

Vorwort

Freeman Dysons Vorlesungsunterlagen zu „*Advanced Quantum Mechanics*“ haben über Jahre hinweg viele Anhänger gefunden, obwohl sie erst seit kurzer Zeit offiziell veröffentlicht sind. Es sich könnte bei ihnen durchaus um einen der erfolgreichsten und begehrtesten Vertreter des *Samizdats* der Physik in der Moderne handeln.¹

Die Aufzeichnungen stammen aus einem Kurs für Studenten im Aufbaustudium, den Dyson im Herbstsemester 1951 an der Cornell University gab. Der Kurs war in vielerlei Hinsicht etwas Besonderes, nicht zuletzt deshalb, weil der Dozent – Dyson – nur vier Jahre zuvor zum ersten Mal nach Cornell gekommen war, als er selbst gerade im ersten Jahr des Aufbaustudiums war. In kürzester Zeit stieg er in die höchsten Kreise der Physiker auf, die sich der großen Herausforderung der Quantenfeldtheorie und der in ihr auftretenden problematischen Divergenzen stellten. Er erkannte als Erster, wie man die unterschiedlichen Ansätze von Sin-itiro Tomonaga, Julian Schwinger und Richard Feynman zur Renormierung miteinander abgleichen kann. Er führte ihre Versuche zum Erfolg, indem er zeigte, dass die Renormierung in jeder Ordnung der Näherung in der Störungsentwicklung funktioniert, also nicht nur in der niedrigsten. Und, was wahrscheinlich am wichtigsten ist: Er war der Erste, der viele Physiker die Einzelheiten der neuen Verfahren lehrte. Obwohl erst Mitte zwanzig, erhielt Dyson bereits eine vollwertige Professur in Cornell, um sich die Lehrverpflichtungen mit Hans Bethe zu teilen. Weder Cornells physikalisches Institut noch die Universitätsverwaltung störten sich an der Kleinigkeit, dass Dyson eigentlich niemals promoviert hatte.²

Der in Großbritannien geborene Dyson studierte an der Universität von Cambridge Mathematik, bevor sein Studium durch den zweiten Weltkrieg unterbrochen wurde. Während des Krieges nutzte er seine Fähigkeiten, um im Royal Air Force Bomber Command als Analytiker in der Operational Research Section zu arbeiten. Wenn er die Zeit fand, beschäftigte er sich mit reiner Mathematik, nicht zuletzt, um „inmitten des Wahnsinns der Bomben-

einsätze bei Verstand zu bleiben“.³ In dieser Zeit entdeckte Dyson Walter Heitlers Buch *The Quantum Theory of Radiation* (1936), das ihm die Augen für die Schönheit und auch die Herausforderungen der Quantenfeldtheorie öffnete. Nachdem er eine Weile mit der Entscheidung rang, wechselte er schließlich von der Mathematik zur Physik. Mithilfe eines Trinity-Stipendiums kehrte er am Ende des Krieges nach Cambridge zurück, um bei dem theoretischen Physiker Nicholas Kemmer zu studieren. Bald jedoch wurde Dyson in Cambridge unruhig: Kemmers Aufmerksamkeit teilte sich auf viele Studenten auf, und diese schienen, zumindest laut Dyson, nicht mit Begeisterung bei der Sache zu sein. Mit der Unterstützung durch ein Commonwealth-Stipendium ging Dyson in die USA, um sein Studium bei Hans Bethe in Cornell fortzuführen. Er kam im September 1947 in Ithaca an.⁴

