

# Über die "Zeit in der Natur" \*

Von H. D. Zeh, Heidelberg

## I. Vorbemerkungen

Der Begriff der Zeit ist den philosophierenden Menschen von jeher rätselhaft erschienen. Einige dieser Rätsel mögen vorwiegend auf der Verwendung traditioneller Vorurteile, Sprechweisen und unangebrachter Analogien oder auf unangemessenen Erwartungen an diesen Begriff beruhen. Falsche Erwartungen kommen häufig durch ein traditionsbehaftetes Vokabular zustande. Sie sollten sich dann bei sorgfältiger Argumentation vermeiden lassen. Andere Probleme sind dagegen erst im Rahmen einer wissenschaftlichen Diskussion der Zeit sichtbar geworden. Wieder andere betreffen, wie sich bei genauerer Betrachtung zeigt, gar nicht den Begriff der Zeit selbst.

Einige Scheinprobleme, die in der historischen Entwicklung des Zeitbegriffs oftmals in die Irre geführt haben, beruhen auf einer mangelhaften Unterscheidung zwischen der "Zeit in der Natur" und der Art, wie diese uns ("in der Seele") bewußt wird. Nach Flasch<sup>1</sup> geht eine solche Trennung und damit der Begriff einer Zeit in der Natur erst auf Albertus Magnus zurück ("Ergo esse temporis non dependet ad anima, sed temporis perceptio"), was bei ersterem aber wohl eher eine Fragwürdigkeit dieser Trennung andeuten soll. Sie mag sich vielleicht einmal als unzureichend herausstellen -- aber davon kann beim derzeitigen Stand der *Erkenntnis* über die Zeit keine Rede sein.

Die Zeit erscheint uns unmittelbar (ohne ein offensichtliches Sinnesorgan) gegeben -- und wir ihrem "Fluß" absolut unterworfen. Dieser subjektiv empfundene Aspekt der Zeit gibt ihr epistemologisch einen fundamentalen Charakter, während unser "objektives Weltbild" grundsätzlich fiktiv bleiben muß -- auch wenn diese Fiktion keineswegs willkürlich, sondern *heuristisch* und damit empirisch begründet ist. (Merkwürdigerweise haben außer unkritischen Menschen gerade Philosophen die größten Schwierigkeiten,

---

\* Erschienen in: Evolution und Irreversibilität, H.-J. Krug und L. Pohlmann, Hsg., (Duncker und Humblot, Berlin, 1998)

sich ein für allemal mit dieser grundsätzlich hypothetischen Natur unseres Bildes der Realität abzufinden.) Doch verstehen wir innerhalb des fiktiven Weltbildes, das uns die Naturwissenschaft bietet, zumindest ansatzweise, wie das Zeitempfinden durch *dynamische Prozesse* (also Bewegungsabläufe) im Gehirn kontrolliert wird. Solche zu formulieren setzt natürlich einen in ebendiesem Sinne fiktiven physikalischen Zeitbegriff voraus.

Das soll keineswegs die Ansicht zum Ausdruck bringen, daß wir das Bewußtsein selbst erklären (aus physikalischen Phänomenen und Gesetzen *ableiten*) könnten, sondern lediglich, daß der Begriff der "Zeit in der Natur" ebensowenig in der Art ihrer Wahrnehmung begründet ist, wie etwa der Begriff des Lichtes in dem der Farbe oder der Temperatur in dem eines Wärmeempfindens. Die wahrgenommene Farbe ist weder eine Eigenschaft des Lichtes noch eine solche reflektierender Objekte. Zwar läßt sich neurobiologisch (also innerhalb des fiktiven Bildes der Realität) weitgehend verstehen, warum etwa bestimmte Frequenzmischungen für das Auge oder das Sehzentrum ununterscheidbar sind, aber nicht, wie oder warum daraus der subjektive Eindruck der Farbe "rot" entsteht.

Ähnlich ist die *Gegenwart* (und somit auch ihr vermeintliches "Fließen" in Richtung auf die dadurch definierte Zukunft) offenbar keine Eigenschaft der Zeit selbst, soweit diese als ein die Natur charakterisierender Begriff verstanden werden kann. Dagegen läßt sich neurobiologisch nachweisen, daß über Zeiträume von Zehntelsekunden oder gar Sekunden getrennte Vorgänge im Gehirn zu "Wahrnehmungspaketen" zusammengefaßt werden (also vor ihrer Wahrnehmung ein physikalisch zu interpretierender Informationsverlust über die zeitliche Einordnung stattfindet).<sup>2</sup> Insofern ist auch das "reale" Zeitkontinuum genauso fiktiv wie das (eben nicht von violett zu rot zusammenhängende) kontinuierliche Spektrum des Lichts. Aber es sei noch einmal betont, daß dieser fiktive Charakter keine Zweitrangigkeit gegenüber etwas Fundamentalere oder (vom rein Subjektiven abgesehen) besser Begründbarem bedeutet.

Dieser Beitrag eines Physikers soll sich ausschließlich mit dem Begriff der *Zeit in der Natur* (und insbesondere deren "Richtung") beschäftigen, aber eine Abgrenzung von *anderen* (möglicherweise auch weitergehenden) Begriffen oder Begriffsversuchen erscheint angebracht. Ob und inwieweit das eine Einschränkung des Zeitbegriffes bedeutet, mag zunächst offen bleiben. Dagegen müßte ein direkt auf dem bewußten Erleben beruhender Zeitbegriff qualitativ bleiben und sich auf unsere vermutlich sehr spezielle "Situation in der Welt" beschränken (auch in der Zeit -- sofern dieser Begriff dann noch Sinn macht).

Empirische (also heuristische) Begriffe werden dadurch in ihrem Wahrheitsanspruch gerechtfertigt, daß sie zum Zwecke einer ökonomischen Beschreibung der Natur "funktionieren". Das Empirische wird gewöhnlich im Sinne von Erfahrung *mit der Zeit*, also als eine Zeitrichtung voraussetzend, verstanden. Das ist zwar in der Welt in der wir leben zutreffend, aber es ist keineswegs eine unumgängliche Voraussetzung für empirische Erkenntnis. So hat Price<sup>3</sup> erst kürzlich über durchaus *denkbare* Einflüsse aus der Zukunft spekuliert. Zusammenhänge zwischen der Natur und deren partizipierendem Beobachter wären aber selbst unter viel allgemeineren Zeitkonzepten (verstanden nur als Aufteilungen einer "überzeitlichen" Realität in mögliche Träger von physikalischen *Zuständen* der Beobachter -- wie etwa im konkreten Fall einer "Foliation" der vierdimensionalen Raumzeit der Relativitätstheorie in raumartige Hyperflächen) möglich. Eine Extrapolation aus unserer spezifischen Situation mit Hilfe empirisch erschlossener und im üblichen Sinne hypothetisch konsequent fortgesetzter Gesetzmäßigkeiten in gänzlich andere ist nicht nur möglich, sondern im Rahmen moderner kosmologischer Modelle durchaus üblich (wenn auch oft unter Einwänden von Traditionalisten).

