Fundamentals regarding the passing and direction of time, the evolution of the block universe, and the capture of the ‘now’

Ulrich Brosinsky

November 2026

Abstract
Even some one hundred and twenty years after the completion of the theory of special relativity, questions regarding time continue to be discussed—questions that the theory has long since answered, or that can easily be resolved based on its principles. This article addresses problems inherent in the Newtonian worldview by resolving them within the framework of special relativity. The analysis relies exclusively on concepts typically covered in introductory courses on the theory, specifically the use of Minkowski diagrams and four-vectors. Insights from general relativity and quantum physics are not included. The starting point is the existence of spacetime, even in the absence of matter. A distinction is made between the differences in time and its passage, the latter arising only from the presence of physical objects—whether animate or inanimate. A mathematical rationale for why time can only progress in one direction is provided by comparing trigonometric functions with their hyperbolic counterparts. Furthermore, the article refutes the assumption that the "block universe" model implies a predetermined future, offering instead a description of the block universe’s evolution. With this description, the problem of the physical indescribability of the ‘now’ no longer arises.

On the Passage of Time

It is an age-old philosophical problem whether time emerges from motion, or whether motion is only possible on the basis of time. Furthermore, there arises the question of whether time can exist in the absence of matter. These questions can be addressed using the framework of special relativity. The role of entropy is discussed in the section concerning the direction of time. The phenomenon of "passing" (or the passage of time) must be conceptually distinguished from the measurement of time intervals—a point illustrated by the example of space: space can be measured precisely, yet it does not "pass."

To represent processes in a space-time diagram, a scaling factor between space and time is required. In special relativity, the speed of light, c, is typically used for this purpose, which results in the propagation of light having a slope of one. Thus, instead of a t-axis, one employs a ct-axis, which has the dimension of length. The question of how fast an object—stationary in space—moves along this axis as time passes can be answered with c, since the distance ct covered per time t yields the speed of light. However, this line of reasoning appears tautological and, at first glance, meaningless.

From the perspective of an observer (who, for the sake of simplicity, is not accelerating), the motion of an object is represented in a space-time diagram as a "worldline." The term "line" is appropriate here because the object's temporal extent vastly exceeds its spatial extent—a fifty-year-old human being is not fifty light-years in size. This is even more true for long-lived elementary particles. Unlike a trajectory in space along which motion occurs, a worldline is conceived as immutable, as it describes all states—past and future—within a diagram that is itself timeless.

The infinitesimal arc length ds of a worldline is proportional to the infinitesimal proper time dτ of the body tracing that worldline – $ds = c\,d\tau$ – with c serving as the constant of proportionality. This identification gives rise to the notion that worldlines are traversed at the speed of light.

Now, in contrast to the original concept, the worldline is interpreted as a kind of trajectory, not in space, but in space-time. Unlike a trajectory, which can be traversed at different speeds, a body on the worldline always travels at the speed of light. One should be wary of the intuitive notion that worldlines are ‘drawn’ at the same speed everywhere. The representation of a world line in a space-time diagram is Euclidean; the arc length in the diagram, $\mathrm{sqrt}\ (\ (ct)^2 + x^2)$, does not correspond to the pseudo-Euclidean arc length, $\mathrm{sqrt}\ (\ (ct)^2 - x^2)$, which corresponds to proper time. It would also be misleading to imagine that the positions of the two ‘pens’, each of which draws one of the two worldlines, are correlated. Whilst it would be possible to begin drawing at the point where two worldlines meet, once they separate and meet again, the arc lengths travelled may differ greatly, as illustrated by the twin paradox.

There are two justifications for this way of viewing worldlines:

1) By using the velocity parameter θ, defined by $v = c \tanh \theta$, the projection of an element ds of a world line’s arc length onto the time axis is given by $ds \cosh \theta$, while its projection into space is given by $ds \sinh \theta$. If a body moves along its worldline by an interval $ds = c\, d\tau$ during its proper time τ, the projection into space is $c\tau \sinh \theta$. Expressed in terms of $t = \tau \cosh \theta$, this becomes $ct \tanh \theta$, resulting in the actual velocity $v = c \tanh \theta$ in space.