Das Leben als Student bereitete ihm viel Vergnügen. Sein Zimmer im Studentenwohnheim war „sehr behaglich und gut zum Arbeiten geeignet“, versicherte er seinen Eltern, kurz nachdem er eingezogen war. Die Bedingungen schienen genau richtig für ein ernsthaftes Studium: „Es ist nicht für ein geselliges Leben konzipiert, die Regeln sind streng: kein Kochen, kein Alkohol und keine Frauen.“⁵ Das Essen in der Cafeteria war gut, und seine Kommilitonen waren sogar noch besser. „Ich denke, ich kann viele Dinge schon durch den Umgang mit diesen jungen Menschen lernen“, schrieb er nach Hause. „Sie alle sind während der Arbeitszeit recht ruhig, ganz im Gegensatz zu der Cavendish-Schar, entweder, weil sie an echten Problemstellungen arbeiten, oder weil es keine Mädchen in der Nähe gibt.“⁶ Einen Monat später berichtete er seinen Eltern, dass er ein „stark professionalisiertes Leben“ führe, „ohne ein erwähnenswertes Privatleben. Ich wache am Morgen auf und denke über Mesonen und Photonen nach, und dagegen gibt es nicht viel einzuwenden.“ Nicht, dass er sich beschweren würde. „Zum ersten Mal in meinem Leben denke ich ständig und ohne Anstrengung über Physik nach, und diese Gewohnheit möchte ich lieber festigen, anstatt sie aufzugeben.“⁷

Bethe übertrug Dyson eine Aufgabe zum Bearbeiten, und Dyson machte sich rasch ans Werk. Die Aufgabe bestand darin, die Auswirkungen von Quantenfluktuationen eines den Atomkern umgebenden elektromagnetischen Feldes auf die Energieniveaus des Wasserstoffatoms zu berechnen – um damit Bethes eigene Berechnung der Lamb-Verschiebung zu verfeinern. In Bethes erstem Ansatz des Problems hatte er in nicht-relativistischer Näherung gearbeitet und die berühmten Divergenzen eliminiert, indem er die entsprechenden Integrale begrenzte. Dysons Aufgabe war es, eine vergleichbare, aber relativistische Berechnung vorzunehmen, während er an anderen Stellen noch immer vereinfachende Annahmen heranzog. Dyson stürzte sich in die Arbeit

und füllte einen großen Stapel Schmierpapier mit seinen Berechnungen. Bethe war beeindruckt und schlug Dyson vor, das Ergebnis zu veröffentlichen.⁸

Bethe ging noch einen Schritt weiter und ermutigte Dyson, noch für ein zweites Jahr in den Vereinigten Staaten zu bleiben, um unter J. Robert Oppenheimer am Institute for Advanced Study in Princeton, New Jersey, zu arbeiten. Dyson war wie berauscht. „All dies zeigt, wie richtig die Entscheidung war, zur Physik zu wechseln“, schrieb er aufgeregt nach Hause. Das Institut übte dabei auf ganz eigene Art eine große Versuchung auf ihn aus. „Ich bin nicht immun gegen die allgemeine Krankheit des Berühmtheiten-Jagens“, erklärte er seinen Eltern. Die Chance, Koryphäen wie Albert Einstein, Hermann Weyl und John von Neumann an dem renommierten Institut zu treffen, schien zu schön, um wahr zu sein.⁹ Nicht schlecht für sein erstes Semester in Cornell.

