

Was versteht ein Physiker unter Zeit?

Prof. Dr. Peter C. Hägele

1. Solang mich niemand danach fragt...

"Was ist Zeit?" wurde ein Student gefragt. Er antwortete: "So etwas Ähnliches wie Radioaktivität: Man riecht sie nicht, man schmeckt sie nicht, und irgendwann fallen einem die Haare aus." Ob das ein Physiker war? Und der Nobelpreisträger FEYNMAN schreibt in seinen bekannten "Lectures on Physics": "Time is what happens when nothing else happens." Auch diese Antwort klingt recht witzig, zeigt aber zugleich die Hilflosigkeit, wenn es darum geht zu erklären, was Zeit ist. FEYNMAN ist mit seiner Definition selbst nicht zufrieden und meint, worauf es schließlich ankomme, sei nicht, wie man Zeit definiert, sondern wie man sie mißt. Ist das der typische Ausweg der Physiker, sich auf das Meßbare, Quantifizierbare zurückzuziehen?

Schon AUGUSTINUS fragt in seinen Confessiones: "Quid est ergo tempus?" – "Was also ist die Zeit? Solang mich niemand danach fragt, ist mir's, als wüßte ich's; doch fragt man mich und soll ich es erklären, so weiß ich's nicht ..." Dann allerdings entwickelt er als einer der ersten Denker eine tiefsinnige Philosophie der Zeit.

Offenbar sind die Menschen in das Phänomen *Zeit* so tief eingebunden, daß es den meisten schwerfällt, dieses in distanzierter Weise zum Objekt einer Analyse zu machen. Ist Zeit für alles *Nachdenken* nicht immer schon vorausgesetzt? Kann man überhaupt hoffen, objektives Wissen über die Zeit zu erlangen? Kann man die Zeit mit Definitionen in den Griff bekommen? Oder bleiben Zeit und Zeitlichkeit letztlich ein Geheimnis?¹

Wie jeder andere *erlebt* auch der Physiker Zeit in vielfältiger Weise: Er *nimmt* sich die Zeit, einen Aufsatz zu schreiben, obwohl er eigentlich *keine Zeit hat*. Oft vergeht ihm die Zeit *wie im Fluge*, dann wieder *verrinnt* sie träge. Auch er verwendet im Alltag Bilder, in denen die Zeit als eine Art Substanz, als vergänglicher Besitz, als fließender Strom vorgestellt ist.

Zeit hat aber noch weitere Aspekte. Der christliche Denker (und Physiker) A.M. KLAUS MÜLLER wies in einer tiefergehenden Reflexion auf insgesamt vier – zunehmend komplexer werdende – Dimensionen der Zeiterfahrung hin:²

1. Da ist zunächst der Bereich der gemessenen, quantifizierten Zeit; Zeit – verstanden als Uhrzeit. Hier ist die Vorstellung der *einen*, verfließenden Zeit, *des Stroms der Zeit* beheimatet. Hier kann die Physik präzisierend und korrigierend mitreden.
2. In unserer Lebenswelt werden weitere Aspekte der Zeit deutlich: Vieles, was *im Laufe der Zeit* geschieht, ist unvorhersehbar und offenbar nicht determiniert. Dies gilt vor allem für die Systeme des Lebens, die ja offene Systeme sind. Ganz elementar ist auch die Erfahrung der Gerichtetheit und der Unumkehrbarkeit der Zeit. Vergangenes unterscheidet sich von Zukünftigem. Vergangenes ist geschehen, faktisch; Zukünftiges ist offen, möglich, wahrscheinlich. Diese Aspekte hat erst die moderne Physik in den Blick bekommen, aber noch keineswegs voll erfaßt.
3. Bewußte Wahrnehmung setzt Gedächtnis und Erinnerungsvermögen voraus, also eine *Vergegenwärtigung* von Vergangenen. Bei der Planung und Ausführung bewußter Handlungen werden Erwartungen über künftiges Geschehen vorweggenommen (modelliert) und einkalkuliert. Der Mensch hat im Bewußtsein die Fähigkeit der *Zeitüberbrückung*.

Für die Untersuchung der menschlichen Zeitwahrnehmung ist weniger die Physik als die Psychologie und Sinnesphysiologie zuständig. Diese Disziplinen haben Interessantes herausgefunden und unterscheiden dabei etwa das Erleben von Gleichzeitigkeit, von Folge, von Jetzt und von Dauer. Es stellt sich z.B. heraus, daß das Bewußtsein des Jetzt-Erlebens bis zu drei Sekunden andauern kann. Zwei aufeinanderfolgende Höreindrücke müssen mindestens eine halbe Hundertstelsekunde auseinanderliegen, damit sie nicht mehr als gleichzeitig wahrgenommen werden.