2) For the following analysis, let the x-axis be chosen to be in the direction of the body’s motion; its momentum is $p_x = |\, \mathbf{p}\, | = : p$. The time component of the four-momentum of a body of mass m as a function of the velocity parameter θ is $E/c = mc \cosh \theta$ and the spatial component is $p = mc \sinh \theta$ From the derivative of the four-momentum with respect to proper time, one obtains the Minkowski force with the time component $mc \sinh \theta \ d\theta/d\tau$ and the spatial component $mc \cosh \theta \ d\theta/d\tau$. The magnitude of the force is $mc\, d\theta/d\tau$. A comparison with the centripetal force in Newtonian mechanics $F = m\, v\, \omega$ reveals a structural similarity if one writes the angular velocity as $\omega = d\varphi/dt$. Since the velocity parameter θ is the pseudo-Euclidean analogue of the angle of rotation φ, namely $\theta = i\varphi$ – see the section on the direction of time for further details – the formulas even coincide if the orbital velocity v is taken to be the speed of light c.

Assuming an object moves along its worldline at the speed of light, the curvature of that worldline under the influence of a force is accurately described. Furthermore, the speed of light within spacetime, when projected onto the three dimensions of space, yields the motion occurring therein.

Since the worldlines, which were initially conceived as static, are now in turn interpreted as trajectories, it seems natural to plot proper time along a fifth dimension. However, such a representation is of little use, as proper time does not possess the properties of a coordinate.

Every body has its own worldline, its own history, and thus its own time. There is no time other than these individual times. The only universal quantity is the ‘drawing speed’. Apparently, it is an inherent property of matter that it cannot move through space-time at any speed other than the speed of light. Since an observer perceives changes external to themselves, the Newtonian worldview interprets the passage of time as an external phenomenon—one that is universal and thus also affects the observer. In the model presented here, the passage of time is tied individually to each object, as evidenced by the time kept by a moving—and inanimate—clock.

Some hold the view that, in a region of space devoid of matter for a period of time, it makes no sense to speak of spatial or temporal intervals, as these cannot manifest. Some go even further, arguing that such intervals do not exist there at all. The model presented here is based on the assumption of a spacetime that exists independently of the presence of matter.

Conclusion:

Question: Does time exist even in the absence of matter?
Answer: The existence of a metric structure of spacetime is primary and independent of matter, although, according to the general theory of relativity, matter determines the form of that metric. Matter is necessary to mark points in spacetime by means of events. Only in this way can time emerge as an aspect of the spatiotemporal separation between these events. In the case of point-like events, the concept of duration cannot yet be applied. This requires the existence of line-like entities within spacetime, the arc length of which is then interpreted as their proper time. However, this duration does not yet possess the property of "passing." Consequently, these insights do not provide an answer to the philosophical question that focuses on the aspect of change—that is, the passing of time.

Question: Is time or motion primary?
Answer: This question is resolved by expanding the concept of motion: motion occurs not only—at varying speeds—within the three dimensions of space, but—at a constant speed—within the four dimensions of spacetime. From the perspective of special relativity, this question does not even arise, as motion and temporal evolution are considered to be one and the same.

Question: Does time pass even in a state of complete stillness?
Answer: This question, too, becomes superfluous, as motion or stillness are merely different projections into space from the perspective of the individual observer.

Incidentally, in Newtonian mechanics too, the passage of time is identical to moving along the time axis. However, in that context it is not bodies that move along their individual time axes, but absolute space as a whole that shifts; consequently, no further conclusions can be drawn.

Note: The pseudo-Euclidean relationship between space and time is not fundamental to the above considerations; a Euclidean relationship would merely require the use of trigonometric functions instead of hyperbolic functions. The only cases to be excluded for the scale factor c are $c = \infty$, which corresponds to the Newtonian world view, and $c = 0$.

