten und meinten, Doug Hofstadters Arbeiten würden nicht zum Ziel führen, er wäre auf dem falschen Weg und das mit der Promotion würde wahrscheinlich nichts werden. Das ist amüsant, weil wir ja wissen, wie das Ganze ausgegangen ist. Ähnlich ist es übrigens auch mir mit Gustav ergangen - bei meiner Doktorarbeit. Als Betreuer kann man sich einfach manchmal verschätzen. Ich habe mit Doug Hofstadter bald eine echte Freundschaft aufgebaut, die immer noch anhält, auch wenn wir uns natürlich immer wieder aus den Augen verloren haben.

Ich habe deshalb zumindest mitbekommen, was über das Problem von Kristallelektronen im Magnetfeld diskutiert wurde, ohne damals anzunehmen, dass ich darüber meine Doktorarbeit schreiben würde. Ich habe mehr mit meiner Diplomarbeit zu tun gehabt und dies nur am Rande verfolgt. Doug Hofstadter saß im Zimmer neben mir. Ich habe auch die ersten Graphen mit dem rudimentären „Hofstadter-Schmetterling“ gesehen, und wir alle fanden das damals relativ aufregend, aber niemand dachte an Fraktale. Niemand hatte damals gewusst, dass dies im Grunde genommen die erste physikalische Realisation eines Fraktals ist. Insofern war das eine sehr interessante Zeit.

Ich habe dann die Diplomarbeit abgeschlossen und wurde mit „sehr gut“ bewertet. Zunächst hatte ich versucht, so weit es irgendwie ging, das Problem analytisch zu lösen. Ich habe dann mit Rumpelstilzchen gearbeitet, um Spektren numerisch zu bestimmen. Die 12 mal 12- Matrizen, die ich benutzte, waren schon an der Grenze dessen, was die Maschine rechnen konnte. Mit den heutigen Hochleistungsrechnern hätte ich dieses Problem damals im Prinzip mit 10stelliger Genauigkeit, also gera-

dezu exakt lösen können. Rumpelstilzchen hat mich dann auch in die Doktorarbeit hinein begleitet. Diese Maschine stand in meinem Zimmer, da ich sie von Doug Hofstadter „geerbt“ habe. Niemand sonst hat sich viel dafür interessiert und ich habe dann mit ihr weitergearbeitet.

Sie hatten davon gesprochen, dass Gustav Ihnen während der Diplomarbeit weitergeholfen hat mit mathematischen Umformungen, Transformationen, Residuensatz bei Behandlung von Integralen. Den Umgang mit Rumpelstilzchen haben Sie sich selbst angeeignet. Douglas Hofstadter hat etwas Ähnliches berichtet, dass er im Umgang mit Rumpelstilzchen immer etwas komisch beäugt wurde, in Hinblick auf die Frage, was denn dieser Amerikaner mit dem Computer macht. Sehen Sie in der damaligen Situation einen methodischen Umbruch in der Theoretischen Physik? Heute ist in der jungen Generation der theoretischen Physiker der Computer nicht mehr wegzudenken. Andererseits ist die ältere Generation von Physikern in der Lage, ausschließlich mit Block und Bleistift komplexe Integrale von Hand zu lösen.

Das kann ich immer noch! Aber irgendwo gibt es Grenzen, das ist genau der Punkt. Ich glaube, dass Sie schon recht haben, dass das ein Umbruch war. Ich vermute, Rumpelstilzchen wurde damals einfach gekauft, weil Geld da war. Die Erstausrüstung war wunderbar in jenen Tagen, Geld floss von allen Seiten und ich glaube, Gustav hat den Rechner erworben, weil er angeboten wurde. Dann stand das Ding da und Doug Hofstadter hat sich irgendwann dessen bemächtigt, und später hat man ihn an mich weitergegeben, weil man nicht recht wusste, wer damit etwas anfangen könnte. Damals haben wir noch, heutzutage vielleicht nicht mehr, eine extrem gute analytische Ausbildung bekommen, das heißt, wir haben die ganzen Differentialgleichungen und Integrale, die man überhaupt lösen konnte, knacken können. Notfalls hat man im Kamke oder im Abramowitz-Stegun nachgeschaut und im Grunde weiß ich immer noch, wo ich nachschauen muss, welche Techniken ich einsetzen muss.

