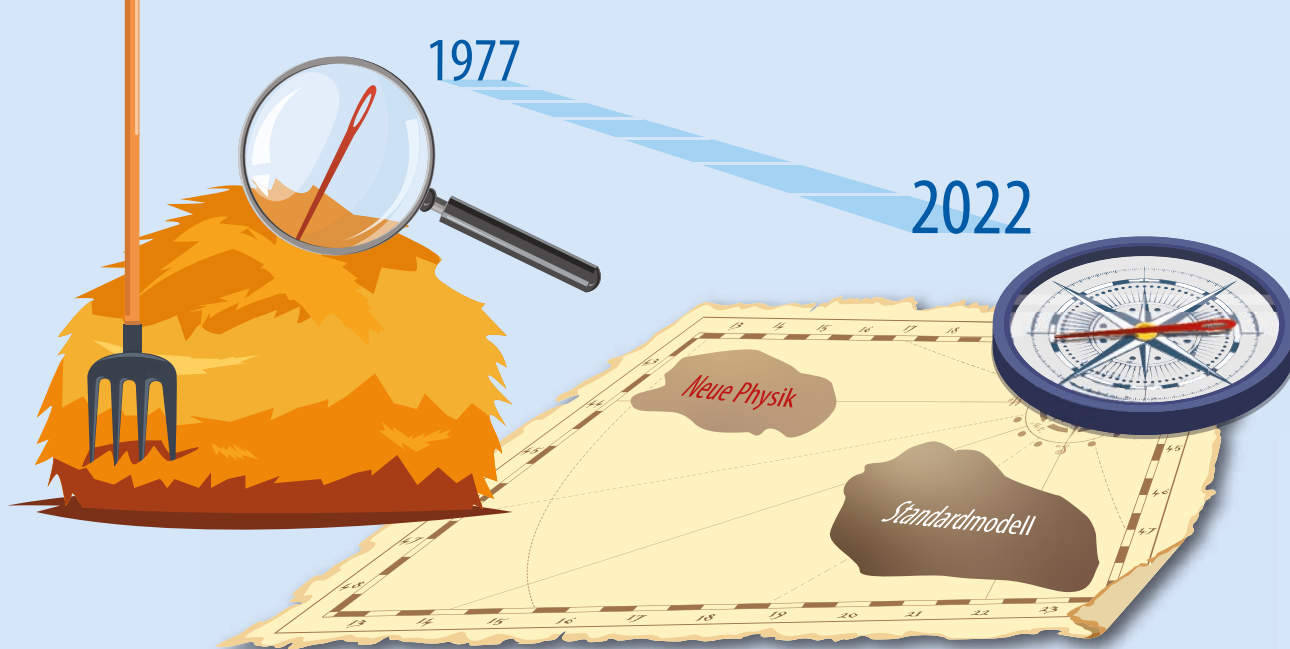




## TEILCHENPHYSIK

# Von der Nadel im Heuhaufen zur Kompassnadel der Teilchenphysik

**Am Large Hadron Collider lassen sich Top-Quarks mit bisher unerreichter Präzision erforschen und damit wegweisende Erkenntnisse für die Teilchenphysik gewinnen.**

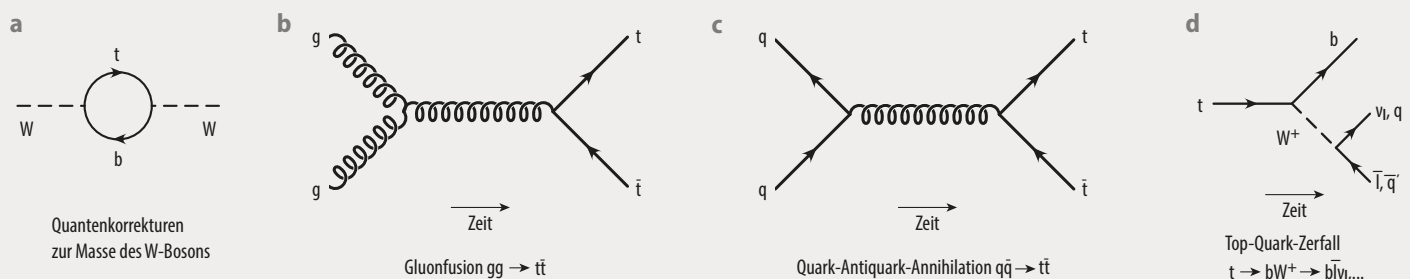
Andrea Knue, Alexander Grohsjean und Peter Uwer

Ein Vierteljahrhundert nach der Entdeckung des Top-Quarks am Tevatron-Beschleuniger des Fermilab öffnet der Large Hadron Collider am CERN die Tür zu einem neuen Bereich der Teilchenphysik. Entsprach der Weg zur Entdeckung noch der sprichwörtlichen Suche nach der Nadel im Heuhaufen, produziert der LHC heute Top-Quarks millionenfach. Die damit erreichbare Genauigkeit erlaubt nicht nur detaillierte Tests des Standardmodells der Teilchenphysik, sondern kann auch den Weg zu seinen möglichen Erweiterungen weisen.

