

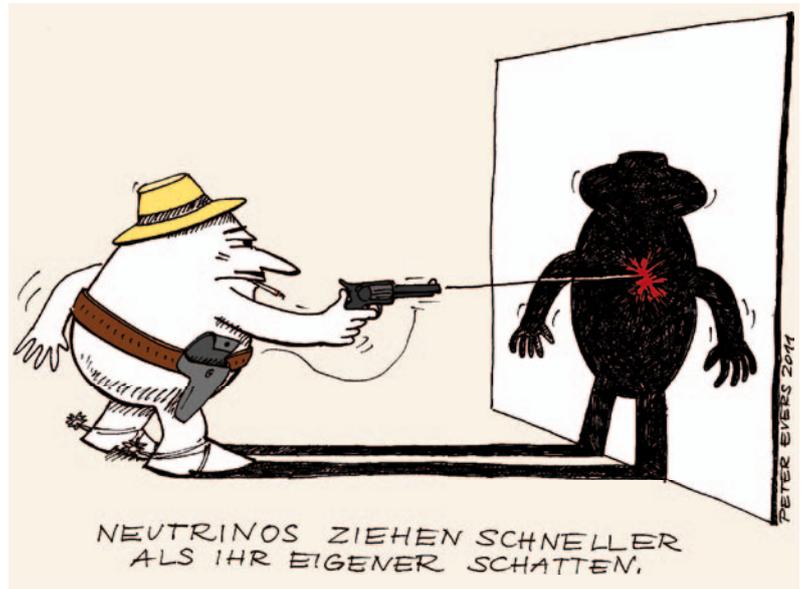
## ■ Wie schnell sind Neutrinos?

Am CERN erzeugte Neutrinos scheinen am 730 Kilometer entfernten Gran Sasso-Labor rund 60 Nanosekunden früher als erwartet anzukommen. Damit wären sie schneller als das Licht.

Wir bedienen keine Neutrinos! Ein Neutrino kommt in eine Bar. – Solche oder ähnliche Sprüche haben in den letzten Wochen reichlich die Runde gemacht. Auslöser dafür war das OPERA-Experiment [1] im italienischen Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS) mit einem revolutionär klingenden Ergebnis: Neutrinos scheinen für die etwa 730 km lange Strecke vom Europäischen Teilchenphysiklabor CERN in Genf zum LNGS in der Nähe von Rom rund 60 Nanosekunden weniger als das Licht zu benötigen [2]. Ein klarer Widerspruch zu Einsteins Relativitätstheorie, der nicht nur in der Fachpresse lebhaft diskutiert wurde.

Das Ziel von OPERA besteht in dem Nachweis, dass sich Myon-Neutrinos, wenn sie die richtige Energie haben, über eine Flugstrecke von mehreren hundert Kilometern in Tau-Neutrinos umwandeln können. Das ist nur möglich, wenn diese Teilchen Masse haben. Solche Neutrinooszillationen wurden schon bei Neutrinos beobachtet, die in der Sonne, in der oberen Atmosphäre oder in Beschleunigern entstehen (vgl. Kap. 13 in [3]). Die Umwandlung von Myon- in Tau-Neutrinos war bislang aber noch nicht nachgewiesen worden.

Am Anfang dieses Experiments steht der SPS-Beschleuniger am CERN, der Protonen auf einen Impuls von 400 GeV/c bringt und sie auf ein Kohlenstoff-Target schießt. Dabei entstehen hauptsächlich Pionen und Kaonen, die von magnetischen Linsen in eine lange Vakuumröhre fokussiert werden, wo sie u. a. in Neutrinos zerfallen, die im Wesentlichen in die gleiche Richtung wie die Pionen/Kaonen weiterfliegen. Da Neutrinos nur der schwachen Wechselwirkung unterliegen, können sie mühelos durch das Erdreich vom CERN zum LNGS fliegen. Deswegen ist eine riesige Zahl von Protonen nötig, damit der Detektor gelegentlich ein Neutrino nachweist. Bei rund



$10^{20}$  Protonen, die auf das Target getroffen sind, hat OPERA etwas über 15 000 Neutrinos nachgewiesen, darunter einige Tau-Neutrinos.

Um die Flugzeit der Neutrinos zu bestimmen, muss man eigentlich nur wissen, wann die Neutrinos ihre Reise antreten und wann sie im LNGS ankommen. Aus der zurückgelegten Strecke ergibt sich dann die Geschwindigkeit. Doch der Teufel liegt natürlich im Detail. So lässt sich der Produktionszeitpunkt der Neutrinos nicht direkt bestimmen. Allerdings kann man mithilfe einer Spule, in der eine Spannung induziert wird, sobald geladene Teilchen hindurch fliegen, die Zeitverteilung der Protonen bestimmen, kurz bevor diese das Target erreichen. Diese Messung ist mit systematischen Kalibrationsunsicherheiten von 5 ns behaftet. Die Zeitverteilung der Protonen lässt sich dann relativ einfach in diejenige der Neutrinos umrechnen, solange der Protonenstrahl und das Target während des 10  $\mu$ s dauernden „Beschusses“ stabil sind (Abb. 1).