## II. Zeit und Bewegung

Ein enger begrifflicher Zusammenhang von *Zeit und Bewegung* wurde bereits von Aristoteles betont. Dieser bezeichnete Zeit als ein Maß für Bewegung, während Newton eher Bewegung als ein Maß für die von ihm postulierte *absolute Zeit* ansah. Der Zusammenhang zwischen Bewegung und Zeit erschien Aristoteles jedoch problematisch -- vor allem, weil er das Messen (oder quantitative Erfassen) als eine Aufgabe der "Seele" ansah, das er sich nur als ein Abzählen von periodischen Vorgängen mit Hilfe der natürlichen Zahlen vorstellen konnte. Die reellen Zahlen als Grundlage der kontinuierlichen räumlichen Bewegung galten ihm noch als unfaßbar -- ein Problem, das auch zu einigen der Zenonschen Paradoxien Anlaß gab. Erstaunlicherweise findet man diesen Einwand gegen die formale Beschreibbarkeit einer kontinuierlichen Zeit gelegentlich auch heute noch, obwohl er gar nicht auf die Zeit beschränkt, rein mathematischer Natur und insofern längst überwunden ist.

Leibniz scheint als erster die Zeit konsequent durch die Bewegung des ganzen Universums *definiert* zu haben, wie es später Mach als Programm für die Mechanik gefordert hat.<sup>4</sup> Der gleiche Zustand der Welt würde dann *dieselbe Zeit* bedeuten. Eine zeitliche Verschiebung oder Umkehr des gesamten Weltablaufes sind danach inhaltsleere begriffliche Konstruktionen, weil sie eine anderweitig definierte ("absolute") Zeit voraussetzen.

In der Tat würde ein sich wiederholender Zustand der Welt nicht nur dieselben Uhrenstände, sondern auch dieselben Gedächtnisinhalte implizieren. Mit dieser relationalen Auffassung verpaßte Leibniz allerdings Newtons Bewegungsgleichungen, die ebenfalls eine absolute Zeit voraussetzen. Mach griff die Leibnizsche Motivation wieder auf, wobei er wichtige begriffliche Vorarbeit zur Allgemeinen Relativitätstheorie leistete. Leibniz war also konsequenter als Newton in der Verwendung eines mechanistischen Zeitkonzeptes, auch wenn Newton zunächst Erfolg hatte und rein logisch hätte recht behalten können. Es bleibt aber die Frage, ob die empirisch gefundenen Naturgesetze die Wiederholung eines Zustandes (also nach Leibniz eine Wiederkehr derselben Zeit) erlauben oder nur ein irreversibles Geschehen zulassen.

Diese "mechanistische" Definition der Zeit durch Bewegung im Sinne von Leibniz und Mach wird oft als deren *Elimination* aus der Naturbeschreibung angesehen, was aber nur für eine *absolute* Zeit zutrifft. Wenn wir etwa die Zeitvariable aus der Bewegungsbeschreibung  $r(t)$ ,  $\phi(t)$  eines Planeten eliminieren, bleibt nur seine zeitlose Bahn  $r(\phi)$ . Systeme, die nicht einem einzelnen Massenpunkt äquivalent sind, wie reale Planeten, auf denen auch komplexe Dinge geschehen, beschreiben Bahnen in hochdimensionalen *Konfigurationsräumen*. Fügen wir etwa vor dem obigen Eliminieren der Zeit noch den Zeiger einer geeigneten Uhr als dynamische Variable im Konfigurationsraum hinzu (wobei eine Uhr immer einen hinreichend umfangreichen Kalender einschließen soll), so bleibt die durch sie definierte "Zeit" als eine physikalisch realisierte Größe bei der Elimination erhalten. Nach Leibniz müßte man für diesen Zweck *alle* physikalischen Uhren (also Bewegungsvorgänge) im Universum berücksichtigen, während sich nach Mach auch Newtons scheinbar absolute Zeit aus den globalen Bewegungsvorgängen des Universums (etwa seiner Expansion) ergeben sollte. Ein nichtrelativistisches Modell solcher Art wurde erst in jüngerer Zeit von Barbour und Bertotti konstruiert.<sup>5</sup>

Dieses begriffliche Vorgehen zur Definition zeitloser Bahnen setzt aber eine *Zuordnung* der Werte verschiedener Variablen voraus, die wir als ihre "Gleichzeitigkeit" interpretieren. Das ist sicher auch ohne die zur Relativitätstheorie führenden Konsequenzen einer universellen Lichtgeschwindigkeit ein nichttrivialer Teilaspekt des Zeitbegriffs, der somit nicht eliminiert wird. Er bleibt im Normalfall auch nach den durch die Relativitätstheorie erzwungenen Modifikationen zur Definition von globalen "Zuständen" oder "Konfigurationen" (auf willkürlich gewählten raumartigen Hyperflächen in der Raumzeit) möglich. Das soll aber nicht das Thema dieses Beitrags sein.

Es muß unser Mißtrauen erwecken, daß Uhren nicht immer "genau" gehen -- denn welche Uhr entscheidet über diese Genauigkeit? Auch astronomische Bewegungen sind

Störungen unterworfen. Erst das Universum als Ganzes kann nicht gestört werden; es *definiert* seine eigene Zeit. Bahnen in einem Konfigurationsraum der möglichen Zustände, die in diesem Fall *alle* (mehr oder weniger genauen) physikalischen Uhren einschließen, lassen sich rein formal durch willkürliche Bahnparameter  $\lambda$  in der Form  $q(\lambda)$  beschreiben. Gleiche  $\lambda$  drücken hier nur die Gleichzeitigkeit aus, aber weder ein Zeitmaß noch eine Richtung. In den fundamentalen Bewegungsgesetzen dürfte die Wahl eines solchen Parameters dann aber keine Rolle spielen. Das wird in modernem Sprachgebrauch als "Reparametrisierungsinvarianz" (der Gesetze) bezeichnet. Newton postulierte jedoch gerade einen bis auf lineare Transformationen definierten Zeitparameter, den er als *absolute Zeit* interpretieren mußte. Diese absolute Zeit "kontrolliert" laut Newtons Gesetzen alle Bewegungsvorgänge. Diese Tatsache bildete also den Ansatzpunkt für Machs Kritik als Konsequenz aus Leibnizschen Begriffen. Newtons funktionale Definition der Zeit entspricht nach Poincaré einer heuristischen Fiktion zur Vereinfachung der Bewegungsgesetze, die bis zur Entdeckung der Relativitätstheorie auch allgemein gerechtfertigt erschien. Sie ist heute in der Tat nur noch als Näherung begründbar.

