# Elementarteilchen: die Bausteine des Standardmodells

QUARKS, LEPTONEN, BOSONEN

Was ist das kleinste Teilchen? Lange lautete die Antwort: das Atom, schon der Name bedeutet „unteilbar“. 1897 zeigte Joseph John Thomson, dass die Kathodenstrahlen in seinen Glasröhren aus winzigen geladenen Teilchen bestehen, viel leichter als jedes Atom [1]. Das Elektron war das erste Elementarteilchen, das man fand, und es gilt noch immer als unteilbar [2].

Inzwischen kennt die Physik 17 solcher Grundbausteine, und sie passen in eine einzige Theorie, das Standardmodell der Teilchenphysik. Es wurde Anfang der 1970er-Jahre entwickelt und hat seither fast alle Experimente erklärt und viele Ergebnisse genau vorhergesagt [2]. Ein paar große Fragen beantwortet es allerdings nicht.

## Was ist ein Elementarteilchen?

Ein Elementarteilchen ist ein Teilchen, das sich nach heutigem Wissen nicht weiter zerlegen lässt. Das Proton gehört nicht dazu, es besteht aus drei Quarks, die von Gluonen zusammengehalten werden. Wie das genau aussieht, steht im Artikel über das Proton. Elektronen und Quarks dagegen gelten als punktförmig. In der Quantenphysik sind auch Elementarteilchen keine Kügelchen, sondern Anregungen von Feldern, die den ganzen Raum ausfüllen. Mehr dazu im Artikel über die Quantenfeldtheorie.

Die 17 Teilchen des Standardmodells fallen in drei Gruppen. Zwölf davon sind Materieteilchen: sechs Quarks und sechs Leptonen, jeweils in drei Paaren, den sogenannten Generationen. Vier weitere übertragen Kräfte. Dazu kommt das Higgs-Boson [2]. Die Materieteilchen sind Fermionen, die Kraftteilchen Bosonen, und was das bedeutet, erklärt der Artikel über Fermionen und Bosonen.

| Teilchen | Ladung | Masse | nachgewiesen |
|---|---|---|---|
| **Quarks** | | | |
| up (u) | +⅔ | 2,2 MeV [3] | 1964 vorhergesagt [4], ab 1968 [5] |
| down (d) | −⅓ | 4,7 MeV [3] | wie up |
| strange (s) | −⅓ | 94 MeV [3] | 1964 vorhergesagt [4] |
| charm (c) | +⅔ | 1,27 GeV [3] | 1974 [6] |
| bottom (b) | −⅓ | 4,18 GeV [3] | 1977 [7] |
| top (t) | +⅔ | 172,6 GeV [3] | 1995 [8] |
| **Leptonen** | | | |
| Elektron (e) | −1 | 0,511 MeV [9] | 1897 [1] |
| Myon (μ) | −1 | 105,7 MeV [9] | 1937 [10] |
| Tau (τ) | −1 | 1777 MeV [9] | 1975 [11] |
| Elektron-Neutrino | 0 | unter 0,45 eV [12] | 1956 [13] |
| Myon-Neutrino | 0 | sehr klein | 1962 [14] |
| Tau-Neutrino | 0 | sehr klein | 2000 [15] |
| **Bosonen** | | | |
| Photon (γ) | 0 | 0 [16] | Lichtquant 1905 [17] |
| Gluon (g) | 0 | 0 [16] | 1979 [18] |
| W-Boson | ±1 | 80,4 GeV [16] | 1983 [19] |
| Z-Boson | 0 | 91,2 GeV [16] | 1983 [19] |
| Higgs-Boson (H) | 0 | 125,2 GeV [16] | 2012 [20] |

Die 17 Elementarteilchen des Standardmodells. Massen als Ruheenergie, gerundet nach den Tabellen der Particle Data Group 2025 (1 GeV = 1000 MeV, etwa die Masse eines Protons). Ladung in Elementarladungen. Zu jedem Materieteilchen gibt es ein Antiteilchen.

# Quarks: sechs Sorten, nie allein

Murray Gell-Mann schlug die Quarks 1964 vor, um Ordnung in die Vielzahl der damals bekannten Kernteilchen zu bringen [4]. Heute kennt man sechs Sorten mit den etwas verspielten Namen up, down, strange, charm, bottom und top. Gewöhnliche Materie besteht nur aus up- und down-Quarks. Die schwereren Sorten entstehen in Teilchenbeschleunigern und in der kosmischen Strahlung und zerfallen schnell wieder [2].