Neutrinos, die das LNGS erreichen, können mit dem Detektor oder dem umliegenden Felsen wechselwirken und geladene Teilchen produzieren, die auf die Szintillatoren des OPERA-Detektors treffen. Photomultiplier wandeln das dabei

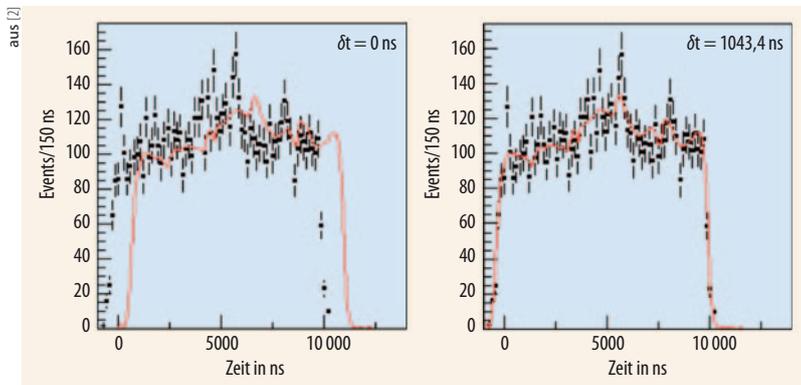
entstehende Licht in elektrische Impulse um, die wiederum von der Elektronik digitalisiert werden. Das Modellieren und Kalibrieren des OPERA-Detektors trägt mit weniger als 4 ns zur Messunsicherheit bei.

Zwar ist es nicht möglich, die Uhren und damit die Flugzeitmessung zwischen CERN und LNGS direkt zu synchronisieren, aber mithilfe der Atomuhren der GPS-Satelliten lässt sich ein einheitlicher Zeitstandard an beiden Orten etablieren. Hierbei kamen „Common-View-Empfänger“ und lokale Cäsium-Atomuhren zum Einsatz. „Common-View“ bedeutet hier, dass die beiden GPS-Empfänger zur Zeitberechnung nur Satelliten nutzen, die sie gleichzeitig empfangen. Dieses Verfahren erlaubt eine besonders präzise Synchronisation der Uhren. Sowohl das Schweizer Bundesamt für Metrologie als auch die Physikalisch-Technische Bundesanstalt haben gezeigt, dass die Uhren mit einer relativen Ungenauigkeit von weniger als 1 ns übereinstimmen. Die unterschiedlichen Verzögerungen und Laufzeiten der Uhrenschnelle wurden jeweils auf mehrere Weisen bestimmt. Diese Unsicherheiten liegen bei 1 bis 3 ns.

Die Entfernung vom Target am CERN zum Eingang des Tunnels, der zum LNGS führt, ließ sich mit

1) Tachyonen sind Teilchen, deren Massequadrat negativ ist

2) Eine Vielzahl von theoretischen Erklärungen und vermeintlichen experimentellen Fehlern sind auf [www.hep.ph.ic.ac.uk/~shitov/nu\\_tachyon\\_arxiv\\_paper\\_short\\_digest.htm](http://www.hep.ph.ic.ac.uk/~shitov/nu_tachyon_arxiv_paper_short_digest.htm) zusammengetragen.



**Abb. 1** Die Zeitverteilung der vom OPERA-Experiment gemessenen Neutrinos (schwarze Punkte) folgt der Verteilung der am CERN erzeugten Protonen (rot). Die linke Abbildung zeigt die beiden Verteilungen ohne Berücksichtigung aller Zeitverzögerungen, rechts ist die best-

mögliche Übereinstimmung zu sehen. Berücksichtigt man noch die gemessenen Korrekturen, entspricht diese Verteilung den 57,8 ns, die Neutrinos zu schnell sind. Der statistische Fehler der Messung beträgt 7,8 ns.

Hilfe einer GPS-Messung bis auf wenige Zentimeter genau vermessen. Die anschließende Triangulation zum Detektor war mit einer Genauigkeit von 0,2 m möglich. Der Gesamtabstand beträgt demnach  $(730\,534,61 \pm 0,20)$  m.

Aus diesen beiden Zutaten ergibt sich die Geschwindigkeit  $v$  der Neutrinos. Das erstaunliche Ergebnis: Die Neutrinos waren unabhängig von der gemessenen Energie  $(57,8 + 11,4 - 9,8)$  ns schneller als die Lichtgeschwindigkeit  $c$ . Dies entspricht einer relativen Abweichung von  $(v-c)/c = (2,37 + 0,47 - 0,4) \cdot 10^{-5}$ .

Bereits 2007 hatte die MINOS-Kollaboration eine ähnliche Messung veröffentlicht, bei der Neutrinos auf der 735 km lange Reise zwischen zwei Neutrinodetektoren 120 ns schneller als das Licht waren [4]. Die Messungenauigkeit war aber mit 70 ns deutlich größer als bei OPERA und ließ daher keine definitive Aussage zu.