Bei meiner Diplomarbeit, habe ich das eher als Ärgernis empfunden, dass ich ein paar Rechnungen mit einer Maschine durchführen musste, weil es eben keine analytische Lösung gab. Das war im Grunde genommen ein Notnagel, um ein paar Zahlen zu erhalten und eine Graphik zu zeichnen. Bei meiner Doktorarbeit habe ich dann den Großrechner der Universität des Zentralen Rechenzentrums eingesetzt,

einen TR 440 von AEG-Telefunken. Ich habe irgendwann eingesehen, dass man mit diesem Instrument tatsächlich die zusätzlichen Einsichten gewinnen kann, um das gestellte Problem zu lösen. Ich habe die analytischen Vorbereitungen allerdings sehr weit getrieben. Es ging um die Peierls-Onsager-Hypothese generell und damit weit über die Harper-Gleichung hinaus. Der Hofstadter Schmetterling ist eine interessante fraktale Struktur, aber er ist nicht wirklich eine Antwort darauf, ob die Peierls-Onsager-Hypothese richtig ist oder nicht, eben weil die Harper-Gleichung extrem vereinfacht ist, während ich gewissermaßen mit den vollen quantenmechanischen Gleichungen für Kristallelektronen im Magnetfeld –allerdings mit einfachster Geometrie– gearbeitet habe.

In meiner Doktorarbeit konnte ich dann eine Antwort auf die gestellte Frage geben. Der entscheidende Schritt war dann doch ein numerischer. Ich habe versucht, mit einem Variationsverfahren die Schrödinger-Gleichung zu lösen und musste eine Reihenentwicklung in einer passenden orthogonalen Basis von Funktionen finden. Mit diesem Großrechner an der Universität ist es mir dann gelungen, die Spektren mit hinreichender Genauigkeit auszurechnen, so dass man in der Tat gesehen hat, was die volle quantenmechanische Rechnung einerseits und was die Peierls-Onsager-Hypothese andererseits liefert. Man konnte die beiden Dinge direkt miteinander vergleichen. Aber dafür musste ich u.a. an den Wochenenden den Rechner der Universität komplett lahm legen! Ich habe mit etwa mit 300 mal 300-Matrizen gerechnet. Das war das Größte, was er gerade noch rechnen konnte – wenn der ganze Rechner nur für mich da war. Nun hatte man aber einen Betrieb, wo verschiedene Nutzer gleichzeitig arbeiten wollten. Man hat sich über ein Terminal eingeloggt, und jeder der so registrierten Nutzer hat in einem Time-Sharing Schema Zugang zu den Rechenressourcen gehabt. Aber ich habe einen Trick entwickelt, wie ich einlogge und dann sofort einen Job losschicke, der alle anderen Aufträge blockiert, so dass der Rechner im Grunde genommen dann den ganzen Tag für mich alleine arbeitet. Das war im Grunde eine reine Überlebensstrategie meinerseits, denn sonst hätte ich meine Rechnungen technisch einfach nicht ausführen können. So habe ich an vielen Wochenenden den Großrechner alleine in Beschlag genommen, um zu meinen Ergebnissen zu kommen.

Am Montag lagen dann immer in einem Fach im Rechenzentrum die Spektren – das war das Spannendste überhaupt! Ich bin immer mit einem großen Bangen hingegangen, weil ich lange Zeit dachte, völlig auf dem Holzweg zu sein. Außerdem

wusste man am Montagmorgen nicht, ob der Rechner es überhaupt geschafft hatte oder nicht, denn oft genug stürzte er ab. Das waren wirkliche quälende Fragen: Hat er durchgerechnet? Haben andere Jobs mich verdrängt, oder sind die Ergebnisse irrelevant oder unerklärbar? Ich habe außerdem die ganze Zeit analytisch weitergearbeitet. Ja, ich habe sogar noch eine quasi-analytische Lösung des gesamten Problems, die ich später gefunden, aber nie veröffentlicht habe, in irgendeiner Schublade. Leider war ich bald mit anderen Sachen beschäftigt und dann kam der erste Forschungsaufenthalt in Amerika.