On the Direction of Time
It is often argued that the direction of time is determined by entropy, because entropy increases with time. Without questioning the latter, one could just as easily take the view that the increase in entropy is merely an indicator of the direction of time. In any case, the question arises as to how something that increases so irregularly, such as entropy, could govern something that increases so precisely, such as time.A clear conceptual distinction between the passing, direction, and metric of time is necessary for an investigation. Radioactive decay offers a further argument. Although the half-life of atomic nuclei is statistical, it has a reproducible mean value. Until decay occurs, a sort of clock is therefore running within the nucleus, but without energy dissipation and without an increase in entropy.

Since the relationship between space and time is purely geometric in nature, it stands to reason to seek a predominantly geometric explanation for the direction of time as well, one in which matter does indeed play a necessary role – for without matter, time could not be observed – but plays as minor a role as possible.

The key lies in a difference in the parametrisation of the circle and the hyperbola that is easily overlooked. The unit circle around the origin is described by $y^2 + x^2 = 1$ and the unit hyperbola by $y^2 – x^2 = 1$, whereby the first equation can be parameterised by $y = \cos \varphi$ and $x = \sin \varphi$, and the second by $y = \cosh \psi$ and $x = \sinh \psi$. The trigonometric and hyperbolic functions appear to correspond to one another. Both parameterisations satisfy their biquadratic equation, the form of which serves to encompass both the upper and lower semicircles, or the upper and lower branch of the hyperbola respectively.

However, there is one important difference. In the parametrisation $y = \cosh \psi$, the hyperbolic cosine can only take values ≥ 1, unlike in $y = \cos \varphi$, where the cosine can take negative values. This parameterisation therefore cannot describe the lower branch of the hyperbola; only squaring the expression extends the solution set accordingly. In contrast, the trigonometric parameterisation describes the entire circle and requires no squaring to be complete. Here, the biquadratic form does not extend the solution set.

To summarise: The relationship between $y^2 + x^2 = 1$ and $y^2 – x^2 = 1$ is not equivalent to the relationship between the trigonometric parametrisation $y = \cos \varphi$, $x = \sin \varphi$ and the hyperbolic parametrisation $y = \cosh \psi$, $x = \sinh \psi$, which can easily be overlooked as both parametrisations satisfy their respective biquadratic equations. This mathematical difference has a physical consequence, as will be shown below.

In the following discussion, the representations of a vector in three coordinate systems are compared. In the familiar Euclidean plane, a vector of radius r can point in any direction, described by the angle φ: $x = r \sin \varphi$ and $y = r \cos \varphi$, whereby, in this polar coordinate representation, φ increases from the positive y-axis towards the positive x-axis. In the Minkowski description of the Special Theory of Relativity, the spatial axes are in an imaginary relationship to the time axis. If the latter is chosen to be real, the spatial axes become imaginary. Here, the y-axis represents the ct-axis, whilst the x-axis represents the (imaginary!) spatial directions. This second coordinate system, which corresponds to the actual, relativistic context, differs from the Euclidean plane only in the imaginary nature of the x-axis; the position of the vector remains unchanged.

Since only real values can be measured, we define a real spatial axis R such that $R = ix$. Now we must examine how a vector is represented in the R,y-plane. This third coordinate system is the pseudo-Euclidean plane.

By rearranging Euler’s formula $\exp(i\varphi) = \cos \varphi + i \sin \varphi$, we obtain

$i \sin \varphi = \sinh i\varphi$, $\cos \varphi = \cosh i\varphi$, and hence $i \tan \varphi = \tanh i\varphi$.