### III. Fluß der Zeit und Irreversibilität

Das formal Wesentlichste an dem empirisch begründeten mechanistischen Zeitbegriff (sei er nun absolut oder relativ) ist seine Eindimensionalität. Die Zeit ist ebenso durch die reellen Zahlen *darstellbar*, wie eine einzelne Raumdimension. Das wird oft dazu benutzt, N-dimensionale Bewegungsvorgänge in (N+1)-dimensionalen Räumen bequem "statisch" darzustellen (etwa eindimensionale Vorgänge auf dem zweidimensionalen Papier). Natürlich ist dabei nur die Darstellung, nicht aber das Dargestellte, statisch. Die Vorstellung, Kurven in diesem (N+1)-dimensionalen Raum würden "durchlaufen", wäre der unsinnigen und überflüssigen Einführung einer unabhängigen *zweiten* Zeitvariablen äquivalent.

Ähnliches gilt für die in der Science-Fiction-Literatur beliebten "Zeitreisen", soweit sie nicht nur Konsequenzen der wegabhängigen *Eigenzeiten* (auch für Personen) in der Relativitätstheorie beschreiben. Es gilt aber auch für die Metapher eines "Zeitflusses", die daher nur eine Tautologie ausdrücken kann. Denn Fluß, wie jede Bewegung, bedeutet funktionale Abhängigkeit von (d.h. Korrelation mit) der Zeit. Somit kann auch die *Richtung der Zeit* entgegen allen metaphorisch begründeten Vorurteilen nur eine Asymmetrie des Geschehens *in der Zeit* bedeuten. Die Weylsche Formulierung, daß die Welt "sei" und nicht "werde", drückt nur die *Möglichkeit* einer statischen Darstellung aus

(oder betrifft sprachliche Konventionen). Darüber hinaus ist sie genau so leer wie ihr Gegenteil. Sie bedarf weder der relativistischen Raumzeit, auf die sie sich bezog, noch eines Determinismus.

Das Fehlen eines Flusses im Zeitkonzept wird leider auch von manchen Physikern, die es besser wissen sollten, als ein Mangel dieses Konzepts hingestellt. Den logischen Fehler einer solchen Kritik zu erkennen bedarf es nicht eines Wissenschaftlers, denn: "Time goes, you say? Ah no! Alas, time stays, we go." (Austin Dobson) Was wir beobachten ist nur die als "Gleichzeitigkeit" verstandene Korrelation von momentanen Zuständen verschiedener Bewegungsvorgänge -- beim subjektiven Zeitgefühl auch mit denen einer (recht ungenauen) "inneren Uhr" als Teil des neurophysiologischen Bewußtseinträgers. Eine solche (zeitlich asymmetrische) innere Uhr mag sich zwar im allgemeinen schwer dokumentieren lassen, ihre Existenz ist aber innerhalb des fiktiven wissenschaftlichen Weltbildes kaum anzuzweifeln (ohne dabei die Funktion des "kleinen Männchens im Gehirn", das seine eigene Armbanduhr dabei hat, zu übernehmen).

Als Newton seine Gesetze postulierte, welche die absolute Zeit funktional definieren, sah er Reibungskräfte noch als fundamental an. Dazu mußte die absolute Zeit auch eine absolute Richtung haben. Das entsprach seiner Vorstellung, daß sie "vermöge ihrer Natur dahinfließt", ebenso wie dem traditionellen, zeitgerichteten Konzept von Kausalität, nach dem unterschiedliche Ereignisse verschiedene Ursachen haben müssen -- aber nicht notwendigerweise umgekehrt. So können verschiedene Bewegungsvorgänge bei Anwesenheit von Reibung zum selben Haltepunkt führen. Heute nennt man solche Punkte im Zustandsraum *Attraktoren*.

Erst nach der statistisch-thermodynamischen Interpretation der Reibungskräfte empfand man eine Diskrepanz zwischen den zeitumkehrsymmetrischen Naturgesetzen und den zeitgerichteten Phänomenen, die in dieser Welt dominieren. Im Gegensatz zu der von der "Physik des Werdens" <sup>6</sup> häufig vertretenen Position handelt es sich bei dieser Diskrepanz aber *nicht um einen Widerspruch*. Die Asymmetrie der Phänomene ist, wie Boltzmann und seine Zeitgenossen und Nachfolger gezeigt haben, mit den symmetrischen dynamischen Gesetzen (und mit einem den reellen Zahlen entsprechenden Zeitkonzept) im Einklang. Sie verlangen nur einen durch die Gesetze der Mechanik und ähnlicher Theorien nicht weiter erklärbaren (aber mit ihnen vereinbaren) sehr unwahrscheinlichen kosmischen Anfangszustand. Wegen ihrer kosmischen Natur hat diese Anfangsbedingung einen nahezu naturgesetzlichen Charakter. Sie unterscheidet sich von den Gesetzen nur aufgrund der Aufteilung der formalen Bewegungsbeschreibung in

Differentialgleichungen (Gesetze) und Integrationskonstanten, die im wesentlichen erst auf Newton zurückgeht.

Es gibt *andere* (jüngere) empirisch begründete Erkenntnisse, die vielleicht eine naturgesetzliche Asymmetrie (oder gar eine Revision des formalen Zeitbegriffes) andeuten könnten. Solche Konsequenzen aus Experimenten oder den sie beschreibenden Theorien sind bisher nur teilweise verstanden und insoweit hypothetisch. Gerade deshalb sollten sie nicht durch unzutreffende oder schlicht falsche Argumente, die vielleicht aus einem antirationalen Wunschdenken stammen, verschleiert werden. Einige der oft benutzten unzureichenden Argumente werden daher im folgenden erwähnt.

Die Vereinbarkeit der beobachteten Asymmetrie in der Zeit mit der Symmetrie der Begriffe und Gesetze beruht also darauf, daß die Naturgesetze in der Form von Differentialgleichungen das Geschehen in der Natur keineswegs festlegen. Sie schränken es lediglich ein, wobei sie die Anfangs- (oder End-)bedingungen im wesentlichen frei lassen. Insbesondere besitzen die den Gesetzen genügenden Vorgänge nur in Ausnahmefällen die Symmetrien der Gesetze selber. Zum Beispiel wird ein rotationssymmetrisches Bewegungsgesetz nicht nur Kreisbahnen erlauben. Dieses Argument ist ausreichend, um den angeblichen Widerspruch zwischen der Symmetrie der Gesetze unter Zeitumkehr und der Asymmetrie des kosmischen Geschehens zu widerlegen. Entgegengesetzt verlaufende Prozesse werden in dynamisch isolierten Systemen in der Tat beobachtet, wenn immer man den erforderlichen Anfangszustand präparieren kann. Das asymmetrische kosmische Gesamtgeschehen erklärt überdies, warum das in den meisten Fällen schwierig ist. Normalerweise müßte der benötigte Anfangszustand eine astronomische Umgebung einschließen, da sich ein makroskopisches System niemals ausreichend isolieren läßt. Trotz des unerklärten und unwahrscheinlichen Anfangszustand ist das eine befriedigende und konsistente Darstellung der Situation.