4. Eine wesentliche und oft bedrückende Erfahrung der Zeit ist die der *Endlichkeit*. Der Mensch erlebt seine Lebenszeit als begrenzt und endlich. Mit der individuellen Grenze der Zeit wird ganz unterschiedlich umgegangen: Manche nehmen an, daß der Mensch über Reinkarnationen weiterlebt, dabei aber letztlich der Zeitlichkeit verhaftet bleibt. Andere verdrängen das Problem. Der Christ weiß um eine andere Zeitqualität, um ein *Jenseits der Zeit*, das ihm durch die Auferstehung Jesu Christi erschlossen ist.

Merkwürdigerweise redet die heutige Naturwissenschaft auch nicht mehr unkritisch von der zeitlichen Unendlichkeit der Welt, sondern erwägt einen Anfang und ein Ende des Kosmos.

2. Der Beitrag der Physik zum Verständnis von Zeit

Vor dem Hintergrund der angedeuteten vielschichtigen Zeiterfahrungen wollen wir nun etwas genauer fragen, was der Beitrag der Physik zur Frage nach der Zeit ist.³

Kann sie uns sagen, was Zeit *wirklich* ist? Das ist nicht zu erwarten, da sie – wie jede Wissenschaft – die Welt mit einem bestimmten methodischen Zugriff zu erfassen sucht und auf diesem Wege dann auch nur einen bestimmten Aspekt von Wirklichkeit in den Blick bekommt.

Die Physik entwirft Modelle für die aus Experimenten und Beobachtungen gewonnenen Daten. Das *Material* der Modelle stammt aus der Mathematik, der Wissenschaft der formalen Strukturen. Wirklichkeit wird also unter strukturellen Gesichtspunkten abgebildet. In der Physik werden mit zunehmender Präzision Fragen nach dem *Wie* beantwortet: Wie und wie schnell fällt ein Stein? Wie breiten sich Wellen aus? Wie kurz ist ein Impuls? Oft lassen sich Zusammenhänge quantitativ darstellen. Diese Methodik von Experiment und Modellbildung erlaubt sehr weitreichende und meist auch praktisch anwendbare Einsichten.

Es bleiben dabei allerdings andere Fragen ausgeblendet, z.B. Fragen nach dem *Was*, nach Qualitäten und nach Werten. Beispiel: Die rote, grüne oder blaue Farbe von monochromatischem Licht wird durch eine Angabe der Frequenz charakterisiert. Was weiß man aber damit über das Wesen des Farbeindrucks und über die qualitative Verschiedenheit von Rot, Grün oder Blau?

Was ist Zeit? "Für den Physiker ist diese Frage wenig sinnvoll", meint der Nobelpreisträger EIGEN. In der Physik müssen wir vielmehr fragen: Wie ist Zeit? In diesem Sinne ist die Physik in ihren Aussagen über Zeit entscheidend *verkürzt* gegenüber dem Phänomen Zeit der Lebenswelt. Der verkürzte Zeitbegriff ist dafür schärfer definiert. Was wir darüber hinaus aufgrund unserer Erfahrung über Zeit wissen, ist deshalb aber nicht illusionär.

Der physikalische Zugriff auf die Zeit korrigiert aber nicht nur manche unserer anschaulichen Zeitvorstellungen, sondern *erweitert* auch unseren Erfahrungshorizont und unser Wissen über die Zeit. Es zeigt sich, daß die Zeitstruktur *reichhaltiger* ist, als es unserer Alltagserfahrung entspricht. Hier regt sich gerne Widerstand: Ist es nicht "unlogisch", daß (in dem vieldiskutierten Zwillingparadoxon) der reisende Zwilling weniger gealtert zur Erde zurückkommt? Kann es denn sein, daß die Gleichzeitigkeit von Ereignissen abhängig vom Bezugssystem ist? Und warum sollten bewegte Uhren langsamer gehen?

Vor allen Einzeldiskussionen über solche Aussagen ist es hilfreich, sich bewußt zu machen, daß wir unsere Alltagserfahrungen häufig unkritisch extrapolieren. Es ist nun aber keineswegs selbstverständlich oder gar logisch zwingend, daß sich unsere Welt mit ihrer Zeitordnung z.B. bei Vorgängen sehr hoher Geschwindigkeit genauso verhält, wie wir es aufgrund unserer Erfahrung bei 50 km/h (oder auch einmal bei 180 km/h) annehmen.