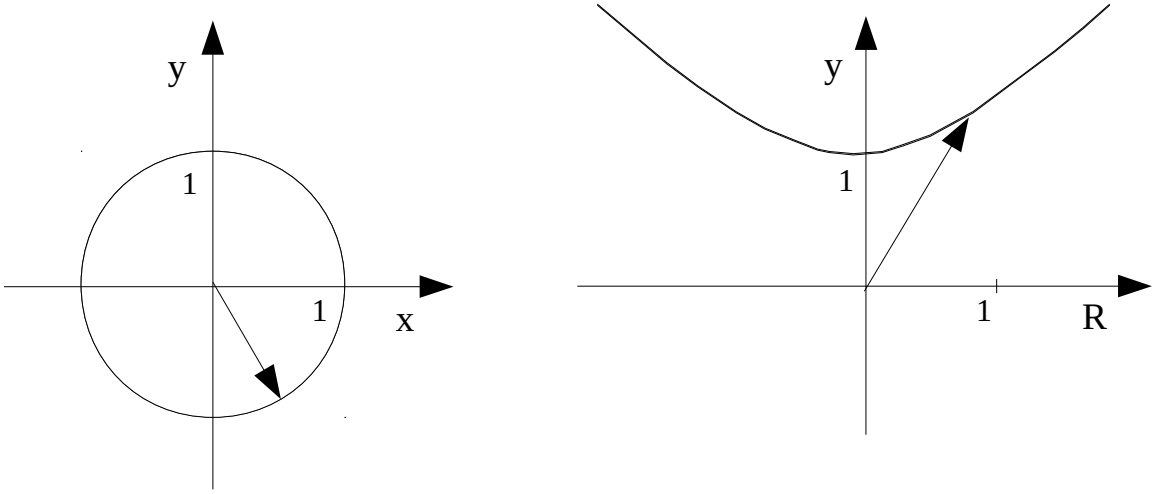
The tangent of the angle φ is calculated as $\tan \varphi = x/y = R/iy$; the corresponding hyperbolic formula is $R/y = \tanh i\varphi$. From the real ratio R/y, a real argument $i\varphi$ of the hyperbolic tangent function follows. An imaginary x-axis is therefore associated with an imaginary angle φ; only then does $i\varphi$ become real. This expression $i\varphi$ is referred to in the Special Theory of Relativity as the velocity parameter and is abbreviated as θ.

The coordinates in the R,y-plane are therefore

$R = ir \sin \varphi = r \sinh i\varphi = r \sinh \theta$ and $y = r \cos \varphi = r \cosh i\varphi = r \cosh \theta$.

Whilst the hyperbolic sine can take on any value, the hyperbolic cosine is greater than or equal to one. In the pseudo-Euclidean representation, the vector therefore points only in the positive y-direction. Accordingly, since $-1 < R/y = \tanh\theta < +1$, the vector lies only within the angular range between $-45°$ and $+45°$ relative to the y-axis.

Although the entire circle is described by $y^2 + x^2 = r^2$, and, according to $R = ix$, the equation $y^2 - R^2 = r^2$ represents both branches of the hyperbola – including the one in the negative y-domain – the vector can only take on positive y-values ≥ 1 .



Sketch: The unit vector can point to any point on the unit circle, but its corresponding vector can only point to the upper branch of the unit hyperbola.

If the relationship between space and time were Euclidean, worldlines could run in any direction and their tangential vectors could point in all directions, thereby covering all possibilities. If one regards this representation as complete and introduces imaginary spatial axes, the conversion to real values restricts the directions of the vectors. Therefore, a worldline has only a positive direction of time. Of course, other vectors can be specified in the R,y-plane, but these do not then originate from the original tangential vectors.

On the "Now"

Physical equations do not capture the "now." What is meant by this statement, and how might the "now" be described in a way that is physically appropriate?

