

Jürgen Audretsch

1. Einleitung

Die physikalische Zeit, die wir von Armbanduhren, Wanduhren, Bahnhofsuhrn usw. ablesen, begleitet unseren Tagesablauf und ist ein wohlvertrautes Element unseres Alltags. Zumeist reicht es für unsere Zwecke, wenn wir auf die Minute genau pünktlich sind. Und dafür genügt eine Quarzuhr, die hin und wieder einmal nachgestellt werden muss, allemal. Eine Funkuhr scheint demgegenüber bereits ein etwas überflüssiger Luxus an Präzision zu sein.

Aber man täuscht sich. Tatsächlich hat schon eine Zeitmessung mit viel größerer Genauigkeit in den Alltag vieler Menschen Einzug gehalten. Das Global Positioning System (GPS), mit dem man heute bereits sein Auto ausstatten kann, ist eines der bekanntesten Beispiele für die Anwendung hochpräziser Zeitmessung. Mit Hilfe dieses Satellitennavigationssystems können Koordinaten auf der Erde ermittelt werden. Extrem ganggenaue Atomuhren, die auf verschiedenen Satelliten stationiert sind, senden synchronisierte Zeitsignale zur Erde. Der beispielsweise in einem Auto stationierte GPS-Empfänger misst die unterschiedliche Laufzeit der Signale und kann so den Abstand zu den Satelliten ermitteln. Daraus bestimmt er dann den Standort des Empfängers. Die amtliche deutsche Landvermessung hat ein GPS aufgebaut, mit dem zivile Nutzer eine Ortsbestimmung mit einer absoluten Genauigkeit von etwa 15 Metern in Echtzeit durchführen können. Mit etwas Geräteaufwand kann die gemessene GPS-Position auf 1 bis 3 Meter korrigiert werden. Dazu werden Zeitmessungen benötigt, die bis auf ein paar Nanosekunden (10^{-9} Sekunden) genau sind. Mit Hilfe des GPS navigieren weltweit Flugzeuge und Schiffe. Der militärische Nutzen ist offensicht-

lich. Die GPS-Empfänger sind heute im Handel erhältlich. Es ist bemerkenswert, dass die beim GPS zugrunde liegende Zeitmessung so genau ist, dass Effekte der Speziellen Relativitätstheorie und der Allgemeinen Relativitätstheorie berücksichtigt werden müssen. Diese Theorien sind also heute bereits bis in Bereiche unseres Alltags vorgedrungen. Wir kommen auf sie später noch zurück.

Wir sehen, dass in der Technik eine immer präzisere Zeitmessung gelingt und immer bessere Zeitnormale installiert werden können. Aber was soll das eigentlich heißen? Was versteht man genau genommen unter der physikalischen Zeit? Finden wir die physikalische Zeit bereits vor und müssen sie dann nur messen? Oder produzieren wir diese Zeit erst? Oder sind das vielleicht gar keine sinnvollen Fragen? Man könnte doch an sich ganz einfach vorgehen: Zeit ist das, was eine Uhr anzeigt. Allerdings wann geht die Uhr richtig? Man könnte sie hierzu mit einer anderen Uhr vergleichen. Nur woher weiß man, dass diese zweite Uhr richtig geht? Der Vergleich mit anderen Uhren hilft also nicht weiter, aber er führt uns direkt auf die zentrale Frage bei der Einführung und Festlegung der physikalischen Zeit: Womit fängt man an? Atomuhren sind heute die wichtigsten technischen Realisierungen von Zeitnormalen. Allerdings sind Atomuhren zugleich auch hochkomplexe Gebilde, die zu ihrem Verständnis modernste und also sehr weit entwickelte Physik benötigen nämlich Quantenmechanik und Quantenfeldtheorie. Zeit ist demgegenüber ein Element, das schon in den fundamentalsten Konzepten der klassischen Physik eine zentrale Rolle spielt. Was also ist die physikalische Zeit? Wir finden einen Zugang zu ihr über die Frage: Wie führt man in der klassischen unrelativistischen Mechanik die Zeit ein? Wir werden dann in weiteren Schritten zur speziell-relativistischen und zur allgemein-relativistischen Zeit kommen.¹

¹ Vertiefende Darstellungen zu Raum-Zeit-Theorien finden sich zum Beispiel in: J. AUDRETSCH und K. MAINZER (Hg.), Philosophie und Physik der Raum-Zeit, Mannheim/Wien/Zürich, 1988.

2. Inertialsysteme

Bevor wir uns mit der Zeit beschäftigen können, müssen wir uns über einige andere grundlegend physikalische Konzepte verständigen. Da sie in gleicher Weise wie die Zeit für die Physik fundamental sein sollen, können wir uns bei ihrer Einführung nicht bereits auf Physik beziehen, sondern müssen auf den technischen, fast handwerklichen Bereich zurückgreifen. Nehmen wir daher an, wir können eine gerade Linie handwerklich realisieren. Nehmen wir weiterhin an, wir können auch parallele Linien und rechte Winkel im Labor konstruieren (Abb. 1).

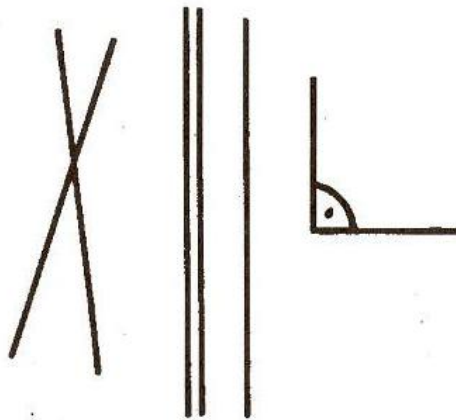


Abb. 1

Dann lassen sich auch starre Bezugssysteme herstellen, indem wir zunächst drei aufeinander senkrecht stehende Achsen festlegen und dann in einem willkürlichen, aber gleichen Abstand parallele Linien zu den Achsen konstruieren. Die rechten Winkel sollen sich nicht ändern und der Linienabstand soll konstant bleiben. Wir erhalten so ein nicht mehr deformierbares, also starres Gitter, dessen Gitterpunkte mit den Werten von x , y und z durchnummeriert werden können. Führen wir nicht nur Parallelen für die ganzzahligen

gen Werte von x , y und z ein, sondern lassen auch noch Parallelen zu allen Zwischenwerten zu, so entsteht ein Bezugssystem oder Koordinatensystem, mit dessen Hilfe man die Lage eines beliebigen Punktes im Raum mit drei Zahlen beschreiben kann (Abb. 2).