Die Physik leitet uns an, mit unserer Anschauung und ihren Extrapolationen sehr kritisch umzugehen. Wir müssen lernen, neuen erweiterten Modellen auch in Bereichen zu trauen, wo die Alltags-Anschauung uns nicht mehr absichert. (Diese Übung kann auch eine Hilfe im Umgang mit biblischen Wahrheiten sein!)

Schließlich muß man auch im Auge behalten, daß die Physik keine abgeschlossene Wissenschaft ist. Ihre Aussagen über die Zeitstruktur unserer Welt haben sich in der Vergangenheit gewandelt, und grundlegende Fragen (z.B. nach der Begründung der Richtung der Zeit) sind bis heute nicht befriedigend beantwortet. Neue Einsichten über die Zeit sind zu erwarten. Selbst radikale Veränderungen im Zeitverständnis sind nicht auszuschließen, wenn in Zukunft einmal die Vereinigung von Quantentheorie und Allgemeiner Relativitätstheorie gelingen wird.

Nach diesen allgemeinen Bemerkungen darüber, was von der Physik zum Zeitproblem prinzipiell zu erwarten ist, soll nun der Frage nachgegangen werden, wie man denn Zeit *mißt*. Bei ihrer Beantwortung ist der Physiker in seinem Element.

2.1 Wie mißt man Zeit?

Die Physik handelt von *Ereignissen* in der Natur. Nehmen wir als Beispiel den Einschlag eines Blitzes, so ist zur (idealisierten) Beschreibung eine Angabe des Orts (der Stelle im Raum) und des Zeitpunkts notwendig. Damit ist natürlich noch nicht alles physikalisch Interessante über Blitze gesagt! Schlagen zwei Blitze ein, so kann man nach dem räumlichen und dem zeitlichen *Abstand* der Einschläge fragen. Orte lassen sich nicht ohne ein *Bezugssystem* angeben. Man wählt dazu ein materielles System, wie etwa die Wände eines Zimmers, und versieht es mit einem geeigneten Koordinatensystem. Bezüglich des Zimmers lassen sich nun drei Zahlen angeben, welche den Ort des Ereignisses festlegen.

Das Bezugssystem muß außerdem Uhren enthalten, an denen man am Ort des Ereignisses den zugehörigen Zeitpunkt ablesen kann. Was ist eine Uhr? Ein Gerät, in dem eine periodische Folge von Ereignissen stattfindet. Numeriert man diese Ereignisse (*Zeitmarken*), so ist damit eine (eindimensionale) zeitliche Reihenfolge festgelegt. Bei der Messung eines Zeitpunktes wird nun festgestellt, in welches Paar aufeinanderfolgender Zeitmarken das zu messende Ereignis fällt. Je kleiner die Intervalle, des-

to genauer lässt sich der Zeitpunkt bestimmen.

Woher weiß man aber, ob eine Ereignisfolge periodisch ist, also *gleiche* Zeitabstände markiert? Man wird versuchen, diese Frage durch eine Messung zu beantworten. Um die Periodizität zu prüfen, bräuchte man eine Uhr, in der eine Folge periodischer Ereignisse mit gleicher oder höherer Genauigkeit stattfindet. Woher weiß man aber, ...? Wir sind hier in einem Zirkel, dem man nicht vollständig entgehen kann. Messungen geschehen mit Geräten, die selber nach Prinzipien der zu erforschenden Natur arbeiten. Dennoch lassen sich Uhren mit immer höherer Genauigkeit herstellen. Dies gelang und gelingt schrittweise, indem man das Alltagswissen über periodische Vorgänge und die fortschreitende Naturerkenntnis mit einbezieht:

Viele Naturgesetze handeln von zeitlichen Abläufen, von Ereignisfolgen. Ihre Formulierung wird somit von den Bezugszeitmarken, d. h. von der verwendeten Uhr abhängen. Leitidee ist nun, solche Uhren zu wählen, welche zu einer möglichst einfachen Gestalt der Gesetze führen. Aus dieser Sicht ist die Folge der Herzschläge eines Menschen zwar eine mögliche Uhr, aber eine solche, die zu einer äußerst komplizierten Formulierung selbst einfachster mechanischer Vorgänge führen würde. Bis 1940 war die Erdrotation (Periode der Meridiandurchgänge eines Sterns) die geeignetste und genaueste bekannte Uhr (relative Abweichungen von nur 10^{-8} in Zeiträumen von 10^4 Jahren).

