

Genial in Gemeinschaft

Zum 100. Geburtstag des Physik-Nobelpreisträgers Richard P. Feynman (1918 – 1988)

Christian Forstner



Fermi National Accelerator Laboratory

Um keinen anderen amerikanischen Physiker hat sich ein ähnlicher Geniekult entwickelt wie um Richard Feynman. Dazu haben sein öffentliches Auftreten und seine autobiografischen Schriften sicher wesentlich beigetragen. Feynman war ein brillanter Wissenschaftler und eine originelle Persönlichkeit, aber kein „einsames“ Genie. Eine historische Perspektive zeigt, dass er mit seinen physikalischen Arbeiten und seinem Denkstil in der Community verankert war.¹⁾

Im Juni 1947 traf sich auf Shelter Island, einer kleinen Insel vor New York, ein exklusiver Kreis von zwei Dutzend der führenden Physiker in den USA, unter ihnen John von Neumann, J. Robert Oppenheimer, John A. Wheeler und der aufstrebende Richard Feynman. In lockerer Atmosphäre diskutierten sie die neuesten Entdeckungen aus der Elementarteilchenphysik und der Quantenelektrodynamik. Diese beiden Teilbereiche entwickelten sich zu zwei der Hauptforschungsrichtungen der Nachkriegsphysik der USA.¹⁾

In dieser Periode veränderte sich der pragmatische Forschungsstil

Auf dem Gruppenbild der Shelter-Island-Konferenz von 1947 ist Richard Feynman versteckt in der hinteren Reihe rechts zu entdecken. Umgeben ist er von einer illustren Schar berühmter Kollegen,

der 1920er-Jahre, demzufolge es die Aufgabe des Physikers nur war, messbare Größen vorherzusagen. Wie der Weg dorthin genau aussah, spielte dagegen keine Rolle, ebenso wenig philosophische Reflexionen. Dieser Stil verband sich nach Kriegsende mit der Arbeitsweise junger theoretischer Physiker, die eng mit Experimentalphysikern kooperierten und deren Bedürfnisse genau kannten.

Insbesondere in der Teilchenphysik und der Militärforschung verschmolz die Arbeit von Experimentatoren und Theoretikern so, dass sich der alte pragmatische Stil zu einem „pragmatic, utilitarian, instrumental style“ weiterentwickelte, der von den experimentellen Möglichkeiten der Instrumente der Großforschung bestimmt war.²⁾ Wie stark Richard Feynman an diese Community und ihren Stil gebunden war, soll im Folgenden untersucht werden.

darunter Linus Pauling (2. von links), Julian Schwinger (9. von links), John von Neumann (11. von rechts), gefolgt von John Wheeler und Hans Bethe sowie J. Robert Oppenheimer (5. von rechts).

Eigenständig ergebnisorientiert

Feynmans Ausbildung war in hohem Maße durch Selbststudium geprägt. Dies geschah nicht etwa, weil er Probleme mit den Methoden und Inhalten des Unterrichts hatte, sondern weil er diesen so schnell absolvierte, dass ihm reichlich Zeit für eigene Studien blieb. Bereits in seiner Schulzeit wandte er neben dem regulären Unterricht beträchtliche Zeit für das Selbststudium auf. Dabei nahm er sehr bald eine pragmatische Haltung an, die sich darin zeigte, dass er dem Lösungsweg nur eine geringe Bedeutung beimaß, solange das Ergebnis stimmte.³⁾

Im Rahmen seines Selbststudiums entfernte sich Feynman also nicht von der Denkweise der US-amerikanischen Physik-Gemeinschaft,⁴⁾ sondern übernahm diese. Das belegt auch der Verlauf seines Grundstudiums am Massachusetts Institute of Technology (MIT): Zunächst hatte er sich für Mathe-

PD Dr. Christian Forstner, Goethe Universität Frankfurt am Main, Gräbstraße 78, 60486 Frankfurt

AIP Emilio Segrè Visual Archives



Richard Feynman diskutiert angeregt mit Kollegen bei der Shelter-Island-Konferenz (von links nach rechts): Willis

Lamb, Abraham Pais, John Wheeler (Feynmans Doktorvater), Feynman, Herman Feshbach und Julian Schwinger.

matik eingeschrieben, wechselte dann dem amerikanischen Mythos des „Practical Man“ folgend zu den Ingenieurwissenschaften, bevor er mit der Physik sein endgültiges Studienfach fand. In seinen physikalischen Arbeiten stellte er betont das Experiment über die Theorie.

