

# W wie Widerspruch?

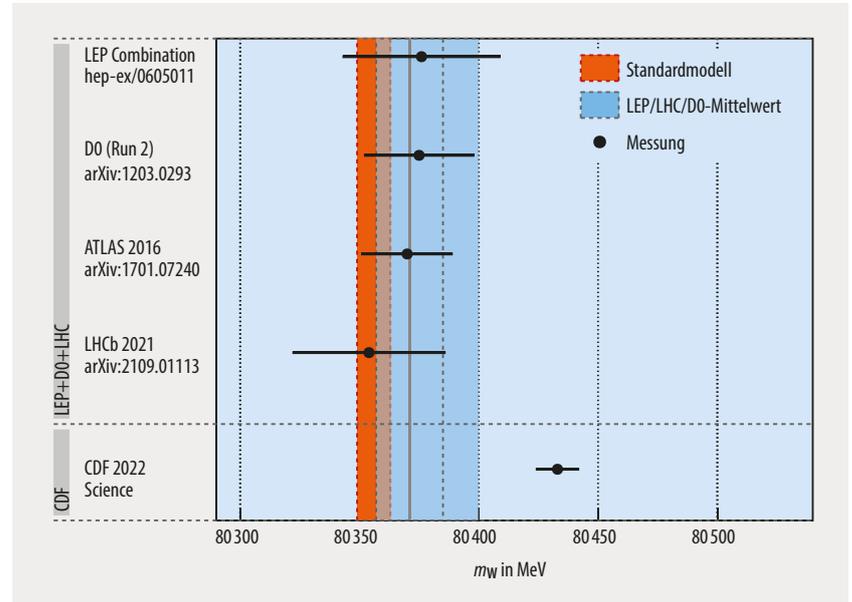
Eine neuer Wert der Masse des W-Bosons könnte auf Physik jenseits des Standardmodells deuten.

Matthias Schott

Anfang April machte eine neue Messung der Masse des W-Bosons weltweit Schlagzeilen [1], da sie um mehr als sieben Standardabweichungen von der Vorhersage des Standardmodells der Teilchenphysik abweicht (**Abb. 1**). Um die Messung und ihre Interpretation richtig einordnen zu können, sollte man sich zunächst die vereinheitlichte elektroschwache Theorie in Erinnerung rufen: Mit nur wenigen Parametern lässt sich die gesamte Theorie der elektromagnetischen und der schwachen Wechselwirkung darstellen: mit den Massen des W- und des Z-Bosons ( $m_W$ ,  $m_Z$ ) sowie der Feinstrukturkonstante ( $\alpha_{em}$ ), der Fermi-Konstante ( $G_F$ ) und dem elektroschwachen Mischungswinkel ( $\sin^2\theta_W$ ). Besonders spannend ist hierbei die Beziehung zwischen den Massen des W- und Z-Bosons und dem elektroschwachen Mischungswinkel.<sup>1)</sup> Durch Schleifenkorrekturen hängt die Masse des W-Bosons indirekt quadratisch von der Masse des Top-Quarks und logarithmisch von der Masse des Higgs-Bosons ab (**Abb. 2**).

Seit der Entdeckung des Higgs-Bosons 2012 ist es möglich, die Beziehungen der Observablen, wie sie das Standardmodell vorhersagt, untereinander sehr genau zu testen: So lässt sich die Masse des W-Bosons auf Basis der gemessenen Werte der anderen Parameter bestimmen und mit ihrem gemessenen Wert vergleichen [2, 3]. Eine Abweichung vom vorhergesagten Wert von  $m_W = 80357 \pm 6 \text{ MeV}/c^2$  wäre ein starker Hinweis auf bisher unbekannte Teilchen bzw. Wechselwirkungen, die in die Schleifenkorrekturen bisher nicht eingehen (**Abb. 2**).

Aus experimenteller Perspektive spielt hier die Messung der Masse des W-Bosons eine zentrale Rolle, da die indirekte Vorhersage mit einer relativen Genauigkeit von 0,007 Prozent etwa doppelt so präzise ist wie die bisherige experimentelle Genauig-