Heute gehören Atomuhren (z.B. mit Cäsium-Atomen) zu den genauesten Uhren. Man bezieht sich dabei auf die Periode von elektromagnetischen Wellen, die beim Übergang eines Atoms zwischen zwei seiner Energieniveaus ausgesandt werden. Auf diese Weise wurde im Jahre 1967 die Maßeinheit *Sekunde* neu definiert:

"Die Sekunde ist das 9.192.631.770-fache der Periodendauer der dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstruktur-niveaus des Grundzustandes von Atomen des Nuklids ^{133}Cs entsprechenden Strahlung."

Die hohe Genauigkeit solcher Uhren (geschätzter relativer Fehler 10^{-13} , d.h. eine Sekunde Fehler in 300 000 Jahren) ist heute mit Funkuhren allgemein zugänglich. Woher weiß man aber, daß Atomuhren die genauere Periodizität haben als die Erddrehung? Wieder geht es um die erstrebte Einfachheit der Naturbeschreibung: Die oben angegebenen mit Atomuhren gemessenen Schwankungen in der Periode der Erdrotation haben ein kompliziertes Zeitverhalten. Sie lassen sich jedoch durch mehrere bekannte Effekte erklären (Einfluß des Mondes, Eiszeiten, innere Reibung, Tropenwinde usw.). Würde man die Erdrotation als das genauere Zeitmaß unterstellen, so würde das sehr viel einfachere System *Atom* komplizierte und bisher ganz unerklärliche Gesetzmäßigkeiten zeigen.⁴

Es gibt auch ganz erstaunlich genaue kosmische Uhren. Im Jahre 1982 entdeckte man einen rotierenden Neutronenstern (Pulsar), der uns wie ein Leuchtturm Signale mit einer Periode von 1,55806449023 Millisekunden schickt. Erst in 250 Millionen Jahren würde diese Uhr nur noch halb so schnell ticken.

Sind einmal bestimmte zeitlich periodische Vorgänge als Uhren definiert, so lassen sich nicht nur periodische Vorgänge zur Zeitmessung verwenden, sondern auch andere gesetzmäßige Vorgänge, wie z. B. zeitlich lineare Vorgänge (Rieseln des Sandes in einer Sanduhr) oder Vorgänge mit exponentiellem Zeitgesetz (Abnahme einer Substanz durch Zerfall radioaktiver Atomkerne).

2.2 Ist alles relativ?

Man kann Folgen von Ereignissen in Raum-Zeit-Diagrammen darstellen. Die (eindimensionale) Bewegung eines Zuges kann als zweidimensionaler *graphischer Fahrplan* gezeichnet werden: Man wählt die Zeit t als Ordinate und den Ort x als Abszisse. Die nacheinander durchlaufenen Orte erscheinen als Linie. Die Dynamik des Bewegungsvorgangs ist eingefroren. Diese – durchaus zweckmäßige – Darstellung der Zeit durch eine räumliche Achse verschleiert allerdings den qualitativen Unterschied von Raum und Zeit.

In der klassischen Physik waren Zeitabstände ebenso wie räumliche Abstände *absolut*, d.h. unabhängig vom gewählten Bezugssystem.⁵ Mit gleich gebauten Uhren schien es auch unproblematisch, diese alle so zu synchronisieren, daß sie die gleiche Zeit anzeigen. Dann sind auch Zeitpunkte absolut. Als *relativ*, d.h. abhängig vom Bezugssystem, erweisen sich dagegen Geschwindigkeiten – ganz in Übereinstimmung mit der Alltagserfahrung.

Die dramatischen Veränderungen des Zeitverständnisses in der modernen Physik durch die Spezielle und die Allgemeine Relativitätstheorie lassen sich nun nicht in wenigen Zeilen verständlich darstellen. Hier kann deshalb nur auf einige wenige interessante Aspekte hingewiesen werden:

Eine der Säulen der Speziellen Relativitätstheorie ist die Existenz einer Grenzgeschwindigkeit: Die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ($c = 299\,792\,458$ m/s; also etwa 300 000 km/s) ist eine absolute Konstante. Sie ist unabhängig von der Bewegung der Lichtquelle und von der Bewegung des Beobachters. Diese Aussage klingt einfach und eingängig, hat es aber in sich: Sie widerspricht völlig unserer Anschauung über die Additivität von Geschwindigkeiten! Und doch ist die Konstanz der Lichtgeschwin-

digkeit heute durch sehr viele direkte und indirekte Experimente bestätigt und gehört zum gesicherten Bestand der Physik.⁶

EINSTEIN erkannte als erster, daß die Existenz dieser absoluten Geschwindigkeit nur mit einer grundlegend veränderten Raum-Zeit-Struktur verstanden werden kann und formulierte das in der Speziellen Relativitätstheorie. Für die Zeitstruktur ergibt sich:

