Stringtheorie: die Suche nach der Weltformel

STRINGS, DIMENSIONEN, WELTFORMEL

Am 24. Februar 1958 sprach Werner Heisenberg um 17 Uhr im Physikalischen Kolloquium der Universität Göttingen über eine Gleichung, aus der sich die ganze Teilchenphysik ableiten lassen sollte. Ein Journalist im Publikum taufte sie „Weltformel“, und das Wort machte sofort Karriere. Die Deutsche Presse-Agentur verbreitete die Nachricht, die Frankfurter Allgemeine brachte sie auf die Titelseite, und der Spiegel sprach von einer wissenschaftlichen Sensation vom Range des ersten Sputnik-Starts [1].

Wolfgang Pauli, mit dem Heisenberg die Theorie entwickelt hatte, rückte in den folgenden Monaten davon ab. Er schickte Heisenberg eine Postkarte mit einem hingekritzelten Rechteck und dem Kommentar, er könne malen wie Tizian, es fehlten nur noch ein paar technische Details [1]. Die Fachwelt kam zu dem Schluss, dass die Theorie mathematisch zweifelhaft war und die Vielfalt der Teilchen nicht erklären konnte [2]. Die Weltformel verschwand, der Wunsch nach ihr nicht. Ihr bekanntester Kandidat heute ist die Stringtheorie.

Warum Physiker eine Weltformel suchen

Die Physik ruht heute auf zwei Säulen, die beide hervorragend funktionieren. Die Quantenphysik beschreibt Teilchen und drei der vier Grundkräfte, im Standardmodell der Teilchenphysik zusammengefasst. Die allgemeine Relativitätstheorie beschreibt die Schwerkraft als Krümmung von Raum und Zeit. Wo beide zugleich wichtig werden, im Inneren schwarzer Löcher oder beim Urknall, widersprechen sie sich. Warum das so ist und welche Wege es aus diesem Widerspruch gibt, erklärt der Artikel über die Quantengravitation.

Schon Albert Einstein hat Jahrzehnte damit verbracht, Schwerkraft und Elektromagnetismus in einer einzigen Feldtheorie zu vereinen. Seine erhaltenen Arbeitsblätter dazu reichen bis in die Zeit vor seinem Tod 1955 [3]. Mehr dazu im Artikel Albert Einstein und die Quanten. Unter Weltformel versteht man heute eine Theorie, die alle vier Kräfte und alle Teilchen aus einem gemeinsamen Prinzip erklärt und zugleich Quantentheorie und Schwerkraft verträgt.

Was ist die Stringtheorie?

Die Grundidee ist schnell erzählt. In der gewohnten Physik sind Elementarteilchen Punkte ohne Ausdehnung. In der Stringtheorie sind sie winzige schwingende Fäden, englisch strings. Wie eine Gitarrensaite je nach Schwingung verschiedene Töne erzeugt, soll ein String je nach Schwingungszustand als Elektron, als Quark, als Photon oder als Graviton erscheinen, das hypothetische Teilchen der Schwerkraft. Die Strings wären so klein, dass sie mit keinem Mikroskop und keinem Beschleuniger direkt zu sehen sind, in der Größenordnung der Planck-Länge von etwa 10^{-35} Metern [4]. Diese Länge ergibt sich aus dem Planckschen Wirkungsquantum, der Lichtgeschwindigkeit und der Gravitationskonstante.

Entstanden ist die Theorie aus einem ganz anderen Problem. 1968 fand der italienische Physiker Gabriele Veneziano eine Formel, die Streuvorgänge zwischen Teilchen der starken Kernkraft erstaunlich gut beschrieb [5]. Bald zeigte sich, dass hinter dieser Formel schwingende Fäden stecken [4]. Als Theorie der Kernkraft scheiterte das Modell allerdings, die Quantenchromodynamik mit ihren Quarks und Gluonen war besser. Störend war vor allem ein masseloses Teilchen mit Spin 2, das in den Rechnungen immer wieder auftauchte und zu keinem bekannten Kernteilchen passte [4].

