Das Proton: drei Quarks, ein Rätsel und der Kern jedes Atoms

MASSE, LADUNG, AUFBAU AUS QUARKS

Ab 1917 zählte Ernest Rutherford in Manchester Lichtblitze. Er schoss Alphateilchen aus einem radioaktiven Präparat durch verschiedene Gase und beobachtete die winzigen Blitze, die geladene Teilchen auf einem Leuchtschirm aus Zinksulfid auslösen. Manche Blitze tauchten noch in einer Entfernung auf, die die Alphateilchen selbst gar nicht erreichen konnten. Sie stammten von Wasserstoffkernen, die weiter fliegen. Ihre Zahl stieg, sobald Luft oder Stickstoff im Spiel war[1]. 1919 schrieb er, man müsse folgern, dass das Stickstoffatom zerfallen sei, und dass der herausgeschlagene Wasserstoffkern ein Bestandteil des Stickstoffkerns gewesen war[2],[1]. Ein Jahr später gab er diesem Baustein einen Namen: Proton[1].

Protonen stecken in jedem Atomkern. Ihre Zahl entscheidet, um welches Element es sich handelt: Wasserstoff hat ein Proton, Kohlenstoff sechs, Uran 92. Lange galten Protonen als unteilbar. Heute weiß man, dass sie aus Quarks bestehen, und gerade dieses Innenleben gibt der Physik Rätsel auf. Um ihre Masse, ihren Spin und sogar ihre Größe wurde jahrelang gestritten.

Was ist ein Proton?

Ein Proton ist positiv geladen, und zwar mit genau einer Elementarladung, dem Gegenstück zur Ladung des Elektrons. Es ist 1836-mal so schwer wie ein Elektron[3]. In einem Wasserstoffatom liegt damit fast die gesamte Masse im Kern, obwohl dieser winzig ist: Der Bohrsche Radius, der typische Abstand des Elektrons, ist rund 63 000-mal so groß wie der Radius des Protons (eigene Rechnung mit Werten aus [3]). Wäre das Proton eine Murmel von einem Zentimeter Radius, hielte sich das Elektron über 600 Meter entfernt auf. Im Kern sitzt das Proton zusammen mit Neutronen, die fast genauso schwer, aber ungeladen sind. Die wichtigsten Eigenschaften:

Eigenschaft	Wert	Anmerkung
Ladung	$+1\,e = 1{,}602\,176\,634 \cdot 10^{-19}$ C [3]	seit 2019 exakt festgelegt
Masse	$1{,}672\,621\,926 \cdot 10^{-27}$ kg [3]	entspricht 938,272 MeV/c^2
Masse im Vergleich	1836,15 Elektronenmassen [3]	Neutron etwas schwerer
Ladungsradius	$0{,}8408 \cdot 10^{-15}$ m [3]	lange umstritten, siehe unten
Spin	½	wie Elektron und Neutron
Bestandteile	zwei up-Quarks, ein down-Quark [4]	Ladungen +⅔, +⅔ und −⅓
Lebensdauer	mehr als $2{,}4 \cdot 10^{34}$ Jahre [5]	Untergrenze für einen Zerfallsweg

Eigenschaften des Protons. Masse und Radius: empfohlene CODATA-Werte von 2022, gerundet.

Drei Quarks und noch viel mehr

1964 schlug Murray Gell-Mann vor, dass Protonen, Neutronen und ihre Verwandten aus noch kleineren Teilchen zusammengesetzt sind. Er nannte sie Quarks und schrieb ihnen drittelzahlige Ladungen zu [6]. Viele hielten das zunächst für einen Rechentrick. Den Nachweis brachten Experimente am Stanford Linear Accelerator Center in Kalifornien. Ende der 1960er-Jahre schossen Physiker dort Elektronen mit hoher Energie auf Protonen und fanden, dass die Elektronen viel häufiger unter großen Winkeln abprallten, als es für ein gleichmäßig gefülltes Teilchen zu erwarten war [7]. Es war eine Wiederholung von Rutherfords berühmtem Streuversuch eine Ebene tiefer. Jerome Friedman, Henry Kendall und Richard Taylor erhielten dafür 1990 den Nobelpreis [8].