1. Zeitpunkte und Zeitabstände sind relativ (in dem oben geschilderten Sinne). Zwei aufeinanderfolgende Ereignisse haben für einen dazu ruhenden Beobachter einen kürzeren Zeitabstand als für einen dazu bewegten Beobachter. In diesem Sinne gehen bewegte Uhren langsamer (*Zeitdilatation*). Dieser Effekt wurde am Beispiel des *Zwillingsparadoxons* ausführlich diskutiert: Wenn von Zwillingen der eine eine Weltraumreise mit z.B. 86,6 % der Lichtgeschwindigkeit unternimmt und nach 10 Jahren (gemäß der Anzeige seiner Borduhr) zurückkommt, dann sind für den anderen Zwilling, der auf der Erde mit einer baugleichen Uhr zurückgeblieben ist, bereits 20 Jahre verstrichen. Reisen hält jung!

Auch wenn man diese Fahrt leider vorerst technisch nicht realisieren kann, so gibt es doch genügend Experimente, welche die Zeitdilatation zweifelsfrei und quantitativ bestätigen. HAFELE und KEATING haben z. B. Cäsium-Atomuhren auf Linienflüge rund um die Erde (westwärts und ostwärts) mitgenommen und anschließend mit einer zurückgebliebenen Uhr gleichen Typs verglichen. Die beobachteten Zeitdifferenzen stimmen mit den Voraussagen der Speziellen Relativitätstheorie überein.⁷ Sie sind in der Größenordnung von nur 10^{-7} Sekunden wegen der (im Vergleich zu Licht) sehr geringen Geschwindigkeit der Flugzeuge. Unser Zeitgefühl wird also erst bei wirklich extrem hohen Geschwindigkeiten strapaziert! Der Begriff einer absoluten Zeit ist damit aber aufgegeben: Gegeneinander bewegte Bezugssysteme haben je ihre eigene Zeit.

2. Gleichzeitigkeit ist relativ. Zwei Ereignisse an verschiedenen Orten, die bezüglich eines bestimmten Inertialsystems als gleichzeitig gemessen werden, sind bezüglich anderer Inertialsysteme *nicht* gleichzeitig. Damit gibt es auch keine absolute Gegenwart. Ein universelles *Jetzt* kennt die Spezielle Relativitätstheorie nicht! Sogar die zeitliche Reihenfolge (Zeitordnung) kann bezugssystemabhängig sein. Glücklicherweise ist dies aber nur bei Ereignissen der Fall, die nicht kausal verknüpft sind (oder verknüpft sein könnten). Bei Ursache-Wirkungs-Gefügen ist die Zeitordnung absolut.

Kann man denn nicht einfach nachprüfen, ob zwei Ereignisse absolut ("an sich") gleichzeitig sind? Dazu könnte man doch zwei baugleiche Uhren am Ort des einen Ereignisses erst synchronisieren und dann eine der Uhren zum Ort des anderen Ereignisses transportieren. Leider kann man aber nicht davon ausgehen, daß die Synchronisation unterwegs – auch bei ideal schonendem Transport – erhalten bleibt, da bewegte Uhren (geschwindigkeitsabhängig) langsamer gehen!

Ein praktikabler Weg ist das Verfahren der EINSTEIN-Synchronisation: Die beiden Uhren an den Orten der Ereignisse werden durch Signale gleicher Geschwindigkeit von der Mitte der Verbindungslinie aus synchronisiert und können dann zur Feststellung der Gleichzeitigkeit verwendet werden.

Hier zeigt sich ein typischer Zug der durch EINSTEIN mitbegründeten modernen Physik: Der bisher unkritisch verwendete Begriff der Gleichzeitigkeit wird durch ein Meßverfahren mit realen Uhren, Signalen usw. *operativ definiert*. Man kann dann *messen*, ob Gleichzeitigkeit vorliegt und stellt fest, daß die so definierte Gleichzeitigkeit nicht absolut (wie bisher unkritisch angenommen), sondern relativ ist.

3. Zum tieferen Verständnis ist es wichtig zu wissen, daß in der Speziellen Relativitätstheorie neue Größen auftreten, die absolut, also nicht bezugssystemabhängig sind. Es ist also keineswegs "alles relativ"! Waren bisher räumliche und zeitliche Abstände von Ereignissen je für sich absolut, so zeigt sich zwar jetzt, daß sie relativ werden, daß dafür aber eine Art verallgemeinerter Abstand, ein raumzeitlicher Abstand zwischen Ereignissen absolut ist. Auch die Aufteilung dieser Abstände in sog. *zeitartige* und *raumartige* ist absolut.