Ein Determinismus der (also prinzipiell "fiktiven") dynamischen Gesetze ist dabei ganz unabhängig von seiner Anwendbarkeit zum Zwecke einer praktischen Vorhersage definiert.<sup>7</sup> Das im Rahmen der *Chaostheorie* viel diskutierte exponentielle Anwachsen anfänglicher Ungenauigkeiten gilt im übrigen *in jeder Zeitrichtung* gleichermaßen: Rechenoperationen müssen nicht in Richtung des Bewegungsablaufs durchgeführt werden. Nur wird gewöhnlich angenommen, daß über die makroskopische Vergangenheit verwertbare Dokumente vorliegen oder vorliegen könnten, so daß diese in einem operationellen Sinne "fixiert" ist. Umgekehrt erlaubt die Abwesenheit entsprechender Dokumente über die Zukunft das *praktische* Konzept der Willensfreiheit lokaler Experimentatoren. Das verlangt jedoch ein zeitlich asymmetrisches Verhalten der physikalischen

Dokumente in Relation zu ihrer Quelle, welches wiederum Teil der Asymmetrie des kosmischen Geschehens *in der Zeit* ist. Es entspricht der traditionellen, zeitgerichteten Kausalität, nach der alle nicht zufälligen Korrelationen eine gemeinsame *lokale* Ursache haben müssen.<sup>8</sup> Diese Form der Kausalität wird auch für Boltzmanns Stoßzahlansatz benötigt. Sie muß sich daher aus der kosmischen Anfangsbedingung ergeben -- eine Forderung, die erfüllbar erscheint.

Poincaré hat darauf hingewiesen, daß die meisten mechanischen Systeme näherungsweise periodisch sein müssen und deswegen nicht allgemein durch Boltzmanns statistisch-mechanische Gleichungen beschrieben werden können. Das ist zwar mathematisch korrekt, aber wie viele mathematische Theoreme für die betrachtete Physik völlig irrelevant. Die Betonung liegt nämlich auf "nicht allgemein". Unter den erwähnten (letztendlich kosmischen) Anfangsbedingungen sind Boltzmanns dynamische Gleichungen zwar nur für beschränkte Zeit eine Näherung, jedoch in Grenzen, die sehr, sehr viel größer als das derzeitige Weltalter sind. Das ist schon sehr lange bekannt. Das Argument trotzdem immer wieder gegen Boltzmann in die Debatte zu werfen grenzt schon an Scharlatanerie.

Die Asymmetrie des zeitlichen Verlaufs der Naturvorgänge allein bietet also keinerlei Hinweise darauf, daß eine Asymmetrie des Zeitkonzeptes selbst zu ihrer Darstellung nötig wäre. Die Naturgesetze zur Beschreibung aller ohne Einflußnahme ablaufenden Naturvorgänge benötigen ebenfalls keine Asymmetrie unter Zeitumkehr, die thermodynamisch relevant sein könnte. Stark asymmetrisch ist allein das *faktisch vorliegende Naturgeschehen*, das durch eine angemessene Anfangsbedingung *im Einklang mit den Naturgesetzen* beschreibbar ist. Der Anfang der kosmischen Historie wird dabei allein durch die (hier diskutierten) Konsequenzen dieser Bedingung von ihrem "Ende" unterschieden, während die Allgemeine Relativitätstheorie uns sagt, daß eine formale Fortsetzung der dynamischen Beschreibung über einen allem Anschein nach durch die Anfangsbedingung verlangten "singulären" Zeitpunkt hinaus im Rahmen ihrer Begriffe nicht existiert und somit sinnlos wäre. (Ob auch die Zukunft begrenzt ist, ist noch nicht empirisch entschieden. Möglicherweise schwimmt der Unterschied im Rahmen der quantenmechanischen Unschärfe.)

Ob das in der Zeit asymmetrische Geschehen auch das Erleben (oder den Eindruck) der fortschreitenden Zeit erklären kann, muß einer Theorie des Zusammenhangs von Natur und Bewußtsein (die sicher *grundsätzlich* neue Begriffe einführen muß) vorbehalten bleiben. Der von Philosophen oft erhobene Vorwurf einer "Verräumlichung" der Zeit durch ihre formale Darstellung kann jedenfalls nicht den Begriff der *Zeit in der Natur*

treffen; er umschreibt eher eine Enttäuschung über nicht bestätigte Erwartungen und Vorurteile. Was hier zur Debatte steht, ist nur die Asymmetrie der Vorgänge *in der Zeit* (die Asymmetrie der Historie allen Geschehens, einschließlich allen "Werdens"). Wie gesagt, kann diese aber sehr wohl durch deterministische und symmetrische Gesetze beschrieben werden. Statistische Argumente erweisen sich dabei wegen der speziellen Anfangsbedingung als äußerst nützlich, stehen allerdings in Kontrast zu dieser extrem unwahrscheinlichen Bedingung. Die Asymmetrie durch ihr (zeitliches) Zustandekommen (ein "Werden") zu *begründen* wäre der dynamischen (gegebenenfalls auch stochastischen) Beschreibung inhaltlich gleich. Es verbleiben höchstens (wenn auch mit Traditionen belastete) *sprachliche* Unterschiede.

Die Asymmetrie physikalischer Vorgänge in der Zeit wird quantitativ durch das Anwachsen der Entropie beschrieben. Auch chemische, biologische und physiologische Vorgänge stehen mit dem zweiten Hauptsatz der Wärmelehre, der in angemessen erweiterter Form auch auf soziales und kulturelles Geschehen anwendbar ist, im Einklang. Boltzmann verstand bereits sehr gut, wie dieses *globale* Gesetz auch eine *lokale Entropieabnahme* durch Wärmeabgabe an die Umgebung *offener Systeme* beschreiben, und ansatzweise, wie das (insbesondere durch den Wärmefluß von der Sonne ins kalte Weltall) zur Entstehung von Ordnung (hier auf der Erde) führen kann. Die Theorien zur Selbstorganisation unserer Tage gehen sicher im Detail viel weiter, bleiben dabei aber oftmals phänomenologisch (was angemessen sein kann) oder behaupten *fundamental* neue Physik zu beschreiben (was *nicht* gerechtfertigt ist). Ob diese im wesentlichen thermodynamische Beschreibung auch allen zukünftigen Erkenntnissen gerecht werden kann, bleibt natürlich offen.

