

# Die experimentelle Bestätigung der speziellen Relativitätstheorie

Von J. P. BLASER

Dass EINSTEINS Theorien auch ausserhalb der wissenschaftlichen Welt eine so grosse Wirkung haben konnten und er selbst zum Inbegriff des genialen Forschers und Denkers wurde – mit all den begleitenden Anekdoten –, liegt wohl hauptsächlich daran, dass die Voraussagen der Relativitätstheorie teilweise Vorgänge betreffen, über die wir gefühlsmässig absolut klare Vorstellungen zu haben glauben und wir daher Paradoxen gegenüberstehen. Diese erschienen aber lange Zeit insofern als eher philosophischer Natur, als solche Effekte ohnehin nur bei mit der Lichtgeschwindigkeit vergleichbar schnellen Vorgängen zu erwarten waren. In der Tat waren alle Experimente zur Prüfung der speziellen Relativitätstheorie bis fast zur Mitte unseres Jahrhunderts äusserst schwierige Präzisionsmessungen mit ganz kleinen Effekten.

Inzwischen ist in der Physik der Elementarteilchen ein Gebiet der Wissenschaft betreten worden, wo relativistische Mechanik und Elektrodynamik nicht nur kleine Korrekturen in den klassischen Gesetzen bringen, sondern das Geschehen vollständig dominieren, bis hin zu handfesten technischen Realisierungen wie Beschleuniger. Wir möchten zu zeigen versuchen, mit welcher unglaublicher Genauigkeit und Vollständigkeit EINSTEINS Voraussagen hier bestätigt sind.

Welches sind nun EINSTEINS berühmte Postulate und welche Effekte folgen daraus? Das *erste Postulat*, das der Gleichwertigkeit aller Inertialsysteme, unterscheidet sich interessanterweise nicht vom Relativitätsprinzip, das bereits NEWTON in unheimlich genialer Voraussicht in seinen Axiomen formuliert hat. EINSTEIN hingegen hat dieses Prinzip von der Mechanik auf die Gesamtheit der in Raum und Zeit situierten Vorgänge ausgedehnt und insbesondere erkannt, dass auch der bis dahin als unumstösslich geltende Begriff der absoluten Zeit relativiert werden muss.

Wie früh EINSTEIN von diesen Problemen beunruhigt wurde, erzählt er uns selbst in seinem Artikel in der Festschrift «Hundert Jahre ETH», den er 1955 noch kurz vor seinem Tode schrieb. Er war als Sechzehnjähriger an der Kantonsschule Aarau und berichtet so über «das erste kindliche Gedankenexperiment zur speziellen Relativitätstheorie»:

*«Wenn man einer Lichtwelle mit Lichtgeschwindigkeit nachläuft, so würde man*

ein zeitunabhängiges Wellenfeld vor sich haben. So etwas scheint es aber doch nicht zu geben!»

Damit meinte er wohl, dass auch der schnelle Begleiter der Welle diese als dynamischen Vorgang entsprechend den MAXWELLSchen Gleichungen erleben müsste. Vielleicht war dies der erste Schritt zum *zweiten Postulat*, der absoluten, das heisst vom Referenzsystem unabhängigen Lichtgeschwindigkeit. Aus den beiden Postulaten folgte EINSTEIN die allgemeine Gültigkeit der LORENTZ-Transformationen als neue Kinematik. Diese waren zwar schon vor 1905 entwickelt worden, aber lediglich als beschränkter Versuch (LORENTZ, POINCARÉ), die zwischen der Mechanik und der MAXWELLSchen Theorie der Elektrodynamik aufgetretenen Widersprüche zu beseitigen. Diese waren übrigens die Folge der in den MAXWELLSchen Gleichungen bereits fünfzig Jahre vor EINSTEIN enthaltenen Konstanz der Lichtgeschwindigkeit  $c$ .

Bei der Ausdehnung dieser Vorstellungen auf die Dynamik erkannte EINSTEIN das Äquivalenzprinzip, das heisst die identische Natur von Masse und Energie, das berühmte  $E = mc^2$ . Die Erweiterung von der «trägen» zur «schweren» Masse erfolgte dann später im Rahmen der allgemeinen Relativitätstheorie. Durch das Äquivalenzprinzip verschmolz EINSTEIN die zwei fundamentalen Erhaltungssätze für «Materie» und für «Energie» in völlig unerwarteter Weise in ein einziges Erhaltungsprinzip für die Gesamtenergie, diese bestehend aus der klassischen Bewegungsenergie und der neuen «massebedingten» Ruhenergie.

Wie steht es nun mit der experimentellen Bestätigung dieser Zusammenhänge? Wir wollen aus der Vielfalt der Erscheinungen einige Beispiele herausgreifen:

Die Grundlage bilden die LORENTZ-Transformationen. Im einfachen Fall eines Systems  $S'$  (Koordinaten  $x'$  und  $t'$ ), das sich relativ zum System  $S$  (Koordinaten  $x$  und  $t$ ) mit  $v$  in  $x$ -Richtung gleichförmig bewegt, lauten die Beziehungen:

$$x' = \gamma (x - vt)$$

$$t' = \gamma \left( t - \frac{vx}{c^2} \right)$$

mit  $\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$  als berühmtem relativistischen Faktor.