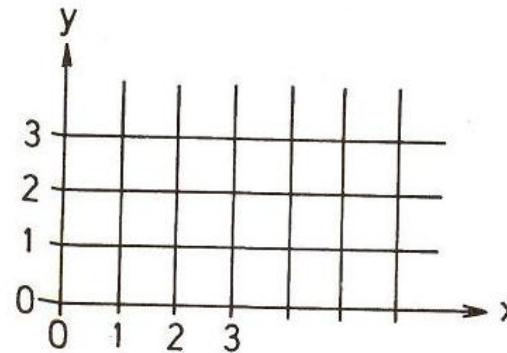


Abb. 2

Dieses Bezugssystem ist starr. Wir können ihm eine Geschwindigkeit gegenüber einem anderen Bezugssystem geben. Und insbesondere kann es sich sehr wohl noch als Ganzes gegenüber anderen Bezugssystemen drehen.

In einem nächsten Schritt wollen wir unter den vielen starren Bezugssystemen diejenigen festlegen, die sich nicht drehen. Drehung soll dabei in absoluter Weise, das heißt ohne Bezug auf andere Bezugssysteme eingeführt werden. Hierzu brauchen wir als Hilfsobjekte oder Probeteilchen die sogenannten freien Punktteilchen. Das sind Objekte, die in der Wirklichkeit nur näherungsweise realisiert werden können, von denen man aber annimmt, dass diese Realisierung im Prinzip sehr gut möglich ist. Es handelt sich um Massen, deren Ausdehnung so klein ist, dass man sie als Punkt beschreiben kann. Zugleich sollen durch Abschirmungen alle nur denkbaren Kräfte, die auf diese Punktmassen wirken können, eliminiert sein. Wir betrachten nun einen Schwarm

solcher freien Punktteilchen, die nach allen möglichen Richtungen und mit allen möglichen Geschwindigkeiten fliegen. Wenn man ihre Bahnen in einem der Bezugssysteme verfolgt, dann entstehen im allgemeinen gebogene Kurven. Wenn man das Bezugssystem hin und her dreht, dann werden diese Kurven verglichen mit den Geraden dieses Bezugssystems einen hin und herschwingenden Verlauf haben, Spiralen sein oder eine noch kompliziertere Form haben. Es finden sich aber ganz spezielle Bezugssysteme, aus deren Sicht alle Bahnen eines Punktteilchenschwarms gerade Linien sind (Abb. 3).

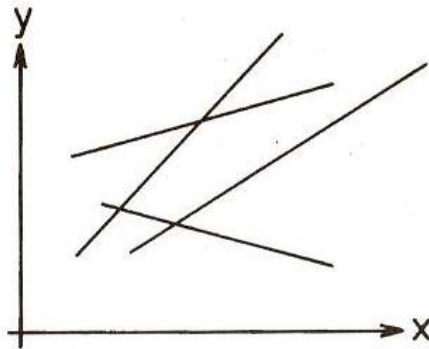


Abb. 3

Dass solche Bezugssysteme existieren, bezüglich derer nicht nur die Bahn eines speziellen freien Punktteilchens eine Gerade ist, sondern gleich alle Bahnen von irgendwelchen freien Punktteilchen Geraden sind, ist eine Aussage über die Natur. Es ist ein Erfahrungssatz. Die Natur könnte sich auch anders verhalten. Wir wollen diese ausgezeichneten Bezugssysteme als drehungsfrei bezeichnen.

Nach dieser Vorbereitung können wir nun die ersten Schritte zur Einführung der physikalischen Zeit machen. Wir führen eine sogenannte topologische Zeit t' ein, durch die eine zeitliche Reihenfolge festgelegt wird und zwar zunächst

auch nur an einem Ort. Hierzu werden an einem Ort z. B. durch Klopfen und gleichzeitiges Abzählen (1, 2, 3, ...) Ereignisse durchnummeriert, in diesem Fall zunächst das Klopfen selber. Es müssen dabei keinerlei Anstrengungen unternommen werden, damit aus einem Vorverständnis heraus der subjektive Eindruck entsteht, in gleichen Zeitabständen zu klopfen. Mit den so durchnummerierten Ereignissen, zu denen man sich noch Ereignisse dazwischen vorstellen kann, ist ein kontinuierlich monoton wachsender Parameter t' an diesem Ort definiert. Er erlaubt bereits eine Verständigung über lokale Ereignisse. So können wir z. B. sagen: Ein bestimmtes Ereignis (z. B. das Heben der Hand) fand zwischen dem dritten und vierten Klopfen statt oder ein anderes Ereignis fiel mit dem siebenten Klopfen zusammen usw.

Selbstverständlich ist diese zeitliche Durchparametrisierung, die in unserem Beispiel durch das Klopfen verursacht wird, vor keiner anderen Durchparametrisierung ausgezeichnet. Wenn jemand an demselben Ort in anderer Weise klopft, so wäre das für unsere Zwecke genauso gut. Wiederrum ließe sich zahlenmäßig erfassen, nunmehr mit Bezug auf die Nummerierung des zweiten Klopfvorgangs, wann irgendein Ereignis stattgefunden hat. Wir dürfen also umparametrisieren $t' \rightarrow t''$, das heißt zu einer anderen topologischen Zeit übergehen.