**D**as Top-Quark spielt im Standardmodell der Teilchenphysik eine besondere Rolle. In den 1970er-Jahren zeigte sich, dass Fermionen (Teilchen mit halbzahligem intrinsischen Drehimpuls) in Familien auftreten, von denen jede aus zwei Quarks, einem geladenen Lepton und einem Neutrino besteht. Diese Familien unterscheiden sich nur durch die Massen der enthaltenen Fermionen. Anfangs waren nur zwei Familien bekannt: Zur ersten Familie gehören u- und d-Quark, Elektron und Elektron-Neutrino, zur zweiten c- und s-Quark, Myon und Myon-Neutrino. Die Entdeckung des  $\tau$ -Leptons 1975 und des b-Quarks 1977 lieferten jedoch Hinweise auf eine dritte, schwerere Familie. Zu diesem Zeitpunkt fehlte ihr

zugehöriges Neutrino sowie ein zweites Quark, das Top-Quark. Obwohl das Standardmodell außer der Masse alle Teilchen-Eigenschaften vorhersagt, führten die intensiven Suchen erst nach fast zwanzig Jahren zum Nachweis des Top-Quarks. Seine für subatomare Verhältnisse riesige Masse – es ist fast 35-mal schwerer als ein b-Quark und damit fast so schwer wie ein Goldatom – macht das Top-Quark einzigartig und stellte die damaligen Experimente vor große Herausforderungen.

Seit 1977 suchten viele Beschleunigerexperimente nach dem Top-Quark. Obwohl die Energie der Beschleuniger lange nicht für die direkte Produktion ausreichte, ließ sich zumindest die Masse des Top-Quarks einschränken, insbesondere ab 1989 am Large Electron-Positron Collider (LEP) des CERN. Denn Teilchen können sich auch durch Quantenfluktuationen verraten: So beeinflusst der Austausch eines Top-Quarks die Propagation eines W-Bosons und damit seine Masse (**Abb. 1a**). Daher ergaben sich aus Präzisionsmessungen der Masse des W-Bosons im Wechselspiel mit theoretischen Vorhersagen eine untere und eine obere Grenze für die Masse des Top-Quarks: Experimente am LEP-Beschleuniger schränkten sie 1994 auf den Bereich zwischen 140 und 203  $\text{GeV}/c^2$  ein [1]. Die Entdeckung gelang schließlich 1995 den beiden Experimenten CDF und DØ am



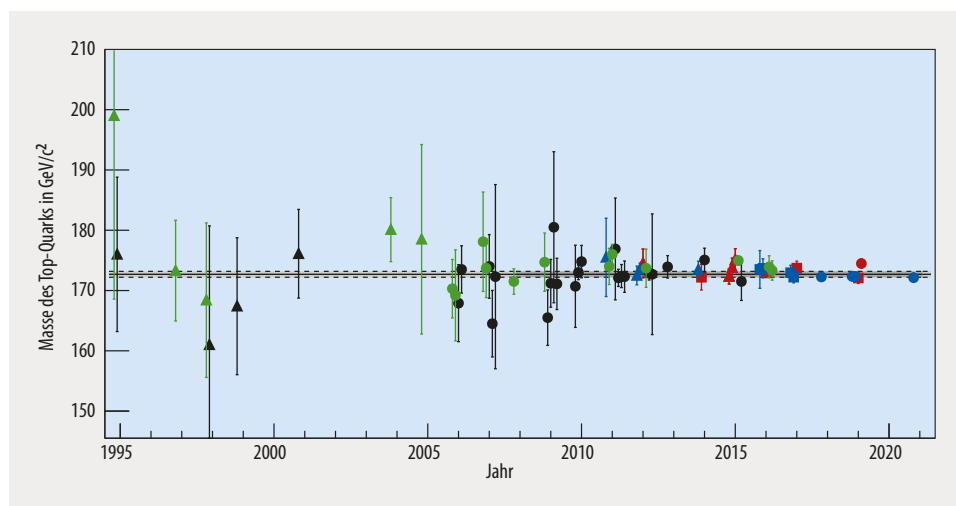
**Abb. 1** Das Top-Quark führt zu Quantenkorrekturen der Masse des W-Bosons (a). Die Feynman-Diagramme zeigen die Produktion von Top-Quark-Paaren durch die starke Wechselwirkung aus Gluonen (b) und Quarks (c). Im Standardmodell dominiert der elektroschwache Zerfall des Top-Quarks in ein b-Quark und ein W-Boson (d), das in ein Leptonen-Paar oder ein Quark-Paar weiter zerfällt.

Tevatron mit Kollisionen von Protonen und Antiprotonen [2]. Innovative Analysemethoden erlaubten es, trotz einer vergleichsweise geringen Anzahl produzierter Top-Quarks bereits viele detaillierte Messungen durchzuführen. Seit 2010 erzeugt der Large Hadron Collider (LHC) am CERN Top-Quarks in großer Anzahl bei der Kollision von Protonen. Diese Daten ermöglichen es, die Eigenschaften des Top-Quarks mit bisher unerreichter Präzision zu vermessen und Vorhersagen des Standardmodells – etwa seine elektrische Ladung oder wie es schwach wechselwirkt – mit hoher Genauigkeit zu überprüfen. Obwohl die Entdeckung von Top-Quark und Higgs-Boson [3] die Vorhersagen des Standardmodells eindrucksvoll bestätigt haben, erklärt es nicht alle experimentellen Beobachtungen. So bleiben etwa die Fragen nach dem Ursprung der Dunklen Materie oder der Hierarchie der Fermionmassen unbeantwortet. Daher steht fest, dass es eine Theorie jenseits des Standardmodells geben muss. Viele Szenarien für neue Physik modifizieren den Mechanismus der Massenerzeugung. Hier spielt das Top-Quark aufgrund seiner großen Masse eine besondere Rolle. Präzise Messungen seiner Eigenschaften erlauben, gezielt bisher noch unbekannte Phänomene zu suchen.