Zwei up-Quarks mit je +⅔ und ein down-Quark mit −⅓ Elementarladung ergeben zusammen genau +1 [4]. Doch das Bild von drei Kügelchen in einer Tüte ist zu einfach. Die Quarks werden von Gluonen zusammengehalten, den Austauschteilchen der starken Kraft, und im Inneren des Protons entstehen und vergehen ständig weitere Quark-Antiquark-Paare. Wie man solche Teilchen als Anregungen von Feldern beschreibt, erklärt der Artikel über die Quantenfeldtheorie.

Woher das Proton seine Masse hat

Hier wird es erstaunlich. Ein up-Quark hat eine Masse von etwa 2,2 MeV/c^2, ein down-Quark von 4,7 MeV/c^2 [4]. Zusammen bringen die drei Quarks also rund 9 MeV/c^2 auf die Waage, das Proton aber 938 [3]. Die Quarkmassen machen nur etwa ein Prozent der Protonenmasse aus (eigene Rechnung). Der Rest ist Energie: die Bewegungsenergie der eingesperrten Quarks und die Energie der Gluonfelder zwischen ihnen. Nach Einsteins $E = mc^2$ wiegt diese Energie etwas, und zwar fast das ganze Proton. Mehr dazu im Artikel über die Relativitätstheorie.

Nachrechnen lässt sich das nur mit sehr großen Computern. Die Theorie der starken Kraft, die Quantenchromodynamik, wird dafür auf ein Gitter aus Raum- und Zeitpunkten gelegt. 2008 gelang

einer Gruppe um Stephan Dürr und Zoltán Fodor von der Universität Wuppertal und dem Forschungszentrum Jülich auf diesem Weg eine vollständige Berechnung der Masse von Proton, Neutron und anderen leichten Teilchen. Die Ergebnisse stimmten mit den Messungen überein [9]. Eine spätere Rechnung zerlegte die Protonenmasse sogar in Anteile. Danach steuern die Energie der Quarks rund 32 Prozent und die Energie des Gluonfelds rund 36 Prozent bei, der Rest verteilt sich auf zwei feinere Quanteneffekte [10].

Das Higgs-Feld, von dem oft gesagt wird, es verleihe den Teilchen ihre Masse, ist also nur für dieses eine Prozent zuständig: Es bestimmt die Masse der Quarks selbst. Für die Masse von Stühlen, Bergen und Menschen, die fast ganz aus Protonen und Neutronen besteht, ist vor allem die starke Kraft verantwortlich. Mehr dazu im Artikel über das Higgs-Boson.

Das Rätsel um den Spin

Der Spin des Protons ist ½, und lange nahm man an, dass er sich einfach aus den Spins der drei Quarks zusammensetzt. 1988 veröffentlichte die European Muon Collaboration am CERN eine Messung, die dem widersprach: Die Quarkspins trugen nur einen kleinen Teil dazu bei [11],[12]. Physiker sprachen von der Spinkrise. Am Elektronen-Protonen-Speicherring HERA des DESY in Hamburg ging das Experiment HERMES ab 1995 der Frage nach, welche Quarks welchen Anteil liefern und welche Rolle die Gluonen spielen [12]. Nach heutigem Stand stammt etwa ein Drittel des Protonenspins von den Spins der Quarks [13]. Der Rest muss aus dem Spin der Gluonen und aus der Bahnbewegung von Quarks und Gluonen kommen. Wie genau er sich aufteilt, ist noch offen.

Wie groß ist ein Proton?

Bis 2010 schien auch diese Frage geklärt. Messungen an gewöhnlichem Wasserstoff und Streuexperimente mit Elektronen ergaben einen Radius von 0,8768 Femtometern, also Billiardstel Metern [14]. Dann maß ein internationales Team unter Leitung von Randolf Pohl vom Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching den Radius auf eine neue Art. Am Paul Scherrer Institut in der Schweiz erzeugten die Forscher myonischen Wasserstoff, bei dem ein Myon die Stelle des Elektrons einnimmt. Das Myon ist rund 200-mal so schwer und kommt dem Proton dadurch viel näher, sodass die Größe des Protons die Energieniveaus des Atoms viel stärker verschiebt. Mit einem Laser bestimmten die Forscher diese Verschiebung [14],[15].