In die theoretische Physik wurde Feynman durch die klassischen amerikanischen Lehrbücher eingeführt, wie die „Introduction to Theoretical Physics“ (1933) von John C. Slater und Nathaniel H.

Frank. Darauf basierten die Kurse am MIT, die das erklärte Ziel hatten, den Studenten zu einem produktiven Physiker auszubilden.⁵⁾ Produktiv bedeutete im amerikanischen Verständnis eines theoretischen Physikers, messbare Vorhersagen zu treffen statt philosophische Spekulationen anzustellen.

Die zahlreichen Übungsaufgaben am MIT stellten Feynman vor keinerlei Probleme. Mit Kommilitonen betrieb er darüber hinaus eigenständige Lektüren. Das abstrakte Lehrbuch des englischen Physikers Paul A. M. Dirac legten sie beiseite und wählten stattdessen das am praktischen Gebrauch der Quantenmechanik orientierte Werk der Amerikaner Linus Pauling und E. Bright Wilson.⁶⁾ Selbstständig leiteten Feynman und seine Studienfreunde die Klein-Gordon-Gleichung her, mussten aber bei der Bearbeitung des Wasserstoffatoms feststellen, dass die Gleichung im Praxistest versagte, weil sie als relativistische Verallgemeinerung der Schrödinger-Gleichung ohne Berücksichtigung des Teilchenspins nicht auf das Wasserstoffatom anwendbar ist.

Feynman nannte dieses Erlebnis später ein Schlüsselereignis, bei dem er erkannte, dass nicht die Schönheit einer Gleichung das Ent-

scheidende in der Physik war, sondern der Test der vorhergesagten Ergebnisse durch das Experiment.

In seiner Abschlussarbeit „Forces and Stresses in Molecules“ löste sich Feynman von der Standardbetrachtung über Energieminima und berechnete die auftretenden Kräfte direkt. Dabei stellte er fest, dass nach der quantenmechanischen Berechnung der Ladungsverteilung nur noch die klassischen elektrostatischen Kräfte in den Gleichungen auftraten.⁷⁾ Feynman hatte hier auf einem direkten Weg eine zeitsparendere Methode gefunden, die gleichzeitig genauere Ergebnisse lieferte.⁸⁾

Traumhafte Intuition?

Als Graduate Student in Princeton arbeitete Feynman ab 1939 als Assistent des Theoretikers John A. Wheeler weiter an Grundlagenproblemen der Quantenelektrodynamik. Feynman äußerte sich begeistert, nun endlich an der Front der aktuellen Forschung angekommen zu sein. Gemeinsam mit Wheeler forschte er zur Theorie der Streumatrix und zur Paarbildung.

Feynman nahm selbstständig wieder Forschungsideen zur unendlichen Selbstenergie des Elektrons auf, die er während seiner Undergraduate Studies am MIT aus einem Buch von Dirac bezogen hatte. Zunächst versuchte er über eine Eliminierung des Feldbegriffs in der klassischen Theorie, das Problem in den Griff zu bekommen. Dazu betrachteten Feynman und Wheeler den gesamten Raum-Zeit-Pfad, den ein Teilchen nach dem Prinzip der kleinsten Wirkung „wählte“. Die klassische Theorie schien gut zu funktionieren, aber Wheeler und Feynman scheiterten an der Ausdehnung der Theorie auf die Quantenelektrodynamik.⁹⁾

Bereits in erste Kriegsforschungen eingebunden, fasste Feynman die Ergebnisse dieser Arbeiten in seiner Dissertation zusammen und gelangte zu einer ersten Anwendung des Wirkungsprinzips in der Quantenmechanik, wenn auch ohne die heute übliche Deutung