Die LORENTZ-Transformationen bedingen vorerst zwei Grundeffekte:

- Die *Längskontraktion*, die ein vorbeifliegendes Längenmass verkürzt erscheinen lässt, und zwar um den Faktor  $\frac{1}{\gamma}$ . Wir werden diesen Effekt noch an einem elektrodynamischen Beispiel illustrieren.

Sowie:

- Die *Zeitdilatation*, welche am Beobachter vorbeifliegende Uhren als um den Faktor  $\gamma$  langsamer laufend erscheinen lassen. Auf die frappanteste Konsequenz, das Zwillings-Paradox, kommen wir noch zurück.

Als Folgen davon ergeben sich:

- *Die Geschwindigkeitsaddition.* Die für uns so selbstverständliche Vorstellung, dass ein mit der Mündungsgeschwindigkeit  $u$  von einem mit  $v$  fliegenden Flugzeug abgeschossenes Geschoss relativ zur Erde die Geschwindigkeit  $u + v$  hat, ist falsch. Diese beträgt

$$u' = \frac{u + v}{1 + \frac{uv}{c^2}} < u + v.$$

Mit «irdischen» Geschwindigkeiten ist der Unterschied allerdings unmessbar klein (etwa  $10^{-10}$ ). Hingegen liefert das neutrale Pion  $\pi^0$ , welches etwa 260 Elektronenmassen hat und dessen Masse entsprechend dem Äquivalenzprinzip «verschwindet», wenn es in zwei Gammaquanten zerfällt, eine ideale Möglichkeit: Im Experiment von ALVÄGER et al., CERN, 1964, emittierten  $\pi^0$ , die mit  $v = 0,9998 c$  flogen, elektromagnetische Wellen in Vorwärtsrichtung, deren Geschwindigkeit direkt mit elektronischen Mitteln gemessen wurde, wobei sich genau  $c$  ergab. Ein ähnliches Experiment wurde später am Stanford-Linearbeschleuniger bei noch höherer Energie durchgeführt.

Die genaueste (auf etwa  $10^{-9}$ ) Prüfung der Unabhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit von der Bewegung der Quelle ist kürzlich von BRECHER im astronomischen Bereich vollzogen worden. Ein Röntgenpuls emittierender Pulsar, der in einem Doppelsternsystem umläuft, bietet dazu ein ideales Objekt, da die kleinste Modulation der Lichtgeschwindigkeit wegen der langen Laufzeit der Signale (im untersuchten Fall von über zwanzig Jahren) eine drastische Veränderung der empfangenen Signalfolge ergäbe\*.

Die symbolische Geschwindigkeitsaddition  $c + c = c$  und das zweite Postulat sind damit vollkommen verifiziert.

- *Der Dopplereffekt*, die Frequenzänderung einer Welle bei relativer Bewegung von Quelle und Beobachter, erhält durch die LORENTZ-Transformation einen neuen Term  $\gamma$ , den es erstmals um 1940 nachzuweisen gelang (IVES und STILLWELL). Dadurch wurde im Grunde die Existenz der Zeitdilatation etabliert. Heute lässt sich die Gültigkeit der relativistischen Dopplereffektformel auch bei hochrelativistischen Geschwindigkeiten durch Messung der Energieverteilung der zwei beim Zerfall des oben erwähnten neutralen Pions sehr leicht nachweisen.

*Die Massen-Energie-Äquivalenz* führt zur bekannten Abhängigkeit der Masse von der Geschwindigkeit entsprechend  $m = m_0 \gamma$ . Diese Beziehung wurde erstmals 1916 (GUYE) mit beschleunigten Elektronen nachgewiesen und ist heute tägliches Werkzeug des Teilchenphysikers bei der Berechnung der Kinematik von Erzeu-

---

\* Diesen Schluss zog schon früh DE SITTER aufgrund der visuellen Beobachtung von Doppelsternen. Im Falle der Lichtquanten erwies sich jedoch, dass bereits nach relativ kurzen Strecken durch Streuung an Atomen im Weltraum die mögliche Abhängigkeit der Lichtgeschwindigkeit von der Bewegung der Quelle verlorengeinge.

gungs- und Streuprozessen von Elementarteilchen. Bezeichnenderweise gibt die Äquivalenzbeziehung auch *Teilchen ohne Ruhmassen*, wie Lichtquant und Neutrino, ein Lebensrecht, auch wenn sie sozusagen zu steter Bewegung mit Lichtgeschwindigkeit verurteilt sind.

Konsequenterweise erscheinen in der Natur auch *Bindungsenergien als Massenunterschiede*. In der Kernphysik sind diese gross und leicht mit massenspektroskopischen Methoden zu messen (Fig.1). Diese Massenunterschiede zwischen den Kernen und ihren Bestandteilen sind es auch, die bei der Fission und der Fusion Kernenergie freisetzen.