Gut, nun zu Ihrer Frage zurück: Damals hat in der Tat ein Qualität- oder Paradigmenwechsel stattgefunden. Das heißt aber nicht, dass man als Physiker heutzutage nur noch Numerik macht und früher hat man Analytik gemacht – heute macht man eben beides! Die Numerik hilft einem, nicht stehen zu bleiben. Wenn nun eine Gleichung sich als zu schwierig erweist, dann wird sie annähernd mit dem Rechner gelöst, und man weiß, wie man weitergehen muss. Da sind unsere Möglichkeiten explodiert und die moderne Physik wäre ohne den Einsatz von Rechnern absolut undenkbar.

Ein weiterer Punkt, den Sie erwähnt hatten, war das Gespräch zwischen Gustav Obermair und Gregory Wannier über Douglas Hofstadters Vortrag und seine Arbeit. Der Lehrstuhl Obermair zeichnet sich bis heute, bis zu Gustavs Emeritierung, durch niedrige Hierarchiestrukturen aus, Douglas Hofstadter hatte berichtet, dass Wannier seine Forschungsergebnisse zunächst zurückwies und zu einer Bibliotheksarbeit über bereits Bekanntes geraten hatte. Ist so etwas nicht auch Ausdruck von hierarchischen Strukturen innerhalb innerhalb der Arbeitsgruppe?

Ich meine, ein Lehrstuhl ist ein Lehrstuhl, und Gustav Obermair hatte als deutscher Professor natürlich das Sagen. Gustav hat zwar niemals den Chef gespielt, aber es war klar, dass er eine besondere Autorität hatte, die er ausgestrahlt und auch ein bisschen genossen hat. Er war mit Sicherheit nicht der Tyrann oder Diktator - er war der Star. Als Star hat er sich eine Aura geschaffen, und diese Aura hat auch gewirkt. Gustav ist ein hochintelligenter Mensch, hochgebildet, mit hervorragenden sozialen Eigenschaften, und deshalb war er auch gar nicht erst in Frage gestellt. Eine Machtfrage gab es nicht. Trotzdem weiß ich nicht, was passiert wäre, wenn sie gestellt worden wäre.

Gregory Wannier war ein völlig anderer Typ. Er war jemand, der in klassischen Machtstrukturen aufgewachsen war. Gregory war vor allem völlig unerbittlich, wenn es um die wissenschaftliche Wahrheit ging und um Qualität, da kannte er weder Freund noch Feind. Wenn er das Gefühl hatte, jemand sei ein Schwätzer oder jemand erreiche das notwendige Niveau nicht, dann war er gnadenlos. Das ging so weit, dass er Leute in Seminaren und dergleichen gewissermassen „hingerichtet“ hat. Das ist etwas, was Gustav sicher nie getan hätte. Nun, Gregory Wannier war ein weltberühmter Wissenschaftler, dessen Wort Gewicht hatte und wenn er sagte, das reicht nicht, dann hätte Gustav zwar sicher zugunsten des „Delinquenten“ argumentiert, aber Gregory hätte wohl das letzte Wort gehabt.

Sie hatten schon begonnen über Ihre Dissertation, die „First-Principles-Bandstruktur von Kristallelektronen im homogenen Magnetfeld und die Überprüfung der Peierls-Onsager-Hypothese“ zu berichten. Darin haben Sie die physikalische Begründung der Peierls-Onsager-Hypothese geliefert. Aus dieser Arbeit ist eine Reihe von Publikationen hervorgegangen: Zwei in Physical Review Letters, drei in Physical Review B und eine in Physica Status Solidi B. Könnten Sie bitte ein paar Worte zu der Arbeit an Ihrer Dissertation sagen?