Zur Vervollständigung denken wir uns schließlich diese lokale Zeit (also z. B. t') auf das ganze sich nicht drehende Bezugssystem übertragen. Man könnte das beim Klopfen etwa mit Hilfe der zugehörigen Schallausbreitung tun. Aber wir wissen, dass bei diesem Verfahren die Werte von t' an verschiedenen Orten nicht das wiedergeben, was wir intuitiv unter Gleichzeitigkeit verstehen. Besser geeignet sind Stäbe, die wir uns in einer Idealisierung so starr vorstellen, dass ein Daraufklopfen auf der einen Seite sich unmittelbar in einem Ruck auf der anderen Seite manifestiert. Wenn wir

die Inertialsysteme mit Zahlen $i, j, \dots$ durchparametrisieren, wären damit die verschiedenen Zeiten t'_i eingeführt.

3. Die unrelativistische physikalische Zeit

Wir haben bisher nicht, wie es unser Ziel ist, eine einzige ausgezeichnete Zeit, sondern nur viele Zeiten einführen können, die noch dazu durch die Art ihrer Konstruktion recht beliebig sind. Lässt sich etwas allgemein Verbindlicheres finden? Hierfür ist es wichtig, dass uns die Natur selber mit einer zentralen Erfahrung, die wir mit ihr machen können, weiterhilft. Es gibt nämlich einen Erfahrungssatz, der eigentlich höchst überraschend ist: Wir haben die Möglichkeit des Uparametrisierens der topologischen Zeit eines jeden Inertialsystems. Uns stehen weiterhin als physikalische Hilfsobjekte die freien Punktteilchen zur Verfügung. Und die Beobachtung zeigt nun, dass man in jedem der Inertialsysteme einzeln erreichen kann, dass durch Umeichen des Zeitmaßes

$$t'_i \rightarrow t_i,$$

also durch Übergang zu einer neuen Zeit t_i , alle Bahnen irgendwelcher freien Punktteilchen nicht nur geradlinig, sondern auch gleichförmig werden. Mit gleichförmig ist gemeint, dass ihre Geschwindigkeit v , wie sie als Quotient $v = \Delta s / \Delta t_i$ aus Wegdifferenz Δs durch die Differenz Δt_i bezüglich der neuen Zeit t_i gemessen wird, konstant ist. Die Aussage über die Natur lautet: Wenn an einem Probeteilchen der Übergang zu dieser ausgezeichneten Zeit t_i vollzogen ist, dann besitzen alle freien Punktteilchen, wo und in welche Richtung sie auch immer fliegen mögen, jeweils eine vielleicht unterschiedliche, aber in jedem Fall konstante Geschwindigkeit. Man wechselt von t'_i zu t_i , indem man so lange den Zeitablauf abändert, bis die an den Probeteilchen ablesbare Eigenschaft erreicht ist.

Aber es geht noch weiter. Es lässt sich als weitere Erfahrung eine noch verblüffendere Eigenschaft der Natur feststellen: Wenn man die Uhrengänge t_i in den verschiedenen Bezugssystemen vergleicht, so stellt man fest, dass sie (bis auf eine konstante Differenz) alle übereinstimmen.

$$t_i = t_j = t$$

Es existiert also eine für alle nicht drehenden Bezugssysteme einheitliche Zeit t . Uhren, die t anzeigen, gehen in all diesen Systemen gleich. Wir wollen die Inertialsysteme mit diesen Uhren ausstatten. Durch die Gleichheit des Uhrenganges gibt es auch eine universelle Gleichzeitigkeit. Damit ist für alle Beobachter einheitlich festgelegt, was mit Vergangenheit und Zukunft gemeint ist, wann ein Ereignis stattgefunden hat und wann zwei Ereignisse gleichzeitig sind. Eine genauere Analyse zeigt, dass die verschiedenen inertialen Bezugssysteme gegeneinander gradlinig und gleichförmig bewegt sind.

4. Relativitätsprinzip

Wir haben bisher nur von Beobachtern, ihren Bezugssystemen und dem Gang ihrer Uhren gesprochen. Dass diese Uhren, die die Zeiten t_i anzeigen, tatsächlich alle gleich gehen und die eine universelle Zeit t anzeigen, bedeutet im Umkehrschluss, dass man mit Hilfe der Zeit ein Inertialsystem nicht vor einem anderen auszeichnen kann. Hinter dieser Aussage verbirgt sich allerdings ein viel umfassenderer Erfahrungssatz, der Relativitätsprinzip genannt wird. Tatsächlich ist es so, dass nicht nur der Uhrengang, sondern alle physikalischen Vorgänge in jedem Inertialsystem bei gleicher Präparation auch in gleicher Weise ablaufen. Wir haben also eine sehr viel weiter gehende Ununterscheidbarkeit: Es ist unmöglich, mit Hilfe von physikalischen Vorgängen oder Experimenten ein Inertialsystem von einem anderen zu

unterscheiden. Mit dem Relativitätsprinzip und der daraus folgenden Ununterscheidbarkeit von Inertialsystemen ist eine Grundaussage der Physik getroffen worden, die sich bisher aber nur auf die massiven Punktteilchen und die darauf aufbauende Mechanik bezieht. Bevor wir dieses Prinzip in der relativistischen Physik als allgemein gültiges Grundprinzip einführen, soll das bisher Erreichte zusammengefasst werden.

5. Henry Poincaré

Wir haben gesehen, dass man sehr wohl, zumindest näherungsweise entscheiden kann, ob eine Uhr richtig geht. Dabei bezieht man sich nicht selber wiederum auf eine Uhr oder einen periodischen Vorgang, den man zu einer Normaluhr erklärt hat. Vielmehr ist diejenige Zeit die richtige Zeit, mit der die Geschwindigkeit aller möglichen freien Punktteilchen eine besonders einfache Form einnimmt: sie wird konstant. Die physikalische Zeit ist also aus der topologischen Zeit, die unser allgemeines Zeitempfinden in vager Weise wiedergibt, durch eine Präzisierung entstanden. Dabei haben wir uns zahlreiche Erfahrungen mit der Natur zunutze gemacht. Somit war die physikalische Zeit also nicht in irgend einem Sinne schon vorher vorhanden. Wir produzieren sie vielmehr indem wir sie messen, also die oben beschriebenen Vorschriften anwenden. Der Mathematiker und Physiker Henri POINCARÉ hat 1906 das Vorgehen in der Physik folgendermaßen charakterisiert:

„Die Zeit muss so definiert werden, dass die Gleichungen der Mechanik so einfach wie möglich werden. Mit anderen Worten, es gibt keine Art, die Zeit zu messen, die richtiger ist als eine andere; die, die allgemein angewendet wird, ist nur bequemer.“²

² Henri POINCARÉ, *Der Wert der Wissenschaft*, Leipzig 1906, S. 33.