A simple example is the formula for free fall, $s = \frac{1}{2} g t^2$, in which no specific point in time is singled out. This is, in fact, the very purpose of a formula that includes time t: it is intended to assign a function value to every possible point in time – or, if there are several open parameters, to establish a relationship between them. This approach assumes that the laws of nature are independent of time, as the formula is meant to hold true for allThe set of all past events that could be causally connected to a given observer is called their absolute past. It is bounded by what is known as the backward light cone—which is, in fact, a hypercone. Correspondingly, there is a

forward light cone, which encompasses all events that could potentially be reached by the observer; this constitutes the absolute future. The term "absolute" is also understood in the following sense: since the speed of light—and, consequently, the light cone—is invariant, any observer will agree on which region of spacetime constitutes the absolute past and the absolute future for a given observer at a specific point in spacetime.

A distinction must be made between the experience of the "now" and its physical description. Consider the classic example of the color blue: while an individual’s subjective perception of it cannot be compared to another’s, the color can be objectified via its frequency. This stands in contrast to the "now," which holds no meaning outside the world line of the observer experiencing it. Other world lines may be uncorrelated; they can differ in duration – depending on their arc length – and fail to align in terms of simultaneity – depending on their slope. This contradicts our everyday experience, where, given that half the Earth’s circumference is only one-fifteenth of a light-second, we feel connected to everyone else in the same "now." Strictly speaking, an observer can only share their experience of the "now" with another observer if their world lines have contact.

In the Newtonian worldview, the concept of "now" gives rise to philosophical questions that no longer arise within the framework of special relativity.

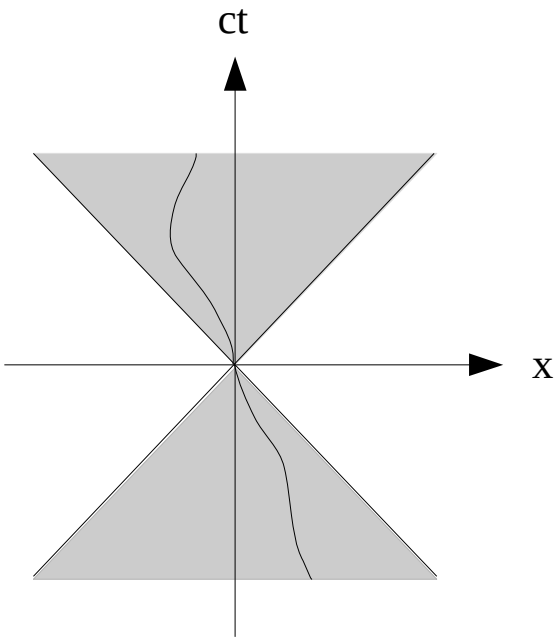
Responding to current external circumstances does not require the capacity for conscious experience, as demonstrated by automated systems. We humans, however, are endowed with the capacity for such experience. Furthermore, we possess memories and visions of the future; without these, we would be confined entirely to the immediate present. It is only through an awareness of the existence of past and future – combined with the ability to distinguish memories and future projections from current impressions (whether external or internal) – that we are able to recognize the present moment through an act of differentiation.

In physical terms, the "now" has only local significance and can be understood solely as a relationship between events. This relationship may be directly causal – indirect causality requires time and thus destroys the "now" – or it may consist merely of spatiotemporal proximity. By defining an event as a marker for a point in spacetime, the "now" is sufficiently described from a material perspective. The experience of the "now" observers share only for as long as they are in each other's vicinity.