Das Ergebnis, 0,8418 Femtometer, war rund vier Prozent kleiner als der alte Wert und lag weit außerhalb von dessen Fehlergrenzen [14]. Entweder steckte in den Messungen ein Fehler, oder Myonen verhalten sich anders als Elektronen, was eine neue Physik bedeutet hätte. Pohl vermutete damals einen Fehler in einer der Rechnungen [14]. Die Auflösung kam in den folgenden Jahren von den Experimenten mit Elektronen. 2019 ergaben neue Messungen an gewöhnlichem Wasserstoff an

der York University in Toronto [16] und ein Streuexperiment am Jefferson Lab in den USA [17] ebenfalls einen kleinen Radius. Der heute empfohlene Wert von 0,8408 Femtometern liegt nahe an der Messung mit Myonen (Abb. 1) [3]. Warum die älteren Messungen zu große Werte lieferten, ist noch nicht in allen Einzelheiten geklärt.

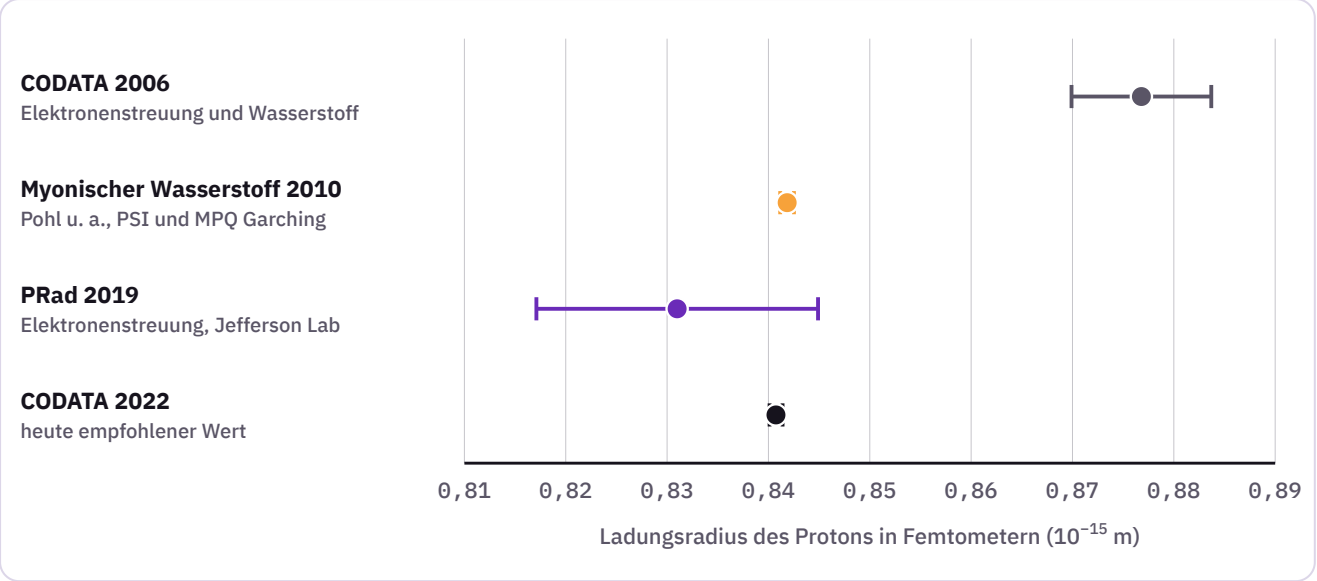


Abb. 1: Der Protonenradius nach verschiedenen Messungen, mit Unsicherheiten. Beim PRad-Wert sind statistische und systematische Unsicherheit zusammengefasst (eigene Rechnung). Eigene Darstellung nach [14],[15],[17],[3].

Ist das Proton unsterblich?

Beim Proton hat noch niemand einen Zerfall gesehen. Manche Theorien, die die Naturkräfte vereinheitlichen wollen, sagen trotzdem voraus, dass auch Protonen irgendwann zerfallen, etwa in ein Positron und ein neutrales Pion. Danach sucht seit 1996 der japanische Detektor Super-Kamiokande, ein unterirdischer Tank voller Wasser, in dem jeder Zerfall einen charakteristischen Lichtblitz erzeugen würde. In mehr als 20 Jahren fand er keinen einzigen. Daraus folgt für diesen Zerfallsweg eine Lebensdauer von mehr als $2{,}4 \cdot 10^{34}$ Jahren [5].