Am LHC entstehen Top-Quarks vorwiegend als Quark-Antiquark-Paar ( $t\bar{t}$ ) durch die starke Wechselwirkung. Dabei fusionieren entweder zwei Gluonen aus den einlaufenden Protonen zu einem  $t\bar{t}$ -Paar (**Abb. 1b**) oder ein ein-

laufendes Quark-Antiquark-Paar annihiliert in ein  $t\bar{t}$ -Paar (**Abb. 1c**). Nur Prozesse, die der schwachen Wechselwirkung unterliegen, erzeugen einzelne Top-Quarks. Experimentell sind solche Ereignisse wegen des Untergrunds deutlich schwerer nachzuweisen. Sie erlauben es jedoch, die elektroschwachen Eigenschaften des Top-Quarks genau zu studieren. Außerdem bietet die elektroschwache Produktion die einzigartige Möglichkeit, polarisierte Top-Quarks zu untersuchen. Neben der Einzel- und Paarproduktion existieren noch wesentlich seltenere Prozesse, beispielsweise die gemeinsame Produktion von vier Top-Quarks ( $t\bar{t}t\bar{t}$ ). Ein Datensatz mit einer Million produzierter  $t\bar{t}$ -Paare enthält im Mittel nur 14 solcher Ereignisse. Dennoch gibt es in den Daten des LHC bereits erste Hinweise auf diesen seltenen Prozess – ein Beleg, dass damit nicht nur sehr präzise Messungen bekannter Prozesse möglich sind, sondern auch die Untersuchung sehr seltener Prozesse.

Wie alle Quarks kommt auch das Top-Quark nicht als freies Teilchen in der Natur vor; im Gegensatz zu seinen leichteren Pendanten bildet es aber keine gebundenen Zustände, sondern zerfällt nach etwa  $10^{-24}$  Sekunden bevorzugt in ein W-Boson und ein b-Quark. Das W-Boson zerfällt weiter in ein Lepton und ein Neutrino oder in zwei Quarks (**Abb. 1d**). Um Top-Quarks zu untersuchen, gilt es, den gesamten Impuls aus den gemessenen Impulsen der Zerfallsprodukte zu rekonstruieren.



**Abb. 2** Am Tevatron haben die Experimente CDF (schwarz) und D0 (grün) die Masse des Top-Quarks bestimmt, am Large Hadron Collider ATLAS (rot) und CMS (blau). Die Kombination der ATLAS-Messungen (Linie) ist mit ihrem Fehlerband (grau) gezeigt. Die Unsicherheiten reduzierten sich im Laufe der Zeit erheblich.

## Wie schwer ist das Top-Quark?

Das Standardmodell der Teilchenphysik legt fast alle Eigenschaften der Quarks durch die Struktur des Modells fest. Lediglich die Masse, ein charakteristisches Merkmal jedes Elementarteilchens, bleibt als freier Parameter. Die Masse des Top-Quarks spielt jedoch eine weit größere Rolle: Sie beeinflusst über Quantenkorrekturen die Masse des Higgs-Bosons und tritt in Modellen neuer Physik auf. Daher ist es entscheidend, sie experimentell durch den Vergleich beobachteter Verteilungen mit theoretischen Vorhersagen für unterschiedliche Massenwerte bestmöglich zu bestimmen.

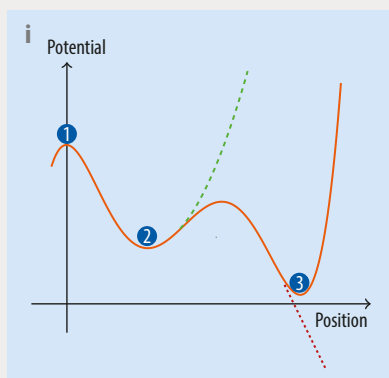
Die Experimente ATLAS und CMS am LHC erlauben es, zahlreiche verschiedene Zerfallskanäle und Verteilungen für die Bestimmung der Masse heranzuziehen. Aufgrund der großen Anzahl produzierter Top-Quarks sind die Ergebnisse nicht länger statistisch, sondern vor allem durch systematische Unsicherheiten limitiert. Trotz dieser Einschränkung ist die Masse des Top-Quarks mit einer relativen Unsicherheit von weniger als 3 Promille die heute am genauesten gemessene Quark-Masse überhaupt! Die erzielte Genauigkeit bei den aktuellen Messungen (**Abb. 2**) übertrifft bereits jetzt die Erwartungen. Trotzdem sollen die Messungen in Zukunft noch weiter verbessert werden. Die zahlreich produzierten Top-Quarks erlauben es, die Analyse auf gut messbare Ereignisse einzuschränken. So besitzen etwa Ereignisse mit leptonischen Endzuständen im Vergleich zu hadronischen kleinere Unsicherheiten, da sich die Energie von Elektronen mehr als fünfmal genauer bestimmen lässt als die von Hadronen. Zusätzliche Kalibrationen der Detektoren unter Verwendung gemessener Daten sowie eine Verbesserung der Monte-Carlo-Simulationen reduzieren die systematischen Unsicherheiten weiter.