Die Prozesse der Paarerzeugung und der Annihilation schliesslich demonstrieren die vollständige Umwandelbarkeit von Energie in Materie und umgekehrt, dies in einer absoluten Weise, die sich 1905 auch EINSTEIN nicht erträumen konnte. Das 1932 entdeckte Positron zum Beispiel stellt «*Antimaterie*» dar, das Antiteilchen des gewöhnlichen Elektrons. Die heutige Physik der Elementarteilchen zeigt die völlige Symmetrie auf zwischen Antimaterie und normaler Materie (Fig.2). Letztere ist natürlich nur insofern «normal», als wir selbst aus solcher bestehen. Bei der Erzeu-

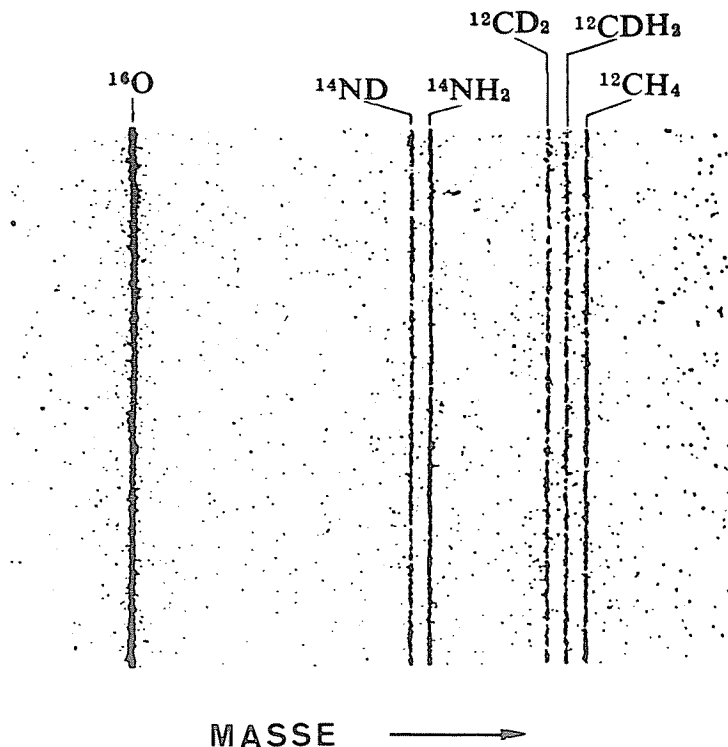


Fig. 1 Massenspektrogramm von Atomen und Molekülen, die gesamthaft aus 16 Nucleonen bestehen. Die Bindungsenergien durch die Kernkräfte äussern sich durch relativistische Massendefekte. Hier ist  $^{16}\text{O}$  weitaus am stärksten gebunden.

gung eines Paares von Protonen (Proton und negativ geladenes Antiproton) wird zum Beispiel aus Energie effektiv die Ruhmasse von zwei Nukleonen geschaffen, Nukleonen wie diejenigen, aus denen alle Kerne der Atome unserer Materie bestehen.



Fig. 2 Ein von einem hochenergetischen Neutrino in einer Blasenkammer am CERN erzeugtes Ereignis (dicker Pfeil). Dabei entstehende Gammaquanten produzieren in mehrfachem Wechsel einen Schauer von Elektronenpaaren (dünne Pfeile). Die Elektronen und ihre Antiteilchen (Positronen) werden durch ein Magnetfeld in entgegengesetzter Richtung aufgewickelt (Photo CERN).

Wie gegenwärtig alle diese Effekte auch rein technisch sind, zeigen uns als eindruckliches Beispiel die *Elektron-Positron-Speicherringe*, wie sie in Hamburg und Stanford in Betrieb stehen und die in den letzten Jahren eines der wirksamsten Werkzeuge der Elementarteilchenphysik geworden sind. Ein europäischer Riesenbeschleuniger dieser Art, LEP genannt, wird gegenwärtig geplant, in welchem die in einem Ringtunnel von 10 km Durchmesser in entgegengesetzter Richtung umlaufenden Elektronen- und Positronenströme mit einer Energie von etwa 100 GeV ( $10^{11}$  eV) aufeinanderprallen sollen (Fig. 3).