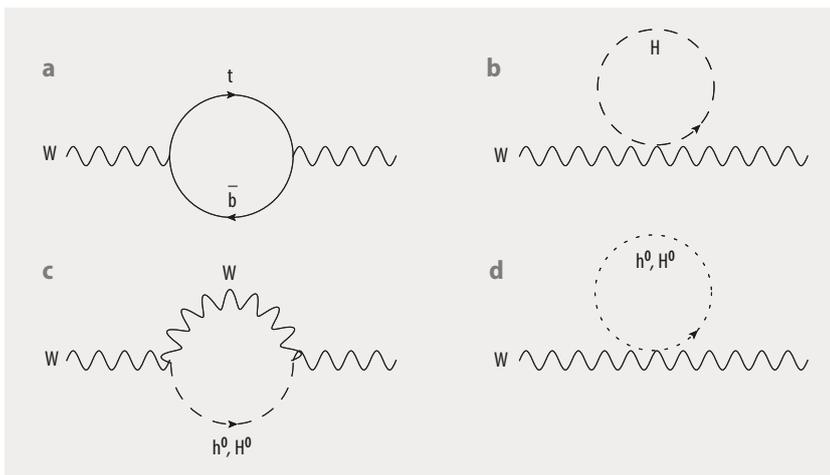
**Abb. 1** Die neue Messung der Masse des W-Bosons von CDF weicht deutlich ab von bisherigen Werten und der Vorhersage des Standardmodells mittels des Gfitter-Programms.

keit von 0,016 Prozent. Die genauesten Messungen der W-Boson-Masse gelangen am Large Hadron Collider des CERN und am Tevatron des Fermilab. Während am LHC Protonen bei Schwerpunktsenergien von bis zu 13 TeV kollidieren, untersucht das Tevatron Kollisionen von Protonen und Antiprotonen bei einer Schwerpunktsenergie von 1,96 TeV.

Das grundlegende Konzept der Messung der Masse des W-Bosons ist bei beiden Beschleunigern sehr ähnlich. Aufgrund der Kurzlebigkeit des W-Bosons sind nur seine Zerfallsprodukte im Detektor nachweisbar. Da sich Zerfälle in zwei Quarks nicht mit der benötigten Genauigkeit von Untergrundprozessen unterscheiden lassen, liegt der Fokus auf leptonenischen Zerfallskanälen, insbesondere auf dem Zerfall in ein Elektron und ein Elektronenneutrino bzw. in ein Myon und ein Myonenneutrino. Die Massenbestimmung des W-Bosons ergibt sich dann aus der Energiemessung seiner Zerfallsprodukte. Die Situation verkompliziert sich dadurch, dass

sich Neutrinos nicht direkt nachweisen lassen, sondern nur als fehlende (transversale) Energie im Detektor in Erscheinung treten. Um eine experimentelle Präzision von wenigen Promille zu erreichen, müssen nun zwei Aspekte bis ins letzte Detail verstanden sein: Zum einen braucht das Detektorsystem eine Kalibration von herausragender Präzision. Diese beruht typischerweise auf Observablen, deren Eigenschaften sehr gut bekannt sind, wie der Masse des Z-Bosons oder des J/Psi-Mesons. Zum anderen gilt es, die Produktion von W-Bosonen in Hadronkollisionen sehr gut zu verstehen: W-Bosonen entstehen nicht exakt in Ruhe, sondern besitzen einen variablen Anfangsimpuls, der sich dann auf die Energie der Zerfallsprodukte überträgt. Hierfür müssen perturbative und nicht-perturbative theoretische Modelle getestet und Unsicherheiten aufgrund der begrenzten

1) Der Mischungswinkel ist ein Maß für die relative Stärke von schwacher und elektromagnetischer Kraft.



**Abb. 2** Das W-Boson kann sich durch Quanteneffekte kurzzeitig in ein Top- und ein Bottom-Quark aufspalten (a) oder ein Higgs-Boson aussenden und wieder absorbieren (b). Solche Prozesse heißen Schleifenkorrekturen zum Propagator des W-Bosons. Weitere Higgs-Teilchen ( $h^0, H^0$ ) jenseits des Standardmodells ermöglichen zusätzliche Schleifenkorrekturen (c, d).

Kenntnis der internen Struktur des Protons bestimmt werden. Die Komplexität einer solchen Auswertung erklärt auch die typische lange Dauer bis zur Veröffentlichung: Die bisher genaueste Messung der W-Boson-Masse am LHC, die auf Daten von 2011 basiert, hat die ATLAS-Kollaboration 2017 veröffentlicht.

Die CDF-Kollaboration hat nun elf Jahre nach Stilllegung des Tevatron-Beschleunigers ihren endgültigen Messwert veröffentlicht [1]. Das Ergebnis von  $m_W = (80434 \pm 9) \text{ MeV}/c^2$  ist aus zwei Gründen höchst bemerkenswert: Die erzielte Unsicherheit beträgt weniger als die Hälfte im Vergleich zu bisherigen Einzelmessungen. Um sich den dahinter stehenden experimentellen Aufwand vorstellen zu können, hilft es vielleicht zu erfahren, dass eine unkorrigierte mittlere Verschiebung von Spurrkammern um Bruchteile eines Millimeters ausreicht, um den gemessenen Wert von  $m_W$  um viele  $\text{MeV}/c^2$  zu verändern. Viel spannender scheinen jedoch die sieben Standardabweichungen Differenz zur indirekten Vorhersage des Standardmodells zu sein. Ist dies der lang gesuchte Hinweis auf neue Physik?