Der statistische Entropiebegriff ist aber nicht eindeutig definiert.<sup>8,9</sup> Er hängt vielmehr von einer etwas willkürlichen makroskopischen Betrachtungsweise ab, bei der nur die verbleibenden ("irrelevanten") mikroskopischen Vorgänge statistisch behandelt werden. Diese Flexibilität des Entropie-Konzeptes erlaubt es gerade, die große Vielfalt von irreversiblen Prozessen zu beschreiben, die in verschiedenen Situationen auftreten. Sowohl sehr einfache wie sehr komplexe Zustände können niedrige Entropie besitzen, und ein allgemeines (vorurteilsfreies) Maß für Komplexität existiert kaum. Es liegt in der Natur der Komplexität, daß sie schwer faßbar ist. Wenn "der Herr böse sein" wollte,<sup>10</sup> hätte er hier reichlich Gelegenheit dazu. Allein die Undurchschaubarkeit des Komplexen ist jedoch kein Grund, irrationale Wunder für erwiesen zu halten oder sich auf einen modischen Wissenschaftspessimismus zurückzuziehen. Andererseits sind wohl kaum bedeutende Physiker jemals dem Irrtum von Marx und Freud erlegen, hochkomplexe Systeme für determinierbar zu halten.

Der im Prinzip unpräzise und zum Teil willkürliche Charakter der Entropiedefinition kann sich etwa bei Fluktuationen der verschiedensten Art bemerkbar machen. Das "Auf-treten" eines bestimmten Fluktuationenzustands und seine (dabei verminderte) Entropie sind nur beobachterabhängig zu begründen, auch wenn das Resultat objektivierbar ist.<sup>8</sup> Dagegen sollte die erwähnte kosmische Anfangsbedingung niedriger Entropie objektiv und eindeutig definiert (und offenbar vom Typ "einfach") sein. Wie noch zu diskutieren sein wird, scheint sie eng mit der Gravitation und der zu dieser diskrepanten Homogenität des Universums zusammenzuhängen.

#### IV. Die Zeit in der "neueren" Physik

Hinweise auf notwendig werdende Modifikationen der für den mechanistischen Zeitbegriff relevanten Grundbegriffe und Naturgesetze ergeben sich erst aus neueren *empirischen* Erkenntnissen oder den daraus gewonnenen Theorien -- also nicht aus einer logischen Kritik an der Boltzmannschen oder Laplaceschen Sicht der Dinge. Dazu gehört in erster Linie die Quantentheorie, die in ungezählten Anwendungen immer wieder bestätigt wurde, deren Interpretation aber trotzdem noch umstritten ist. Die Problematik der Quantentheorie kann hier nicht angemessen dargestellt werden, aber sicher wäre es ganz unzureichend, sie auf einen reinen Indeterminismus in der Natur zu reduzieren, wie es häufig (auch unter Physikern) geschieht. Sie verlangt vor allem neue Begriffe zur Darstellung von Zuständen physikalischer Systeme, die "nichtlokal" in dem eigentümlichen Sinn sein müssen, daß sie sich nicht aus lokalen Eigenschaften zusammensetzen lassen (so wie sich etwa auch eine ausgedehnte Dichteverteilung aus den Dichten an allen Raumpunkten ergäbe). Bei bestimmten Vorgängen ist *zudem* ein fundamental indeterministisches Verhalten zu berücksichtigen, das aber möglicherweise gar nicht das System selbst, sondern seine potentiellen Beobachter (also uns) betrifft. Ob dieser Indeterminismus eine absolute Zeitrichtung auszeichnet oder wieder durch die kosmische Anfangsbedingung geprägt wird, ist interpretationsabhängig.

Beispielsweise kann nach der Quantenmechanik ein "Teilchen" (so nennt man es jedenfalls noch) gleichzeitig verschiedenen Wegen folgen. Obwohl diese verschiedenen Wege allgemein durch den *Konfigurationsraum*, also den Raum der klassischen *Möglichkeiten* verlaufen, tragen sie alle in Form einer gemeinsamen "Superposition" zum beobachteten Ergebnis bei, wenn sie wieder zusammengeführt werden können. Sie müssen dann also im üblichen Wortsinn auch *alle existieren* (denn eine reine Möglichkeit kann ihrer Definition nach keinen realen Einfluß ausüben). Wenn man diese Konsequenz auf

makroskopische Objekte überträgt, führt das auf offensichtliche Absurditäten, von denen Schrödingers Katze, die nach diesem Formalismus in einer Superposition von gleichzeitig tot und lebendig sein kann (ebenfalls zwei *Möglichkeiten* in ihrem klassischen Konfigurationsraum), die bekannteste ist.

Erst in den letzten ein oder zwei Jahrzehnten hat man verstanden, daß makroskopische Objekte (im Gegensatz zu mikroskopischen) ständig und unvermeidbar ihre natürliche Umgebung derart beeinflussen, daß die verschiedenen Wege im *gesamten* Konfigurationsraum praktisch niemals wieder *zur lokalen Beobachtung* zusammengeführt werden können; sie werden *praktisch* irreversibel getrennt. Die Art dieser Wirkung auf die Umgebung ist kausal ähnlich dem Boltzmannschen Stoßzahlansatz mit den dabei *entstehenden*, aber für alle Zukunft irrelevanten, Korrelationen. Obwohl stetig, läuft sie so schnell ab, daß sie spontane *Quantensprünge* vortäuscht. Bei "mesoskopischen Objekten" (die aber noch im atomaren Bereich liegen) ist die Stetigkeit eines solchen, als "Dekohärenz" <sup>11</sup> bezeichneten Vorgangs kürzlich experimentell nachgewiesen worden.<sup>12</sup> Dekohärenz führt dazu, daß jeweils nur ein einziger, nicht im voraus determinierter Weg (oder dabei erreichter Zustand) zu existieren *scheint*. Sie tritt zum Beispiel immer auf, wenn eine mikroskopische Größe durch ihre Messung mit einer makroskopischen "Zeigerstellung" (z.B. einem Schwärzungs-Korn auf der Fotoplatte) korreliert wurde. In diesem Sinne erklärt die Dekohärenz auch Heisenbergs oft zitierte, in einem konkreten Idealismus begründete Bemerkung, wonach "die Bahn des Teilchens erst durch ihre Beobachtung zustandekommt", auf objektive dynamische Weise.