1974 drehten Tamiaki Yoneya in Japan sowie Joël Scherk und John Schwarz in Kalifornien den Spieß um. Genau so ein Teilchen braucht man für die Schwerkraft. Das störende Teilchen war das Graviton, und die Stringtheorie enthielt die allgemeine Relativitätstheorie als Grenzfall [6],[7]. Damit die Schwerkraft die richtige Stärke bekommt, mussten die Strings allerdings um rund 20 Zehnerpotenzen schrumpfen, von der Größe eines Protons auf die Planck-Länge. Die Mathematik blieb dabei fast unverändert [4]. Aus einer gescheiterten Theorie der Kernkraft war ein Kandidat für die Quantengravitation geworden.

Zehn Dimensionen und mehr

Der Preis dafür ist hoch. Die Stringtheorie ist nur in einer ganz bestimmten Zahl von Dimensionen mathematisch widerspruchsfrei. In ihrer ersten Form, die nur Kraftteilchen kennt, braucht sie 26 Dimensionen. Die Superstringtheorie, die auch Materieteilchen enthält und eine zusätzliche Symmetrie namens Supersymmetrie voraussetzt, kommt mit zehn aus [4]. Unsere Welt hat aber nur drei Raumdimensionen und eine Zeit. Die übrigen sechs müssen so winzig aufgerollt sein, dass wir sie nicht bemerken.

Theorie	Dimensionen der Raumzeit	Bemerkung
Unsere Erfahrung, Relativitätstheorie	4	drei Raumdimensionen und die Zeit
Bosonische Stringtheorie	26 [4]	ohne Materieteilchen
Superstringtheorie	10 [4],[8]	fünf verschiedene Varianten
M-Theorie	11 [9],[10]	verbindet die fünf Varianten

Wie viele Dimensionen die verschiedenen Theorien brauchen.

Lange galt die Theorie trotzdem als Außenseiterthema [4]. Das änderte sich 1984, als Michael Green und John Schwarz zeigten, dass bestimmte mathematische Widersprüche, sogenannte Anomalien, in der zehndimensionalen Superstringtheorie wie durch ein Wunder verschwinden [8]. Danach gab es fünf verschiedene Superstringtheorien, und es war unklar, welche davon die richtige sein sollte. 1995 argumentierte Edward Witten, dass die fünf eng zusammenhängen und Grenzfälle einer umfassenderen Theorie in elf Dimensionen sein könnten [9]. Kurz darauf nannte er sie mit Petr Hořava M-Theorie [10].

Was die Stringtheorie erreicht hat

Ganz ohne Ergebnisse ist die Theorie nicht geblieben, nur liegen sie woanders, als man erwartet hatte. 1996 gelang es Andrew Strominger und Cumrun Vafa, für eine bestimmte Art schwarzer Löcher die Entropie aus dem Abzählen von Quantenzuständen herzuleiten, und zwar genau mit der Formel, die Jacob Bekenstein und Stephen Hawking zwei Jahrzehnte vorher auf ganz anderem Weg gefunden hatten [11]. Über die Rätsel schwarzer Löcher berichtet der Artikel über Schwarze Löcher.

Noch folgenreicher war eine Vermutung, die Juan Maldacena Ende 1997 aufstellte. Danach ist eine Stringtheorie mit Schwerkraft in einem bestimmten gekrümmten Raum gleichwertig zu einer gewöhnlichen Quantenfeldtheorie ohne Schwerkraft auf dessen Rand [12]. Maldacenas Arbeit wurde nach Semantic Scholar mehr als 20 000-mal zitiert [12]. Mit der Wirklichkeit unseres Universums hat sie allerdings nur indirekt zu tun, denn der dort betrachtete Raum hat eine andere Krümmung als unserer.