Es geht also bei der physikalischen Zeit nicht um „richtig“, sondern nur um „bequem“. Die Zeit selber verliert auf diese Weise in der Physik alles Verwunderliche, Bemerkenswerte und Tiefsinnige. Umgekehrt wird die Natur und ihre physikalische Beschreibbarkeit dafür aber umso verwunderlicher und bemerkenswerter. Denn die Einführung dieser physikalischen Zeit war nur dadurch möglich, dass die Natur eine Reihe von Eigenschaften aufweist, die oben als Erfahrungssätze charakterisiert wurden. Die Existenz nicht drehender Bezugssysteme war die erste Feststellung. Dass es gelingt, durch Umeichen des Zeitmaßes ein Zeitmaß t_i zu finden, in dem die Geschwindigkeiten nicht nur eines, sondern aller freien Punktteilchen stets gleichförmig werden, ist keine Selbstverständlichkeit. Es hätte genauso gut sein können, dass sich ein solches Zeitmaß nicht finden lässt. Hat man es dann für jedes Bezugssystem einzeln gefunden, so ist es noch völlig offen, ob alle diese Zeitmaße übereinstimmen (Inertialsysteme). Dass die Einführung der physikalischen Zeit, wie wir sie kennen, gelingt, ist eine tiefliegende experimentelle Aussage über die Natur. Wenn man sich noch einmal auf das Zitat von POINCARÉ bezieht, so macht es im Kern die Aussage, dass sich die Natur als überraschend einfach in ihrer Beschreibung erweist, allerdings nur dann, wenn man dabei geschickt vorgeht. Es ist immer wieder die Aufgabe der Theoretischen Physik, genau in diesem Sinne ihr Können unter Beweis zu stellen.

6. Was ist eine Sekunde?

Wir hatten einleitend die extrem genauen Atomuhren erwähnt. Beruhen diese Uhren tatsächlich darauf, dass in ihnen die Bahn von freien Massenpunkten messend verfolgt wird? Das wäre sicherlich viel zu ungenau. Es ist vielmehr so, dass die Physik, wie sie sich im Laufe von Jahrhunderten mit immer neuen Anwendungsgebieten entwickelt hat,

stets mit Bezug auf die Zeit t der Inertialsysteme formuliert wurde. Auch wenn in der modernen Atomphysik von der Frequenz einer vom Atom emittierten Strahlung gesprochen wird, so meint man die Zahl der Schwingungen dieser Strahlung pro Sekunde dieser Zeit t . Oder man kann umgekehrt sagen, man gibt an, wie viele Schwingungen abzuwarten sind, bis eine Sekunde der Zeit t verstrichen ist. Und nach dieser Vorschrift findet tatsächlich die Realisierung der Zeiteinheit mit Hilfe von Caesium-Atomuhren z. B. in der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig statt, die auch unsere Funkuhren steuert. Caesium-Atome machen einen Übergang zwischen den beiden sogenannten Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustandes. Die Frequenz des emittierten Mikrowellenfeldes wird gezählt. Nach 9 192 631 770 Periodendauern ist eine Sekunde verstrichen. Die Anlage ist dabei so stabil, dass im Laufe eines Jahres in Folge von Störungen nur mit einer Abweichung von einer millionstel Sekunde zu rechnen ist.

7. Speziell-relativistische Zeit

Wir hatten oben beim Stichwort Relativitätsprinzip gesehen, dass alle physikalischen Vorgänge in jedem der nach der bisherigen Vorschrift konstruierten Inertialsysteme bei gleichen Anfangsbedingungen auch gleichartig ablaufen. Das gilt tatsächlich ebenso für elektromagnetische Phänomene. So ist zum Beispiel die Geschwindigkeit v von Licht endlich und dem Betrag nach in allen Inertialsystemen gleich c . Dies ist ein bemerkenswerter Umstand, denn dann kann die oben gemachte Behauptung der Existenz einer universellen Zeit genau genommen nicht richtig sein. Bei den oben angeführten Eigenschaften von inertialen Bezugssystemen hängt die Geschwindigkeit z. B. einer Masse davon ab, von welchem Bezugssystem aus sie gemessen wird. So kann man zu einem vorgegebenen frei fliegenden Massen-

punkt, der eine gewisse konstante Geschwindigkeit in einem Inertialsystem hat, sofort ein anderes Inertialsystem finden, in dem er die Geschwindigkeit Null besitzt. Man bewegt dazu dieses Inertialsystem einfach mit dem gradlinig gleichförmig fliegenden Massenpunkt mit, so dass er relativ hierzu ruht. Für Licht, das sich ja stets mit derselben konstanten Lichtgeschwindigkeit ausbreitet, ist es andererseits unmöglich, ein Inertialsystem zu finden, das so mit dem Licht mitbewegt wird, dass das Licht in ihm gewissermaßen ruht. Wir müssen also unser bisheriges Schema modifizieren. Wenn wir versuchen dem Licht zu folgen, indem wir immer schneller bewegte Inertialsysteme nehmen, die sich in ihrer Geschwindigkeit v der Lichtgeschwindigkeit c annähern, so dürfen wir nicht etwa in ihnen den alten Uhrenablauf des ruhenden Inertialsystems annehmen, sondern müssen den Zeitablauf so abändern bzw. nachjustieren, dass mit der neuen Zeit im bewegten Bezugssystem die Lichtgeschwindigkeit wiederum den alten Wert annimmt. Die Konsequenz ist: Genauere Beobachtung zwingt uns, unsere Konzeption einer universellen Zeit aufzugeben.