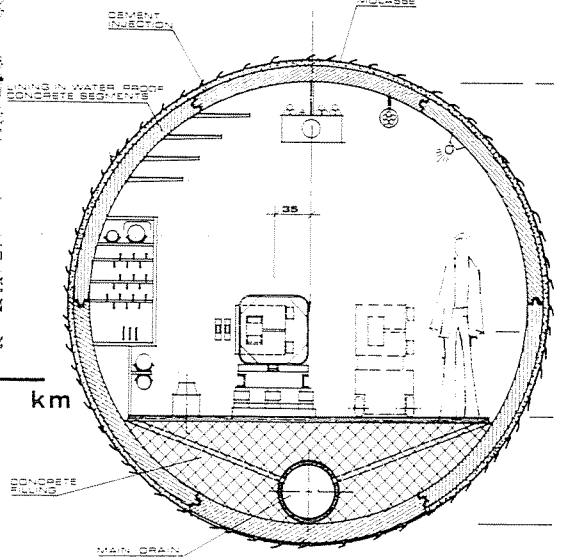
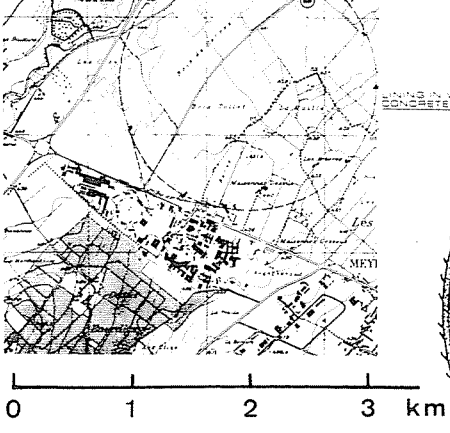
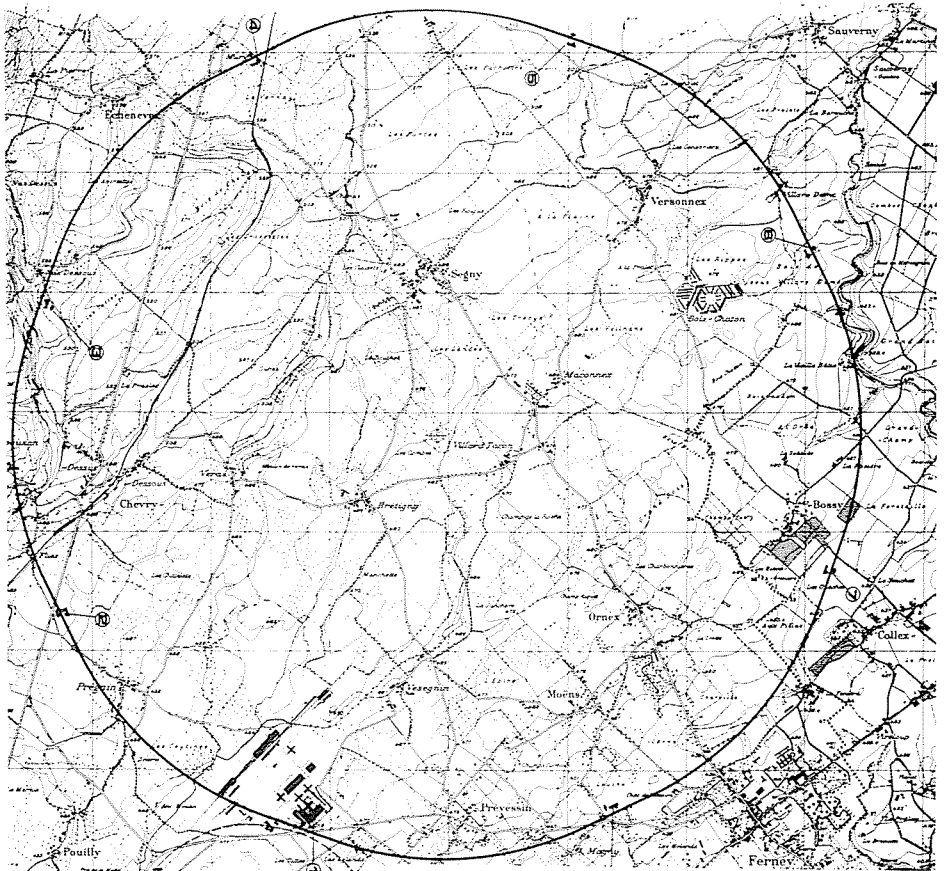
Betrachten wir nun die Vorgänge in einem solchen Beschleuniger. Vorerst werden Elektronen beschleunigt und mit diesen Bremsstrahlungs-Gammaquanten produziert, welche durch Paarbildung dann Positronen zeugen. Es ist heute technisch ohne weiteres möglich, Ströme von solcher Antimaterie von vielen Ampere zu erzeugen. Antiteilchen sind, solange sie im Vakuum bleiben, völlig stabil. So wurden letztes Jahr in einem Experiment am CERN in Genf erstmals Antiprotonen tatsächlich während Tagen «aufbewahrt».

Nun werden die durch Magnete auf einer Kreisbahn geführten Elektronen und Positronen durch elektrische Felder beschleunigt. Mit der Energie steigt die Geschwindigkeit der Teilchen sehr rasch gegen die Lichtgeschwindigkeit  $c$ . Bei der weiteren «Beschleunigung» kann ihre Geschwindigkeit nicht mehr zunehmen, dafür steigt ihre Masse mit der zunehmenden Energie. Die Trägheit der Energie verhindert sozusagen das Überschreiten der Lichtgeschwindigkeit. Um die in unserem Beispiel bei 100 GeV praktisch genau mit  $c$  (auf  $10^{-11}$  genau) umlaufenden Teilchen auf ihrer Kreisbahn zu halten, müssen die Magnete eine wegen der relativistischen Massenzunahme auf  $m = \gamma m_0 = 200\,000 m_0$  entsprechend vergrösserte Zentrifugalkraft kompensieren.

Ein weiterer bemerkenswerter relativistischer Effekt tritt bei solchen – Elektronen-Synchrotrons genannten – Beschleunigern auf: die *Synchrotronstrahlung*. Auf ihrer Bahn erfahren die Elektronen eine aus den Gesetzen der Kreisbewegung folgende Zentripetalbeschleunigung. Diese führt nach der Elektrodynamik zur Ausstrahlung elektromagnetischer Wellen, und zwar genau so, wie dies eine radial gerichtete Dipolantenne am Ort des Teilchens tun würde. Bei relativistisch schnell umlaufenden Elektronen wird nun aber diese allseitige Ausstrahlung tangential vorwärts in einen Kegel mit dem Öffnungswinkel  $1/\gamma$  gebündelt, bei unserem Beispiel etwa eine Bogensekunde (Fig. 4)! Diese relativistische Konzentration macht aus einem Synchrotron die weitaus intensivste Strahlungsquelle im UV- und Röntgenbereich und dadurch zu einem wichtigen Forschungsinstrument. Die Leistung dieser Strahlung wäre beim LEP riesig gross, etwa 20 Megawatt von Synchrotronstrahlung, Leistung, die dem dadurch «gebremsten» Strahl wieder zugeführt werden muss!