Im Standardmodell sorgt die Wechselwirkung der Fermionen mit dem Higgs-Feld für ihre Masse (Yukawa-Kopplung). Diese ist proportional zur Kopplungsstärke, sodass das Top-Quark als schwerstes Teilchen auch die größte Yukawa-Kopplung aufweist. Das gilt nur, falls der Higgs-Mechanismus – ein Schlüsselement des Standardmodells – tatsächlich in der Natur realisiert ist. Um dies zu überprüfen, bedarf es sowohl einer präzisen Messung der Masse als auch der Yukawa-Kopplung des Top-Quarks.

Die direkte Messung der Yukawa-Kopplung erweist sich jedoch als sehr anspruchsvoll. Am besten geeignet ist die Produktion eines Top-Quark-Paares zusammen mit einem Higgs-Boson ( $t\bar{t}H$ ). Die großen Massen der beteiligten Teilchen führen jedoch dazu, dass für einen Datensatz mit einer Million produzierter  $t\bar{t}$ -Paare nur 600 solcher Ereignisse zu erwarten sind. In der Vergangenheit schwankte die Prognose für die Durchführbarkeit dieser Analysen daher zwischen „unmöglich“ und „gerade so machbar“. Erst 2018 gelang es,  $t\bar{t}H$ -Ereignisse nachzuweisen [4]. Dabei verwendete man die Zerfälle des Higgs-Bosons in zwei b-Quarks, in zwei Photonen oder in mehrere Leptonen. Diese Zerfallskanäle unterscheiden sich deutlich bezüglich ihrer Unsicherheiten: Der häufigste Zerfall in zwei b-Quarks weist wegen des Untergrunds große Unsicherheiten auf; sehr präzise messen lässt sich hingegen der sehr seltene Zerfall in zwei Photonen.

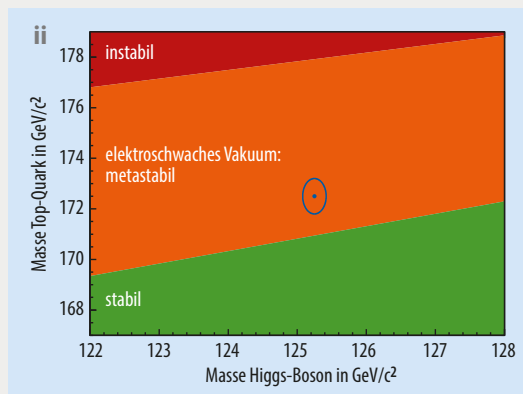
Trotz dieser Herausforderungen ergab die Kombination der Ergebnisse bereits eine relative Genauigkeit von etwa 20 Prozent [5]. Dabei stimmt der gemessene Wert gut mit der Vorhersage basierend auf der Masse des Top-Quarks überein: Die Messungen bestätigen im Rahmen der Unsicherheiten den Higgs-Mechanismus! Für einen präziseren Test gilt es, die Unsicherheiten zu reduzieren. Die Werte

## Die Zukunft des Universums



Im Potential eines klassischen Teilchens kann es instabile Positionen (**Abb. i**, Punkt 1) geben, an denen eine beliebig kleine Störung genügt, damit ein dort ruhendes Teilchen diese verlässt. An metastabilen Stellen (Punkt 2) bedarf es dazu hinreichend großer Störungen. Am absoluten Minimum des Potentials (Punkt 3) herrscht eine stabile Gleichgewichtslage, die jedoch nicht für jedes Potential existiert. Das Higgs-Potential des Standardmodells hängt nicht von der Position, sondern vom Betrag des Higgs-Feldes ab. Quantenkorrekturen, insbesondere durch die Wechselwirkung von Higgs-Boson und Top-Quark, modifizieren dieses Potential: Abhängig von der Masse des Top-Quarks kann das elektroschwache Vakuum instabil (rot), metastabil (orange) oder stabil (grün) sein.

Theoretische Vorhersagen zur Stabilität des Potentials hängen von den Massen des Higgs-Bosons und des Top-Quarks ab [6] (**Abb. ii**). Deren gemessene Werte (blau) legen nahe, dass sich das Universum in einem metastabilen Zustand befindet. In diesem Fall bestimmt das metastabile Minimum die aktuellen Massen der Elementarteilchen. Beim Übergang in das absolute Minimum findet analog zum Verdampfen von Wasser ein Phasenübergang statt, sodass Atome, wie wir sie heute kennen, vielleicht nicht mehr existieren. Die Lebensdauer des potentiell metastabilen Zustands ist allerdings weitaus größer als das Alter unseres Universums [7], sodass ein solcher Phasenübergang, falls er denn auftreten sollte, wahrscheinlich noch in sehr ferner Zukunft liegt. Darüber hinaus können bisher vernachlässigte Effekte der Gravitation oder neue Physik das Bild ebenfalls grundlegend ändern.



von Masse und Yukawa-Kopplung spielen allerdings noch eine weit wichtigere Rolle: Theoretische Studien zeigen, dass das Universum nur für einen eingeschränkten Bereich der Top-Quark-Masse stabil ist (**Infokasten** „Die Zukunft des Universums“).