Bei der Festlegung der inertialen Bezugssysteme und des jeweiligen Zeitablaufs in einem Bezugssystem ist der Uhrengang nunmehr so festzulegen, dass (1) freie Punktteilchen sich geradlinig gleichförmig bewegen und dass (2) die Geschwindigkeit von Licht in allen Inertialsystemen denselben konstanten Wert c hat. Wir erwarten dann, dass hierfür beim Übergang von einem Inertialsystem zum anderen die Zeit eben doch abgeändert werden muss

$$t_i \neq t_j$$

und das genau stellt man auch mit sehr verfeinerten Messmethoden experimentell fest. Der oben in Kapitel 4 angeführte Erfahrungssatz ist also bei ganz genauem Hinsehen gar nicht streng erfüllt. Er ist außerordentlich gut erfüllt, wenn die Relativgeschwindigkeiten der Inertialsysteme

klein gegen die Lichtgeschwindigkeit sind ($v \ll c$) und darum hat man ihn lange Zeit für absolut richtig gehalten. Er ist aber immer schlechter erfüllt und der Zeitablauf in zwei Inertialsystemen wird immer unterschiedlicher, wenn die Geschwindigkeit der beiden relativ zueinander in die Nähe der Lichtgeschwindigkeit kommt.

Damit gerät allerdings unsere ganze bisherige Theorie durcheinander, denn es war ja unter der bisherigen Annahme einer universell gültigen Zeit scheinbar bereits geglückt, korrekte physikalische Gesetze aufzuschreiben. Man sieht daran, dass das offenbar nicht für alle Situationen der Fall sein kann. Und tatsächlich lässt sich experimentell feststellen, dass für Fälle, in denen Geschwindigkeiten eine Rolle spielen, die in die Größenordnung der Lichtgeschwindigkeit kommen, die alten sogenannten unrelativistischen physikalischen Gesetze zu korrigieren sind. Es müssen neue Gesetze eingeführt werden. Sie haben in allen Inertialsystemen dieselbe Form, wenn man für jedes Inertialsystem den entsprechenden unterschiedlichen Zeitablauf annimmt. Man sagt dann, dass die Gesetze die Forderungen der Speziellen Relativitätstheorie erfüllen. Sie spiegeln nach wie vor das Relativitätsprinzip wider. Historisch gesehen hat man über lange Zeit die Notwendigkeit einer Neuformulierung der Physik nur deshalb nicht bemerkt, weil die Geschwindigkeiten, mit denen man es zu tun hatte, klein gegenüber der Lichtgeschwindigkeit waren. In diesem Fall sind die Abänderungen der unrelativistischen Gesetze nur außerordentlich gering. Die korrekten Gesetze sind so, dass sie im Grenzfall kleiner Geschwindigkeiten in die alten Gesetze übergehen.

8. Relativität der Gleichzeitigkeit

Die Überlegungen des vorigen Kapitels mögen ein wenig abstrakt erscheinen. Es soll daher noch einmal etwas operationaler und anschaulicher begründet werden, warum es

keine universelle Zeit und damit keine allgemein gültige Gleichzeitigkeit mehr geben kann. Da die Lichtausbreitung den Anstoß zu den Überlegungen des vorigen Kapitels gegeben hat, liegt es nahe, von einer physikalischen Situation auszugehen, in der Licht eine herausragende Rolle spielt. Wir betrachten hierzu in *Abbildung 4a* einen Wagen, der ein Inertialsystem sein soll, d. h. er befindet sich gegenüber anderen Inertialsystemen in Ruhe oder hat eine geradlinig gleichförmige Geschwindigkeit. Im Wagen befinden sich an der Vorderwand und der Rückwand an den Orten *a* und *b* jeweils eine Uhr, die der Einfachheit halber nur einen Zeiger haben soll. Diese beiden Uhren sollen aus der Sicht eines Beobachters *A* im Wagen synchronisiert werden, d. h. ihr Zeiger soll zur gleichen Zeit z. B. in die Position 12 gestellt werden. Hierzu werden in der Mitte des Wagens von einer Lampe gleichzeitig Lichtblitze nach beiden Seiten ausgeschickt (Wellenlinien). Da sie in beiden Fällen die gleiche Strecke zurücklegen müssen, kommen sie vom Wagen aus betrachtet zur gleichen Zeit bei den Uhren an. Mit dem Auftreffen der Blitze in *a* und *b* werden die Zeiger in die gleiche Position gestellt.

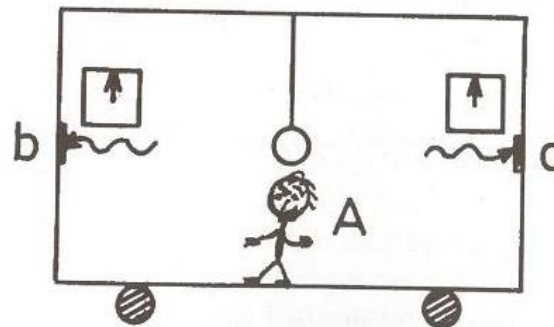


Abb. 4a

Wie sieht dieser Vorgang für einen Beobachter aus, der sich in einem anderen Inertialsystem befindet? Denken wir uns einen zweiten Beobachter, der am Straßenrand in gleicher Weise bereits vorher mit Licht zwei Uhren c und d synchronisiert hat (Abb. 4b). Der Wagen möge sich aus der Sicht des Inertialsystems „Straßenrand“ mit der konstanten Geschwindigkeit v bewegen. Wiederum werden im Wagen gleichzeitig die nach beiden Seiten hin laufenden Blitze ausgelöst. Auch für den Beobachter am Straßenrand hat nach unserer neuen Definition des Inertialsystems das Licht der beiden Blitze wiederum die gleiche Geschwindigkeit c . Aber aus seiner Sicht kommt die Uhr b dem Lichtblitz mit der Geschwindigkeit v entgegen, während die Uhr a ihrem Lichtblitz mit der Geschwindigkeit v davonfährt.