On the Block Universe

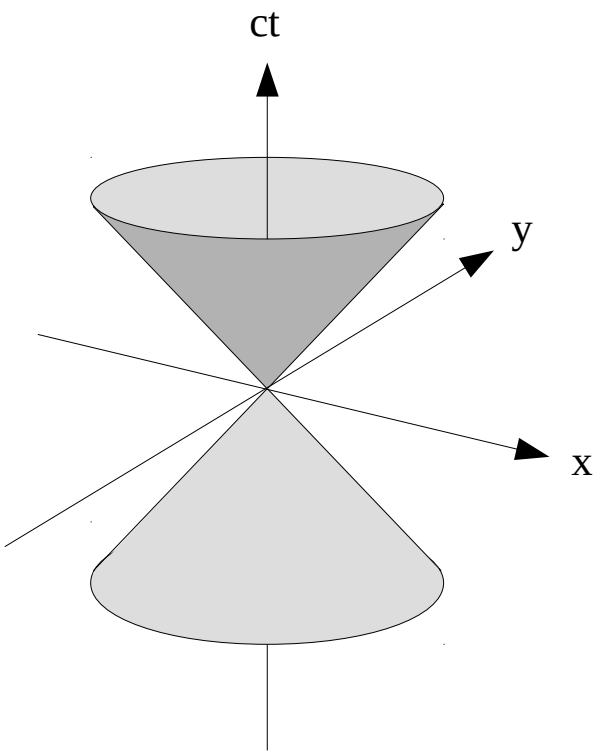
The "block universe"—a concept familiar from special relativity, in which all events (defined by both their location and the time of their occurrence) are encompassed within a four-dimensional spacetime – can, in fact, be conceived even within a Newtonian worldview. Over time, events accumulate, much like the floors of a skyscraper being added during construction. It is often argued that the block universe implies a predetermined future; however, this notion is refuted here. To begin with, it is clear that because the block universe represents all states across time, the representation itself is static. The future now comes into play in a new way through the Special Theory of Relativity: what an observer classifies as "simultaneous" depends on their own velocity. Consequently, an observer might perceive an event as lying in the future, while for another observer, that same event lies in the past. Yet, the conclusion that the future is "fixed" simply because it may already be in the past for someone else relies on an illicit conflation of the actual, relativistic world with its approximation within the Newtonian framework. In the Newtonian view, simultaneity is absolute, making the distinction between past and future binding for all observers.

Einstein, however, identified the speed of light as the universal upper limit. An observer’s "actual" past can only include events that could have influenced them or of which they could have become aware – processes that, at most, could have traveled at the speed of light. Any message or effect that would have required a speed greater than that of light to reach the observer does not exist for them at that given moment (though it might at a later time). The set of all preceding events that could potentially be connected to a given observer is termed their "absolute past." The set of all past events that could be causally connected to a given observer is called their absolute past. It is bounded by what is known as the backward light cone – which is, in fact, a hypercone. Correspondingly, there is a forward light cone, which encompasses all events that could potentially be reached by the observer; this constitutes the absolute future. The term "absolute" is also understood in the following sense: since the speed of light – and, consequently, the light cone – is invariant, any observer will agree on which region of spacetime constitutes the absolute past and the absolute future for a given observer at a specific point in spacetime.



The illustration shows a possible world line sketched within the light cone.

In this illustration, the regions outside the cone appear separate because only one spatial dimension – corresponding to the instantaneous direction of motion – is plotted. A representation using two spatial dimensions (x and y) from the three-dimensional space (x, y, and z) reveals a single, contiguous region outside the light cone. This approach is frequently used because time is required as an additional axis, and it is impossible to depict four dimensions within our three-dimensional world. What is shown here is merely a three-dimensional cone – a cross-section of the hypercone of light propagation – which is why it is called a "light cone." Accordingly, only two dimensions of the 3D space identified as simultaneous are represented – the so-called “simultaneity plane,” in this case the xy-plane.



This simultaneity is formal, as the simultaneous events can only be registered at a later point in time. Furthermore, they are no longer classified as simultaneous at all if the observer has, in the meantime, changed his velocity – thereby tilting his plane of simultaneity. Simultaneity is binding only for observers who have no relative velocity.

The mode of thought inherent in the Newtonian worldview – with its absolute time and the resulting division into past and future for different observers – cannot be adopted here.

While it is possible to view all events as a "block universe" even within a Newtonian framework, the true utility of this approach – specifically its ability to represent pseudo-Euclidean geometry and, consequently, planes of simultaneousity – only becomes apparent in the context of special relativity.