Immer häufiger fand sich in Dysons Briefen nach Hause ein neuer Name: Richard Feynman. „Er ist der klügste der jungen Theoretiker hier“, berichtete Dyson seinen Eltern, „und er ist das erste Exemplar einer seltenen Spezies, das ich treffe, nämlich die des gebürtig amerikanischen Wissenschaftlers.“¹⁰ Feynman war seit dem Ende des zweiten Weltkrieges in Cornell gewesen, als Bethe ihn aus Los Alamos abgeworben hatte. In den Jahren seit dem Krieg, während er größtenteils für sich arbeitete, kehrte Feynman zu dem Problem der Divergenzen in der Quantenelektrodynamik zurück. Er hatte begonnen, kleine Linienzeichnungen zu skizzieren, die ihm halfen, sich durch die verschiedenen Terme der Störungsentwicklungen durchzuarbeiten. Sie sollten bald als „Feynman-Diagramme“ bekannt werden. Mit ihrer Hilfe und mit vergleichbaren Rechentricks – einschließlich seiner berühmten Methode, die Nenner von Integralen in Integralen zusammenzufassen – bastelte Feynman eine Möglichkeit zurecht, aus den Berechnungen in der Quantenelektrodynamik endliche Zahlenwerte zu gewinnen, ohne auf das plumpe Abschneiden zurückzugreifen, das bisherige Berechnungen beeinträchtigt hatte.¹¹ Er hatte noch keines seiner neuen Ergebnisse sorgfältig niedergeschrieben. Wie Dyson später seinen Eltern erzählte, „brütete Feynman immer über neuen Ideen, die meisten eher eindrucksvoll als nützlich, und kaum eine reifte sehr lange heran, bevor sie wieder von neuen Inspirationen verdrängt wurde.“ Dyson verfolgte gebannt dieses Vorgehen: Feynmans „wertvollster Beitrag zur Physik ist seine Rolle als Bewahrer der Einstellung zur Arbeit: Wenn er mit seinem neuesten Geistesblitz in einen Raum stürmt und beginnt, ihn gestikulierend und in schwärmerischem Tonfall darzulegen, dann ist das Leben zumindest nicht langweilig.“¹²

Dyson freundete sich mit Feynman an, und beide begannen im Frühling, mehr über Feynmans eigenwilligen Ansatz der Quantenelektrodynamik zu sprechen. Feynmans Methoden – noch immer eher Faustformeln als sorgfältige Herleitungen – schienen Dyson „vollkommen rätselhaft.“¹³ Im Sommer 1948 fuhren die beiden kreuz und quer durchs Land, und Dyson, der noch immer mit Feynmans Ansatz nicht weiterkam, erhielt hier wichtige Anregungen. Die Reise nahm in den brieflichen Schilderungen an seine Eltern fast olympische Ausmaße an.¹⁴ Gleich danach machte sich Dyson auf nach Ann Arbor, Michigan, um die jährliche Summer School für theoretische Physik zu besuchen. Die Hauptattraktion jenes Sommers war Julian Schwinger. „Gestern ist der großartige Schwinger angekommen, und zum ersten Mal habe ich mit ihm gesprochen“, schrieb Dyson begeistert nach Hause. Schwingers eleganter Ansatz der Renormierung – in Stil und Art ganz das Gegenteil zu Feynmans temperamentvollem Gekritzel – machte sofort Eindruck auf Dyson. „Ich denke, in ein paar Monaten haben wir vergessen, wie die Prä-Schwinger-Physik aussah“, berichtete er seinen Eltern.¹⁵ Er lauschte jeden Morgen hinterzogen den Vorlesungen Schwingers, bevor er den ganzen Nachmittag über eigene Berechnungen anstellte. Er fand ein paar Wege, Schwingers Herleitungen „aufzuräumen“ – Einzelheiten, die Dyson in diesem Sommer ein paar ehrenvolle persönliche Gespräche mit Schwinger einbrachten.¹⁶

Bis zum Ende des Sommers war einiges an Zeit zusammengekommen, in der Dyson direkt von Feynman und Schwinger gelernt hatte, wie jeder der beiden Physiker das Problem der Renormierung anging. Niemand sonst in der Welt hatte eine vergleichbare Erfahrung gemacht. Sogar Feynman und Schwinger gaben zu, dass sie nicht verstanden, was der jeweils andere tat. Während Dyson im Sommer mit dem Bus zurück nach Osten fuhr, verfiel sein müder Geist in „eine Art halber Benommenheit“ und er „begann, sehr ausgiebig über Physik nachzudenken, insbesondere über die miteinander konkurrierenden Strahlungstheorien von Schwinger und Feynman.“ Und dann gab es einen klassischen „Heureka!“-Moment, genauso erhebend wie Archimedes' Erkenntnis der Verdrängung des Wassers, als er gerade in eine Badewanne stieg, oder August Kekulés nächtlicher Traum von der schlangenartigen Struktur des Benzolmoleküls. Dyson schrieb seinen Eltern, was als nächstes geschah:

Nach und nach wurden meine Gedankengänge klarer und schlüssiger, und bevor ich wusste, wie mir geschah, hatte ich das Problem gelöst, das das ganze Jahr über in meinem Kopf steckte, nämlich den Beweis, dass beide Theorien äquivalent sind. Mehr noch: Da jede der beiden Theorien in bestimmten Details der jeweils anderen überlegen war, lie-

ferte der Beweis nebenbei noch eine neue Form der Schwinger-Theorie, die die Vorteile beider Theorien miteinander verknüpfte.

Er hatte nun eine Mission. Seine erste Aufgabe, nachdem er am Institute for Advanced Study eingetroffen war, war es, seine während der Reise zusammengekommenen Eingebungen zu Papier zu bringen.¹⁷

Dyson schrieb in diesem Herbst am Institut zwei Veröffentlichungen. Die erste präsentierte Feynmans und Schwingers verschiedene Ansätze und zeigte ihre mathematische Entsprechung – keine geringe Leistung, hatten doch weder Feynman noch Schwinger bisher „irgendetwas einigermaßen Verständliches zu ihren Theorien“ veröffentlicht.¹⁸ Feynman hatte noch nichts von seinem neuen Ansatz in Druck gegeben, und Schwinger hatte bisher über seine Methoden nur einen kurzen Brief an den Herausgeber der *Physical Review* geschrieben. (Zu der Zeit, als er den Artikel schrieb, machte sich Dyson auch mit dem Ansatz der Renormierung von Sin-itiro Tomonaga vertraut, der in den USA noch nicht sonderlich bekannt war. Tomonagas Methoden waren denen von Schwinger so ähnlich, dass er sie in seinem Artikel zu einem einzigen „Tomonaga-Schwinger“-Ansatz zusammenfassen konnte, der Feynmans diagrammartigem Ansatz gegenüberstand.) In seiner zweiten Veröffentlichung – noch länger und komplizierter als die erste – verallgemeinerte Dyson die bisherigen Theorien der Renormierung auf beliebige Ordnungen in der Störungsentwicklung und zeigte damit zum ersten Mal, dass die Divergenzen, die die Quantenelektrodynamik so lange geplagt hatten, systematisch und in sich konsistent entfernt werden können.¹⁹ Zusammen boten die beiden Artikel Dysons eine Art Rezept oder Anleitung, wie man bei den neuen Berechnungen vorgehen musste. Obwohl Feynman nur wenige Monate später selbst zwei Artikel über seine neuen Methoden veröffentlichte, wurden Dysons Abhandlungen von 1949 für die nächsten anderthalb Jahrzehnte viel öfter zitiert als Feynmans.²⁰

Nun trat umgehend die Cornell University auf den Plan und berief Dyson wieder zu sich, lockte ihn also nach Ithaca zurück. Eine seiner ersten Aufgaben war es nun, die Vorlesungen über Quantenelektrodynamik von Feynman zu übernehmen. Kurz zuvor hatte nämlich das California Institute of Technology Feynman berufen und ihn damit von Cornell abgeworben. Einer von Dysons Studenten erinnerte sich an dessen Art zu lehren. „Lieber Vater“, begann der Student,

er [Dyson] ist ein ziemlich guter Dozent. Er hat eine sehr klare und einleuchtende Art, obwohl er, zumindest in diesem Kurs [der Kerntheorie] kaum Vorlesungsunterlagen verwendet. Normalerweise verweist er

auf einen Stapel *Physical Reviews*, den er mit in die Vorlesung bringt. Damit kommt er die meiste Zeit aus, da er sich offensichtlich viele Gedanken über die Vorlesung gemacht hat und überhaupt den ganzen Stoff gut beherrscht, aber manchmal kommt er durcheinander. Er gibt sich sehr große Mühe, um sicherzugehen, dass jeder versteht, wovon er spricht, und er ist sehr geduldig, wenn er Dinge im Detail erklärt.