## Wechselwirkungen unter der Lupe

Wie alle Fermionen besitzt das Top-Quark einen halbzahligen Spin. Da die Wechselwirkungen während der Produktion seine Ausrichtung beeinflussen können, erlauben spinabhängige Messgrößen, die Wechselwirkungen des Top-Quarks im Detail zu untersuchen. Das Verhalten ergibt sich dabei oft qualitativ mit einfachen Überlegungen zum Drehimpuls (**Infokasten** „Zerfall des Top-Quarks und Spinphysik“). Die Analyse des Spins des Top-Quarks erfolgt über die Winkelverteilung der Zerfallsprodukte. Hier unterscheidet sich das Top-Quark deutlich von seinen leichteren Verwandten: Bei leichten Quarks geht bei der Entstehung von Hadronen die Spininformation meist verloren. Da Top-Quarks zerfallen, bevor Bindungszustände entstehen, lässt sich anhand ihrer Zerfallsprodukte die Polarisation bestimmen.

Eine besonders einfache Größe, die sich gut zur Messung der Spinkorrelation eignet, ist der azimutale Öffnungswinkel der geladenen Leptonen aus dem Zerfall der beiden Top-Quarks (**Abb. 1d**). Er liefert ein Maß, wie häufig die Spins in der  $t\bar{t}$ -Produktion parallel bzw. antiparallel ausgerichtet sind. Am LHC fliegen die paarweise produzierten Top-Quarks mehrheitlich in entgegengesetzter Richtung auseinander, was sich auch in der Bewegung der Leptonen zeigt: Der Öffnungswinkel beträgt überwiegend 180 Grad. Der Effekt der Spinkorrelation reduziert dies ein wenig, sodass sich der Anteil der Leptonen, die in die gleiche Richtung fliegen, leicht erhöht (**Abb. 3a**). Der Effekt ist jedoch so

klein, dass es mehr als 15 Jahre dauerte, bis die Kollaboration am DØ-Experiment Hinweise auf die Korrelation der Spins in der Paarproduktion von Top-Quarks fand. Der endgültige Nachweis gelang 2011 am LHC durch die Messung des azimutalen Öffnungswinkels. Es folgten weitere Messungen bei unterschiedlichen Schwerpunktsenergien, um die Korrelation immer genauer zu bestimmen. Dabei zeigten sowohl die Daten des ATLAS- als auch des CMS-Experiments [9] einen erstaunlichen Trend: Der Anteil der Top-Quark-Paare mit parallel ausgerichteten Spins fiel scheinbar höher aus, als im Standardmodell vorhergesagt (**Abb. 3b**). Trotz zahlreicher Studien systematischer Unsicherheiten lässt sich die beobachtete Abweichung bisher nicht vollständig erklären. Eine Ende 2019 von der CMS-Kollaboration veröffentlichte Messung konnte jedoch keine Hinweise auf neue Physik finden. Neben dem azimutalen Öffnungswinkel der beiden Leptonen wurde sowohl die Polarisation der beiden Top-Quarks als auch die Korrelation der Spins bezüglich aller Raumrichtungen gemessen – ohne Abweichungen zu den Vorhersagen des Standardmodells zu beobachten. Daher könnte der Effekt von der Kinematik der beiden Top-Quarks abhängen, die den azimutalen Öffnungswinkel ebenfalls sehr stark beeinflusst. Da die zugrundeliegenden Monte-Carlo-Simulationen nur störungstheoretische Rechnungen nächstführender Ordnung nutzen, ergeben sich bei der Vorhersage azimutaler Verteilungen Unsicherheiten (**Abb. 3b**): Die Korrekturen durch höhere Ordnungen führen zu einer besseren Übereinstimmung. Bislang existiert allerdings keine vollständige Simulation des Gesamtprozesses inklusive der Korrekturen.

Messungen von Spinkorrelationen sind heute ein integraler Bestandteil der Präzisionsmessungen am LHC. Insbesondere der stete Austausch zwischen Theorie und Experiment führt hier zu einem tieferen Verständnis des Top-Quarks und seiner Wechselwirkungen.

## Zerfall des Top-Quarks und Spinphysik

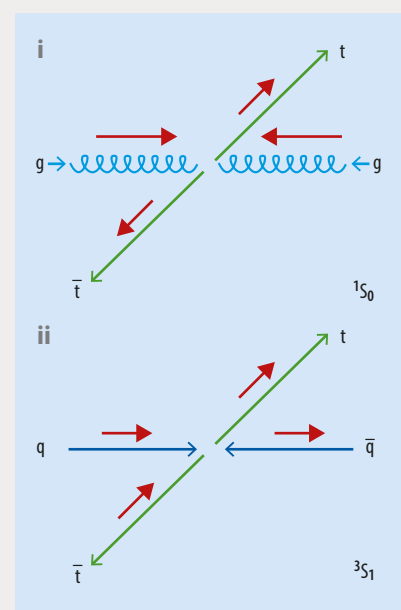
Im Standardmodell zerfällt das Top-Quark vor allem in ein W-Boson und ein b-Quark. Zerfällt das W-Boson in ein geladenes Lepton und ein Neutrino, handelt es sich um einen leptonischen Zerfall; bei einem hadronischen Zerfall entstehen zwei Quarks. Da der Zerfall paritätsverletzend ist, enthält die Winkelverteilung der Zerfallsprodukte Hinweise auf die Polarisation. Beim leptonischen Zerfall eines Top-Quarks fliegen die geladenen Leptonen bevorzugt in Richtung des Spins, für ein Anti-Top-Quark entgegen der Spinrichtung.