Die bisher wohl genaueste Messung der Neutrinogeschwindigkeit ergibt sich aus den Beobachtungen der Supernova-Explosion SN1987A, bei der die Ankunftszeit von sowohl Licht als auch Neutrinos gemessen wurde [5]. Neutrinos und Licht waren dabei 168 000 Jahre unterwegs und wurden innerhalb von wenigen Stunden auf der Erde nachgewiesen. Daraus lässt sich eine Grenze von  $|v-c|/c < 2 \cdot 10^{-9}$  ableiten. Wären diese Neutrinos (sie haben nur ungefähr ein Tausendstel der Energie) genau so schnell wie

die bei OPERA, wären sie vier Jahre vor dem Licht eingetroffen.

Seit der Veröffentlichung der OPERA-Ergebnisse als Preprint gab es eine Flut von Arbeiten, die alle „erklären“ wollen, wo die vermeintlichen Fehler der Messung zu finden seien: Nichtberücksichtigung der Erdkrümmung oder von Effekten der Allgemeinen Relativitätstheorie, falsche Synchronisation der Uhren und vieles mehr. Viele fühlten sich berufen, zur Diskussion beizutragen, aber keiner der Einwände hielt einer Überprüfung stand. Die OPERA-Kollaboration hatte eine saubere Analyse abgeliefert, die bis jetzt nicht zu widerlegen ist.

Inzwischen gelang es mit einer zweiten Messung auch, den Kritikpunkt auszuräumen, dass die Zeitverteilung der Protonen nicht notwendig derjenigen der Neutrinos entsprechen muss. Dazu wurde wiederholt ein nur etwa 5 ns kurzer Protonenpuls generiert, sodass die

eigentliche Verteilung innerhalb dieser Pulse keinen Einfluss auf die Zeitmessung hat. Diese Messung, bei der über einige Wochen nur etwa zwanzig Neutrinowechselwirkungen nachgewiesen wurden, hat die ursprüngliche Messung mit hoher Genauigkeit bestätigt.

Was nun? Sollte dies tatsächlich der erste Hinweis darauf sein, dass ein grundlegender Umbau unseres theoretischen Grundgebäudes notwendig ist? Sind Neutrinos gar überlichtschnelle Tachyonen, die auch in Einsteins Theorien möglich sind, obwohl sie die Kausalität verletzen?<sup>1)</sup> Oder leben wir nicht in einem vierdimensionalen Raum-Zeit-Kontinuum und die Neutrinos haben eine Abkürzung durch den Hyperraum genommen?<sup>2)</sup>

An dieser Stelle sind unzählige Spekulationen möglich. Doch bevor nicht andere Experimente wie MINOS am Fermilab oder T2K in Japan [6] diese Messungen mit einer entsprechenden Genauigkeit bestätigen, würde ich die moderne Physik noch nicht umschreiben. Dennoch: Es ist eine aufregende Zeit, nicht nur für Neutrinophysiker.

**Alfons Weber**

- [1] R. Acquafredda et al. (OPERA Collaboration), JINST 4, P04018 (2009)
- [2] T. Adam et al. (OPERA Collaboration), arXiv:1109.4897
- [3] K. Nakamura et al. (Particle Data Group), J. Phys. G 37, 075021 (2010)
- [4] P. Adamson et al. (MINOS Collaboration), Phys. Rev. D 76, 072005 (2007)
- [5] K. Hirata et al., Phys. Rev. Lett. 58, 1490 (1987); R. M. Bionta et al., Phys. Rev. Lett. 58, 1494 (1987); M. J. Longo, Phys. Rev. D 36, 3276 (1987)
- [6] K. Abe et al. (T2K Collaboration), N.I.M. A 659, 106 (2011)

## KURZGEFASST

### ■ Anstößiger Widerstand

Forscher am Max-Born-Institut in Berlin haben die extrem schnelle Entwicklung des elektrischen Widerstandes in einem Halbleiter beobachtet, indem sie die Bewegung der Elektronen in Echtzeit verfolgten. Dabei konnten sie feststellen, dass die wichtigsten Stoßpartner der durch extrem kurze THz-Pulse beschleunigten Elektronen nicht atomare Schwingungen sind, sondern die positiv geladenen „Löcher“, die etwa die 6-fache Masse des Elektrons haben. P. Bowlan et al., Phys. Rev. Lett. 107, 256602 (2011)

### ■ Noch mehr Erden

Astronomen haben mit dem Kepler-Weltraumteleskop zwei erdgroße Exoplaneten um den Stern Kepler-20 aufgespürt. Der eine hat fast genau Erdgröße, der andere ist mit 0,87 Erdradien sogar etwas kleiner. Bei Kepler-20, der rund 1000 Lichtjahre entfernt ist, konnten bereits drei größere Planeten nachgewiesen werden. Die beiden neu entdeckten Planeten sind nach Aussage der Forscher sehr wahrscheinlich Gesteinsplaneten ähnlich der Erde. F. Fressin et al., Nature, doi:10.1038/nature10780 (2011)