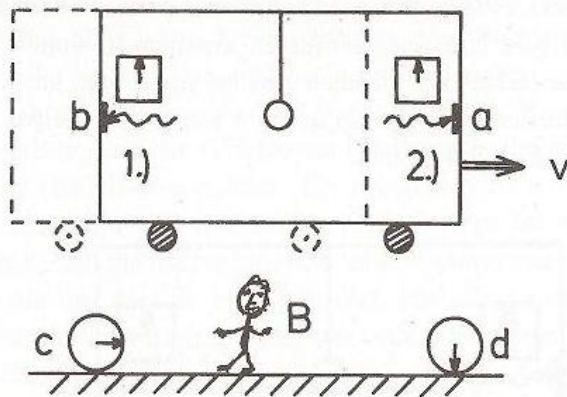


Abb. 4b

Für den Mann am Straßenrand wird daher der nach links laufende Blitz zunächst in b auftreten und dann erst der nach rechts laufende Blitz in a . Und das genau zeigen ihm auch die Uhren am Straßenrand an. Der Effekt ist natürlich nur dann mit einfachen Methoden beobachtbar, wenn v/c in die Größenordnung von 1 kommt. Wir sehen also, dass

die Gleichzeitigkeit voneinander entfernter Ereignisse vom Bewegungszustand des jeweiligen Betrachters abhängt. Die Ereignisse sind gleichzeitig für den Mann im Wagen, finden aber nacheinander statt für den Mann am Straßenrand. Dies macht noch einmal besonders deutlich, dass es keine universelle Zeit gibt.

Etwas verkürzt kann man daher sagen: „Jeder hat seine eigene Zeit“. Das Zwillingsparadoxon beruht auf dieser Einsicht. Es ist allerdings nicht paradox, sondern bezeichnet ganz normale Physik. Wir betrachten Zwillinge, also zwei gleich alte Personen. Der eine Zwilling macht eine Reise und kehrt anschließend wieder an den Ausgangspunkt zurück. Der andere Zwilling bleibt die ganze Zeit zu Hause (Abb. 5). Wenn die Zwillinge wieder zusammentreffen, ist jeder älter geworden, aber der Zwilling, der die Reise gemacht hat, ist relativ jünger geblieben als der, der zu Hause geblieben ist. Man sieht daran, dass Reisen nicht nur bildet, sondern gemäß der Speziellen Relativitätstheorie auch jung hält. Damit der Effekt merkbar wird, sollte der reisende Zwilling allerdings möglichst mit nahezu Lichtgeschwindigkeit reisen. In Abbildung 5 sind die beiden Raum-Zeit-Bahnen der Zwillinge in einem Diagramm mit den Achsen t (Zeit) und x (Abstand) eingezeichnet. Die Länge der beiden Raum-Zeit-Kurven bis zum erneuten Zusammentreffen ist ein direktes Maß für die Zeit, die für den entsprechenden Reisenden auf seiner Uhr und damit für alle seine Lebensvorgänge verstreicht. Der kleineren Kurvenlänge auf dem Papier entspricht dabei die größere Zeitdifferenz. Man kann also durchaus auch den zweiten Zwilling eine Reise unternehmen lassen. Wenn die Längen der beiden Raum-Zeit-Kurven nicht gleich groß sind, werden die Zwillinge beim Zusammentreffen einen Altersunterschied aufweisen.

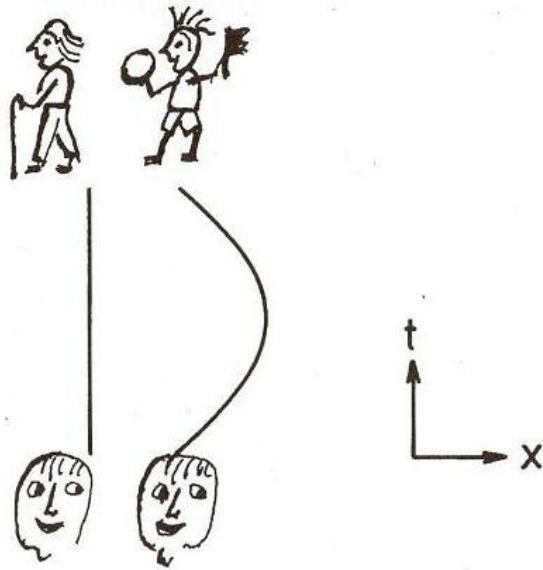


Abb. 5

Selbstverständlich wird man ein solches Experiment nicht mit Zwillingen machen. Bereits 1971 flogen mit Atomuhren ausgestattete Flugzeuge einmal in östlicher Richtung und einmal in westlicher Richtung um die Erde. Die Zeitunterschiede zwischen den in den Flugzeugen installierten Uhren und der am Boden befindlichen Normaluhr gab den Zwillingseffekt exakt wieder. Dabei war allerdings der unterschiedliche Einfluss der Gravitation mit zu berücksichtigen. Wir kommen jetzt zu diesem gravitativen Effekt.

9. Gravitative Rotverschiebung

Die Zeit und der Gang von Uhren erhalten noch mehr physikalische Struktur, wenn man berücksichtigt, dass Uhren sich an verschiedenen Stellen im Gravitationsfeld befinden können. Wiederum ist es die Ausbreitung von Licht, die dabei eine zentrale Rolle spielt. Licht ist ein Schwingungs-

vorgang. Es breitet sich wie eine Welle aus. Licht in einer der Farben des Regenbogens hat eine wohlbestimmte Frequenz. Es schwingt mehr oder weniger schnell, d. h. es wird in einem gewissen Zeitintervall mehr oder weniger häufig derselbe Zustand (z. B. ein Wellenberg) erreicht. Die Frequenz des Lichts ist dabei ein unmittelbares Maß für seine Energie. Blaues Licht hat eine größere Frequenz und damit eine größere Energie als rotes Licht und das unsichtbare „Licht“ der Röntgenstrahlen ist energiereicher als blaues Licht. Das Konzept der Energie führt uns direkt darauf, was mit Licht im Gravitationsfeld geschieht. In der EINSTEINschen Allgemeinen Relativitätstheorie wird das im einzelnen behandelt.