Das war natürlich eine aufregende Zeit. Zunächst einmal gab mir Gustav Obermair eine sehr komplizierte Gleichung, letztendlich eine Integro-Differentialgleichung, die man als Operator relativ kompakt darstellen konnte und sagte: „So, das ist die Schrödinger-Gleichung; wenn man die löst, dann hat man im Grunde genommen die ganze Frage der Peierls-Onsager-Hypothese gelöst.“ Sollte heißen, dann weiß man, ob diese Hypothese einer strengen quantenmechanischen Formulierung des Problems „Kristallelektronen im Magnetfeld“ entspricht, zumindest in der einfachsten nicht-trivialen Konstellation. Die Gleichung, die Doug Hofstadter untersucht hatte, war als ein extremer, artifizieller Grenzfall enthalten in dieser Schrödinger-Gleichung. Dann habe ich mich also auf die Suche gemacht, eine Lösung zu finden und bin relativ viele Irrwege gegangen. Das war gar nicht anders möglich. Ich habe wieder mal im wesentlichen für mich allein gearbeitet, und ich kann mich gut erinnern, welche Lösungsansätze ich nun im Einzelnen versucht habe. Ich hatte vier Jahre Zeit für meine Promotion. Solange war ich als Verwalter einer Dienststelle eines wissenschaftlichen Assistenten (VDWA) unter Vertrag. Es war klar, dass ich in dieser Zeit die Promotion abschließen musste. Ich habe natürlich auch Übungen durchgeführt und dergleichen, aber die vier Jahre waren an sich Zeit genug, um zum Ergebnis zu kommen. Tatsächlich habe fast drei Jahre umschlichen wie ein heißes Gericht. Dabei habe ich noch eine Reihe von Mathematikbüchern gelesen und verschiedenes Interessantes gemacht, aber hauptsächlich habe ich versucht, die Lösung einzukreisen.

Kreisen passt ganz gut in dem Zusammenhang: Gustav Obermair hat mich überhaupt nicht gedrängt und gepuscht, aber irgendwann im dritten Jahr hat er mich mich zu einer Besprechung gebeten und so ging ich zu ihm hin mit vier Ordnern von Aufzeichnungen, um ihm zu erklären, was ich alles gemacht hatte. Aber er hatte offenbar schon die Meinung gefasst gehabt, dass das nichts so Rechtes werden würde, und so ging es mir ein bisschen wie Doug Hofstadter. Ich legte ihm die Ordner hin und er sagte: „Aha, der Berg kreiste und gebar ein Mäuslein.“ Das fand ich wirklich nicht besonders motivierend, ja damals war ich richtig böse darüber, aber wir haben das ein bisschen diskutiert und ich habe ihm erklärt, was ich machen wollte, ohne ihn so recht zu überzeugen. Schließlich habe ich dann aber gefunden, mit welcher Orthogonalbasis von Funktionen ich das Problem knacken kann, nachdem ich zuvor unglaublich komplizierte Rechnungen mit ungeeigneten Basen durchgeführt hatte. Sowie ich aber die richtige Orthogonalbasis gefunden hatte, habe ich

das Ganze zunächst einmal programmiert, übrigens mit Rumpelstilzchen, um zu testen, ob das Ganze funktioniert. Weil ich den Tisch-Rechner für mich allein hatte, war ich nicht auf den Großrechner angewiesen. Dann habe ich den Algorithmus gefunden, mit dem ich diese Basis extrem schnell erzeugen konnte. Das ist alles auf Rumpelstilzchen passiert, ich war damals ziemlich gut auf diesem Rechner. Dann habe ich die ersten Ergebnisse Gustav gezeigt und wie er merkte, es gibt doch einen Zugang, da wurde er wieder interessiert, und wir saßen da und brüteten über den Spektren. Zunächst hat alles keinen Sinn ergeben. Ich sollte vor allem versuchen, die Aufspaltung der diamagnetischen Subbänder in dieser realistischen Gleichung zu finden, aber es sah alles wie in einem Datensalat aus.