RICHARD PHILLIPS FEYNMAN

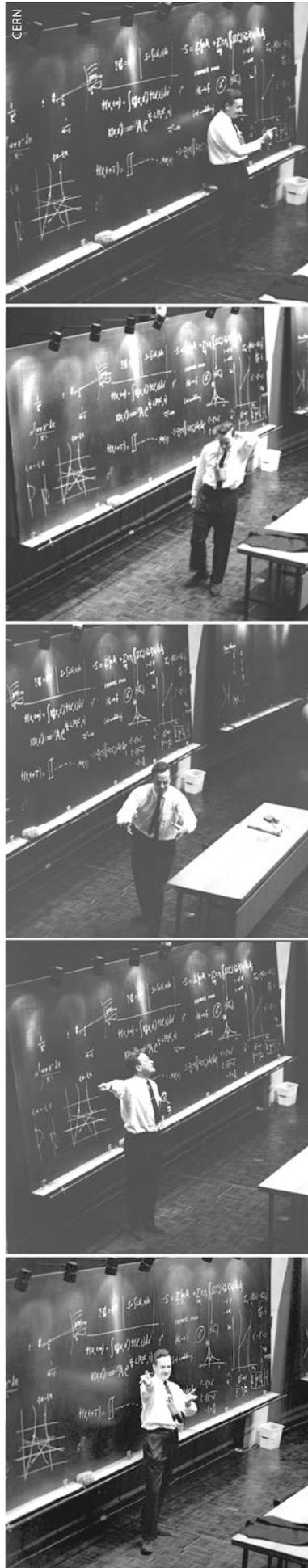
- Geboren am 11. Mai 1918 in Far Rockaway, Queens, einem Außenbezirk von New York
 - 1935 – 1942 Studium am Massachusetts Institute of Technology (B. Sc. 1939) und an der Universität Princeton (Doktorarbeit bei J. A. Wheeler 1942)
 - 1943 – 1946 Leiter einer Theoriegruppe in Los Alamos (Manhattan District Engineers)
 - 1946 – 1950 Associate Professor an der Cornell University
 - 1950 – 1988 Professor am California Institute of Technology, Pasadena
 - 1965 Nobelpreis für Physik zusammen mit Sin-Itiro Tomonaga und Julian Schwinger für ihre grundlegenden Arbeiten zur Quantenelektrodynamik
 - 1986 Mitglied der Untersuchungskommission zur Challenger-Katastrophe
 - Gestorben am 15. Februar 1988 in Los Angeles.
- Wichtige Buchveröffentlichungen:**
 Quantum Electrodynamics (1962); Theory of Fundamental Processes (1962); Feynman Lectures (3 Bände, 1963 – 1964); Quantum Mechanics and Path Integrals (mit A. R. Hibbs 1965); The Character of Physical Law (1965); QED.: The Strange Theory of Light and Matter (1985)

der Integrale als Pfadintegrale. Den Weg dorthin beschrieb Feynman mehr als 20 Jahre später in einer Art Traumerzählung. Tagsüber hatte er mit dem deutschen Emigranten Herbert Jehle über einen Artikel Diracs gearbeitet, nachts lag Feynman dann in seinem Bett und fragte sich: „What would happen if I wanted to get the wave function at one time, and at finite interval later suppose that the interval was divided into a large number of small steps?“ Die Lösung sah er plötzlich vor sich: „I could represent the coordinates that I was integrating over a succession of positions through which the particle was supposed to go, and then this quantity, this sum, would be like an integral the integral of L , which is in fact the action.“¹⁰⁾ Feynman schildert anschließend, wie aufgeregt er gewesen sei, als ihm direkt die Idee für die neue Formulierung der Quantenmechanik auf Basis der Wirkung gekommen war. Kurzerhand sei er aufgestanden, um alles aufzuschreiben und immer wieder zu überprüfen, um wirklich sicher sein zu können.