Quarks tragen außer ihrer elektrischen Ladung eine zweite Eigenschaft, die Physiker Farbe nennen. Mit Farben im Alltag hat sie nichts zu tun. Quarks verbinden sich immer so, dass das Ergebnis farblos ist, und deshalb hat noch niemand ein einzelnes Quark für sich beobachtet [2]. Die Spannweite der

Massen ist enorm: Das top-Quark ist rund 340 000-mal so schwer wie ein Elektron und fast so schwer wie ein ganzes Goldatom (eigene Rechnung nach [3],[9]).

## Leptonen: Elektron, Myon, Tau und Neutrinos

Die geladenen Leptonen sind das Elektron und seine zwei schweren Verwandten. Das Myon fanden Seth Neddermeyer und Carl Anderson 1937 in der kosmischen Strahlung[10], das Tau eine Gruppe um Martin Perl 1975[11]. Beide sind instabil und zerfallen in Sekundenbruchteilen. Zu jedem gehört ein Neutrino, ein ungeladenes Teilchen, das kaum mit Materie wechselwirkt. Das erste wurde 1956 an einem Kernreaktor nachgewiesen[13], das letzte, das Tau-Neutrino, erst im Jahr 2000[15].

Neutrinos sind so leicht, dass ihre Masse bis heute nicht gemessen ist. Das Experiment KATRIN am Karlsruher Institut für Technologie wiegt sie über den Betazerfall von Tritium. Nach 259 Messtagen steht fest: Die Masse des Elektron-Antineutrinos liegt unter 0,45 Elektronenvolt[12]. Ein Elektron ist damit mindestens eine Million Mal schwerer (eigene Rechnung). Dass Neutrinos überhaupt eine Masse haben, ist schon ein Hinweis auf Physik jenseits des Standardmodells[12]. Mehr dazu im Artikel über Neutrinos.

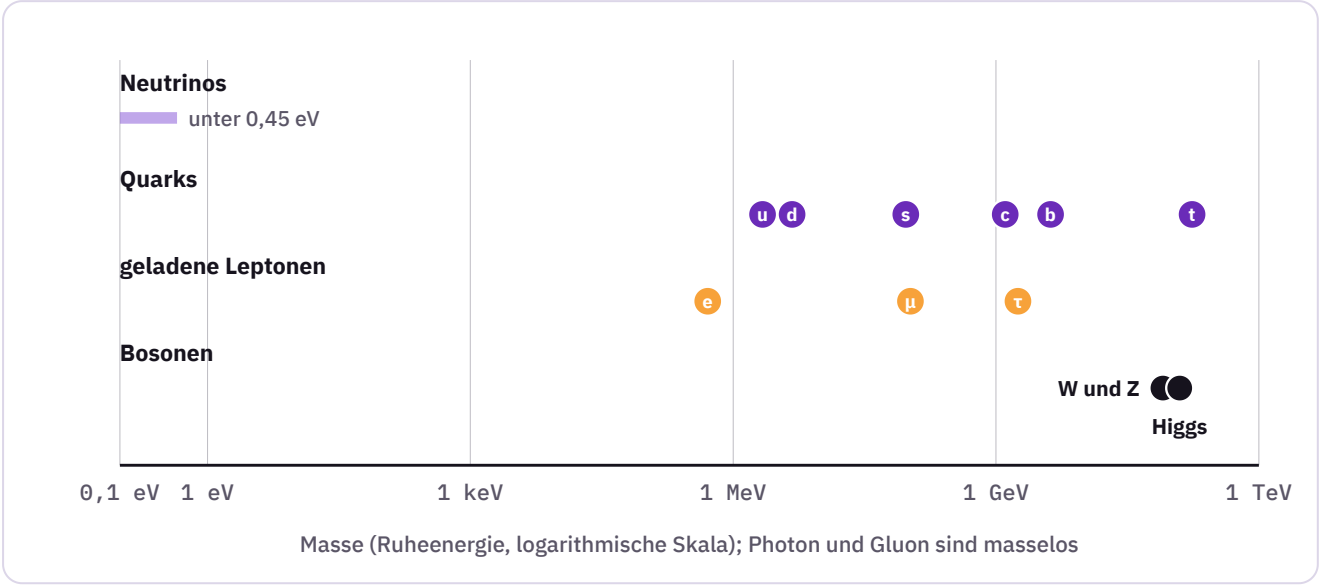



**Abb. 1:** Die Massen der Elementarteilchen umfassen mehr als zwölf Zehnerpotenzen. Jeder Teilstrich ist tausendmal so viel wie der vorige. Eigene Darstellung nach [3],[9],[16],[12].

