

9. Relativität räumlicher und zeitlicher Bezüge

Die moderne Physik kann durchaus als brutal bezeichnet werden, was ihren Umgang mit unseren klassischen Vorstellungen über die Welt betrifft:

- Der Zusammenhang zwischen Ursache und Wirkung, oder Kausalität, erweist sich als nicht eindeutig. Die materielle Wirklichkeit entfaltet sich in Möglichkeiten, von denen sich eine als Tatsache manifestiert.
- Die Grundbausteine der Materie, also die Atome oder Elektronen oder Kernteilchen erweisen sich als 'nicht-objektiv'. Ihre Wirkungen sind kontextabhängig. Manchmal wirken sie wie Wellen und manchmal wie Teilchen, je nachdem, wie man sie beobachtet.
- Und diese Grundbausteine bewegen sich nicht auf Bahnkurven. Ihre Wirkung breitet sich nichtlokal von der Ursachenquelle zum beobachteten Phänomen hin aus. Das hat of recht verblüffende Effekte. Zum Beispiel kann ein so genannter Wegedetektor über viele Kilometer hinweg den Ausgang eines Experimentes beeinflussen, selbst wenn er gar nichts registriert.

In den vorausgehenden Kapiteln haben wir solche Effekte sorgfältig diskutiert. Unser Denken, das an der klassischen Welt gewachsen ist und diese gemäß unserer Hypothese sogar geformt hat, kommt da nicht mehr mit. Wir haben Vorstellungen über Raum, Zeit und Wirkungen, die mit der von uns erlebten Wirklichkeit nicht kompatibel sind.

Die oben aufgeführten merkwürdigen Eigenschaften der Quantenmechanik resultieren aus der Unschärfe von Raum und Zeit. Wir stellen uns einen Raum vor, an dem jedes Objekt eine beliebig genau festgelegte Position hat, und wir stellen uns eine Zeit vor, in der jeder Augenblick beliebig genau festgelegt werden kann. Zenon von Elea und Aristoteles haben aber schon vor über 2000 Jahren erkannt, dass das so nicht sein kann.

Und vor etwa 100 Jahren hat nun Albert Einstein herausgefunden, dass unsere Vorstellungen über Raum und Zeit noch ein viel fundamentaleres Problem hat. Raum und Zeit sind relativ. Das hat jeder schon gehört. Aber was bedeutet es?

Im Grunde bedeutet es, dass wir uns Raum und Zeit überhaupt nur vorstellen, dass Raum und Zeit Bewusstseinsphänomene sind. Wir meinen oft, Raum und Zeit unmittelbar zu erleben, aber das tun wir nie. Wir erkennen Objekte und wir erleben die Anordnung dieser Objekte als Raum. Raum ist eine Ordnungsbeziehung zwischen objektiven Bewusstseinsinhalten und hat keine eigenständige, objektive Existenz. Und Zeit erleben wir als eine Beziehung von Gedächtnisinhalten und Projektionen auf eine mögliche Zukunft.

Wir glauben, in einen Weltenraum hineingeboren worden zu sein, aber unsere Existenz gründet sich nicht auf Raum und Zeit. Dies ist eine logische Schlussfolgerung aus den Messungen der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Lichtsignalen (Lichtgeschwindigkeit) c . Die Messungen zeigen, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Lichtwirkungen unabhängig von der Bewegung des Bezugssystems immer gleich ist:

$$\underbrace{c'}_{\substack{\text{Lichtgeschwindigkeit} \\ \text{im bewegten} \\ \text{Bezugssystem}}} = \underbrace{c}_{\substack{\text{Lichtgeschwindigkeit} \\ \text{im ruhenden} \\ \text{Bezugssystem}}} \neq \underbrace{c + v^{(\text{Bezugssystem})}}_{\substack{\text{Addition von Ge-} \\ \text{schwindigkeiten im} \\ \text{absoluten Raum}}}. \quad (9-1)$$

In einem absoluten (mathematischen) Raum addieren sich Geschwindigkeiten. Das geht schon aus ihrer Definition hervor. Wenn ich stehend auf einer Rolltreppe für die Strecke von *10 Metern* ganze *10 Sekunden* brauche, dann kann ich die gleiche Strecke auch in der halben Zeit zurücklegen. Ich muss nur zusätzlich mit derselben Geschwindigkeit der Rolltreppe auf dieser vorwärts laufen.