Dann hatte ich das entscheidende Erlebnis: Ich hörte den Vortrag eines Gastes, der über die Mathieu-Gleichung sprach, die einen Teil des vollständigen Problems beschreibt, während die Harper-Gleichung gewissermassen den anderen Teil ausdrückt. Das fand ich überaus interessant, habe aber noch keinen wirklichen Zusammenhang gesehen zur Lösung meines Problems, weil es viel komplizierter war. Aber dann habe ich von MacLachlan ein Buch über die Mathieu-Gleichung gelesen, sofern man ein Mathematikbuch lesen kann, d. h. ich habe alles nachvollzogen und programmiert und wusste dann, wie die Lösungen aussehen, wie man diese generieren kann. Das war der entscheidende Schritt. Ich habe das gelesen und hatte das so intensiv durchgearbeitet, dass ich sogar wusste, wie die Spektralwerte sind. Insbesondere den Grundzustand des Mathieu-Hamiltonians, also das erste Niveau des Spektrums hatte ich noch irgendwie im Kopf. Dann habe ich ein halbes Jahr lang etwas anderes gemacht, an meiner Gleichung weiter herumgefummelt und vollständige Kristallelektronen-Spektren ausgerechnet.

Eines Morgens habe ich, wieder an einem Montag, die Spektren aus dem Rechenzentrum abgeholt. Da ist mir eine Zahl aufgefallen: minus 27 Komma irgendetwas. In dem Moment schoss es mir durch den Kopf, dass das eben zwei mal der niedrigste Wert der Mathieu-Gleichung ist, also -13,5 plus irgendetwas. Das stimmte fast genau, und in dem Moment sah ich, dass das Spektrum der vollen Schrödinger-Gleichung unter bestimmten Voraussetzungen einfach das doppelte Spektrum der Mathieu-Gleichung war! Das war mein Heureka-Erlebnis - in dem Moment wusste ich genau, wie die ganze Struktur zusammengesetzt ist. Letztlich eine gute Gedächtnisleistung... Heute wüsste man, dass es so sein muss, aber damals ist man im Dunkeln herumgetappt. Als ich dann wusste, wie es geht, habe ich innerhalb eines

halben Jahres die volle Schrödinger-Gleichung numerisch komplett gelöst.

Nebenher habe ich den Peierls-Onsager-Hamiltonian, die berühmte Näherung, analytisch geknackt. Dazu habe ich auch noch eine eigene Methodik entwickelt. Das ging dann alles immer schneller am Ende meiner Doktorarbeit - das Bild wurde immer vollständiger, alles passte zusammen. Und einen Monat, bevor ich abgeben musste, hatte ich alle Ergebnisse im Sack. Aber leider hatte ich die eigentliche Arbeit noch nicht geschrieben; dies geschah dann in knapp vier Wochen! Ich hatte dann noch drei Tage Zeit, um mich auf die Prüfung vorzubereiten, das Rigorosum vor dem gesamten Physik-Fachbereich. Im Nachhinein war das der völlige Wahnsinn. Andere schreiben ihre Doktorarbeit in zwei Jahren und ich habe sie in drei Wochen geschrieben, aber ich hatte alle Ergebnisse beisammen und das war ein unglaublicher Beschleunigungsprozess.

Gustav hat die Entwicklung zum Teil mitbekommen und gesehen, wohin das geht. Wie ich dann fertig war, habe ich ihm und Alexander Rauh das komplette Ding auf den Tisch gelegt. Sie haben es gelesen und haben sich unheimlich gewundert, wie im Alleingang das Ganze gelöst werden konnte. Ich kann mich auch noch gut erinnern, dass Gregory Wannier im Sommer und Herbst 1980 wieder in Regensburg war, gerade als ich mit der Arbeit fertig war. Ich glaube, ich war noch im Urlaub, und Gregory Wannier hat meine Doktorarbeit gelesen, Gustav hatte sie ihm gegeben. Am nächsten Tag kam er wieder und sagte: „Ja, das ist ja schade, da ist alles das gelöst, was wir eigentlich noch ausrechnen wollten!“ Das war natürlich für mich eine schöne Entwicklung, aber es hing an ein paar seidenen Fäden.

Inwiefern hing es an ein paar seidenen Fäden?