## Die Kraftteilchen

Drei der vier Grundkräfte entstehen im Standardmodell dadurch, dass Teilchen Bosonen austauschen. Das Photon überträgt die elektromagnetische Kraft, das Gluon die starke Kraft, die

Quarks zusammenhält, und die W- und Z-Bosonen die schwache Kraft, die zum Beispiel beim Betazerfall wirkt [2]. Wie solche Zerfälle ablaufen, steht im Artikel über Radioaktivität.

Das Gluon wurde in Hamburg entdeckt. Im Juni 1979 fanden Physiker am Speicherring PETRA des Deutschen Elektronen-Synchrotrons DESY die ersten Ereignisse mit drei Teilchenbündeln, sogenannten Jets, die in einer Ebene lagen. Zwei Jets stammten von einem Quark und seinem Antiquark, der dritte von einem abgestrahlten Gluon [18],[21]. Die W- und Z-Bosonen folgten 1983 am CERN, wofür Carlo Rubbia und Simon van der Meer 1984 den Nobelpreis erhielten [19]. Als letztes Teilchen kam 2012 das Higgs-Boson dazu [20]. Warum es für die Masse der anderen Teilchen so wichtig ist, erklärt der Artikel über das Higgs-Boson.

## Warum gerade drei Generationen?

Die Materieteilchen kommen in drei Kopien vor, die sich nur durch ihre Masse unterscheiden. Alle stabile Materie besteht aus der ersten Generation: up- und down-Quarks, Elektronen und Elektron-Neutrinos [2]. Dass es nicht noch eine vierte Generation mit einem leichten Neutrino gibt, haben die Experimente am Beschleuniger LEP am CERN gezeigt. Aus 17 Millionen Zerfällen des Z-Bosons ergab sich für die Zahl der leichten Neutrinosorten der Wert 2,98 mit einer Unsicherheit von weniger als einem Hundertstel [22]. Warum es aber gerade drei Generationen gibt und warum ihre Massen so verschieden sind, kann das Standardmodell nicht sagen [2].

## Wie gut das Standardmodell ist

Wie genau das Standardmodell stimmt, zeigt das magnetische Moment des Elektrons. Eine Gruppe um Gerald Gabrielse hat es 2023 mit einer Unsicherheit von 0,13 Billionsteln gemessen, und die Vorhersage des Standardmodells bestätigt sich damit auf ein Billionstel genau [23]. Die Grundlage dieser Rechnungen ist die Quantenelektrodynamik, zu der Richard Feynman die anschaulichen Diagramme beigesteuert hat, mit denen Physiker solche Prozesse noch immer zeichnen. Mehr über ihn im Porträt Richard Feynman.

Beim schwereren Myon sah es lange nach einer Abweichung aus, die auf neue Teilchen hätte hindeuten können. 2021 legte eine Gruppe um Zoltán Fodor von der Universität Wuppertal eine Gitterrechnung vor, deren Ergebnis näher an der Messung lag [24]. Im Juni 2025 veröffentlichte das Experiment Muon g-2 am Fermilab sein Endergebnis mit einer Genauigkeit von 127 Milliardsteln [25]. Die neueste Vorhersage der Theoretiker liegt nahe daran, was die Hoffnung auf neue Physik an dieser Stelle dämpft. Ganz geklärt ist der Streit zwischen zwei Rechenmethoden aber noch nicht [26].

# Was das Standardmodell nicht erklärt

Trotz aller Erfolge ist das Standardmodell nicht das letzte Wort. Die Schwerkraft kommt darin nicht vor[2]. Ein Graviton, das Teilchen der Schwerkraft, ist vermutet, aber nicht gefunden[2]. Wie man Quantenphysik und Gravitation vereinen könnte, beschreibt der Artikel über die Stringtheorie. Das Standardmodell erklärt auch nicht, woraus die Dunkle Materie besteht, und nicht, warum nach dem Urknall Materie übrig blieb, aber kaum Antimaterie[2].

Thomson hatte 1897 ein einziges Teilchen in der Hand. Heute stehen 17 in der Tabelle, jedes durch Experimente bestätigt, das letzte erst 2012. Ob das schon alle sind, ist eine der spannendsten offenen Fragen der Physik.