Das ist eine einfache Rechnung, sie gilt aber nicht für Lichtsignale. Lichtsignale brauche für eine bestimmte Strecke immer dieselbe Zeit, unabhängig vom Bezugssystem. Daher kann es nicht sein, dass wir alle in einem gemeinsamen, absoluten Raum leben. Das wollen wir im nächsten Abschnitt etwas eingehender überlegen.

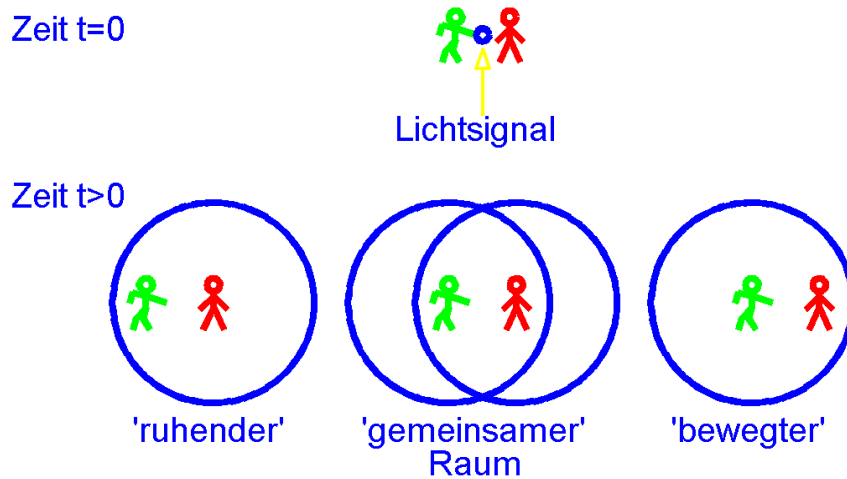
Der individuelle Charakter der Raumzeit

Wie man die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Lichtsignalen hochpräzise messen kann, wurde im Kapitel 2 anhand des Michelson-Interferometers schon ausgeführt. Das Ergebnis aller bekannten Messungen bis heute ist, dass sich Lichtsignale unabhängig von der Bewegung des Bezugssystems nach allen Richtungen mit derselben Geschwindigkeit c ausbreiten. Das hat skurrile Konsequenzen. Zum Beispiel kann man die raum-zeitlichen Bezüge eines ruhenden und eines bewegten Beobachters nicht gleichzeitig in einem Diagramm eintragen. Ein solches Diagramm gibt immer die Bezüge in einer Raum-Zeit an, jeder Beobachter hat aber seine eigene Raum-Zeit.

Wir nehmen an, wie in Abbildung 9-1 dargestellt, dass sich ein Beobachter an einem anderen gleichförmig vorbeibewegt und dass sie im Moment der Begegnung ein Lichtsignal aussenden. Da sich dieses Lichtsignal unabhängig von der Bewegung des Bezugssystems nach allen Richtungen mit der Geschwindigkeit c ausbreitet, kann sich jeder der beiden Beobachter im Zentrum einer 'Lichtwirkungskugel' erleben. Der Radius der Kugeln wächst mit der Zeit. Das heißt: jeder der beiden Beobachter kann zur Zeit T in der Entfernung $R=cT$ zu sich eine Lichtwirkung registrieren, zum Beispiel auf einem Photopapier.

Der Versuch in Abbildung 9-1, dies in einem Diagramm festzuhalten, schlägt fehl! Wir können links die raum-zeitlichen Bezüge des Ruhenden zeichnen, oder rechts die des Bewegten. Zeichnen wir in der Mitte die Bezüge beider Beobachter ein, bekommen wir zwei Lichtsignalkugeln, was jedoch mit dem Experiment nicht in Einklang steht. Jeder Beobachter weist durch seine Messungen ja nur eine einzige Lichtsignalkugel nach.