Legt man oben die Betonung auf "scheint", so verwendet man bereits die Interpretation der *Vielweltheorie*, nach der alle möglichen Wege -- auch wenn sie sich irreversibel getrennt haben -- als pseudoklassische Zustände der Welt weiterexistieren (genauer aber: ihre Superposition als eine *einzig*e und dynamisch determinierte Quantenwelt). Da sich das Wort "scheint" auf die *Wahrnehmung* der Situation bezieht, zu deren physikalisch vollständiger Beschreibung die "Wege" den Zustand der Beobachter einschließen müssen, hat man auch zutreffender von einer *Theorie des multiplen Bewußtseins* gesprochen. Bevorzugt man dagegen die Ansicht, daß nur jeweils einer, nämlich der schließlich beobachtete Zustand der Welt nach dem Ablaufen des Dekohärenzprozesses noch existiert, so postuliert man einen fundamental stochastischen, in der Zeit asymmetrischen dynamischen Vorgang. Er wird im Gegensatz zur Schrödinger-Dynamik durch eine nichtlineare Gleichung beschrieben, die wieder eine absolute Zeitrichtung voraussetzt. Da seine Existenz aber bisher nicht nachgewiesen werden konnte -- die Linearität der Dynamik wurde vielmehr mit sehr großer, wenn auch für diese Zwecke noch immer nicht ausreichender Genauigkeit bestätigt --, kann er auch nicht genauer lokalisiert

werden. Die überwiegende Mehrheit der Physiker bevorzugt trotzdem diese zweite, pragmatische Interpretation -- meistens aber reichlich inkonsequent unter Vernachlässigung ihrer (normalerweise geringfügigen, aber prinzipiell wesentlichen) Auswirkungen auf die Dynamik der Entropie (nicht nur bei Fluktuationen und Messungen). Hier besteht noch reichlich Bedarf für fundierte Untersuchungen.

Es mag für den Nichtphysiker überraschend sein, daß die Gravitation eine wichtige Rolle für den Begriff der Zeit spielt. Sie zeigt sich schon darin, daß Gravitation im Rahmen der Relativitätstheorie durch die Krümmung der vierdimensionalen Raumzeit beschrieben wird. Während die spezielle Relativitätstheorie die Begriffe von Raum und Zeit in dem neuen Begriff einer vierdimensionalen Raumzeit vereint, behält sie das Konzept einer im dynamischen Sinne absoluten Zeit (zu unterscheiden von dem aufzugebenden Begriff einer absoluten Gleichzeitigkeit) in Form von *Eigenzeiten* längs Weltlinien, also Bahnen punktförmiger Objekte in der Raumzeit, noch bei. Denn ihrzufolge sind die Eigenzeiten auch in Abwesenheit materieller "Uhren" durch die vorgegebene Metrik absolut definiert und wie bei Newton durch Bewegungsvorgänge nur zu *messen*, d.h. materiell sichtbar zu machen.

Die Sonderrolle der Zeit (im Vergleich zu den räumlichen Dimensionen der Raumzeit), die uns als ihr unvermeidbares Fortschreiten erscheint, ist mathematisch durch den "hyperbolischen" Charakter der die Materiefelder beschreibenden Differentialgleichungen auf der Raumzeit bedingt. Obwohl er sich nur in einem Vorzeichen ausdrückt, ist er verantwortlich für die Existenz aller (exakten und approximativen) Erhaltungssätze und somit letztendlich auch für die kausal verstandene "Identität" einer Person zu verschiedenen Zeiten. Er ist also im Rahmen der raumzeitlichen Dynamik der Grund, warum wir in der Zeit nicht eine ähnliche Freiheit haben wie im Raum.

Erst in der Allgemeinen Relativitätstheorie wird die räumliche "Metrik" (welche die Krümmung bestimmt) zu einer dynamischen Größe. Das zeigt sich etwa im Auftreten von Gravitationswellen. Diese Dynamik wird durch Einsteins Gleichungen unabhängig von der Wahl einer absoluten Zeit (also "reparametrisierungsinvariant") beschrieben. Aber dynamische Größen können selber als "Uhrzeiger" verstanden werden. Weder muß die durch sie definierte Zeit im Prinzip erst gemessen werden, noch kann Zeit in einem abgeschlossenen Universum unabhängig von der Raumkrümmung definiert sein: Die heutige Krümmung bestimmt die "vielfingrige Zeit" (d.h. die Eigenzeiten längs aller raumzeitlichen Wege, die heute enden); sie kann daher nicht die Krümmung von morgen sein! Die Konsequenzen der Relativitätstheorie bezüglich der physikalischen Zeit sind vielfach und unzweifelhaft nachgewiesen. Sie müssen aus Konsistenzgründen natürlich

auch für physiologische Vorgänge und somit sicher auch für die subjektiv wahrgenommene Zeit gelten. Bekannt ist das "Zwillings-Paradoxon", welches besagt, daß sich wiederbegegnende Zwillinge mit unterschiedlicher Bewegungsgeschichte im allgemeinen verschieden alt sein müssen. Nur wegen der Beschränkung unserer Alltagserfahrungen auf die uns zugängliche Winzecke des Universums sowie die beschränkte Genauigkeit unserer Sinne haben wir uns offenbar unzureichende Begriffe von Raum und Zeit angeeignet.

Die Einsteinschen Gleichungen, die die Dynamik der Raumkrümmung erfolgreich beschreiben, zeichnen aber, genau wie Newtons Gleichungen, keine Richtung der Zeit aus. Auch wenn die Gravitation anziehend wirkt, erlaubt sie Expansion ebenso wie Kontraktion (abhängig nur von der Anfangs- oder Endgeschwindigkeit). Ein verbreiteter Denkfehler besteht darin, dynamische Betrachtungen nur auf die Zukunft anzuwenden. Die Symmetrie gilt auch für den Extremfall Schwarzer Löcher, deren Gravitation nichts mehr entkommen kann. Innerhalb ihres raumzeitlichen Sichtbarkeitshorizontes, der als solcher für einen äußeren Beobachter existiert, läuft die Zeit selbst auf das Zentrum zu. Der Abstand davon wird zur negativen Zeit, der Mittelpunkt zu deren Ende für jedes ins Innere gelangte Objekt. Schwarze Löcher sind somit zwar zeit-asymmetrische Gebilde, aber Einsteins Theorie (wie jede ähnliche Theorie der Gravitation) erlaubt ebenso Objekte, aus denen umgekehrt *nur* etwas herauskommen kann, bei denen der Abstand vom Zentrum also zur *positiven* Zeit wird, und die manchmal (nicht besonders sinnvoll) als "Weiße Löcher" bezeichnet werden.