Diese Erzählung Feynmans vom Träumen der Pfade ist auch in seiner Nobelpreisrede enthalten.¹¹⁾ Mit ihr betont er seine Intuition und führt gleichzeitig einen Traditionsbruch herbei.¹²⁾ Anders als seine rückblickende „Heiligenerscheinung“ der Pfadintegrale vermuten lässt, knüpfte Feynman in seiner Dissertation ganz gezielt an die bisherigen Arbeiten der Gemeinschaft an und betonte die Nützlichkeit seiner Forschung für die aktuellen Forschungsprogramme der Quantenelektrodynamik und der Teilchenphysik.¹³⁾

Krieg, Krise und Karriere

Während des Zweiten Weltkrieges arbeitete Feynman in Los Alamos als Leiter einer theoretischen Forschungsgruppe am zentralen Projekt zum Bau der Atombombe mit. Die Kriegsforschung zeichnete sich durch einen spezifischen Arbeitsstil der Wissenschaftler aus. Statt an einzelnen fundamen-



talen theoretischen Problemen arbeiteten sie anwendungsorientiert in kleinen Schritten hin zu einer Problemlösung. Ebenso arbeiteten die Theoretiker eng mit Experimentalphysikern und Ingenieuren zusammen. Anstelle von exakten Lösungen genügte im Allgemeinen Abschätzungen der Ergebnisse innerhalb klar definierter Toleranzen, und eindeutige Arbeitsanweisungen machten diese Ergebnisse für einen weiten Personenkreis verwertbar. Dieser Arbeitsstil prägte auch Feynmans persönlichen Stil in der unmittelbaren Nachkriegszeit. Des Weiteren wirkte Los Alamos als ein Karrierenetzwerk, und Feynman wurde nach 1945 mit Stellenangeboten nahezu übersättigt.¹⁴⁾

Der Theoretiker und deutsche Emigrant Hans Bethe war für Feynman die zentrale Bezugsperson, die ihn in der Nachkriegszeit förderte. Noch in Los Alamos hatte Bethe Feynman erfolgreich für eine Professur an der Universität Cornell angeworben. Bethe protegierte Feynman, unterstützte ihn auf Tagungen und stellte den Kontakt zwischen Feynman und den Spitzen der physikalischen Gemeinschaft her. Nach 1945 engagierte Feynman sich im Rahmen der Federation of Atomic Scientists durch öffentliche Vorträge für eine zivile Kontrolle der Atomforschung.¹⁵⁾ Dies steht ganz im Gegensatz zum Bild des von allen sozialen Bindungen losgelösten Genies, das Feynman von sich in seinen späteren autobiografischen Schriften zeichnete.

Ein anderes Bild von Feynman lässt sich in seinen Erzählungen zu seinen Forschungen in der Quantenelektrodynamik entdecken: Als junger Physiker unter hohem Erwartungs- und Konkurrenzdruck stehend, erlitt Feynman in Cornell ein Burn-Out und beschloss, nur noch das zu tun, was ihm Spaß machte. In einer späteren Anek-

Nachdem Richard Feynman den Physik-Nobelpreis erhalten hatte, hielt er am 17. Dezember 1965 beim CERN in Genf einen Kolloquiumsvortrag über die „Entwicklung der Raum-Zeit-Formulierung der Quantenelektrodynamik“.

dote gelangte er nach dieser Entscheidung von der spaßesalber durchgeführten Analyse der Präzessionsbewegung eines Tellers hin zu seiner Fassung der Quantenelektrodynamik: „It was like uncorking a bottle: Everything flowed out effortlessly. I almost tried to resist it! There was no importance to what I was doing, but ultimately there was. The diagrams and the whole business that I got the Noble Prize for came from that piddling around with the wobbling plate.“¹⁶⁾

Der Weg von dem rotierenden Teller hin zur Quantenelektrodynamik bleibt dem Laien verschlossen, er erscheint ähnlich wie der Tagtraum der Pfadintegrale als schlichtweg „genial“. Tatsächlich bestand Feynmans Arbeit an seiner Fassung der Quantenelektrodynamik in einem konstanten Prozess des Übersetzens zwischen Feynmans Sprache und der des Kollektivs. Bethe unterstützte Feynman dabei. Die moderne Fassung des Pfadintegralformalismus präsentierte Feynman 1947 erstmals auf der Shelter Island Conference, ohne bei seinen Kollegen auf große