Das alles zeigt, dass die raum-zeitlichen Bezüge nicht vom Beobachter getrennt werden können, sie sind Teil des Beobachters. Eine für alle Beobachter gemeinsame Raum-Zeit gibt es nicht und die Angabe von raum-zeitlichen Bezügen ohne Bezug auf den Beobachter ist nicht möglich. Raum ist Bewusstseinsraum und Zeit ist Bewusstseinszeit. Sie sind subjektive Eigenschaften eines Individuums, das eine objektive Welt erlebt.



Zwei Beobachter bewegen sich relativ zueinander und lösen dabei ein Lichtsignal aus (oben). Das Lichtsignal breitet sich kugelförmig aus und beide bleiben im Zentrum dieser Signalkugel, obwohl sie sich voneinander entfernen. In einem gemeinsamen, objektiven Raum (unten mitte) ist das nicht möglich. Jeder erlebt die Ausbreitung des Lichtsignals in einem eigenen, individuellen Raum, einem 'ruhenden' (unten links) und einem 'bewegten' Raum (unten rechts).

Abbildung 9-1

Die kollektive Grundlage von Lichtphänomenen

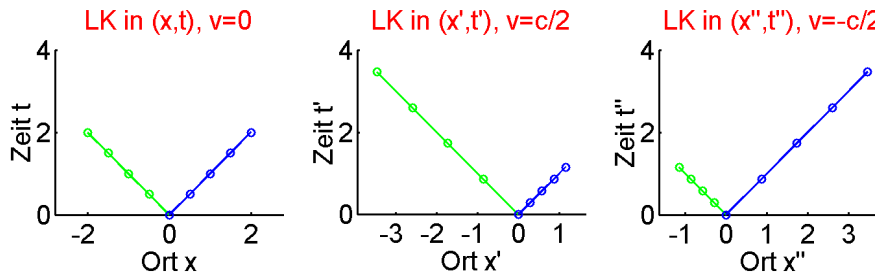
Der Individualität raumzeitlicher Bezüge zum Trotz basieren auch Lichtphänomene auf einer allen Beobachtern gemeinsamen Grundlage. Wir Menschen erleben gemeinsame ein und dieselbe materielle Welt und ein und dieselben Lichtphänomene, nur in mehr oder weniger unterschiedlichen raum-zeitlichen Bezügen. Dass unsere Welterfahrung doch kollektiv ist kommt sehr schön in der Transformationsformel zum Ausdruck, mit der Raum-Zeit-Koordinaten in jedes beliebig (gleichförmig) bewegte Bezugssystem umgerechnet werden können. Es ist die berühmte Lorentz-Transformation:

$$\begin{aligned} \text{Transformation Raumkoordinate} & \quad x' = \gamma(x - vt); & (9-2) \\ \text{Transformation Zeitkoordinate} & \quad t' = \gamma(t - xv/c^2); \\ \text{Zerrfaktor} & \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \end{aligned}$$

Sind die Raum-Zeit-Koordinaten (x, t) eines Ereignisses bekannt, so berechnet man mit dieser Lorentz-Transformation die entsprechenden Koordinaten (x', t') in einem Bezugssystem, das sich mit der Geschwindigkeit v relativ zum ursprünglichen Bezugssystem bewegt.

Die Grundlage dieser Transformation ist einfach die Invarianz der Lichtgeschwindigkeit c : Ein Lichtsignal breitet sich in jedem Bezugssystem kugelförmig aus und genau das berücksichtigt die Lorentz-Transformation (9-2).

Wir sehen das in Abbildung 9-2. Im linken Diagramm sind Raum-Zeit-Punkte eingetragen, an denen ein Lichtsignal registriert werden kann, das seinen Ursprung an den Koordinaten $(x, t) = 0$ hat. Die Ausbreitung eines Lichtsignals stellt sich hier als Kegelmantelquerschnitt dar, zu jedem Zeitpunkt t bildet er jedoch einen Kreisquerschnitt.



Lichtkegel (LK) in verschiedenen Bezugssystemen. Die Krinkel entsprechen Ort-Zeit-Messungen oder -Ereignissen und werden entsprechend der Lorentz-Transformation (9-2) in die verschiedenen Bezugssysteme transformiert. Der Öffnungswinkel des Lichtkegels verändert sich bei den Transformationen nicht, aber die einzelnen Ereignisse verschieben sich.