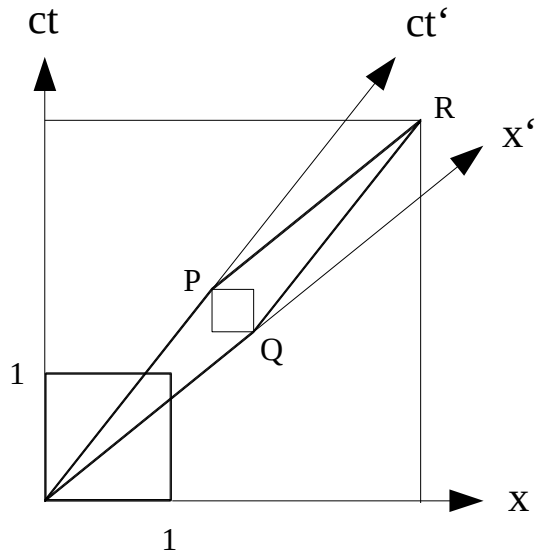
The experience of the temporal evolution of the universe – initially considered, for the sake of simplicity, from the perspective of an unaccelerated observer A – is grounded in subjective simultaneity, which, in a two-dimensional space-time diagram, is represented by an x-axis oriented perpendicular to the time axis. An observer B, moving at a constant velocity relative to the first observer, has a world line in the latter’s diagram that is inclined, corresponding to B’s own time axis, t’. Due to the pseudo-Euclidean geometry of space-time, the x’-axis is inclined in the opposite direction. Observer A can now calculate how the universe evolves from the perspective of B. Since B’s position on the world line is known, A can determine the points in space-time that lie above the line of simultaneity, x'.

For B, the block universe expands in different regions than it does for A. For an accelerating observer C, there even exists a region where time runs in reverse relative to A. Due to time dilation, B perceives processes as occurring more slowly than A describes them; furthermore, as a result of length contraction, B perceives all events as being more closely spaced, scaled by the same Lorentz factor. In the hypervolume of spacetime, the "event density" for A and B is therefore the same. This can be directly deduced from the Lorentz transformation,

$$\begin{pmatrix} ct' \\ x' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh\theta & \sinh\theta \\ \sinh\theta & \cosh\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} ct \\ x \end{pmatrix}$$

as its determinant $\text{Det} = \cosh^2\theta - \sinh^2\theta = 1$ demonstrates the invariance of the area in the ct,x-plane under a Lorentz transformation. Since the y and z directions remain unchanged during the transformation, the four-dimensional volume also remains invariant.

How the block universe for B grows from the perspective of A can be clearly seen in the following diagram. It shows the unit square for A, with vertices at (0,0), (1,0), (0,1), and (1,1). The corresponding square for B is represented in A's diagram by the points (0,0), P, Q, and R, which form a parallelogram. According to the Lorentz transformation, these points have the following coordinates:
P: $(\cosh\theta, \sinh\theta)$, Q: $(\sinh\theta, \cosh\theta)$, R: $(\cosh\theta + \sinh\theta, \sinh\theta + \cosh\theta) = (\exp\theta, \exp\theta)$.
The differences between the x-coordinates of P and Q, as well as between their ct-coordinates, both have a magnitude of $\cosh\theta - \sinh\theta = \exp(-\theta)$.



$\beta = v/c = \tanh\theta = 0.8$

$\exp\theta = 3$

The parallelogram is thus derived from the unit square through stretching along the direction of one diagonal and compression along the direction of the other, with the area remaining unchanged. Consequently, observers A and B – albeit in different regions – perceive the same "rate of growth" for the block universe. Were this not the case, one could indeed conclude that the future is fixed. While the block universe allows us to visualize the arrangement of all events – to the extent that a four-dimensional diagram can be visualized at all – it offers no answer as to whether the future is already determined.

