

# Anmerkungen zur Antimaterie

ALBAN KELLERBAUER

Dieses Dokument enthält Ergänzungen zum Artikel „Antimaterie – Spiegelbild oder Zerrbild“ in **Physik in unserer Zeit**, 38. Jahrgang 2007, Nr. 4, S. 168. Es enthält zwei kurze Zusatzkapitel:

- Antimaterie als Energiequelle?
- Nachweis der doppelten Annihilation mit Athena

## Antimaterie als Energiequelle?

Eines der wichtigsten Vermächtnisse von Albert Einstein ist sein 1905 veröffentlichtes – und damals noch als Vermutung formuliertes – Gesetz von der Äquivalenz von Masse und Energie [1]. Mit seiner Hilfe können wir zum Beispiel verstehen, warum Atome eine geringfügig kleinere Masse haben als ihre Bestandteile: Um sie wieder zu trennen, muss Energie zugeführt werden. Eine beeindruckende Bestätigung dieser Gesetzmäßigkeit ist die Entstehung von massereichen Teilchen aus dem „Nichts“ und der umgekehrte Prozess, die Vernichtung oder Annihilation von zwei Teilchen in einem Energieblitz. Freilich müssen die zwei an einem solchen Ereignis teilhabenden Partner in einem ganz besonderen Verhältnis zueinander stehen, sie stellen nämlich jeweils das Antiteilchen des anderen dar.

Von allen heute existierenden oder auch nur vorstellbaren Energiequellen ist Antimaterie die effizienteste. Wenn die Annihilation eines Teilchens mit seinem Antiteilchen ausschließlich unter Abgabe von Lichtquanten abläuft, wird die gesamte Masse nach der Formel

$$E = mc^2$$

in Energie umgewandelt, wobei  $c$  die Vakuumlichtgeschwindigkeit ist. Die Tabelle zeigt, dass diese Form der Energiegewinnung fast 300-mal effizienter ist als Kernfusion, aus der die Sonne ihre Energie bezieht, und deren Energieausbeute ihrerseits diejenige von chemischen Reaktionen um mindestens 6 Größenordnungen übertrifft.

**Tab. 1** *Energiefreisetzung aus 1 kg (Anti-)Wasserstoff nach Reaktionstyp.*

Reaktionstyp	Formel	freiwerdende Energie	
		(kJ/Mol)	(kWh/kg)
Verbrennung	$2 \text{ H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{ H}_2\text{O} + \text{Energie}$	140	39
Kernfusion	$4 \text{ H} \rightarrow \text{He} + \text{Energie}$	$6,4 \times 10^8$	$1,8 \times 10^8$
Annihilation	$\bar{\text{H}} + \text{H} \rightarrow \text{Energie}$	$1,8 \times 10^{11}$	$5,0 \times 10^{10}$

Ein einziges Kilogramm Antiwasserstoff könnte so den Energiebedarf einer deutschen Kleinstadt mit 10 000 Einwohnern mehr als 100 Jahre lang decken. Ob es gelingen würde, die gesamte freiwerdende Energie zu nutzen, ist allerdings fraglich. Die in großer Zahl entstehenden Neutrinos wechselwirken nur so schwach mit Materie, dass sie wohl ungenutzt verlorengelassen würden.

Antimaterie kommt aber schon allein deshalb nicht als Energiequelle in Frage, weil für ihre Herstellung milliardenfach mehr Energie aufgebracht werden muss, als sie bei der Vernichtung später wieder abgeben kann. Selbst wenn durch enorme technische Fortschritte eine verlustfreie Herstellung möglich wäre, könnte man doch höchstens wieder die ursprünglich aufgewandte Energie herausbekommen. Diese Beschränkung wäre natürlich hinfällig, wenn im Weltraum große Antimaterievorkommen entdeckt würden. Es gibt aber keinen Hinweis auf Ansammlungen baryonischer Antimaterie im Umkreis von Milliarden von Lichtjahren um unser Sonnensystem.

So bleibt die Aussicht, dass Antimaterie eines Tages als zwar teurer, aber höchst effizienter Brennstoff zum Antrieb von Raumschiffen verwendet werden könnte. Für eine solche Anwendung stellt die Speicherung großer Mengen von Antimaterie die größte Herausforderung dar. Geladene Antiteilchen stoßen sich durch die Coulombkraft gegenseitig ab, so dass in elektromagnetischen Fallen höchstens etwa  $10^{12}$  von ihnen eingeschlossen werden können. Das sind 11 Größenordnungen weniger, als für die Speicherung von einem Gramm Antiprotonen nötig wäre. Die Problematik des Einschlusses von neutralen Anti-Atomen ist eine bis heute offene Frage und wird im Artikel im Detail besprochen.