# Quellen


1. J. J. Thomson: *Cathode Rays.* In: Philosophical Magazine 44 (1897), S. 293–316, doi:10.1080/14786449708621070.
2. CERN: *The Standard Model.* home.cern (abgerufen am 29. Oktober 2026).
3. Particle Data Group, S. Navas u. a.: *Review of Particle Physics*, Ausgabe 2025, Summary Table Quarks, pdg.lbl.gov.
4. 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.
5. 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.
6. J. J. Aubert, U. Becker, P. J. Biggs u. a.: *Experimental Observation of a Heavy Particle J.* In: Physical Review Letters 33 (1974), S. 1404–1406, doi:10.1103/PhysRevLett.33.1404.
7. S. W. Herb, D. C. Hom, L. M. Lederman u. a.: *Observation of a Dimuon Resonance at 9.5 GeV in 400-GeV Proton-Nucleus Collisions.* In: Physical Review Letters 39 (1977), S. 252–255, doi:10.1103/PhysRevLett.39.252.
8. F. Abe u. a. (CDF Collaboration): *Observation of Top Quark Production in $\bar{p}p$ Collisions with the Collider Detector at Fermilab.* In: Physical Review Letters 74 (1995), S. 2626–2631, doi:10.1103/PhysRevLett.74.2626.
9. Particle Data Group, S. Navas u. a.: *Review of Particle Physics*, Ausgabe 2025, Summary Table Leptons, pdg.lbl.gov.
10. S. H. Neddermeyer, C. D. Anderson: *Note on the Nature of Cosmic-Ray Particles.* In: Physical Review 51 (1937), S. 884–886, doi:10.1103/PhysRev.51.884.
11. M. L. Perl, G. S. Abrams, A. M. Boyarski u. a.: *Evidence for Anomalous Lepton Production in $e^+e^-$ Annihilation.* In: Physical Review Letters 35 (1975), S. 1489–1492, doi:10.1103/PhysRevLett.35.1489.
12. KATRIN Collaboration, M. Aker u. a.: *Direct neutrino-mass measurement based on 259 days of KATRIN data.* In: Science 388 (2025), S. 180–185, doi:10.1126/science.adq9592.
13. C. L. Cowan, F. Reines, F. B. Harrison u. a.: *Detection of the Free Neutrino: a Confirmation.* In: Science 124 (1956), S. 103–104, doi:10.1126/science.124.3212.103.
14. G. Danby, J.-M. Gaillard, K. Goulianos u. a.: *Observation of High-Energy Neutrino Reactions and the Existence of Two Kinds of Neutrinos.* In: Physical Review Letters 9 (1962), S. 36–44, doi:10.1103/PhysRevLett.9.36.

15. K. Kodama u. a. (DONUT Collaboration): *Observation of tau neutrino interactions.* In: Physics Letters B 504 (2001), S. 218–224, doi:10.1016/S0370-2693(01)00307-0.
16. Particle Data Group, S. Navas u. a.: *Review of Particle Physics*, Ausgabe 2025, Summary Table Gauge and Higgs Bosons, pdg.lbl.gov.
17. A. Einstein: *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt.* In: Annalen der Physik 322 (1905), S. 132–148, doi:10.1002/andp.19053220607.
18. DESY: *The discovery of the gluon – a research trip back to the 70s.* Hintergrundartikel, 2019, desy.de.
19. Nobel Prize Outreach: *The Nobel Prize in Physics 1984.* nobelprize.org.
20. ATLAS Collaboration, G. Aad u. a.: *Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC.* In: Physics Letters B 716 (2012), S. 1–29, doi:10.1016/j.physletb.2012.08.020.
21. R. Brandelik u. a. (TASSO Collaboration): *Evidence for Planar Events in $e^+e^-$ Annihilation at High Energies.* In: Physics Letters B 86 (1979), S. 243–249, doi:10.1016/0370-2693(79)90830-X.
22. ALEPH, DELPHI, L3, OPAL, SLD Collaborations u. a.: *Precision electroweak measurements on the Z resonance.* In: Physics Reports 427 (2006), S. 257–454, doi:10.1016/j.physrep.2005.12.006.
23. X. Fan, T. G. Myers, B. A. D. Sukra, G. Gabrielse: *Measurement of the Electron Magnetic Moment.* In: Physical Review Letters 130 (2023), 071801, doi:10.1103/PhysRevLett.130.071801.
24. S. Borsanyi, Z. Fodor, J. N. Guenther u. a.: *Leading hadronic contribution to the muon magnetic moment from lattice QCD.* In: Nature 593 (2021), S. 51–55, doi:10.1038/s41586-021-03418-1.
25. Muon g-2 Collaboration, D. P. Aguillard u. a.: *Measurement of the Positive Muon Anomalous Magnetic Moment to 127 ppb.* In: Physical Review Letters 135 (2025), 101802, doi:10.1103/7clf-sm2v.
26. Fermilab: *Muon g-2 announces most precise measurement of the magnetic anomaly of the muon.* Pressemitteilung vom 3. Juni 2025, news.fnal.gov.

## Zitiervorschlag

```
quanten.de: Elementarteilchen: die Bausteine des Standardmodells. Stand: November 2026. URL: https://quanten.de/elementarteilchen.html
```

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

**Weiterlesen:** Proton · Higgs-Boson · Neutrinos · Fermionen und Bosonen