Resonanz zu stoßen. Seine Formulierungen waren den Konferenzteilnehmern zu fremd. Anschließend erarbeitete er auf Anregung eines befreundeten Kollegen eine Publikation, die 1948 in *Reviews of Modern Physics* erschien.¹⁷⁾ Die Publikation enthielt in axiomatischer Formulierung eine Fassung der Pfadintegrale, bei der jedem möglichen virtuellen Pfad eine Amplitude und eine Phase zugeordnet wird und damit jeder denkbare virtuelle Pfad einen Beitrag zur gesamten Wahrscheinlichkeitsamplitude liefert. Auch diese Publikation entstand in enger Diskussion zwischen Feynman und Mitgliedern des Kollektivs.¹⁸⁾

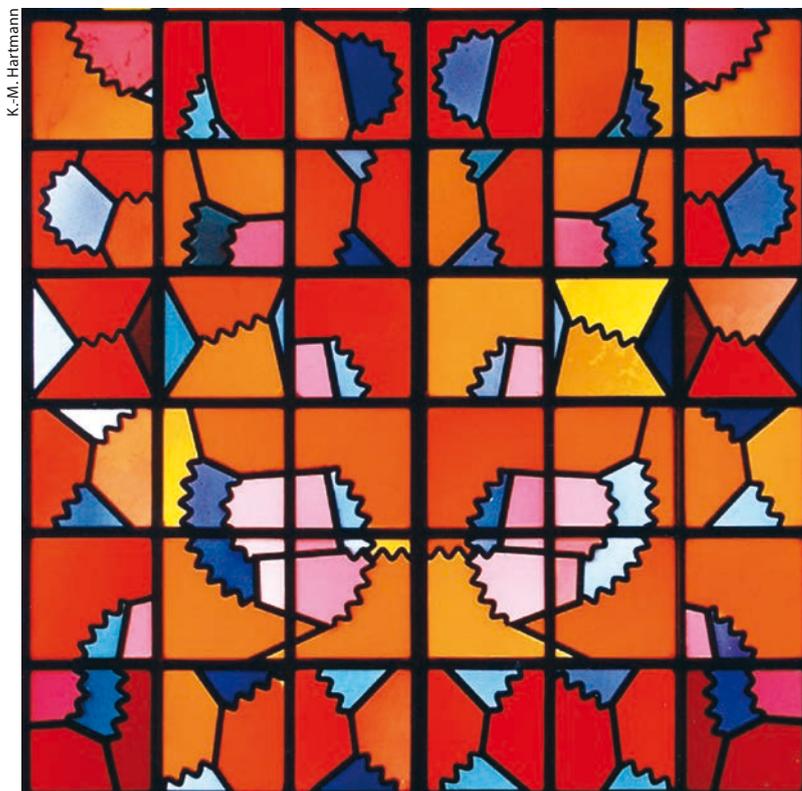
Nach der Shelter Island Conference arbeitete Feynman weiter an seiner Formulierung der Quantenelektrodynamik, allerdings unter hohem Konkurrenzdruck. Sein Kollege Julian Schwinger schien ihm immer etwas voraus zu sein und war zudem durch zahlreiche Publikationen in der *Community* besser verankert als Feynman. Auf der Nachfolgekonferenz 1948 in Pocono stellte Feynman seine

Ergebnisse zur Quantenelektrodynamik vor. Sein ungewohnter Ansatz stieß auf Befremden und erst Freeman Dysons Übertragung von Feynmans Ansatz in die Sprache der *Community* ermöglichte eine breite Rezeption von Feynmans Theorie, die 1965 mit dem Nobelpreis belohnt wurde.