Entsteht das Top-Quark bei der Fusion von Gluonen (**Abb. i**), befindet es sich an der Produktionsschwelle in einem  $^1S_0$ -Zustand (spektroskopische Notation  $^{2s+1}L_J$  mit Gesamtdrehimpuls  $J$ , Bahndrehimpuls  $L$  und Spin  $s$ ). Dieser Prozess dominiert am Large Hadron Collider, sodass bevorzugt kleine Winkel zwischen den Zerfalls-Leptonen auftreten. Am Tevatron fand die Produktion vorwiegend durch Quark-Antiquark-Annihilation (**Abb. ii**) statt: An der Schwelle liegt ein  $^3S_1$ -Zustand vor, bei dessen Zerfall die Winkel zwischen den Leptonen groß werden.

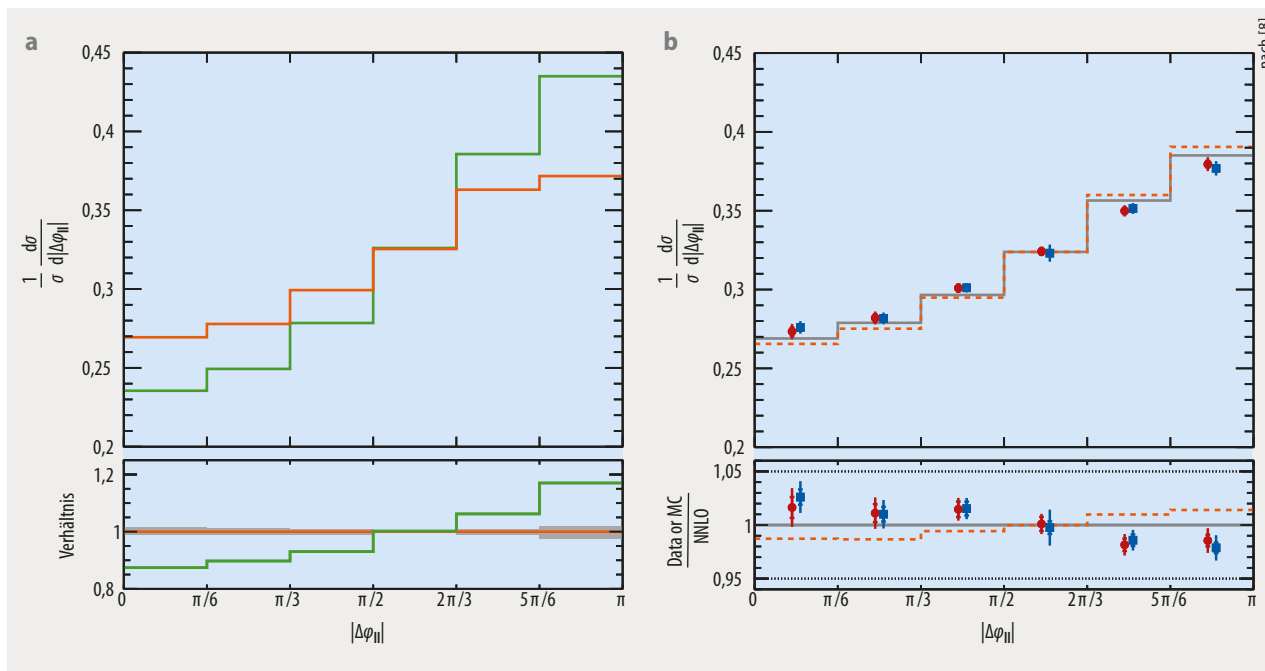
Die Messung der differentiellen Winkelverteilung der Zerfallsprodukte erlaubt es, spinabhängige Größen zu bestimmen. Allgemein können für die Spins  $\vec{S}_t, \vec{S}_{\bar{t}}$  des Top- bzw. Anti-Top-Quarks Erwartungswerte der Form  $\langle (\vec{a} \cdot \vec{S}_t)(\vec{b} \cdot \vec{S}_{\bar{t}}) \rangle$  mit beliebigen Richtungen  $\vec{a}, \vec{b}$  bestimmt werden. Die Verteilung der Öffnungswinkel der Leptonen ist beispielsweise sensitiv auf den Erwartungswert  $\langle \vec{S}_t \cdot \vec{S}_{\bar{t}} \rangle$  mit dem einfachen Ergebnis

$$\langle \vec{S}_t \cdot \vec{S}_{\bar{t}} \rangle = \frac{1}{2} \left( \langle (\vec{S}_t + \vec{S}_{\bar{t}})^2 \rangle - \langle \vec{S}_t^2 \rangle - \langle \vec{S}_{\bar{t}}^2 \rangle \right) = \begin{cases} -\frac{1}{4} \text{ für } ^1S_0 \\ \frac{3}{4} \text{ für } ^3S_1 \end{cases}$$

an der Produktionsschwelle. Oberhalb der Produktionsschwelle sorgt der endliche Bahndrehimpuls für berechenbare Korrekturen.