Abbildung 9-2

Mit Hilfe der Lorentz-Transformation (9-2) kann nun jeder Krinkel (jedes Ereignis) in ein bewegtes Bezugssystem umgerechnet werden. Wir sehen in der Mitte und rechts in Abbildung 9-2, dass sich die Krinkel dabei verschieben, der Öffnungswinkel des Kegelmantels jedoch gleich bleibt. Und wegen $x=ct$ entspricht dieser Öffnungswinkel ja gerade der Lichtgeschwindigkeit c . Die Lorentz-Transformation (9-2) rechnet Ereigniskoordinaten also genau so in bewegte Bezugssysteme um, dass die Geschwindigkeit der Lichtausbreitung immer denselben Wert c hat.

Das so genannte Zwillingsparadoxon

Durch die Lorentz-Transformation werden Raum- und Zeitstrecken verzerrt, sie werden gedehnt oder verkürzt. Das sind durchaus messbare Phänomene. Im täglichen Leben eines Hochenergiephysikers spielen sie eine ganz entscheidende Rolle. Zum Beispiel erzeugt die Höhenstrahlung in der oberen Erdatmosphäre hochenergetische Wirkungszustände, die so genannten Myonen. Sie existieren nur einen ganz kurzen Augenblick (2^{-6} Sekunden) und müssten eigentlich dort in ca. 50 km Höhe gleich wieder zerfallen. Tatsächlich erreichen sie aber die Erdoberfläche und können in entsprechenden Laboratorien nachgewiesen werden. Das ist allein darauf zurückzuführen, dass für sie wegen ihrer hohen Geschwin-

digkeit der Weg zur Erdoberfläche verkürzt und die Zeitspanne, die ihnen zur Verfügung steht, verlängert ist.

Die Raum-Zeit-Verzerrungen spielen aber auch in unserem täglichen Leben eine immer größere Rolle. Für die Satellitennavigationssysteme, die in unseren Fahrzeugen immer mehr Verbreitung finden (GPS), sind sie durchaus relevant. Um die extrem gute Ortsauflösung dieser Geräte von wenigen Metern erreichen zu können, müssen die Signallaufzeiten von den Satelliten zum GPS-Empfänger extrem genau bestimmt werden. Dabei spielen diese Verzerrungen eine bedeutende Rolle und müssen berücksichtigt werden.

Um diese Verzerr-Effekte etwas besser diskutieren zu können, betrachten wir ein etwas hypothetisches, dafür aber berühmtes Beispiel eines ungleichen Zwillingspaars. Einer der Zwillinge ist sehr unternehmungslustig und begibt sich in einer Rakete auf eine kosmische Reise. Der andere ist der Nesthocker, der zu Hause auf die Rückkehr seines Bruders wartet. Nach der Rückkehr stellen die beiden fest, dass der Reisende weniger gealtert ist als der Nesthocker. Wie kommt das?

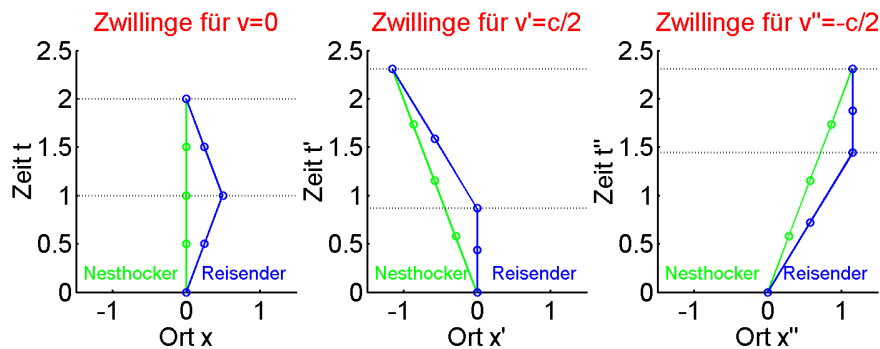
In Abbildung 9-3 ist links das Ruhesystem des Nesthockers dargestellt und wir sehen verschiedene Ereignispunkte des Nesthockers und des Reisenden. Während der Nesthocker immer am gleichen Ort $x=0$ bleibt, bewegt sich der Reisende für eine Zeiteinheit vom Nesthocker fort und kehrt dann zu ihm zurück.