Der oben geschilderte graphische Fahrplan ist also viel mehr als nur eine zweckmäßige Darstellung, er drückt eine tiefliegende Verbindung von Raum und Zeit aus. Der dreidimensionale Raum und die eindimensionale Zeit bilden zusammen die vierdimensionale *Raumzeit*. Linien in der Raumzeit stellen Folgen von Ereignissen dar. Es kann sich dabei um determinierte oder auch um indetermierte Prozesse handeln; das muß die Spezielle Relativitätstheorie offen lassen.

Diese geometrisierte Darstellung von Zeit könnte eine Hilfe sein, angemessen über Schöpfung zu reden: Gott ruft die Raumzeit (zusammen mit Materie) ins Dasein (vgl. Röm 4,17). Die Ordnungsstruktur Zeit wird mitgesetzt. Schöpfung geschieht also nicht *in* der Zeit. Wie alt die Welt nach unseren Zeitmaßstäben ist, wird dann zu einer eher sekundären Frage. AUGUSTINUS hat das schon klar erkannt: „Niemals also hat es eine Zeit gegeben, wo du nicht schon etwas geschaffen hattest, weil du ja die Zeit selbst geschaffen hast.“⁸

2.3 Reisen in die Vergangenheit?

Die Allgemeine Relativitätstheorie EINSTEINS ist zum einen eine Verallgemeinerung der Speziellen Relativitätstheorie auf beliebige beschleunigte bewegte Bezugssysteme, zum anderen eine über NEWTON hinausgehende Gravitationstheorie. In ihr wird der Einfluß von Massen auf die Geometrie der Raumzeit formuliert ("gekrümmter Raum"). Auch diese Theorie ist inzwischen expe-

rimentell gut bestätigt. Ihre Hauptanwendung liegt in der Beschreibung großräumiger Massenverteilungen im Kosmos. Für das Verständnis von Zeit ergeben sich folgende neue Einsichten:

1. Zeitliche Abstände von Ereignissen werden auch von Schwerfeldern beeinflusst: Je stärker das Gravitationsfeld, desto langsamer geht dort eine Uhr. Das gilt für alle Uhren unabhängig von ihrer Bauart! Dieser Effekt konnte mit Cäsiumuhren im höhenabhängigen Schwerfeld der Erde nachgewiesen werden und beträgt für 100 m Höhendifferenz ca. 10^{-9} Sekunden/Tag.

Seit 1971 wird dieser allgemeinrelativistische Effekt bei der sog. Internationalen Atomzeitskala TAI (Temps Atomique International) berücksichtigt: Die oben definierte Sekunde bezieht sich nun ausdrücklich auf Uhren in Meereshöhe.

2. Das Problem der Uhrensynchronisation wird sehr viel schwieriger und nicht mehr allgemein lösbar. Ein Schwerfeld in einem System verhindert ja eine einheitliche (homogene) Zeit. Aus dieser Sicht erscheint es verwunderlich, daß man im Rahmen des Standard-Modells der Kosmologie (Urknall-Modell) dennoch von einem "Weltalter" sprechen kann. Ist das nicht ein Rückfall in die NEWTONSche absolute Zeit? In gewissem Sinne, ja. Ein Weltalter läßt sich allerdings nur in ganz speziellen, hochsymmetrischen Weltmodellen definieren. Hält man das kosmologische Prinzip für gültig, daß der Kosmos großräumig überall und in allen Richtungen dieselben Eigenschaften hat (Homogenität und Isotropie), so gibt es für Beobachter in verschiedenen Gegenden des Kosmos jeweils Bezugssysteme, in denen sie die gleiche isotrope Expansion beobachten. Mit Hilfe des beobachteten Entwicklungszustandes des Weltalls läßt sich dann eine gemeinsame (absolute) Zeit definieren.

Im Rahmen der Allgemeinen Relativitätstheorie werden auch sehr viel kompliziertere Weltmodelle diskutiert mit ganz anderen Zeitstrukturen. Ob sie einmal zur genaueren Beschreibung unserer Welt notwendig werden, ist derzeit nicht zu entscheiden. Zur Veranschaulichung denke man sich z.B. das Blatt eines graphischen Fahrplans stark verformt. Selbst geschlossene Zeitlinien (Zeitschleifen) sind theoretisch möglich (GÖDEL). Ob damit Reisen in die Vergangenheit möglich sind, ohne daß man sich in kausale Widersprüche verstrickt (Möglichkeit der Ermordung der eigenen Vorfahren u.ä.), ist ein weites Feld der Forschung, Spekulation und Science Fiction.