Was hat das nun mit der durch die Thermodynamik definierten *Richtung in der Zeit* zu tun, die uns als Irreversibilität erscheint? Zwar ist auch der Gravitationskollaps, der zu einem Schwarzen Loch führt, ein irreversibler Vorgang, aber erstaunlicherweise scheinen Schwarze Löcher echte thermodynamische Eigenschaften zu besitzen, nämlich (eine sehr große) Entropie und eine (normalerweise sehr kleine) Temperatur. Das ergibt sich jedenfalls recht zwingend aus theoretischen Überlegungen von Bekenstein und Hawking, womit wir allerdings das Gebiet der experimentell direkt bestätigten Physik verlassen. Für hinreichend große Massen überwiegt diese Entropie Schwarzer Löcher jede anderweitig realisierbare Entropie.<sup>13</sup>

Das gibt uns eine Möglichkeit, der genauen Natur der gesuchten unwahrscheinlichen kosmischen Anfangsbedingung auf die Spur zu kommen. Die Unwahrscheinlichkeit des heutigen Kosmos besteht in seiner (trotz der Existenz von Sternen und Galaxien) approximativen Homogenität -- insbesondere in der weitgehenden Abwesenheit Schwarzer oder Weißer Löcher. Penrose hat daher die völlige Abwesenheit solcher Löcher als

kosmische Anfangsbedingung postuliert und die Unwahrscheinlichkeit dieser Hypothese abgeschätzt. Sie ergibt sich für ein Standardmodell des Universums endlicher Größe als die unvorstellbar kleine Zahl von  $\exp\{-10^{123}\}$ . Das ist sehr, sehr viel unwahrscheinlicher als jede Form von Komplexität auf der Erde oder auf anderen Planeten im Universum, die in diesem Fall eine immer noch sehr kleine Wahrscheinlichkeit von jeweils etwa  $\exp\{-10^{88}\}$  im Vergleich zu allen möglichen anderen Zuständen besitzen. Wir sind danach nur Zwischenprodukte auf dem langen Marsch des Universums in einen thermodynamisch wahrscheinlichen inhomogenen Zustand, mit einem zunehmenden Anteil von Materie in Schwarzen Löchern.

## V. Die verlorene Zeit

Auch an diesen noch vorwiegend theoretischen Betrachtungen ist vermutlich das meiste *im Wesentlichen* zutreffend, obwohl zu erwarten ist, daß unsere Grundbegriffe, mit denen wir bisher die Welt erfolgreich beschrieben haben, nicht für alle Zeit ausreichen können. Solches deutet sich in der Tat bereits aus Konsistenzbetrachtungen im Rahmen des uns bisher empirisch Bekannten an, also unabhängig von einer stets zu erwartenden Entdeckung völlig neuer Dinge und Gesetzmäßigkeiten, über die die theoretische Physik zuvor (selten erfolgreich) nur spekulieren kann.

So muß die Quantentheorie nach bisherigem Wissen auf *alle* anderen Theorien angewandt (ihnen als eine "Quantisierung" übergestülpt) werden. Das gilt dann auch für die Gravitation, obwohl die sich daraus ergebenden direkt beobachtbaren Konsequenzen (z.B. Gravitonen) mit den derzeit *vorstellbaren* experimentellen Methoden kaum jemals nachzuweisen sind. Die Quantengravitation hat aber fundamentale begriffliche Konsequenzen, die bei kosmologischen Betrachtungen sehr zu beachten sind. Die wichtigsten davon lassen sich vielleicht ansatzweise auch anschaulich darstellen.

Wie schon erwähnt, kann die Einsteinsche Theorie als die Dynamik (das bedeutet hier die Abhängigkeit von einer frei wählbaren, also auch reparametrisierbaren Zeitkoordinate) der *räumlichen* Krümmung von Hyperflächen in der Raumzeit verstanden werden. Die sich daraus ergebenden "zeitlosen" Bahnen durch den Konfigurationsraum dieser Krümmungen (also die kontinuierlichen Folgen von gekrümmten dreidimensionalen Hyperflächen) definieren dann die Krümmung der vierdimensionalen Raumzeit, die ihrerseits alle materiellen Uhren dynamisch kontrolliert. Diese dynamische Interpretation der allgemeinen Relativitätstheorie wurde übrigens erst lange nach Einstein

entwickelt, während man früher fast ausschließlich das "statische Bild" der Raumzeit bevorzugte. Nun verlangt aber die Quantentheorie, wie schon erwähnt, daß Bahnen grundsätzlich nicht mehr existieren. Dann kann es auch keinen Bahnparameter, der die Rolle der Zeit übernimmt, und keine mit ihm formulierte Dynamik mehr geben. Für eine allgemeine (zeitabhängige) Schrödinger-Gleichung der Gravitation, wie sie bei der Quantisierung zu erwarten wäre, müßte man dagegen wieder einen *absoluten* (äußeren) Zeitparameter voraussetzen. Wie ist dieses Dilemma zu lösen?

Es gehört für mich zu den erstaunlichsten Ergebnissen der jüngeren theoretischen Physik, daß tatsächlich die "Schrödinger-Gleichung der allgemeinen Relativitätstheorie" (bekannt als *Wheeler-DeWitt-Gleichung*) einerseits zwangsläufig die Form einer *stationären* Schrödinger-Gleichung,  $H\psi = 0$ , annimmt (eine äußere Zeit also nicht mehr vorkommt), diese aber andererseits und im Gegensatz zur normalen stationären Schrödinger-Gleichung von der oben erwähnten hyperbolischen Form ist. Dabei spielt der Logarithmus des kosmischen Expansionsparameters, der die Ausdehnung des Universums mißt, die Rolle der zeitartigen Koordinate im Konfigurationsraum. Er bestimmt somit eine "innere Dynamik" des zunächst zeitlos erscheinenden Quantenuniversums.

Die fundamentale Bedeutung dieser formalen Konsequenz ist sicher nicht ohne Weiteres zu würdigen. Ein Zeitparameter, der ohnehin keine physikalische Rolle mehr spielen würde, aber wenigstens noch die Darstellung einer zeitlichen Sukzession (einer Bahn oder Trajektorie ohne absolutes Zeitmaß) erlauben würde, existiert als fundamentaler Begriff überhaupt nicht mehr. Stattdessen wird die Ausdehnung des Universums, also eine physikalische "Variable", zu einem Parameter der *inneren Dynamik*, die zumindest formal ein deterministisches "Anfangswertproblem" für die Wellenfunktion definiert. Die hyperbolische Natur dieser formal zeitlosen Wheeler-DeWitt-Gleichung bedingt eine *Stetigkeit allen Geschehens*, die dessen begriffliche Erfäßbarkeit überhaupt erst ermöglicht. Die zeitartige Variable besitzt dabei in der durch ihre Interpretation bedingten Form ihrer potentiellen Energie eine fundamentale dynamische Vorzeichen-Asymmetrie, die sogar mit der Asymmetrie Schwarzer Löcher und der ihres Auftretens korreliert zu sein scheint.<sup>14</sup>