In der Mitte von Abbildung 9-3 sehen wir das Ruhesystem des Reisenden bei seinem Abflug. In diesem Bezugssystem sieht es so aus, als würde sich der Nesthocker bewegen und der Reisende ruhen. Die Ereignispunkte wurden einfach Punkt für Punkt vom linken Bild mit Hilfe der Lorentz-Transformation (9-2) in dieses Diagramm übertragen. Jeder kann dies mit einem Taschenrechner nachvollziehen.

Auffallend ist, dass in diesem (mittleren) Bezugssystem der Umkehrpunkt des Reisenden früher markiert ist als im Ruhesystem des Nesthockers. In diesem Bezugssystem braucht er nur $T=0.87$ Zeiteinheiten, um bis zum Umkehrpunkt zu kommen. Und auch für seine Heimfahrt, für die das Ruhesystem im rechten Diagramm gezeichnet ist, braucht er weniger Zeit.

Dies erklärt, warum er während seiner Reise weniger gealtert ist als sein häuslicher Bruder. Es ist einfach so wegen der Verzerrung der räumli-

chen und zeitlichen Bezüge. Für den Nesthocker vergehen so 2 Zeiteinheiten, für den Reisenden nur 1.7 Zeiteinheiten.



So genannte Weltlinien (Verbindungslinien zwischen Ereignissen) in drei verschiedenen Bezugssystemen für zwei Beobachter, einen ruhenden und einen bewegten. Die Beobachter entfernen sich zunächst voneinander und treffen sich dann wieder. Da sich ihre Lebenszeit immer auf das Ruhesystem bezieht, in dem sie sich gerade befinden, vergeht für den Nesthocker mehr Zeit als für den Reisenden. Das so genannte Zwillingsparadoxon besteht nun darin, dass ja beide in gleichberechtigten Bezugssystemen sind und daher keine Unterschiede im Zeitverlauf auftreten sollten.

Abbildung 9-3

Die Paradoxie besteht nun darin, dass beide Brüder in gleichberechtigten Bezugssystemen sind. Beide Brüder entfernen sich voneinander und kommen dann wieder zusammen. Warum sollte nun einer jünger und der andere älter sein? Zwischen beiden Brüdern besteht jedoch der Unterschied, dass der Reisende während der Reise das Bezugssystem mehrfach wechselt und der Nesthocker nicht. Dies löst das Paradoxon auf.

Das Wesen der Masse

Mindestens so berühmt, wenn nicht gar berühmter als das Einstein'sche Zwillingsparadoxon ist die Formel

$$\text{Energie} = \text{Masse} \cdot (\text{Lichtgeschwindigkeit})^2. \quad (9-3)$$

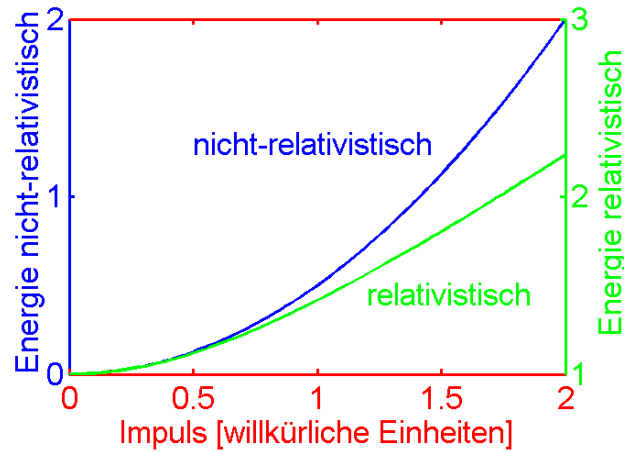
Sie besagt, dass Masse und Energie einander entsprechen, dass Masse nichts anderes als eine spezielle Art von Energie ist. Auf dieser Formel basiert die Funktionsweise der Atomkraftwerke und der Atombomben.