Wenn ich zum Beispiel nicht auf die richtige Orthogonalbasis gekommen wäre... Das war irgendwann eine Einsicht, und damit war eine geeignete Methode zur Approximation der Lösungen gefunden. Im Grunde genommen war aber das Entscheidende, dass ich mich an die Spektren der Mathieu-Gleichung erinnern konnte. Ich habe mein Promotionstudium sehr breit angelegt. Ich habe mir alle möglichen mathematischen Techniken, alle möglichen physikalischen Argumentationen angelesen und selber durchgerechnet, Ordner über Ordner produziert von eigenen Aufzeichnungen, was eben als nicht sehr zielgerichtet von Gustav empfunden wurde. Ich bin alle möglichen Wege gegangen, habe das Problem richtig eingekreist und hinterher hat sich heraus gestellt, ich hatte genau dann die Technik zur Hand oder

zu Kopfe, die notwendig war. Heutzutage würde man so etwas im Team ausarbeiten, dann wird es vielleicht leichter, als wenn man es alleine macht. Dass ich immer rechtzeitig die richtige Einsicht hatte, das war nicht garantiert und hätte schief gehen können. Dann würde ich nicht hier sitzen und mit Ihnen telefonieren, weil Sie sich dann nicht für mich interessieren würden.

Dann wären Sie auf jeden Fall nicht so leicht auffindbar gewesen.

Das hat mich auch generell gelehrt, dass es sich lohnt, ein extrem breites Methodenspektrum zu haben, dass man wirklich flexibel ist. Dann fällt einem in der Tat immer wieder etwas ein, und diese Schmalspur-Hochgeschwindigkeitskarrieren, wo man mit Hilfe seines Professors durchrauscht, die enden oft im kognitiven Nirgendwo. Also ich denke, ich habe damals gelernt, erstens selbst zurecht zu kommen, unter schwierigen Umständen mich mit einem sehr breiten Umfeld von Gedanken zu umgeben, bzw. ein großes Umfeld von Gedanken aufzunehmen, und dann zweitens auch die nötige Flexibilität zu entwickeln, die man braucht, um komplexe Probleme anzugehen. Das war in gewisser Weise genau so, wie eine Promotion sein soll. Für meine wissenschaftliche Karriere war das das entscheidende Erlebnis, das Gefühl der eigenen Stärke zu entwickeln.

Als damals Gregory Wannier in Regensburg war und mit mir diskutierte, hatte ich noch eine Fülle von Ideen, das Thema weiterzuentwickeln. Aber ich habe dann in Amerika andere Dinge gemacht. Gregory Wannier hatte größten Respekt vor mir und hat mir seine Freundschaft angeboten. Er hat mich nach Santa Barbara vermittelt, an das ITP, eines der besten Theorie-Institute der Welt. Auf jeden Fall war meine Promotion die Phase, in der ich meine wissenschaftliche Statur letztendlich entwickelt habe. So sollte jede Promotion sein, aber nicht immer gelingt es. Dazu ist ein breites Wissen notwendig, aber eben auch Glück. Man muss im richtigen Moment den richtigen Gedanken haben und das kann man nicht steuern. Da braucht man einfach ein auch bisschen Unterstützung vom Schicksal.

Sie waren anschließend in Santa Barbara in Kalifornien und haben dort mit dem späteren Nobelpreisträger Walter Kohn zusammengearbeitet.

Ja, das war sogar derjenige, mit dem ich am meisten zu tun hatte. Ich war abends öfters in seinem Haus und er war der Mit-Gutachter meiner Habilitation in Oldenburg.

Wie beurteilen Sie den Forschungsstil in den Staaten im Vergleich zu Deutschland? Zum einen denke ich wieder an Hierarchie-Ebenen, die Art des Umgangs miteinander und zum anderen an die Kooperation von Theoretikern und Experimentalphysikern.

Im Grunde genommen verhielten sich der Lehrstuhl Obermair und das ITP zueinander, wie ein Kaninchenstall und ein Haifischbecken, wobei der Kaninchenstall natürlich der Lehrstuhl Obermair war. Am ITP waren etwa 80 Leute ab dem Postdoc-Level, unter ihnen einige der besten Physiker der Welt, versammelt. Dort war ein Produktionsniveau und ein Konkurrenzniveau, das man sich in Deutschland überhaupt nicht vorstellen kann. Wenn man Ideen hatte, dann wurde man akzeptiert, aber wenn man keine Ideen hatte oder nicht sofort brilliert hat, dann ist man links liegen gelassen worden.