Anschauung und Popularisierung

Feynmans Formulierung der Quantenelektrodynamik war ebenso wie der Operatorformalismus von Schwinger und Tomonaga nicht revolutionär im Sinne von Kuhns Paradigmenwechsel. Es erfolgte kein Bruch mit der bisherigen Physik, vielmehr knüpfte die neue Theorie an die Quantenmechanik an.¹⁹⁾ Die Revolution, verstanden als eine zentrale Neuerung in Feynmans Ansatz, lag in einem anderen Bereich, den sein damaliger Konkurrent Julian Schwinger wie folgt charakterisierte: „Like the silicon chip of more recent years, the Feynman diagram was bringing computation to the masses.“²⁰⁾ Feynmans Weg ermöglichte den Physikern auf eine schnelle Art und Weise und im Vergleich zu Schwingers und Tomonagas Theorie, ohne komplexe Berechnungen zu Ergebnissen zu gelangen.²¹⁾

Das Fassen der mathematisch hochkomplexen Theorie in einer einfachen Sprache, verbunden mit einem grafischen Anschauungsapparat, ermöglichte eine Popularisierung der Theorie. Darin besteht die zweite „Revolution“ in Feynmans Arbeiten. Somit brachte er nicht nur der breiten physikalischen Gemeinschaft mit seinen Diagrammen die Quantenelektrodynamik näher, sondern wirkte in zahlreichen Vorträgen, die später als Aufsätze und in Büchern publiziert wurden, als Popularisierer der modernen Physik, wie nur wenige andere Physiker im 20. Jahrhundert. „The Character of Physical Law“²²⁾ entstand aus einer Vortragsreihe, die Feynman 1960 gehalten hatte. In diesem Band führt Feynman den Leser ausgehend von Newtons Gravitationsgesetz hin zu komplexen



Die Feynman-Diagramme haben sogar Eingang in die Gestaltung von Kirchenfenstern gefunden, wie dieser Ausschnitt eines Fensters im Altarraum der

St. Nicolai-Kirche in Kalkar zeigt. Entworfen hat es der Wiesbadener Künstler Karl-Martin Hartmann.²³⁾

+) Physik Journal, Dezember 2004, S. 36

und grundsätzlichen Fragen, wie die der Symmetrie in der modernen Physik, die er veranschaulicht, ohne ins Triviale abzuleiten. Dabei wagte sich Feynman auch an komplexe Themen. Der Band „QED – The Strange Theory of Light and Matter“ entstand ebenfalls aus einer populären Vortragsreihe und ist eine bis heute einmalige populärwissenschaftliche Einführung in Feynmans Formulierung der Quantenelektrodynamik.²³⁾

Nicht zuletzt begründen die „Feynman Lectures“, die aus einer mehrsemestrigen Vorlesungsreihe hervorgegangen sind, den Ruhm von Feynman als hervorragenden Hochschullehrer.²⁴⁾

Happy Birthday!

Der 100. Geburtstag von Richard Feynman ist sicher ein Grund zum Feiern, aber nicht voller akademischer Würden, die Feynman sein ganzes Leben lang verschmähte

und verspottete. Vielmehr gilt es, an einen hochgradig kreativen und eigenständigen Physiker in Forschung und Lehre zu erinnern, der mit seinem Vorbild durchaus dem wissenschaftlichen Nachwuchs als Orientierung dienen kann: Man sollte in der Forschung eigene Wege beschreiten, sich aber nicht zu weit von der Community entfernen. Das einsame Genie gibt es nicht.

Weiterführende Literatur

- *Ch. Forstner*, Quantenmechanik im Kalten Krieg. David Bohm und Richard Feynman, GNT-Verlag, Diepholz (2007)
- *A. Wüthrich*, The Genesis of Feynman Diagrams, Springer, Dordrecht (2011)
- *D. Kaiser*, Drawing Theories Apart. The Dispersion of Feynman Diagrams in Post-War Physics, University of Chicago Press, Chicago (2005)
- *J. Mehra*, The Beat of a Different Drum. The Life and Science of Richard Feynman, Clarendon, Oxford (1996)

DER AUTOR

Christian Forstner (FV Geschichte der Physik, AG Physik und Abrüstung) ist seit 2011 Leiter des DPG-Fachverbands Geschichte der Physik. Er studierte Physik mit Nebenfach Wissenschaftsgeschichte in Regensburg. Dort promovierte er 2006 in allgemeiner Wissenschaftsgeschichte. Als Predoctoral Fellow forschte er am MPI für Wissenschaftsgeschichte in Berlin und ein Jahr als Postdoc an der Universität Wien zur Geschichte der Radium- und Kernforschung in Österreich. Von 2007

bis 2017 arbeitete er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am „Ernst-Haeckel-Haus“ der Universität Jena, an der er 2017 habilitierte. Derzeit ist er als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Frankfurt im SFB 1095 „Schwächediskurse und Ressourcenregime“ beschäftigt.