Betrachten wir zum Vergleich zunächst eine Masse, die im Gravitationsfeld der Erde auf der Höhe U (Abb. 6) mit der Geschwindigkeit v senkrecht hochgeschossen wird. Es ist eine Alltagserfahrung, dass diese Masse beim Aufsteigen im Gravitationsfeld immer langsamer wird. Sie wird auf der Höhe O nur noch die kleinere Geschwindigkeit v' haben. In entsprechendem Maße hat auch ihre Bewegungsenergie abgenommen. Dadurch dass die Masse sich gegen die ständig nach unten ziehende Gravitationskraft der Erde hocharbeiten musste, ist zugleich ihre Bewegungsenergie zu einem Teil aufgezehrt worden. Es ist eine bedeutende physikalische Erfahrung, dass es Licht im Gravitationsfeld nicht anders geht. Auch wenn Licht im Gravitationsfeld aufsteigt, verliert es an Energie. Allerdings äußert sich das nicht darin, dass die Lichtgeschwindigkeit kleiner wird, denn wir hatten schon gesehen, dass das nicht möglich ist. Das Maß für die Energie des Lichts ist vielmehr die Frequenz. Sie nimmt bei der Aufwärtsbewegung des Lichts im Gravitationsfeld ab. Das heißt wenn z. B. blaues Licht auf der Höhe U senkrecht nach oben geschickt wird, dann kommt es mit einer zur roten Seite des Spektrums hin verschobenen Frequenz in der Höhe O an.

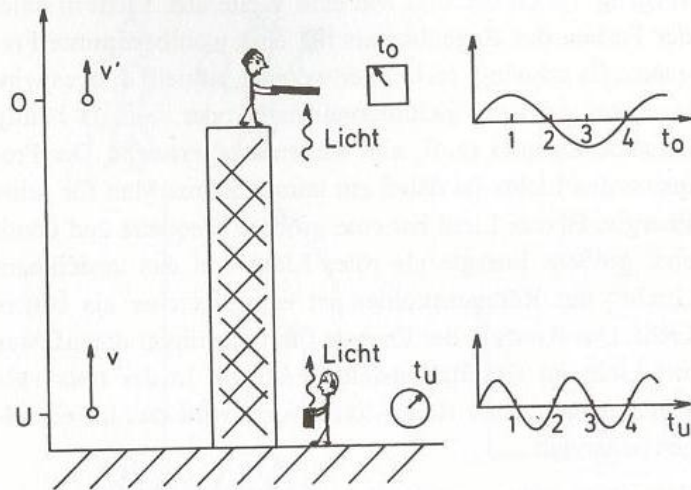


Abb. 6

Veranschaulichen wir uns wieder operational, was wir unter einer solchen Aussage im einzelnen zu verstehen haben. Auf der Höhe U befindet sich ein Experimentator mit einer sehr genauen Uhr (rundes Zifferblatt), die die Zeit t_U anzeigt. Er schickt Licht nach oben mit einer solchen Frequenz, dass nach zwei Zeiteinheiten von t_U das Licht gerade einen Schwingungsvorgang beendet hat. Auf der Höhe O befindet sich ein zweiter Beobachter wiederum zusammen mit einer sehr genauen Uhr (eckiges Zifferblatt), die seine Zeit t_O anzeigt. Dieser Beobachter stellt als wichtiges experimentelles Ergebnis fest, dass das Licht, das bei ihm ankommt, eine geringere Frequenz hat. Das heißt beispielsweise, dass es erst nach vier seiner Zeiteinheiten einen Schwingungsvorgang beendet hat. Dieser Effekt, wie er von zwei Beobachtern auf verschiedener Höhe im Gravitationsfeld registriert wird, heißt gravitative Rotverschiebung. Speziell auf der Erde wurde für einen Beobachter, der sich auf einem 30 m hohen Turm befindet, festgestellt, dass die Verschiebung $\Delta\omega$ der Frequenz ω des Lichtes den zwar sehr kleinen, aber gut messbaren Wert von $\Delta\omega/\omega$ von etwa 10^{-15} beträgt.

10. Uhrengang im Gravitationsfeld und die allgemein-relativistische Zeit

Die gravitative Rotverschiebung hat unmittelbare Konsequenzen für den Uhrengang im Gravitationsfeld. Wir können uns das wiederum veranschaulichen, indem wir uns überlegen, welche Erfahrungen experimentierende Personen machen werden. In diesem Fall konzentrieren wir uns auf die Beobachtungen, die der Experimentator auf der Höhe O macht, wenn er eine sich unten auf der Höhe U befindliche Uhr (rundes Zifferblatt) von oben aus betrachtet (Abb. 7). Der Beobachter hat auf seiner Höhe O ebenfalls eine Uhr (eckiges Zifferblatt), die t_O anzeigt. Er schaut nun gewissermaßen mit dem einen Auge auf diese Uhr und mit dem anderen durch ein Fernrohr auf die untere Uhr. So kann er bequem die Gänge der beiden Uhren vergleichen. Die Information über die untere Uhr bekommt er dabei in optischer Weise, also mit Licht, das von der unteren Uhr ausgeht und von ihm im Auge registriert wird.