Das Problem mit der Überprüfbarkeit

Wie die sechs zusätzlichen Dimensionen aufgerollt sind, bestimmt, welche Teilchen und Kräfte in unserer Welt herauskommen. Es gibt aber unvorstellbar viele Möglichkeiten. 2003 zeigten Shamit Kachru, Renata Kallosh, Andrei Linde und Sandip Trivedi, wie sich in der Stringtheorie Lösungen mit einer kleinen positiven Energie des leeren Raums konstruieren lassen, wie sie unser Universum zu haben scheint [13]. Leonard Susskind zog im selben Jahr die Konsequenz, dass es eine riesige

Landschaft solcher Lösungen geben dürfte [14]. Wenn aber fast alles möglich ist, sagt die Theorie wenig voraus.

Hinzu kommt, dass die Experimente bisher schweigen. Viele Physiker hatten erwartet, dass der Large Hadron Collider am CERN Partnerteilchen aus der Supersymmetrie findet, die die Superstringtheorie voraussetzt. Gefunden wurde keines. In einfachen Modellen sind etwa die sogenannten Gluinos bis zu Massen von rund 2,3 Teraelektronenvolt ausgeschlossen [15]. Die Stringtheorie selbst ist damit nicht widerlegt, denn sie legt nicht fest, bei welcher Energie die Supersymmetrie sichtbar wird. Bestätigt ist sie aber auch nicht.

Die Physikerin Sabine Hossenfelder hat diese Lage 2018 in ihrem Buch „Das hässliche Universum“ scharf kritisiert. Ihr Vorwurf: Die theoretische Physik verlasse sich auf Schönheit und Eleganz als Wegweiser zur Wahrheit und sei damit in eine Sackgasse geraten, weil Ideen wie die Supersymmetrie nicht durch Beobachtungen bestätigt würden [16]. Auch in der Szene selbst ist man vorsichtiger geworden. Auf der großen Fachkonferenz Strings 2026 in Shanghai verglich der Organisator Hirosi Ooguri den Stand des Gebiets mit einer Bewerbung um eine Dauerprofessur und kam zu dem Ergebnis, dass die Stringtheorie diese noch nicht verdient habe [17].

Gibt es eine Weltformel?

Ob es eine Weltformel gibt, weiß niemand. Die Stringtheorie ist bis heute der am weitesten ausgearbeitete Kandidat, aber sie ist keine fertige Theorie mit eindeutigen Vorhersagen, sondern eher ein ganzes Gebäude von Rechenmethoden und Vermutungen. Die Schleifen-Quantengravitation und andere Ansätze verfolgen bescheidenere Ziele und wollen zunächst nur die Schwerkraft quantisieren. Einen experimentellen Beleg hat keiner von ihnen.

Neue Hoffnung setzen manche auf indirekte Spuren. Eine Gruppe am King’s College London hat 2026 mit Methoden der künstlichen Intelligenz Millionen von Stringmodellen daraufhin geprüft, welche zu zwei möglichen Massen eines hypothetischen Teilchens namens Axion passen. Wird ein solches Axion eines Tages gefunden, könnte man damit einen Teil der Modelle ausschließen. Das ist eine Pressemitteilung der Universität, und die Methode setzt eine Entdeckung voraus, die es noch nicht gibt [18].

Heisenbergs Weltformel überzeugte schon nach wenigen Monaten kaum noch jemanden, die Stringtheorie hat inzwischen mehr als fünfzig Jahre auf dem Buckel. Paulis Rechteck ist größer und viel kunstvoller geworden. Das Bild darin fehlt noch.