Er ist bei den Studenten sehr beliebt und bemüht sich auch darum, denke ich.²¹

Dyson berichtete damals seinen Eltern, dass er das Lehren „recht vergnüglich“ fand „und nicht viel dafür arbeiten“ musste.²²

Mehr noch als die beiden Artikel von 1949 stellten die Mitschriften von Dysons Kurs 1951 in Cornell die detailliertesten, klarsten und aktuellsten Instruktionen dar, um die Quantenfeldtheorie und die Renormierung in Angriff zu nehmen. Bethe, der sich in den vorangegangenen Jahren mit Feynman als Dozent dieses Kurses abgewechselt hatte, bezeichnete Dysons Version schlicht als „das Modell“.²³ Bald zeigten sich noch mehr Physiker als nur Bethe beeindruckt. Drei Studenten des Kurses bereiteten eine Vervielfältigung der Mitschriften des Kurses vor, ursprünglich mit der Absicht, sie anderen Teilnehmern zur Verfügung zu stellen. Aber die Kunde von Dysons Kurs verbreitete sich rasch auch außerhalb Ithacas, und bald wollten auch Physiker anderer Universitäten eigene Exemplare der Mitschriften haben. Dieses Echo beeindruckte die Studenten, die bald darauf ein Rundschreiben an Physik Institute richteten. Sie boten die Kopien für 2,50 Dollar an, um ihre Kosten für Vervielfältigung und Versand zu decken. (Selbst unter Einberechnung der Inflation war das ein Schnäppchen – im Jahre 2011 wären dies weniger als 22 Dollar gewesen und damit weniger als für ein gedrucktes Lehrbuch). Drei Jahre später erstellte ein anderer Cornell-Student, Michael Moravcsik, eine überarbeitete Version der Mitschriften, und auch diese fand weite Verbreitung.²⁴

Die Dyson-Mitschriften wurden in den Kursen anderer Institute oft eingesetzt, obwohl bereits einige Bücher zu diesem Thema erschienen waren. Viele dieser Bücher wiederum hielten sich sehr eng an Dysons Darstellungen und verwiesen oftmals auch lobend auf die Mitschriften von 1951. Die Notizen wurden häufig auch für das Selbststudium genutzt. Zahlreiche junge Physiker zitierten die unveröffentlichten Mitschriften in ihren Artikeln und Dissertationen.²⁵ Der mathematische Physiker Elliot Lieb stellte Mitte der 90er Jahre – fast 50 Jahre, nachdem die Kopien erstmals verbreitet wurden – fest, dass Dysons Vorlesungsunterlagen „in einigen Privatbibliotheken noch immer als lang gehegte Schätze“ überdauerten. Ungefähr zur selben Zeit deu-

tete ein älterer Physiker, den ich besuchte, auf die vergilbten Seiten in seinem Regal und nannte sie nur „meine Bibel“. ²⁶

Dysons Vorlesungsmitschriften haben den Test der Zeit bestanden. Obwohl es inzwischen Dutzende von Büchern zur Quantenfeldtheorie und zur Renormierung gibt, können nur wenige mit der Raffinesse von Dysons ursprünglichen Darstellungen mithalten. Danke an David Derbes dafür, dass er die Mitschriften in eine so schöne, moderne Form gebracht hat, und danke an die Herausgeber und Lektoren von World Scientific dafür, dass sie Dysons berühmte Mitschriften so weitreichend zugänglich gemacht haben.

David Kaiser

Germeshausen Professor of the History of Science,
Director, Program in Science, Technology, and Society,
und Senior Lecturer, Department of Physics,
Massachusetts Institute of Technology
dikaiser@mit.edu

25. Juli 2011

Dyson Quantenfeldtheorie

Die weltbekannte Einführung von einem der Väter der
QED

Dyson, F.

2014, XXIX, 288 S. 148 Abb., Softcover

ISBN: 978-3-642-37677-1