In beiden Fällen wird die Masse der Materie verringert und entsprechend (9-3) sehr eindrücklich in eine enorme Energiemenge umgesetzt. Die Formel ist in der Hochenergiephysik überaus wichtig und wird immer und überall bestätigt.

Einen wesentlichen Aspekt von Masse haben wir bereits im Kapitel 5 (Die Grundgesetze der Physik ...) kennen gelernt. Masse verknüpft Impuls und Geschwindigkeit einer Wirkung so miteinander, dass die Wirkung in allen bewegten Bezugssystemen gleich ist. Dies hat auf die nicht-relativistische Energiefunktion geführt:

$$Energie = \frac{1}{2} \frac{(\text{Impuls})^2}{\text{Masse}}. \quad (9-4)$$

Energie drückte aus, wie sich eine Wirkung mit der Zeit ändert. Bei der Ableitung dieser Formel wurde nicht berücksichtigt, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit c von Lichtsignalen in allen Bezugssystemen gleich ist. Geschwindigkeiten wurden einfach addiert, so wie das bei den kleinen Geschwindigkeiten unseres Alltagslebens eben richtig ist.



Vergleich der nicht-relativistischen (9-4) mit der relativistischen Energiefunktion (9-5). Masse und Lichtgeschwindigkeit wurden auf den Wert 1 gesetzt. Für kleine Impulse stimmen die Funktionen bis auf die Konstante mc^2 miteinander überein. Die Konstante äußert sich in den unterschiedlichen Skalenwerten der beiden Energie-Achsen (Ordinaten).

Abbildung 9-4

Wenn wir nun dieser Eigenart der Ausbreitung von Lichtsignalen gerecht werden wollen, müssen wir die Ableitung der Energiefunktion ein klein wenig abändern. Für den Fachmann ist das nicht besonders schwierig, der Laie aber sollte sich damit nicht ablagen. Als Ergebnis dieser Ableitung findet man die Energiefunktion

$$(Energie)^2 = (Impuls)^2 \cdot (Lichtgeschwindigkeit)^2 + (Masse)^2 (Lichtgeschwindigkeit)^4 \quad (9-5)$$

Ist kein Impuls vorhanden, also für eine ruhende Wirkung, ergibt sich aus (9-5) die berühmte Energie-Massen-Äquivalenz (9-3). Für kleine Ausbreitungsgeschwindigkeiten der Wirkung, also kleine Impulse, ist die nichtrelativistischen Energiefunktion (9-4) gleichwertig mit der relativistischen (9-5). Das sehen wir in Abbildung 9-4.

Die Nachricht der Atomkraftwerke

Die Einstein'sche Äquivalenz von Energie und Masse beruht ganz allein auf dem individuellen Charakter raum-zeitlicher Beziehungen. (9-3) ist eine logische Konsequenz davon, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit von Lichtsignalen c unabhängig vom Bezugssystem ist. Und das ist eine Nachricht der Wolkensäulen, die wir schon in großer Entfernung von Atomkraftwerken erkennen können:

Raum und Zeit sind Aspekte unserer Individualität. Raum und Zeit sind nicht absolut und unabhängig von unserem Bewusstsein. Raum ist Bewusstseinsraum und Zeit ist Bewusstseinszeit. Wir werden nicht in den Weltenraum hineingeboren, dieser Weltenraum entwickelt sich mit unserer Individualität und unserem Bewusstsein derselben.

Die andere Nachricht der Wolkentürme über Atomkraftwerken ist vielleicht die: Mit unsere Individualität haben wir einen enormen Energiebedarf entwickelt. Offensichtlich leiden wir unter der Gebundenheit unseres bewussten Seins an Raum, Zeit und Materie. Mit unserem physikalischen Wissen versuchen wir, dieses Leid zu mildern. Und der Energiebedarf dafür steigt unablässig. Vielleicht führt uns ein Weltbild, das mehr als die rein physikalischen Aspekt unserer Existenz erfasst, zu anderen Möglichkeiten des Wohlseins.