2.4 Warum wird Kaffee mit der Zeit kalt?

Zu unseren selbstverständlichen und prägenden Erfahrungen gehört die Ungleichheit von Vergangenheit und Zukunft. Vergangenes liegt fest, Zukünftiges ist offen, unbestimmt. Ereignisfolgen (Prozesse) laufen in Richtung Zukunft, nicht in Richtung Vergangenheit. Bei einer Filmsequenz über einen Vorgang (Abbrennen eines Streichholzes, Explosion einer Bombe) wissen wir genau, welches die *richtige* Abspielrichtung ist. Man spricht mit dem Astrophysiker EDDINGTON vom "Pfeil der Zeit", wobei aber nicht an eine Flugbewegung gedacht werden sollte, sondern an die Auszeichnung einer *Richtung*. Die Zeit ist asymmetrisch.

In der quantenmechanischen Beschreibung von Prozessen wird diese Asymmetrie deutlich: Für künftige Ereignisse werden nur Wahrscheinlichkeitsaussagen gemacht. Merkwürdigerweise zeichnet aber die zugrundeliegende SCHRÖ-DINGER-Gleichung gar keine Zeitrichtung aus. Erst durch den Vorgang der Messung kommt ein irreversibler Aspekt ins Spiel. Und gerade dieser ist bisher noch nicht gut verstanden.

Alle Grundgleichungen der Physik sind *zeitumkehrinvariant*. Sie zeichnen nicht die Zukunft vor der Vergangenheit aus; sie "erlauben" Prozesse in beide Richtungen der Zeit. Sie erlauben sozusagen doppelt so viel wie tatsächlich beobachtet wird.⁸

Natürlich gibt es direkt an den Erscheinungen orientierte sog. phänomenologische Gleichungen (wie den Zweiten Hauptsatz oder die Wärmeleitungsgleichung), welche die "richtige" Zeitrichtung auszeichnen. Das Problem besteht in ihrer Begründung aus den Grundgleichungen der Physik.

So gesehen ist es verwunderlich, daß eine Tasse mit heißem Kaffee sich immer in die Zukunft hinein abkühlt, obwohl doch alle beteiligten Moleküle den zeitumkehrinvarianten Grundgesetzen genügen!⁹ Der bekannte Zweite Hauptsatz der Thermodynamik beschreibt solche Vorgänge phänomenologisch korrekt. Er zeichnet eine Zeitrichtung aus ("irreversible Prozesse"): In wärmeisolierten Systemen nimmt die Meßgröße Entropie mit fortschreitender Zeit bis zu einem Maximalwert (Gleichgewicht) zu. Manchmal ist das anschaulich mit einer zunehmenden Unordnung verbunden. Im Gleichgewicht verliert sich dann der Zeitpfeil.

Die Statistische Physik versucht seit BOLTZMANN und GIBBS, den Zweiten Hauptsatz aus den Grundgleichungen der Mechanik herzuleiten. Mit wahrscheinlichkeitstheoretischen Überlegungen kann man in der Tat zeigen, daß auf eine geringere Entropie mit hoher Wahrscheinlichkeit eine Entropiezunahme folgt. Dies gilt in Richtung Zukunft wie auch – im Widerspruch zum Zweiten Hauptsatz – in Richtung Vergangenheit. Die Grundgleichungen der Physik zeichnen ja keine Zeitrichtung aus! Woher kommt dann die Asymmetrie? C.F. v. WEIZÄCKER argumentiert, daß man hier die asymmetrische Zeitstruktur bereits voraussetzen muß, da man Wahrscheinlichkeiten sinnvoll nur für künftige, mögliche Ereignisse anwenden kann und nicht für vergangene, die festliegen und (prinzipiell) bekannt sind. Ist also die Zeit *selbst* asymmetrisch? Warum zeigt sich das dann nicht in den Grundgleichungen?

Das, was in der Welt geschieht, hängt nicht nur von Gesetzen ab, sondern auch von Randbedingungen, kontingenten Vorgaben. Der Kaffee in der Tasse war ja gar nicht immer ein (näherungsweise) isoliertes System. Er ist angekoppelt an andere Systeme über Randbedingungen: Das Kaffeewasser wurde in einem Kocher elektrisch erhitzt. Die benötigte Energie stammt (z.B. über den Zwischenspeicher Kohle) letztlich von der Sonne. Aber auch die Sonne ist nicht vom Rest des Universums isoliert, sie entstand in einer früheren Phase aus Gasnebeln. Zur Abkühlung des Kaffees ist andererseits auch nötig, daß die Luft des umgebenden Zimmers kühler ist, daß die Erde also Wärme an den noch kühleren Weltraum abstrahlen kann.