Quellen und Anmerkungen

- 1 Die Shelter Island Conference und ihre Folgekonferenzen in Pocono und Oldstone waren die bedeutendsten Konferenzen für die Entwicklung der Physik nach dem Zweiten Weltkrieg, vgl. *Silvan S. Schweber*, Shelter Island, Pocono, and Oldstone. The Emergence of American Quantum Electrodynamics after World War II, *Osiris* 2, S. 265 (1986)
- 2 *Silvan S. Schweber*, Some Reflections on the History of Particle Physics in the 1950s, in: *Laurie M. Brown, Max Dresden und Lilian Hoddeson* (Hrsg.), Pions to Quarks. Particle Physics in the 1950s. Cambridge University Press, Cambridge (1989), S. 668 – 693
- 3 *Charles Weiner*, Interview with Richard Feynman, 4. März 1966, S. 16 – 53, www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/5020-1, vgl. auch *James Gleick*, Richard Feynman. Leben und Werk des genialen Physikers, Droemer Knaur, München (1993), S. 55 – 60; *Silvan S. Schweber*, QED and the Men Who Made It. Dison, Feynman, Schwinger and Tomonaga, Princeton University Press, Princeton (1994), S. 374; *Jagdish Mehra*, The Beat of a Different Drum. The Life and Science of Richard Feynman, Claredon, Oxford (1996), Kapitel 2, S. 22 – 43
- 4 Mit Feynmans Worten: „I wouldn't give a damn – I know I didn't care – to find out what way you had to do it, because it seemed to me, if I did it, I did it.“, *Charles Weiner*, Interview with Richard Feynman, 4. März 1966, S. 27, www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/5020-1; zum pragmatischen Denkstil der US-Physik siehe insbesondere: *Ch. Forstner*, Quantenmechanik im Kalten Krieg. David Bohm und Richard Feynman, GNT-Verlag (2007), S. 59–76 sowie *Silvan S. Schweber*, The Empiricist Temper Regnant. Theoretical Physics in the United States 1920–1950, Historical Studies in the Physical and Biological Sciences 17, S. 55 – 98 (1986), für die Nachkriegszeit: *Silvan S. Schweber* (1989), op. cit., S. 668 – 693
- 5 *John C. Slater und Nathaniel H. Frank*, Introduction to Theoretical Physics, McGraw-Hill, New York (1933); <https://archive.org/details/IntroductionToTheoreticalPhysics>
- 6 *Linus Pauling und E. Bright Wilson*, Introduction to Quantum Mechanics. With Applications to Chemistry, McGraw-Hill, New York (1935)
- 7 *Richard P. Feynman*, Forces and Stresses in Molecules, Abschlussarbeit zur Erlangung des B.Sc., unveröffentlicht (1939), MIT Archives
- 8 Vgl. *Christian Forstner* (2007), op. cit.: S. 155 – 159
- 9 Idem, S. 159 – 168
- 10 *Charles Weiner*, Interview with Richard Feynman, 5. März 1966, S. 155, www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/5020-2
- 11 *Richard P. Feynman*, The Development of the Space-Time View of Quantum Electrodynamics, in: Nobel Lectures. Physics, 1963–1970, Elsevier, Amsterdam (1972), S. 166 f., www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1965/feynman-lecture.html
- 12 *Charles Weiner*, Interview with Richard Feynman, 5. März 1966, S. 155, sowie *Richard P. Feynman* (1972), op. cit., S. 166 f. Vgl. die unkritische Übernahme dieser Erzählung bei *Jagdish Mehra* (1996), op. cit., S. 137
- 13 Ebenso stellte Feynman stilgemäß die experimentelle Testbarkeit der Theorie als ein wesentliches Kriterium für ihre Richtigkeit heraus: „The final test of any physical theory lies, of course, in experiment. No comparison has been made in this paper. The author hopes to apply these methods to quantum electrodynamics. It is only out of some such direct application that an experimental comparison can be made.“, in: *Richard P. Feynman*, The Principle of Least Action in Quantum Mechanics, Dissertation, Princeton University (1967)