Quellen

1. C. Schrader: *Wissenschaftsgeschichte: Heisenbergs Weltformel.* Spektrum der Wissenschaft, 21. Februar 2018, spektrum.de.
2. Max-Planck-Institut für Wissenschaftsgeschichte: A. Blum, *Heisenberg's 1958 Weltformel and the Roots of Post-Empirical Physics.* SpringerBriefs in History of Science and Technology, Springer 2019, mpiwg-berlin.mpg.de.
3. T. Sauer: *Einstein's Working Sheets and His Search for a Unified Field Theory.* Preprint 2019, arXiv:1906.06106.
4. J. H. Schwarz: *The Early History of String Theory and Supersymmetry.* Vortrag, 2012, arXiv:1201.0981.
5. G. Veneziano: *Construction of a crossing-symmetric, Regge-behaved amplitude for linearly rising trajectories.* In: Il Nuovo Cimento A 57 (1968), S. 190–197, doi:10.1007/BF02824451.
6. T. Yoneya: *Connection of Dual Models to Electrodynamics and Gravidynamics.* In: Progress of Theoretical Physics 51 (1974), S. 1907–1920, doi:10.1143/PTP.51.1907.
7. J. Scherk, J. H. Schwarz: *Dual models for non-hadrons.* In: Nuclear Physics B 81 (1974), S. 118–144, doi:10.1016/0550-3213(74)90010-8.
8. M. B. Green, J. H. Schwarz: *Anomaly cancellations in supersymmetric D = 10 gauge theory and superstring theory.* In: Physics Letters B 149 (1984), S. 117–122, doi:10.1016/0370-2693(84)91565-X.
9. E. Witten: *String theory dynamics in various dimensions.* In: Nuclear Physics B 443 (1995), S. 85–126, doi:10.1016/0550-3213(95)00158-O.
10. P. Hořava, E. Witten: *Heterotic and Type I string dynamics from eleven dimensions.* In: Nuclear Physics B 460 (1996), S. 506–524, doi:10.1016/0550-3213(95)00621-4.
11. A. Strominger, C. Vafa: *Microscopic origin of the Bekenstein-Hawking entropy.* In: Physics Letters B 379 (1996), S. 99–104, doi:10.1016/0370-2693(96)00345-0.
12. J. Maldacena: *The large N limit of superconformal field theories and supergravity.* In: Advances in Theoretical and Mathematical Physics 2 (1998), S. 231–252, doi:10.4310/ATMP.1998.v2.n2.a1; Zitationszahl nach Semantic Scholar (abgerufen am 28. Oktober 2026).
13. S. Kachru, R. Kallosh, A. Linde, S. P. Trivedi: *De Sitter vacua in string theory.* In: Physical Review D 68 (2003), 046005, doi:10.1103/PhysRevD.68.046005.
14. L. Susskind: *The Anthropic Landscape of String Theory.* Preprint 2003, arXiv:hep-th/0302219.
15. M. D'Onofrio, F. Moortgat: *Supersymmetry, Part II (Experiment).* In: Particle Data Group, Review of Particle Physics, überarbeitet August 2025, pdg.lbl.gov.
16. S. Hossenfelder: *Das hässliche Universum. Warum unsere Suche nach Schönheit die Physik in die Sackgasse führt.* S. Fischer, Frankfurt am Main 2018, ISBN 978-3-10-397246-7; Verlagsangaben und Besprechungen bei perlentaucher.de.
17. H. Ooguri: *Concluding Remarks, Strings 2026.* Shanghai 2026, ooguri.caltech.edu.
18. King's College London: *String theory finally testable with power of AI.* Pressemitteilung vom 5. August 2026, kcl.ac.uk.

Zitiervorschlag

quanten.de: *Stringtheorie: die Suche nach der Weltformel.* Stand: November 2026. URL: https://quanten.de/stringtheorie.html

Texte und Abbildungen © 2026 quanten.de. Nutzung mit Quellenangabe und Link gern, kommerzielle Nutzung nach Absprache: info@quanten.de

Weiterlesen: Quantengravitation · Relativitätstheorie · Schwarze Löcher · Quantenfeldtheorie