Man kann sagen, daß die formal zeitlose Wheeler-DeWitt-Wellenfunktion des Universums über dem hochdimensionalen Konfigurationsraum *an die Stelle der Zeit* als einer nur eindimensionalen Kette von globalen Zuständen (einer Trajektorie) tritt. Sie kann somit als eine neue Art von "diffuser Dynamik" verstanden werden und führt nur im Rahmen der sogenannten WKB-Näherung (oder geometrischen Optik) und unter Berücksichtigung der erwähnten Dekohärenz auf die uns vertrauten eindimensionalen kausalen

Verknüpfungen längs Trajektorien (für *jede* der sich dabei immer weiter verzweigenden "vielen Welten"). Für diese approximativen kausalen Zusammenhänge ergibt sich die dem Physiker vertraute Form einer zeitabhängigen Schrödinger-Gleichung für die Materie: die verlorene Zeit findet sich als Näherung wieder.<sup>15</sup> Auf diese Weise erhalten alle Konfigurationen mit nicht vernachlässigbaren Werten der Wellenfunktion eine "Erinnerung" an eine praktisch eindimensionale Historie. Barbour hat solche Zustände als "Zeitkapseln" bezeichnet.<sup>16</sup> Nach dieser neuartigen Interpretation der Wellenfunktion als dynamisches Instrument *vermeinen* wir mikroskopische Systeme auf Grund des leicht diffusen Charakters der kausalen Historien im *Zustand* einer Wellenfunktion zu beobachten.

Diese zum Schluß angedeuteten Konsequenzen gehen sicher sehr weit und über alles in absehbarer Zeit Nachprüfbares hinaus. Auch die meisten Physiker schrecken daher vor ihnen zurück und versuchen sich auf traditionelle Vorstellungen (insbesondere die Beibehaltung eines fundamentalen Zeitkonzeptes) zurückzuziehen, was aber Eingriffe in die bekannte Theorie erfordert. Es sei daher noch einmal betont, daß es sich bei diesen Konsequenzen um solche aus einer Kombination der beiden derzeit bestbestätigten fundamentalen Theorien der Physik (nämlich Quantentheorie und Allgemeine Relativitätstheorie) handelt, wenn auch vielleicht nicht völlig unabhängig von Interpretationsfragen. Selbst Stephen Hawking,<sup>17</sup> der viel zur Quantisierung der Gravitation beigetragen hat, bleibt hier halbherzig, indem er den Begriff von Bahnen (oder parametrisierbaren "Pfadern") noch ganz wesentlich für seine Interpretation der Quantengravitation beibehält.<sup>18</sup>

Die Erforschung der Natur ist alles andere als abgeschlossen. Unsere Kenntnis der Grundbegriffe, die sie uns zugänglich macht, ist vorläufig. Aber *die Welt* weiterhin mit Begriffen aus unserer beschränkten Alltagserfahrung beschreiben zu wollen, wäre naiv. Ihre Anpassung an die weitestgehenden Erkenntnisse über die Natur mag uns einen kleinen Schritt weiterbringen, der uns aber aus der Perspektive unserer alltäglichen Welt riesig und ungewohnt -- vielleicht sogar absurd -- erscheint.

## Fußnoten:

- <sup>1</sup> K. Flasch, Was ist Zeit? (Klostermann, Frankfurt, 1993).
- <sup>2</sup> E. Pöppel, K. Schill und N.v. Steinbüchel, Sensory integration within temporally neutral system states, *Naturwiss.* 77 (1990), S. 89.
- <sup>3</sup> H. Price, *Time's Arrow & Archimedes' Point: A View from Nowhen* (Oxford UP, 1996).
- <sup>4</sup> J.B. Barbour und H. Pfister, *Mach's Principle* (Birkhäuser, Basel, 1995).
- <sup>5</sup> J.B. Barbour, Leibnizian time, Machian dynamics and quantum gravity, in: *Quantum Concepts in Space and Time*, R. Penrose and C.J. Isham, Hsg. (Clarendon Press, London, 1986).
- <sup>6</sup> I. Prigogine, *Vom Sein zum Werden* (Piper, München, 1979).
- <sup>7</sup> J. Bricmont, Science of chaos or chaos in science?, in: *The Flight from Science and Reason*, P.R. Gross, N. Levitt, and M.W. Lewis, Hsg. (New York Acad. Science, New York, 1996).
- <sup>8</sup> H.D. Zeh, *The Physical Basis of the Direction of Time* (Springer, Heidelberg, 1992 -- erweiterte dritte Auflage in Vorbereitung).
- <sup>9</sup> H. Grad, The many faces of entropy, *Comm. Pure Appl. Math.* XIV (1961), S. 323.
- <sup>10</sup> Einstein hat seine Bewunderung für die Großartigkeit und Erfäßbarkeit der Natur ausgedrückt mit den Worten: "Raffiniert ist der Herr - aber bössartig ist er nicht."
- <sup>11</sup> D. Giulini, E. Joos, C. Kiefer, J. Kupsch, I.-O. Stamatescu und H.D. Zeh, *Decoherence and the Appearance of a Classical World in Quantum Theory* (Springer, Berlin, 1996).
- <sup>12</sup> M. Brune, E. Hagley, J. Dreyer, X. Maître, Y. Maali, C. Wunderlich, J.M. Raimond und S. Haroche, Observing the Progressive Decoherence of the "Meter" in a Quantum Measurement, *Phys. Rev. Lett.* 77 (1996), S. 4887.
- <sup>13</sup> C. Kiefer, Quanteneigenschaften Schwarzer Löcher, *Physik in unserer Zeit* 28 (1997), S. 22.
- <sup>14</sup> C. Kiefer und H.D. Zeh, Arrow of time in a recollapsing quantum universe, *Phys. Rev. D* 51 (1995), S. 4145.
- <sup>15</sup> C. Kiefer, The semiclassical approximation to quantum gravity, in: *Canonical Gravity: From Classical to Quantum*, J. Ehlers and H. Friedrich, Hsg. (Springer, Berlin, 1994).
- <sup>16</sup> J.B. Barbour, The Emergence of Time and Its Arrow from Timelessness, in: *Physical Origins of Time Asymmetry*, J.J. Halliwell, J. Pérez-Mercader, and W.H. Zurek, Hsg. (Cambridge UP, 1994).
- <sup>17</sup> S.W. Hawking, *A Brief History of Time* (Bantam, London, 1988).
- <sup>18</sup> Siehe die Diskussion im Anschluß an: H.D. Zeh, Time (A-)Symmetry in a Recollapsing Quantum Universe, in: *Physical Origins of Time Asymmetry*, J.J. Halliwell, J.P. Perez-Mercader, and W.H. Zurek, Hsg. (Cambridge UP, 1994).