Gut, Walter Kohn war jemand, der versuchte, die jungen Wissenschaftler zu integrieren, ansonsten aber hat sich niemand um irgendeinen gekümmert. Dort hätte man keine vier Jahre Zeit gehabt, um eine Idee wirklich auszuloten und zu einem Ergebnis zu kommen. Das ist ganz unglaublich, mit welcher Geschwindigkeit und mit welcher Intensität damals sich die Arbeit am ITP abgespielt hat. Eine Arbeit habe ich dort noch zum Magnetismus im Alleingang produziert, auch für Physical Review B. Mit Gregory Wannier hatte ich noch diskutiert, als er in Santa Barbara war und bin dann in das Gebiet der quasi-periodischen Schrödinger-Operatoren, die ganze Chaos-Physik bzw. die Physik komplexer Systeme migriert. Also dies war die Wende, die mich letztendlich bis zu der Umweltforschung geführt hat, die setzte während dieser Zeit in Santa Barbara ein. Wer etwas ganz anderes sehen wollte, als die im Grunde genommen gemütliche Atmosphäre eines deutschen Lehrstuhls an einer Provinz-Universität, der hätte damals ans ITP gehen müssen. Es war ganz egal, zu welcher Tages- oder Nachtzeit man in dieses Institut ging, es hat immer einer bei geöffneter Tür gearbeitet, und ob nun man am ersten Weihnachtstag hinein ging oder irgendwann sonst, es wurde immer gedacht und geforscht und dies auf höchstem Niveau.

Die weiteren Stationen in Ihrer Biographie machen diesen Wechsel hin zu komplexen Systemen, Umweltforschung, deutlich: 1985 die Habilitation in Oldenburg...

Die ging über die quasi-periodischen Schrödinger-Operatoren, aber dies schon im Kontext der allgemeinen komplexen Systeme.

Anschließend Ihr Heisenberg-Stipendium. Die Professur 1989 am Institut für Chemie und Biologie des Meeres. Dort waren Sie dann später auch Direktor und 1991 die Gründung des Potsdam Institut für Klimafolgenforschung

1987 war ich noch bei Michael Nauenberg als Heisenberg-Stipendiat an der University of California in Santa Cruz. Michael Nauenberg war einer der Pioniere der nichtlinearen Dynamik. Ich habe mit ihm gearbeitet und für Phys. Rev. Letters über die fraktale Dimension von Julia-Mengen geschrieben, eine meiner schönsten Arbeiten. Mit rein analytischen Argumenten kann man die fraktale Dimension gewisser Mengen – übrigens so berühmt wie der Hofstadter-Schmetterling - mit hoher Präzision ausrechnen. Aber im Grunde genommen bin ich schon nach meiner Habilitation 1985 zweigleisig gefahren, d.h. komplexe Systeme, Anwendung auf Quantentheorie und dergleichen, aber vor allem auch auf die Umweltproblematik. Das ist durch viele Gespräche mit Nichtphysikern in der Universität Oldenburg passiert. Das hat sich dann so entwickelt, dass ich weiterhin zur reinen Physik arbeitete; beispielsweise habe ich mit Bob Griffiths und Harry Urbschat 1990 in Phys. Rev. Letters über Frenkel-Kontorova-Systeme publiziert. Ich glaube, uns sind damals einige sehr interessante Einsichten gelungen.

Daneben habe ich schon über viele andere Dinge nachgedacht und 1991 z.B. das Symposium „Klimaänderung und Küste“ organisiert. Aber ich habe auch kürzlich auch noch mit Armin Bunde et.al zwei Arbeiten in Phys. Rev Letters veröffentlicht, über die Persistenz von atmosphärischen Fluktuationen. Das ist ein Thema, das mit der Klimatologie zu tun hat, aber es sind rein physikalische Methoden, die eingesetzt worden sind und es ist einfach so, dass ich nach wie vor versuche, den Spagat zwischen reiner Physik und Umweltforschung auszuhalten. Allerdings ist mein Spagat im Augenblick sogar bi-national: Ich habe einen Lehrstuhl an der Universität Potsdam für Theoretische Physik, bin gleichzeitig Professor für Umweltwissenschaften an der University of Norwich, bin immer noch assoziiert mit dem Potsdam Institut, aber auch Forschungsdirektor des Tyndall Center in England, und das ist dann eine ziemlich komplexe Welt, in der ich mich jetzt bewegen muss.