- 14 Zum Arbeitsstil Feynmans in Los Alamos siehe: *Peter Galison*, Feynman's War. Modelling Weapons, Modelling Nature, Studies in the History and Philosophy of Modern Physics 29, S. 391 – 434 (1998), vgl. auch *Gleick* (1993), op. cit., S. 227 – 300 und insbesondere *Schweber* (1994), op. cit., S. 397 – 405
- 15 FBI-File Richard Feynman, erhalten unter dem Freedom of Information Act, Memorandum [1946, nicht datiert], <https://archive.org/details/Richard-FeynmanFBI>; siehe auch: *Charles Weiner*, Interview with Richard Feynman, 27. Juni 1966, S. 68 f., www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/5020-3
- 16 *Richard P. Feynman*, „Surely you're Joking, Mr. Feynman!“ Adventures of a Curious Character, Norton, New York (1997), S. 174
- 17 *Richard P. Feynman*, Space-Time Approach to Non-Relativistic Quantum Mechanics, Reviews of Modern Physics 20, S. 367 – 387 (1984)
- 18 Vgl. *Gleick* (1993), op. cit., S. 334 – 339 zu Shelter Island und *Mehra* (1993), op. cit., S. 183 zum Entstehen des Artikels, ebenso *Schweber* (1994), op. cit., S. 409 – 413 zu Shelter Island und zum Artikel. Hans Bethe unterstützte ihn bei der Berechnung des Lamb-Shifts. Als sein Mentor regte ihn Bethe zu Publikationen an und half ihm bei der Übersetzung der Ergebnisse in die Sprache der Gemeinschaft, wie Feynman sich später erinnerte: „So I made the corrections. I tried to translate it back in the language that other people use. And then I went in, the next day. He [Bethe] showed me how to calculate the self-energy of an electron, and I showed him what the correction ought to be. I tried to translate my principles into the other language that he was explaining this thing in.“, *Charles Weiner*, Interview with Richard Feynman, 27. Juni 1966, S. 29, www.aip.org/history-programs/niels-bohr-library/oral-histories/5020-3
- 19 *Helge Kragh*, Quantum Generations. A History of Physics in the Twentieth Century, Princeton University Press, Princeton (1999), S. 332 – 336
- 20 *Julian Schwinger*, Renormalization Theory of Quantum Electrodynamics, in: *Laurie Brown und Lilian Hoddeson* (Hrsg.), The Birth of Particle Physics. Cambridge (1983), S. 329 – 353, hier: S. 343
- 21 Zum Pfadintegral und dessen Bedeutung als physikalischer Methode siehe insbesondere: *David Kaiser*, Drawing Theories Apart. The Dispersion of Feynman Diagrams in Post-War Physics, University of Chicago Press, Chicago (2005). Robert F. Christy, ein Kollege Feynmans, stellte die Nützlichkeit von Feynmans Weg bereits nach dem Erhalt eines Vorabdrucks fest: „I want to thank you for forwarding prepublication copies of your papers on electrodynamics. I have found them very interesting and have tried applying your methods not yet (except in an exploratory way) in new problems. I also gave a series of three or four seminars on them. They certainly are wonderful in making calculations easier.“, Brief von *Robert F. Christy* an *Richard Feynman*, 12. September 1949, Richard P. Feynman Papers, Caltech. Manuscripts Collection, Folder 1.20
- 22 *Richard P. Feynman*, The Character of Physical Law, Penguin Books, London (1992)
- 23 *Richard P. Feynman*, QED. The Strange Theory of Light and Matter, Princeton University Press, Princeton (1985)
- 24 *Richard P. Feynman, Robert B. Leighton und Matthew L. Sands*, The Feynman Lectures on Physics, 3 Bände, Addison-Wesley, Redwood City, CA (1989)