►

Fig. 3 Der geplante europäische grosse Elektron-Positron-Speicherring (LEP) für Energien von 70 bis 100 GeV pro Strahl. Auf der Karte der Tunnel von 7 km Durchmesser. Rechts der Tunnel im Querschnitt mit den Führungsmagneten. Unten links auf der Karte die gegenwärtigen Anlagen des CERN, gestrichelt der Tunnel des 400-GeV-Protonsynchrotrons (SPS).



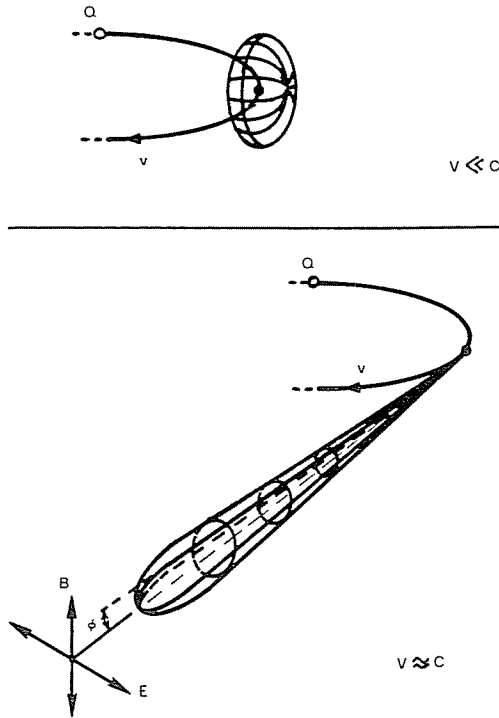


Fig. 4 Die auf einer Kreisbahn gleichförmig umlaufende Ladung strahlt. Im relativistischen Bereich verformt sich die torusförmige Ausstrahlung zu einer scharfen, vorwärts gerichteten Keule: die Synchrotronstrahlung.

Die Synchrotronstrahlung ist auch im Weltall häufig und spielt eine wichtige Rolle, so bei Supernovahüllen und bei Pulsaren, indem sie uns direkte Information über kosmische Magnetfelder und Teilchenenergien liefert.

Wenden wir uns nun dem berühmtesten Effekt, dem *Zwillings-Paradox* zu. EINSTEIN selbst sagte 1905 aufgrund der Zeitdilatation folgendes voraus:

«Befinden sich in A zwei synchron gehende Uhren und bewegt sich die eine derselben auf einer geschlossenen Kurve mit konstanter Geschwindigkeit  $v$ , bis sie wieder nach A zurückkehrt, was  $t$  Sekunden dauern möge, so geht die letztere Uhr bei ihrer Ankunft in A gegenüber der unbewegt gebliebenen um  $\frac{tv^2}{2c^2}$  Sekunden nach.»

Die Figur 5 erläutert die Situation. Interessanterweise gibt EINSTEIN für die Altersdifferenz nur einen Näherungsausdruck. Er konnte ja nicht ahnen, dass schon sechzig Jahre später ein voller Test im hochrelativistischen Bereich vollzogen würde. Mit Paradox meint man hier zweierlei: erstens das Gefühl, dass es unmöglich so sein kann; zweitens – subtiler – die Tatsache, dass der Effekt symmetrisch sein sollte, denn jeder Zwilling reist ja relativ zum andern. Einen Unterschied zum zu Hause



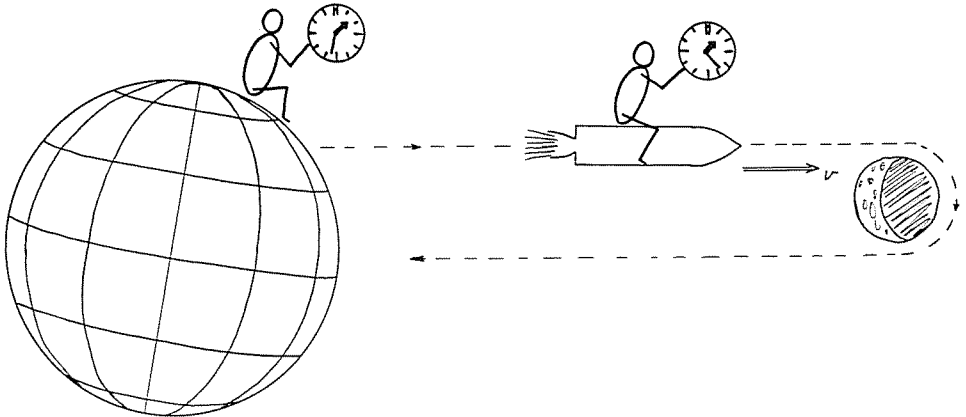


Fig. 5 Zum Zwillingsparadoxon bei der Raketenfahrt zum Mond und zurück.

bleibenden erfährt aber der Raketenzwilling durch drei Phasen der Beschleunigung bei Start, Umkehr und Landung. Die Tatsache, dass man es dann mit beschleunigten Referenzsystemen zu tun hat, führte zu zahlreichen, bis in die jüngste Zeit anhaltenden Kontroversen über die Frage, ob der Effekt korrekt durch die spezielle Relativitätstheorie beschrieben werden darf. Es ist zu hoffen, dass diese, wie ich meine, unnötigen Zweifel angesichts des gemessenen Effekts ein Ende finden.