Das Universum ist knapp 14 Milliarden Jahre alt [18]. Ein Proton lebt also mindestens eine Billion Billionen Mal so lange, wie es das Universum gibt (eigene Rechnung). Dass man überhaupt so lange Lebensdauern messen kann, liegt an der Menge: Im ausgewerteten Volumen von Super-Kamiokande, 27 200 Tonnen Wasser [5], stecken rund $9 \cdot 10^{33}$ Protonen. Selbst bei der Untergrenze der Lebensdauer wäre in diesem Zerfallsweg nicht einmal ein Zerfall pro Jahr zu erwarten (eigene Rechnungen).

Auch das Gegenstück des Protons wird mit großem Aufwand vermessen. Das Experiment BASE am CERN, an dem unter anderem die Physikalisch-Technische Bundesanstalt, die Universitäten Hannover und Mainz und das Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg beteiligt sind, hat

2022 gezeigt, dass Proton und Antiproton bis auf 16 Billionstel dasselbe Verhältnis von Ladung zu Masse haben [19]. Mehr dazu im Artikel über Antimaterie.

Protonen als Werkzeug

Weil Protonen geladen sind, lassen sie sich mit elektrischen Feldern beschleunigen und mit Magneten lenken. Im Large Hadron Collider am CERN erreichen sie seit 2022 eine Energie von 6,8 Teraelektronenvolt pro Strahl [20] und sind dann nur noch etwa ein Hundertmillionstel langsamer als das Licht (eigene Rechnung). In der Sonne verschmelzen Protonen zu Helium und liefern so die Energie, von der das Leben auf der Erde abhängt. Wie das trotz der gegenseitigen Abstoßung gelingt, erklärt der Artikel über die Kernfusion.

In der Medizin werden Protonen gegen Krebs eingesetzt. Röntgenstrahlung wirkt in wenigen Zentimetern Tiefe am stärksten und wird dann schwächer. Protonen und schwerere Ionen dagegen geben den größten Teil ihrer Energie erst am Ende ihres Weges ab, kurz bevor sie stehen bleiben. Diesen Bereich nennt man Bragg-Peak. Über die Energie lässt sich steuern, in welcher Tiefe er liegt, sodass die höchste Dosis im Tumor ankommt und das Gewebe dahinter kaum belastet wird [21]. Am Heidelberger Ionenstrahl-Therapiezentrum, das 2009 den ersten Patienten behandelte, werden die Teilchen auf bis zu drei Viertel der Lichtgeschwindigkeit gebracht und dringen bis zu 30 Zentimeter tief ein. Die drehbare Strahlführung dort wiegt 670 Tonnen [21].

Nach Angaben der Deutschen Gesellschaft für Radioonkologie gab es 2023 in Deutschland Protonentherapie für Patienten in Dresden, Essen, Heidelberg und Marburg, dazu eine Anlage für Augentumoren in Berlin, weltweit mehr als 120 Zentren [22], und bis Ende 2023 wurden insgesamt fast 350 000 Menschen mit Protonen bestrahlt [23]. Die Behandlung ist deutlich teurer als eine herkömmliche Bestrahlung. Für Kinder und für Tumoren in der Nähe empfindlicher Organe ist sie etabliert, bei vielen anderen Krebsarten soll in Studien geprüft werden, ob sie Vorteile bringt [22].

Rutherford hat sein Proton aus einem Stickstoffkern geschlagen und für einen einfachen Baustein gehalten. Gut hundert Jahre später kann man seine Masse aus der Theorie berechnen, hat seinen Spin noch nicht ganz verstanden und seine Größe erst vor wenigen Jahren richtig gemessen.

Quellen

1. CERN Courier: *Rutherford, transmutation and the proton.* cerncourier.com.
2. E. Rutherford: *Collision of α particles with light atoms. IV. An anomalous effect in nitrogen.* In: Philosophical Magazine 37 (1919), S. 581–587, doi:10.1080/14786440608635919.
3. P. J. Mohr, D. B. Newell, B. N. Taylor, E. Tiesinga: *CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 2022.* In: Reviews of Modern Physics 97 (2025), 025002, doi:10.1103/RevModPhys.97.025002; Werte abgerufen über physics.nist.gov/cuu/Constants.