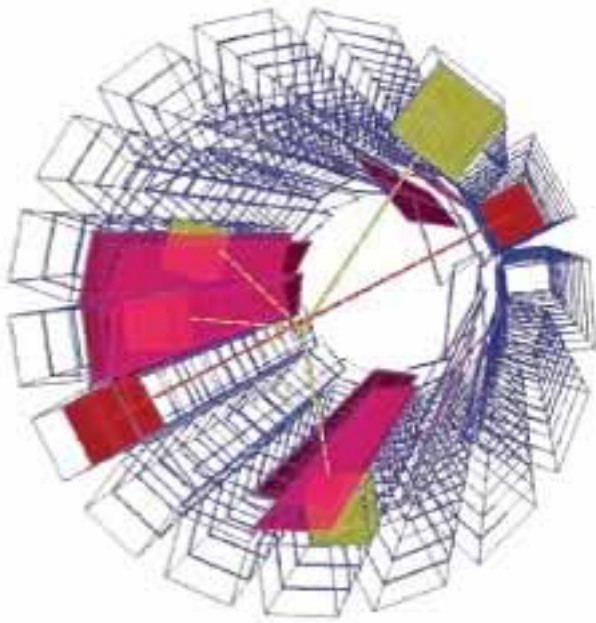
## Nachweis der doppelten Annihilation mit Athena

Wenn ein Antiwasserstoffatom auf ein gewöhnliches Atom an der Elektrodenoberfläche trifft, annihiliert zunächst das Positron des Antiwasserstoffatoms mit einem Elektron aus der Hülle eines Atoms der Fallenelektrode. Dabei entstehen zumeist zwei Lichtquanten mit jeweils der Energie, die der Masse eines Elektrons oder Positrons entspricht, nämlich 511 keV. Aufgrund des Impulserhaltungssatzes werden diese zwei Photonen immer in genau entgegengesetzte Richtungen ausgesandt. Das Antiproton trifft kurz danach auf einen Atomkern des Elektrodenmaterials, in dem sich Neutronen und Protonen befinden. Diese Bestandteile des Atomkerns, auch Nukleonen genannt, sind keine Elementarteilchen, sondern bestehen selber aus jeweils drei Quarks. In den Nukleonen kommen ausschließlich die Quarksorten  $u$  und  $d$  vor, im Antiproton die Antiquarks  $\bar{u}$  und  $\bar{d}$ . Bei der Annihilation eines Antiprotons mit einem Nukleon entstehen in erster Linie die aus je einem Quark und einem Antiquark bestehenden Pionen, und zwar im Schnitt drei geladene und zwei neutrale [2].

Die Athena-Gruppe am CERN verwendet zum Nachweis des charakteristischen Signals der doppelten Annihilation einen höchst komplexen aber sehr kleinen Detektor mit einem Durchmesser von nur 14 cm. Er ist konzentrisch um die Achse der Penning-Falle platziert und besteht aus zwei separaten Teilen. Auf der Innenseite sind in zwei Lagen 8192 Siliziumstreifen-Detektoren angeordnet, die den Durchtritt der geladenen Pionen auf einige Mikrometer genau messen. Außen um den Detektor herum befinden sich 192 etwa

zuckerwürfelgroße Cäsiumiodid-Szintillatoren, die hochenergetische Photonen absorbieren und ihre Energie in Form von Licht im sichtbaren und UV-Bereich wieder abgeben. Dieses Licht wird von Lawinenfotodioden in ein elektrisches Signal umgewandelt, dessen Intensität Rückschluss auf die Energie des ursprünglichen Photons gibt.

Um die räumliche und zeitliche Koinzidenz der beiden Annihilationen nachzuweisen, werden alle Detektordaten miteinander korreliert. Dazu wird zunächst aus den Daten der Siliziumstreifen der Ausgangspunkt der Annihilation des Antiprotons rekonstruiert. Das Signal der Fotodioden erlaubt es zwar nicht, auf ähnliche Weise den Ort der Positron-Vernichtung zu ermitteln. Wenn man allerdings versuchsweise den gleichen Ausgangspunkt für beide Ereignisse voraussetzt, kann man überprüfen, ob die beiden gleichzeitig ausgesandten Photonen tatsächlich wie erwartet genau entgegengerichtet emittiert wurden.



**Abb. 1** *Vollständig analysierter Nachweis eines Annihilationsereignisses. Die gelbgrün eingefärbten Kristalle liegen auf der Spur der geladenen Pionen und registrieren durch deren elektromagnetischen Schauer ein falsches Signal. Dieses wird bei der Offline-Analyse als Untergrund erkannt und nicht berücksichtigt.*

Abbildung 1 zeigt ein auf diese Art vollständig analysiertes Ereignis. Zwar lässt sich wegen der begrenzten Detektoreffizienz und wegen des durch Sekundärprozesse verursachten Untergrundes nur ein kleiner Anteil aller Ereignisse komplett rekonstruieren. Anhand von numerischen Simulationen aller beteiligten physikalischen Prozesse ist es aber möglich, aus den beobachteten Zählraten auf die Anzahl der tatsächlich erzeugten Antiwasserstoffatome zu schließen [3]. Diese Berechnungen haben ergeben, dass jedem vollständig rekonstruierten Ereignis fast 400 weitere Antiwasserstoff-Annihilationen gegenüberstehen, die nicht komplett erfasst werden können.

## Literatur

- [1] A. Einstein, Ann. Phys. **1905**, 18, 639.
- [2] C. Amsler et al., Rev. Mod. Phys. **1998**, 70, 1293.
- [3] M. Amoretti et al., Phys. Lett. B **2004**, 578, 23.