Die Frage der Zeitrichtung führt so auf Eigenschaften unseres Kosmos. Manche vermuten in der kosmischen Entwicklung (Expansion) den "Super-Zeitpfeil", die "Master-Asymmetrie", aus der letztlich die von uns erfahrene Zeitrichtung folgt.

Andere suchen nicht Randbedingungen, sondern Gesetze zur Erklärung der Asymmetrie. Nach DAVIES ist die Gravitation im Kosmos die Quelle der Asymmetrie: Große Massen unter Schwerkraft haben die Besonderheit, daß sie nie in einen stabilen Gleichgewichtszustand gelangen (wo keine Zeitrichtung erkennbar ist), sondern letztlich zu Schwarzen Löchern kollabieren. Schwarze Löcher absorbieren als "kosmische Staubsauger" unbegrenzt Materie und Strahlung, ohne sie wieder zu emittieren. Sie geben damit eine Zeitrichtung vor.¹⁰

Alle diese Überlegungen sind bisher nicht abgeschlossen und zu einer allgemein akzeptierten Theorie verdichtet. Sie zeigen immerhin, wie weit man offenbar ausholen muß, um ein so geläufiges Phänomen wie die Asymmetrie der Zeit physikalisch zu verstehen.

Dr. Peter C. Hägele ist Professor für Physik an der Universität Ulm und Mitglied des Leitungskreises der Fachgruppe Naturwissenschaftler der Akademikerarbeit der SMD.

Anmerkungen

¹ Einführend: GUMIN, H. und MEIER, H. (Hrsg.): Die Zeit. Dauer und Augenblick. 2. Aufl. München, Zürich: Piper 1990. (Veröffentlichungen der Carl Friedrich von Siemens Stiftung, Band 2).

PETER C. AICHELBURG (Hrsg.): Zeit im Wandel der Zeit. Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg 1988.

² A.M. KLAUS MÜLLER: Die Gefährdung von Umwelt und Frieden im Atomzeitalter. In: Naturwissenschaft und Glaube. Hrsg.: Helmut A. Müller. Bern, München, Wien: Scherz 1988.

³ Einführend: DAVIES, P.: Die Unsterblichkeit der Zeit. Bern, München, Wien: Scherz 1998 (4. Aufl. der Sonderausgabe).

LUDWIG, G.: Das naturwissenschaftliche Weltbild des Christen. Osnabrück: Fromm 1962.

Vertiefend: Mittelstaedt, P.: Der Zeitbegriff in der Physik. 2. Aufl. Mannheim, Wien, Zürich: Bibliographisches Institut 1980.

⁴ Eine ausführlichere Darstellung der Probleme der Zeitmessung findet sich in dem – auch sonst sehr empfehlenswerten – Buch von RUDER, H. und RUDER, M.: Die Spezielle Relativitätstheorie. Braunschweig: Vieweg 1993.

⁵ Man betrachtet Bezugssysteme, in denen das Trägheitsgesetz gilt (Inertialsysteme). Sie führen selber keine beschleunigten Bewegungen aus. Ein zu einem Inertialsystem gleichförmig bewegtes System ist ebenfalls ein Inertialsystem. In allen Inertialsystemen gelten die gleichen Gesetze der Mechanik.

⁶ Zerfallende π^0 -Mesonen mit einer Geschwindigkeit von mehr als 99,975% der Lichtgeschwindigkeit senden Licht aus, dessen Geschwindigkeit mit einer Genauigkeit von

10^{-4} auch *nur* die Lichtgeschwindigkeit c ist (CERN, ALVÄGER 1964).

⁷ Da die Flugzeuge in verschiedenen Höhen flogen, mußten auch allgemeinrelativistische Effekte des Schwerefeldes berücksichtigt werden.

⁸ Bekenntnisse XI, 14.

⁹ Bei Elementarteilchenprozessen mit neutralen K-Mesonen scheint eine Verletzung der Zeitumkehrinvarianz vorzuliegen. Diese seltenen Prozesse bleiben hier außer Betracht.

¹⁰ BREUER, R.: Die Pfeile der Zeit. Frankfurt/M., Berlin: Ullstein 1987.

¹¹ Vertiefend: Davies, P.C.W.: The Physics of Time Asymmetry. Berkeley, Los Angeles: University of California Press 1976.