**Abb. 3** Für die Verteilung des azimutalen Öffnungswinkels der Leptonen ergeben Berechnungen unterschiedliche Werte, falls Spinkorrelationen Berücksichtigung finden (a, orange) oder nicht (grün). Die Daten von ATLAS (b, blau) und CMS (rot) stimmen untereinander gut überein [8], weichen aber von den Simulationen (orange) ab. Bei den störungstheoretischen Rechnungen sind die in Monte-Carlo-Simulationen vernachlässigten höheren Ordnungen offenbar wichtig (dunkelgrau).

## Auf Entdeckungsreise zu neuer Physik

Verschiedene empirische Beobachtungen erfordern eine Erweiterung des Standardmodells, sodass am LHC intensiv nach weiteren Hinweisen auf neue Physik gesucht wird. Denkbar wäre etwa die Existenz bisher unbekannter Austauscheteilchen, die zu neuen Wechselwirkungen führen. Die resonante Produktion solcher Teilchen kann den Wirkungsquerschnitt bereits bekannter Prozesse erhöhen und macht sie so experimentell über das Auftreten sogenannter Resonanzen nachweisbar. Eine denkbare Erweiterung des Standardmodells modifiziert etwa den Higgs-Mechanismus durch Einführung weiterer Higgs-Bosonen. Sind diese schwer und wechselwirken ähnlich wie das Higgs-Boson im Standardmodell, ließen sie sich besonders gut in der Paarproduktion von Top-Quarks nachweisen.

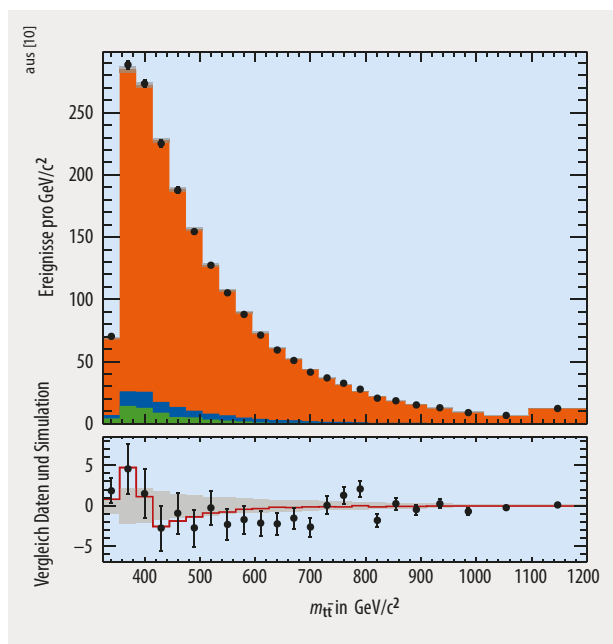
Die Suche nach Resonanzen stellt eine Standardmethode zur Entdeckung neuer Physik dar. Ähnlich wie beim Doppelspalt-Experiment sind aber auch Interferenzen möglich: Eine Überhöhung kann dann im Wirkungsquerschnitt ebenso auftreten wie eine teilweise Auslöschung. Eine solche Signatur stellt die Experimente vor große Herausforderungen. Bei zu geringer experimenteller Auflösung bzw. zu grober Einteilung der Histogramme mitteln sich Überhöhung und Auslöschung weg (**Abb. 4**). Damit potenzielle Anzeichen neuer Physik nicht übersehen werden, ist daher eine hohe experimentelle Auflösung wichtig.

Für eine erste Suche nach Interferenzeffekten im Massenspektrum von Top-Quark-Paaren nutzte die CMS-Kollaboration mehr als 50 000 Ereignisse aus dem Jahr 2016 [10]. Da ein schweres Higgs-Boson als spinloses Teilchen die Paare mit vom Standardmodell abweichenden Spinkorrelationen erzeugt, ist zusätzlich die Abhängigkeit vom Öff-

nungswinkel der beiden Leptonen von Interesse, um den Beitrag von Prozessen des Standardmodells zu reduzieren. Subtrahiert man von der Anzahl der rekonstruierten Ereignisse als Funktion der invarianten Masse des Top-Quark-Paares den erwarteten Untergrund, ergibt sich eine kleine Abweichung (**Abb. 4**), die isoliert betrachtet eine Signifikanz von 3,5 Standardabweichungen besitzt. Dies reduziert sich auf knapp 2 Standardabweichungen, wenn berücksichtigt wird, dass solche Effekte auch statistisch in den zahlreichen Suchen vorkommen. Demnach könnte es sich um eine statistische Fluktuation handeln. Denkbar bleibt aber auch, dass ein erster Hinweis auf ein neues Teilchen vorliegt. Eine endgültige Antwort kann nur die Analyse weiterer Daten geben.