Gestatten Sie mir noch eine abschließende Frage. Sie haben angesprochen, dass die ersten Anzeichen, zweigleisig zu fahren, in Santa Barbara sichtbar wurden. Gab es dazu auch schon Anlagen am Lehrstuhl Obermair? Mitte der 70er Jahre diskutierten Alexander Rauh und Gustav Obermair viel über die friedliche Nutzung der Kernenergie.

Ja, aber ich muss sagen, dass ich die Debatten eher mit Distanz verfolgte. Ich habe mich in diesen Debatten mit engagiert, aber ich habe damals diese radikale Ab-

lehnung der Kernenergie eigentlich nicht nachvollziehen können. Natürlich haben einen die Umweltaspekte berührt, aber vor allem Alexander Rauh war ein sehr erbitterter Gegner der Kernenergie. Ich hatte einen etwas weniger emotionalen Standpunkt. Dies gilt nach wie vor, denn wenn man nun wirklich ein absolut sicheres Atomkraftwerk bauen könnte und wenn man dafür sorgen könnte, dass das spaltbare Material nicht in die Hände von Terroristen fallen würde, dann müssten wir vielleicht diese Energiequelle sogar nutzen, um bestimmte Bedürfnisse der Menschheit heute zu befriedigen. Allerdings sind diese beiden Fragen, die ich selber gestellt habe, nicht ohne weiteres mit einem Ja zu beantworten. Deshalb bin ich skeptisch gegenüber der Kernenergie. Aber diese damalige Antikernkraftwerkbewegung schien mir doch sehr einseitig zu sein und auch sehr romantisierend. Wir haben uns eher ein bisschen gestritten über diese Dinge.

Im Fachbereich Physik hat damals ein Gastprofessor aus Kanada ein Seminar über fortgeschrittene statistische Probleme abgehalten. Dort wurde zum ersten Mal über Fraktale geredet. Es ging u.a. über Prigogines Arbeiten, nichtlineare Selbstorganisation von Systemen fern vom Gleichgewicht, usw. Gustav hatte ihn eingeladen und ich habe dann auch einen Vortrag über Katastrophentheorie gehalten. Das hat mich zum ersten Mal mit der Thematik in Berührung gebracht. Das war etwa 1975 oder '76. Dass nun Doug Hofstadter auf Rumpelstilzchen gerade auch ein Fraktal erzeugt hat, das war uns damals noch nicht klar. Ich habe mich also 1975 schon intensiv mit diesen Sachen befasst und es geschah eben nicht über die politische Schiene bei mir, sondern über die analytisch-wissenschaftliche, dass ich mich immer mehr mit komplexen Systemen befasst habe.

Es kam erst später im Zusammenhang mit Atmosphärendynamik und Küstenmorphologie dazu, dass ich den Umweltaspekt immer stärker ins Auge gefasst habe. Das heißt, ich bin zur Umweltforschung, die ich ja nach wie vor neben meiner physikalischen Forschung betreibe, aus wissenschaftlicher Neugier – so enttäuschend das für manche klingen mag. Das schließt nicht aus, dass ich meine eigenen Wertvorstellungen im Umweltbereich habe. Ich sympathisiere natürlich auch privat mit allen Bestrebungen, mit dieser Umwelt pfleglicher und vorsichtiger umzugehen, also z.B. kraftvollen Klimaschutz zu betreiben, und etwa die Kernkraft nicht ohne weiteres auf die Menschheit loszulassen. Das ist ganz klar, aber das war nicht mein primärer Zugang.

Lehrstuhl für Wissenschaftsgeschichte
Universität Regensburg
D-93040 Regensburg
<http://www-wissenschaftsgeschichte.uni-r.de>