Die Teilchenphysik stellt uns für ein Experiment ideale Zwillinge in der Gestalt der *Müonen* zur Verfügung. Sie haben eine «Lebensdauer» von etwa zwei Millionstel Sekunden, und ihr «Tod» lässt sich einzeln leicht registrieren. Im Experiment von FARLEY et al., CERN, 1968 und 1975 (Fig. 6a), ist genau die EINSTEINSche Situation realisiert: ein in Ruhe lebender Zwilling A und sein im Kreise reisender Bruder B, der periodisch zurückkehrt und sich erkundigt, ob sein Zwillingsbruder noch lebt. Man stellt tatsächlich fest, dass der mit 99,9% der Lichtgeschwindigkeit reisende Zwilling  $\gamma = 20$ mal langsamer altert als der ortsfeste Zwilling (Fig. 6b). Da der Zerfall des Müons nach denselben quantenmechanischen Prozessen erfolgt, welche auch die biochemischen Vorgänge bestimmen, kann kein Zweifel darüber bestehen, dass auch die biologische Zeit der relativistischen Zeittransformation unterliegt.

Trotzdem war es hochinteressant zu versuchen, den Zwillings effekt an makroskopischen Uhren zu prüfen. Die Gelegenheit, dies anlässlich der Apolloflüge zu tun (Fig. 5), wurde verpasst. In der Tat hätte ein Mondastronaut, ausgerüstet mit einer hochpräzisen *Cäsiumstrahl-Atomuhr* am Handgelenk, bei der Rückkehr festgestellt, dass er um einige hundert Mikrosekunden jünger geblieben ist als wir. Zu vorgekommen sind ihm HAEFELE und KEATING, die 1971 mit solchen Uhren als normale Passagiere der «Concorde» um die Welt flogen und die erwartete Verjüngung von ca.  $0,2\mu\text{s}$  mit einer Genauigkeit von 10% tatsächlich nachweisen konnten. Interessant ist, dass bei solchen Versuchen zwei Effekte sich überlagern, aber leicht getrennt werden können: die Zeitdilatation der speziellen Relativitätstheorie und