## Top-Quark – Quo vadis?

Der Large Hadron Collider beendete 2018 planmäßig die Datennahme bei 13 TeV Schwerpunktsenergie (Run 2). Seit-her erfolgten am Beschleuniger und an den Experimenten umfangreiche Verbesserungen. Ein Teil der Maßnahmen gehört zu den notwendigen Vorarbeiten zum Betrieb bei erhöhter Luminosität (HL-LHC), der 2029 beginnen soll. Dann lassen sich zwanzigmal mehr Kollisionen aufzeichnen als heute. Dazu sind 2026 bis 2028 weitere Arbeiten erforderlich, sodass der LHC zunächst nur mit leicht erhöhter Energie und Luminosität für weitere vier Jahre (Run 3) laufen soll. Run 3 soll den bisher existierenden Datensatz mehr als verdoppeln und bereits in Run 2 etablierte Messungen verbessern. Davon profitieren auch die Suchen nach neuer Physik, wenngleich nicht im gleichen Umfang wie die Messungen zum Standardmodell. Für die Suche nach der Nadel im Heuhaufen braucht es neue Methoden, zum Beispiel



**Abb. 4** Die beobachtete (schwarz) und simulierte (orange) Massenverteilung von Top-Quark-Paaren, hier gezeigt für leptomische Öffnungswinkel bis zu  $53^\circ$ , zeigen leichte Abweichungen. Ein mögliches Signal neuer Physik eines pseudoskalaren Higgs-Bosons mit einer Masse von  $400 \text{ GeV}/c^2$  (rot) könnte die Abweichungen erklären.

aus dem Bereich Big Data. Seit mehr als 15 Jahren kommt in vielen Analysen maschinelles Lernen zum Einsatz; die Methodenvielfalt hat kontinuierlich zugenommen. Dies in Theorie und Experiment fortzuführen, gilt als ein wichtiger Baustein, um das Potenzial des HL-LHC voll auszuschöpfen.

Auch für Top-Quarks verspricht der HL-LHC eine deutliche Verbesserung: Die erreichbare Präzision der Messungen und das Potenzial für die Entdeckung seltener Prozesse werden erheblich gesteigert [11]. So wird angestrebt, die Unsicherheit für die gemessene Masse des Top-Quarks auf deutlich weniger als  $0,5 \text{ GeV}/c^2$  zu reduzieren und die Unsicherheit der Yukawa-Kopplung zu halbieren. Der Wirkungsquerschnitt der sehr seltenen Produktion von vier Top-Quarks sollte mit einer Unsicherheit von etwa 11 Prozent messbar sein. Viele Modelle neuer Physik sagen für diesen Prozess große Korrekturen voraus. Die Messungen erlauben es daher auch, gezielt nach neuer Physik zu suchen.

## Literatur

- [1] D. Schaile, CERN-PPE-94-162, Proceedings ICHEP 1994
- [2] CDF Collaboration, Phys. Rev. Lett. **74**, 2626 (1995);  
D0 Collaboration, Phys. Rev. Lett. **74**, 2632 (1995)
- [3] ATLAS Collaboration, Phys. Lett. B **716**, 1 (2012);  
CMS Collaboration, Phys. Lett. B **716**, 30 (2012)
- [4] ATLAS Collaboration, Phys. Lett. B **784**, 173 (2018);  
CMS Collaboration, Phys. Rev. Lett. **120**, 231801 (2018)
- [5] ATLAS Collaboration, ATLAS-CONF-2021-053;  
CMS Collaboration, CMS-PAS-HIG-19-005
- [6] S. Alekhin, A. Djouadi und S. Moch, Phys. Lett. B **716**, 214 (2012)
- [7] A. Andreassen, W. Frost, M. D. Schwartz, Phys. Rev. D **97**, 056006 (2018)
- [8] LHC Top Working Group,  
[https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/LHCPhysics/LHCtopWGSummaryPlots#Spin\\_Correlation](https://twiki.cern.ch/twiki/bin/view/LHCPhysics/LHCtopWGSummaryPlots#Spin_Correlation)
- [9] ATLAS Collaboration, Eur. Phys. J. C **80**, 754 (2020);  
CMS Collaboration, Phys. Rev. D **100**, 072002 (2019)
- [10] CMS Collaboration, JHEP **04**, 171 (2020)
- [11] ATLAS and CMS Collaborations, arXiv:1902.10229, CERN-LPCC-2019-0

## Die Autor:innen



**Andrea Knue** hat an der U Göttingen studiert und promoviert. Seit 2007 ist sie Mitglied der ATLAS-Kollaboration. Nach der Promotion ging sie als Feodor-Lynen-Fellow an die U Glasgow und arbeitete danach am Max-

Planck-Institut für Physik in München. Seit 2017 ist sie als Wissenschaftlerin an der U Freiburg tätig.



**Alexander Grohsjean** (FV Teilchenphysik) forscht am DESY Hamburg. Nach dem Physikstudium an der U Heidelberg und der Promotion an der LMU München arbeitete er zwei Jahre in Saclay. Als DESY-Fellow forschte er

drei Jahre am ATLAS-Experiment, bevor er 2015 ans CMS-Experiment wechselte.



**Peter Uwer** hat an der RWTH Aachen Physik studiert und promoviert. Nach Stationen in Saclay, an der Universität Karlsruhe und am CERN ist er seit 2008 Professor für Theoretische Elementarteilchenphysik an der HU Berlin

und forscht zur Quantenchromodynamik und der Physik des Top-Quarks.

**Dr. Andrea Knue**, Physikalisches Institut, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Hermann-Herder-Str. 3, 79104 Freiburg im Breisgau, **Dr. Alexander Grohsjean**, DESY Hamburg, Notkestr. 85, 22607 Hamburg und **Prof. Dr. Peter Uwer**, Institut für Physik, Humboldt-Universität zu Berlin, Newtonstr. 15, 12489 Berlin