Die meisten Forschenden in der Teilchenphysik sind zurzeit noch etwas zurückhaltend mit einer solchen Einschätzung, weil die neue Messung auch signifikant von den bisherigen Messergebnissen abweicht (**Abb. 1**). Eine Kombination

der bisher genauesten Messungen am Large Electron-Positron Collider (LEP) mit den Messungen von ATLAS [4] und LHCb [5] am LHC und der Messung des D0-Experiments am Fermilab [6] ergibt einen Wert von  $m_W = (80371 \pm 14) \text{ MeV}/c^2$ . Dieser ist nicht nur völlig kompatibel mit der indirekten Vorhersage des Standardmodells, sondern weicht auch um etwa vier Standardabweichungen von der neuen Messung ab.

Daher bleibt es in den kommenden Monaten zunächst zu klären, wie die Abweichung der einzelnen experi-

mentellen Bestimmungen zustande kommt, bevor mögliche Erklärungen jenseits des Standardmodells in den Fokus rücken. Erste Diskussionen innerhalb der Fachkollegien nach der Präsentation des neuen Werts ergaben zahlreiche Fragen, welche die beteiligten Wissenschaftler:innen nun im Detail überprüfen. Zudem arbeiten die Kollaborationen der LHC-Experimente ebenfalls mit Hochdruck an neuen Präzisionsmessungen der W-Boson-Masse. So wird wohl erst in einigen Monaten, wenn nicht gar Jahren klar sein, ob das aktuelle Resultat tatsächlich einen belastbaren Hinweis auf neue Physik darstellt.

- [1] *CDF Collaboration*, *Science* **376**, 170 (2022)
- [2] *J. Erler und M. Schott*, *Prog. Part. Nucl. Phys.* **106**, 68 (2019)
- [3] *Gfitter Collaboration*, *Eur. Phys. J. C* **78**, 675 (2018)
- [4] *ATLAS Collaboration*, *Eur. Phys. J. C* **78**, 110 (2018)
- [5] *LHCb Collaboration*, *JHEP* **01**, 036 (2022)
- [6] *D0 Collaboration*, *Phys. Rev. Lett.* **108**, 151804 (2012)

## Der Autor

**Prof. Dr. Matthias Schott**, Institut für Physik, Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Staudingerweg 7, 55099 Mainz

## Kurzgefasst

### Nahezu perfekt

Polarisierte Röntgenstrahlen erlauben es, fundamentale Tests der Quantenelektrodynamik durchzuführen und zum Beispiel die Vakuumdoppelbrechung nachzuweisen. Für die entsprechenden Experimente braucht es nahezu perfekt polarisierte Strahlen, damit sich kleinste Änderungen der Polarisation messen lassen. Kürzlich gelang es einem Forschungsteam aus Jena, Darmstadt, Dresden und Hamburg, die Polarisationsreinheit um eine Größenordnung auf  $8 \times 10^{-11}$  zu verbessern. Am European XFEL kollimierten die Forschenden dazu Röntgenstrahlung mittels Beryllium-Linsen; ein Monochromator stabilisierte die Energie auf 6,457 keV. Im Anschluss sorgte ein Polarimeter mit zwei optimierten Siliziumkristallen für die hohe Reinheit.

*K. S. Schulze et al.*, *Phys. Rev. Research* **4**, 013220 (2022)

### Kein neutrinoloser Zerfall

Der Nachweis eines neutrinolosen doppelten Betazerfalls ( $0\nu\beta\beta$ ) würde belegen, dass Neutrinos ihre eigenen Antiteilchen sind. Solche Majorana-Teilchen könnten die Asymmetrie von Materie und Antimaterie im Universum erklären. Die CUORE-Kollaboration untersucht daher den Zerfall von  $^{130}\text{Te}$  mit einem kryogenen Kalorimeter im italienischen Untergrundlabor Gran Sasso. Das Kalorimeter besteht aus fast 1000 hochreinen Telluroxid-Kristallen, die zusammen 700 kg wiegen. Nach drei Jahren Messzeit hat die Kollaboration nun als Untergrenze für die Halbwertszeit des  $0\nu\beta\beta$ -Zerfalls von  $^{130}\text{Te}$  einen Wert von  $2,2 \times 10^{25}$  Jahren bei einem Konfidenzniveau von 90 % veröffentlicht. Die Kryotechnik von CUORE eignet sich auch für supraleitende Qubits.

*The CUORE Collaboration*, *Nature* **604**, 53 (2022)