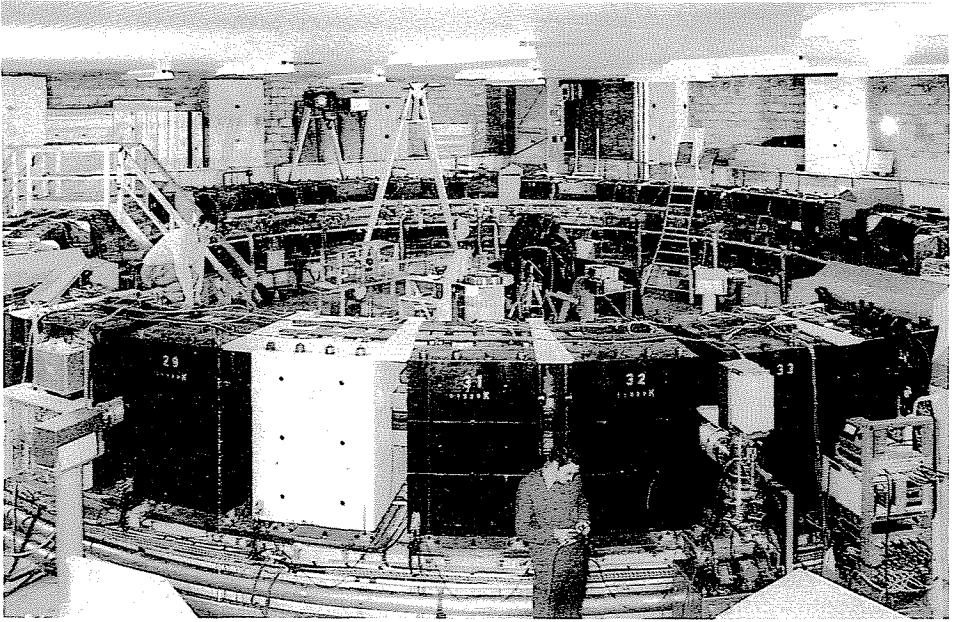
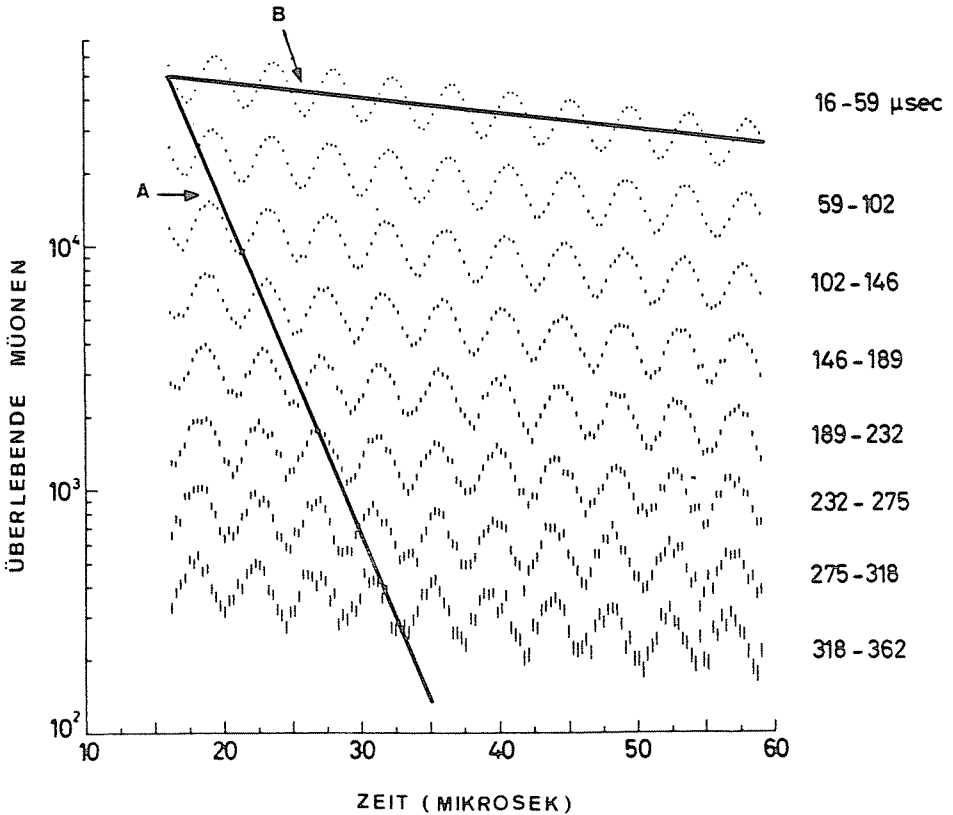
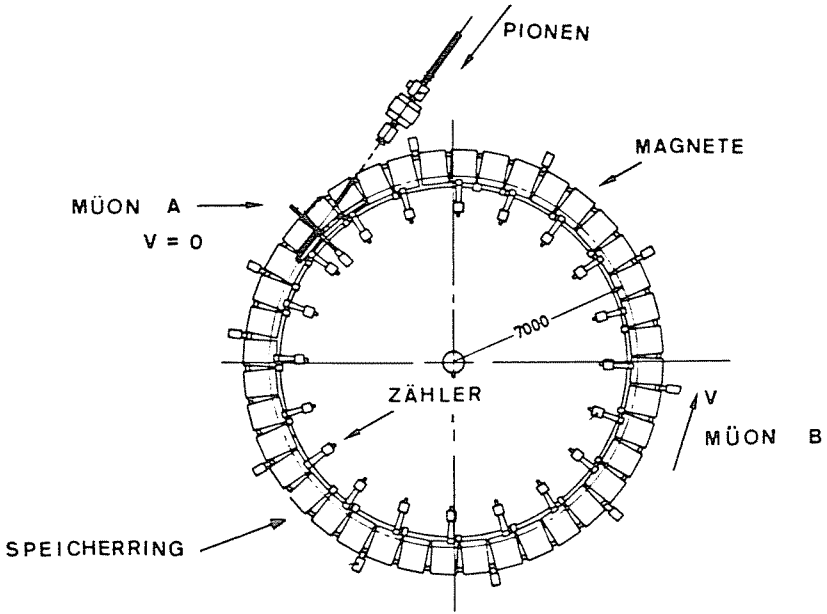


Fig. 6a Der Müonenspeicherring, mit dem am CERN der Zwillingseffekt mit grosser Genauigkeit nachgewiesen wurde. Die Magnete führen die Teilchen auf einer Kreisbahn von 14 m Durchmesser (Photo CERN).

der Einfluss des Gravitationspotentials auf den Gang der Uhr entsprechend der allgemeinen Relativitätstheorie.

Ich möchte schliessen mit einem weniger spektakulären, aber vielleicht noch beklemmenderen Effekt, nämlich einer alltäglichen Wirkung, die von einem essentiell relativistischen Effekt herrührt, und dies erst noch bei der lächerlichen Geschwindigkeit von weniger als Schneckentempo. Es ist die Zugkraft einer Lokomotive, letztlich zurückzuführen auf die magnetische Kraft auf einen elektrischen Strom. Die LORENTZsche Kraftformel sagt, dass auf eine relativ zu einem stromführenden Draht ruhende Ladung keine Kraft wirkt. Setzen wir uns in Gedanken auf ein mit den Elektronen wanderndes Referenzsystem (Fig.7): Der Strom durch den Draht erzeugt immer noch dasselbe Magnetfeld, nur wird der Strom nicht mehr von den nun ruhenden Elektronen verursacht, sondern durch die den Draht bildenden Kupferionen, welche in entgegengesetzter Richtung wandern. In diesem System bewegt sich nun aber die Ladung, also wirkt eine LORENTZkraft! Es kann natürlich

Fig. 6b Die durch den Zerfall der Pionen entstehenden Müonen werden einerseits gestoppt (Müon A) und andererseits bei 99,9% der Lichtgeschwindigkeit im Speicherring (Müon B) bis zum Zerfall «aufbewahrt». Die in den Zählern registrierten Zerfälle ergeben entsprechend der Relativitätstheorie eine zwanzigmal grössere Lebenserwartung für das «reisende» Müon B. (Die wellenförmige Modulation der Kurve rührt von der Drehung des Spins der Müonen im Magnetfeld her, was das Hauptziel der Messung war.)