4. Particle Data Group, S. Navas u. a.: *Review of Particle Physics*, Ausgabe 2025, Summary Table Quarks, pdg.lbl.gov.
5. A. Takenaka u. a. (Super-Kamiokande Collaboration): *Search for proton decay via $p \to e^+\pi^0$ and $p \to \mu^+\pi^0$ with an enlarged fiducial volume in Super-Kamiokande I–IV.* In: Physical Review D 102 (2020), 112011, doi:10.1103/PhysRevD.102.112011.
6. M. Gell-Mann: *A schematic model of baryons and mesons.* In: Physics Letters 8 (1964), S. 214–215, doi:10.1016/S0031-9163(64)92001-3.
7. E. D. Bloom, D. H. Coward, H. DeStaebler u. a.: *High-Energy Inelastic e–p Scattering at 6° and 10°.* In: Physical Review Letters 23 (1969), S. 930–934, doi:10.1103/PhysRevLett.23.930.
8. Nobel Prize Outreach: *The Nobel Prize in Physics 1990.* nobelprize.org.
9. S. Dürr, Z. Fodor, J. Frison u. a.: *Ab Initio Determination of Light Hadron Masses.* In: Science 322 (2008), S. 1224–1227, doi:10.1126/science.1163233.
10. Y.-B. Yang, J. Liang, Y.-J. Bi u. a.: *Proton Mass Decomposition from the QCD Energy Momentum Tensor.* In: Physical Review Letters 121 (2018), 212001, doi:10.1103/PhysRevLett.121.212001.
11. J. Ashman u. a. (European Muon Collaboration): *A measurement of the spin asymmetry and determination of the structure function g_1 in deep inelastic muon-proton scattering.* In: Physics Letters B 206 (1988), S. 364–370, doi:10.1016/0370-2693(88)91523-7.
12. CERN Courier: *HERMES searches for the nucleon's missing spin.* 31. Oktober 2001, cerncourier.com.
13. C. A. Aidala, S. D. Bass, D. Hasch, G. K. Mallot: *The spin structure of the nucleon.* In: Reviews of Modern Physics 85 (2013), S. 655–691, doi:10.1103/RevModPhys.85.655.
14. Max-Planck-Gesellschaft: *Das Proton – kleiner als gedacht.* Pressemitteilung vom 8. Juli 2010, mpg.de.
15. R. Pohl, A. Antognini, F. Nez u. a.: *The size of the proton.* In: Nature 466 (2010), S. 213–216, doi:10.1038/nature09250.
16. N. Bezginov, T. Valdez, M. Horbatsch u. a.: *A measurement of the atomic hydrogen Lamb shift and the proton charge radius.* In: Science 365 (2019), S. 1007–1012, doi:10.1126/science.aau7807.
17. W. Xiong, A. Gasparian, H. Gao u. a.: *A small proton charge radius from an electron–proton scattering experiment.* In: Nature 575 (2019), S. 147–150, doi:10.1038/s41586-019-1721-2.
18. Planck Collaboration, N. Aghanim u. a.: *Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters.* In: Astronomy & Astrophysics 641 (2020), A6, doi:10.1051/0004-6361/201833910.
19. M. J. Borchert, J. A. Devlin, S. R. Erlewein u. a.: *A 16-parts-per-trillion measurement of the antiproton-to-proton charge–mass ratio.* In: Nature 601 (2022), S. 53–57, doi:10.1038/s41586-021-04203-w.
20. E. Howell: *Large Hadron Collider hits world record proton acceleration.* Space.com, 25. April 2022, space.com.
21. Universitätsklinikum Heidelberg: *Heidelberger Ionenstrahl-Therapiezentrum HIT.* Broschüre, 2012, klinikum.uni-heidelberg.de.
22. Deutsche Gesellschaft für Radioonkologie (DEGRO): *Stellungnahme zur Strahlentherapie mit Protonen in Deutschland.* Stand Juni 2023, degro.org.
23. Particle Therapy Co-Operative Group (PTCOG): *Particle therapy facilities and patient statistics.* Stand Ende 2023, ptcog.web.psi.ch.

Zitiervorschlag

quanten.de: *Das Proton: drei Quarks, ein Rätsel und der Kern jedes Atoms.*

```
Stand: November 2026. URL: https://quanten.de/proton.html
```

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

Weiterlesen: Atommodelle · Antimaterie · Higgs-Boson · Kernfusion