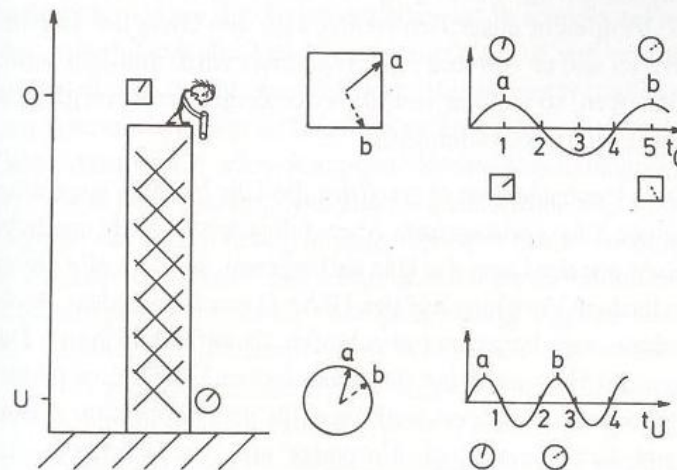


Abb. 7

Von der Lichtausbreitung im Gravitationsfeld wissen wir, dass sie der gravitativen Rotverschiebung unterliegt. Das heißt, dass das Licht oben mit einer geringeren Frequenz ankommt als es unten abgeschickt wurde. Das Vorrücken des Uhrenzeigers um gleiche Winkel ist aber ebenfalls ein solcher periodischer Vorgang mit einer gewissen Frequenz. Man könnte etwa die Zeigerstellungen a und b der unteren Uhr mit den Wellenbergen a und b einer von der unteren Uhr aus nach oben laufenden elektromagnetischen Welle zusammenfallen lassen. Wenn diese beiden Wellenberge vom oberen Beobachter registriert werden, geben sie ihm die Information, dass der Zeiger der unteren Uhr auf der Position a bzw. auf der Position b steht. Wegen der gravitativen Rotverschiebung ist aber der Wellenvorgang, wenn er auf der Höhe O ankommt, gemessen mit der dortigen Uhr auseinandergezogen. Er hat eine kleinere Frequenz und schwingt daher nicht so schnell wie unten in denselben Zustand zurück. Das bedeutet, dass die Zeit zwischen dem Auftreffen der beiden Wellenberge a und b in O gemessen mit der dortigen (eckigen) Uhr größer ist als auf der Höhe U . Vergleicht unser Beobachter also den Gang der Uhr unten, so wie er von ihm oben registriert wird, mit dem seiner Uhr oben, so stellt er fest, dass der Zeiger unten vergleichsweise langsamer vorangeht.

Dem Beobachter in O erscheint die Uhr in U als gegenüber seiner Uhr verlangsamt. Aber selbstverständlich erscheint nicht nur der Gang der Uhr verlangsamt, sondern alle physikalischen Vorgänge auf der Höhe U erscheinen dem Beobachter oben langsamer abzulaufen als auf der Höhe O . Das geht im Extremfall bei den sehr starken Gravitationsfeldern Schwarzer Löcher so weit, dass für den Beobachter weitab vom Schwarzen Loch Vorgänge auf der Oberfläche des Schwarzen Lochs unendlich verlangsamt erscheinen. Sie sind gewissermaßen „eingefroren“. Auf der Erde ist der Effekt nicht so drastisch. Eine Uhr auf der Spitze des Everest geht 3×10^{-5} Sekunden pro Jahr schneller als eine Uhr auf

Meereshöhe. Für eine Uhr im Satelliten ist die Differenz größer. Es ist verständlich, dass sie für das Global Positioning System mit eingerechnet werden muss.

Wir hatten schon festgestellt, dass gegeneinander bewegte Beobachter einen unterschiedlichen Zeitablauf haben. Jetzt zeigt sich in der Allgemeinen Relativitätstheorie, dass alle Beobachter – auch solche, die relativ zueinander in Ruhe sind – im Gravitationsfeld ihren eigenen Ablauf der Zeit haben. Die physikalische Zeit hat damit eine noch komplexere Struktur erhalten.

11. Physikalische Zeit und Zeit des Bewusstseins

Wir haben in den ersten Kapiteln gesehen, dass die physikalische Zeit ein zwar sehr fundamentales und weitreichendes, aber durch die Abstraktion, die ihre Einführung und Charakterisierung kennzeichnet, zugleich recht karges Konzept ist. Dies ist offensichtlich der Fall für die unrelativistische Zeit, wie sie für die näherungsweise Beschreibung von fast allen physikalischen Phänomenen des Alltags verwendet wird. Erst wenn man zu hohen Relativgeschwindigkeiten oder starken Gravitationsfeldern übergeht, zeigt sich bei aller Abstraktion eine komplexe Beobachterabhängigkeit der Zeit. Dass dieses physikalische Zeitkonzept als Grundlage für die Beschreibung physikalischer Vorgänge so außerordentlich erfolgreich ist, hängt gerade damit zusammen, dass die physikalische Zeit nur ganz wenige Aspekte unseres allgemeinen Zeitempfindens wiedergibt. Der außerordentlich großen Präzisierung des Zeitbegriffs steht daher – vermutlich in unvermeidlicher Weise – eine Verarmung im Inhalt gegenüber. Die oben festgestellten Eigenschaften sind bereits alle Eigenschaften der physikalischen Zeit. Diesen Zusammenhang sollte man sich bei einem fachübergreifenden Gespräch über die Zeit vor Augen halten.

Verglichen mit der objektiv messbaren Zeit hat, wie jeder-
mann weiß, die subjektiv erlebte Zeit eine Fülle weiterer
Strukturen. So sind z. B. in der physikalischen Zeit alle qua-
litativen Aspekte der Gegenwart ausgeblendet worden. Ge-
genwart ist ein Zeitpunkt ohne weitere Struktur oder Eigen-
schaften. Die subjektiv erlebte Zeit kennt demgegenüber
intensives Erleben oder Langeweile, erfüllte oder leere Zeit.
Ein Augenblick kann für etwas der rechte Augenblick sein
(Kairos). Weiterhin gibt es theologisch die Vorstellung ei-
nes künftigen Reiches Gottes und seines Wirkens in der
Gegenwart. Schließlich kann der Zeitverlauf mit Werden
und Vergehen verknüpft werden und das empfinden wir
durchaus auch beim Blick auf unsere Funkuhr. Um dies mit
PINDAR, einem Autor aus dem 5. vorchristlichen Jahrhun-
dert, zu beschreiben: „Wir Flüchtigen! Was wir sind, schon
sind wir es nicht mehr. Ein Traum des Schattens, das ist der
Mensch.“ Auch das sind Erfahrungen, die wir mit der Zeit
machen.