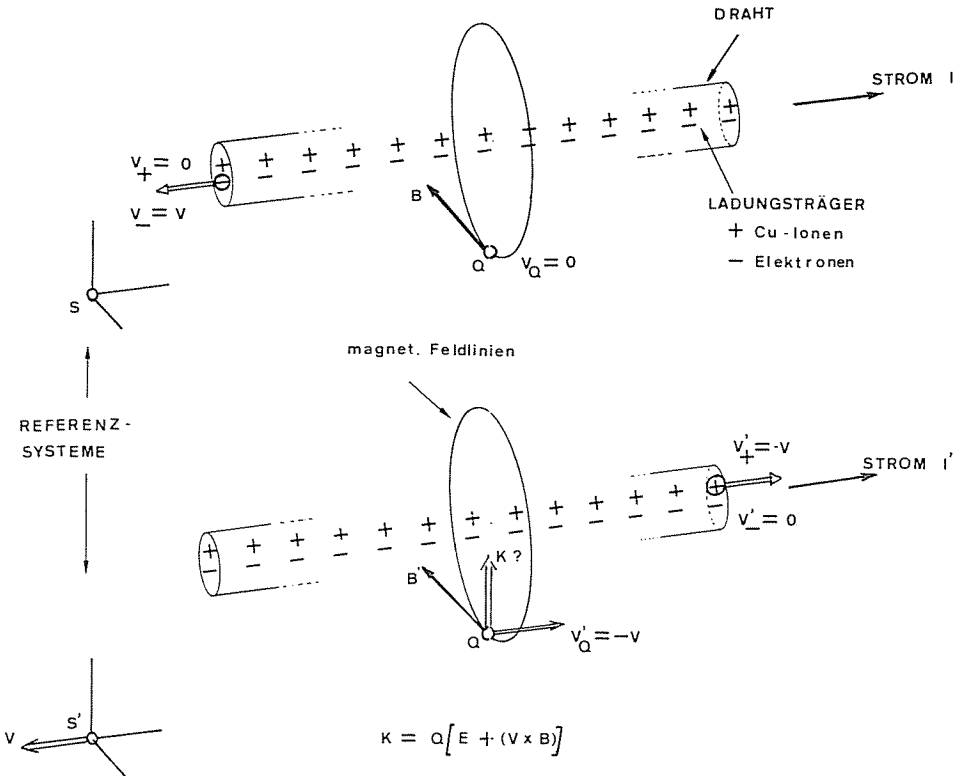


Fig. 7 Die Erzeugung eines Magnetfeldes durch einen stromführenden Draht und dessen Kraftwirkung auf eine bewegte Ladung, von zwei Referenzsystemen aus betrachtet (siehe Text).

nicht sein, dass eine leichte Bewegung des Beobachters mit Bruchteilen eines Millimeters pro Sekunde eine Kraft bedingt. In der Tat tritt eine diese kompensierende elektrische Kraft auf, und zwar ist diese auf die relativistische Transformation der Ladungsdichte zurückzuführen. Während nämlich die Ladung relativistisch invariant ist, erleidet ein Drahtstück, das eine bestimmte Anzahl Ladungen enthält, eine LORENTZ-Kontraktion entsprechend dem Faktor  $\gamma$ , in diesem Beispiel etwa  $10^{-24}$ . Dies bewirkt nun, dass die positiven und negativen Ladungen sich nicht mehr genau aufheben und ein elektrisches Differenzfeld erzeugen. Dies wird üblicherweise als Wirkung eines Magnetfeldes interpretiert, ist aber in Wirklichkeit ein schon bei kleinsten Geschwindigkeiten auftretender Effekt der speziellen Relativitätstheorie. Das Ungeheuerliche dieses Differenzeffektes wird durch folgenden Vergleich klar: Das elektrische Feld der Ladungen im Draht ändert so, wie sich das Schwerefeld der Erdkugel bei Wegnahme einer einzigen Schaufel voll Erde verkleinern würde!

Wir stehen also mit Staunen vor einem grossen Gebäude, alle denkbaren Vorgänge in Raum und Zeit umfassend, dessen einzelne Säulen mit absoluter Präzi-

sion passen. EINSTEIN, der Architekt, hat mit genialer Intuition und – mit Ausnahme des MICHELSON-Versuchs – ohne experimentelle Evidenz das in seiner Ökonomie verblüffende Fundament geschaffen, das sich als tragfähig für alle Wissenschaften, vom Elementarteilchen zum Universum erweisen sollte. Mit Ehrfurcht gedenken wir heute dieses grossen Menschen.

Adresse des Autors:

Prof. Dr. JEAN-PIERRE BLASER, Professor für Experimentalphysik ETHZ, Büro: SIN,  
CH-5234 Villigen.