Concluding Remarks

In the pre-relativistic worldview, time appears both as something experienced individually and as a phenomenon that, in a mysterious way, operates throughout the entire universe. This presents a significant philosophical challenge. Recognizing the aspects of duration and simultaneity as purely individual experiences—and as subjective frameworks for ordering events within spacetime—strips time of some of the significance it held in the pre-relativistic view. Newton’s absolute time, which was beyond questioning, is replaced by spacetime—a concept that is likewise beyond questioning. Traversing spacetime at the speed of light emerges as an intrinsic property of all matter, revealing motion to be a projection into space. While some "why" questions remain unanswered—and new ones arise—a substantial advancement in our understanding has nonetheless been achieved.

Alluding to Plato’s allegory of the cave—in which projected shadows are mistaken for reality—the theory of special relativity has made it possible to recognize the projection for what it is, thereby unraveling at least a small part of reality.

Grundlegendes zum Vergehen und zur Richtung der Zeit, zur Entwicklung des Blockuniversums sowie zum Erfassen des Jetzt

Ulrich Brosinsky

November 2026

Zusammenfassung
Sogar rund einhundertzwanzig Jahre nach Vollendung der Speziellen Relativitätstheorie werden immer noch Fragen betreffend die Zeit diskutiert, welche die Theorie längst beantwortet hat oder solche, die sich auf ihrer Grundlage leicht beantworten lassen. In diesem Artikel werden Probleme, die sich im Newtonschen Weltbild stellen, im Rahmen der Speziellen Relativitätstheorie aufgelöst. Dabei wird nur auf Kenntnisse dieser Theorie zurückgegriffen, wie sie in Einführungsvorlesungen vermittelt werden, insbesondere die Darstellung im Minkowski-Diagramm und die Verwendung von Vierervektoren. Erkenntnisse der Allgemeinen Relativitätstheorie sowie der Quantenphysik fließen in diese Betrachtungen nicht ein. Ausgangspunkt ist die Existenz der Raumzeit auch ohne Anwesenheit von Materie. Es wird unterschieden zwischen dem Maß der Zeit und ihrem Vergehen, das erst aus dem Vorhandensein von Körpern – belebt oder unbelebt – resultiert. Eine mathematische Begründung, weshalb die Zeit in nur einer Richtung zunehmen kann, liefert ein Vergleich der trigonometrischen Funktion mit ihren hyperbolischen Entsprechungen. Ferner wird die Annahme, die Darstellungsmöglichkeit in Form eines Blockuniversums beweise eine bereits feststehende Zukunft, widerlegt und die Entwicklung des Blockuniversums beschrieben. In diesem Modell tritt das Problem der physikalischen Nichtbeschreibbarkeit des Jetzt nicht mehr auf.

Zum Vergehen der Zeit

Es ist ein altes philosophisches Problem, ob die Zeit aus der Bewegung entstehe, oder ob Bewegung nur auf Grundlage von Zeit möglich sei. Ferner stellt sich die Frage, ob Zeit auch ohne Anwesenheit von Materie existiere. Diese Fragen lassen sich mit den Mitteln der Speziellen Relativitätstheorie beantworten. Auf die Rolle der Entropie wird im Absatz über die Richtung der Zeit eingegangen. Das Vergehen als Phänomen ist begrifflich zu unterscheiden von der Messung von Zeitdifferenzen, wie am Beispiel des Raumes deutlich wird: Der Raum kann genau vermessen werden, aber er “vergeht“ nicht.

Zur Darstellung von Abläufen in einem Raum-Zeit-Diagramm wird ein Maßstabsfaktor zwischen Raum und Zeit benötigt. In der Speziellen Relativitätstheorie verwendet man üblicherweise die Lichtgeschwindigkeit c, wodurch die Ausbreitung von Licht die Steigung eins erhält. Statt einer t-Achse benutzt man also eine ct-Achse, welche die Dimension Länge hat. Die Frage, wie schnell sich ein im Raum ruhender Körper mit dem Vergehen der Zeit entlang dieser Achse bewege, kann mit c beantwortet werden, denn die zurückgelegte Strecke ct pro Zeit t liefert die Lichtgeschwindigkeit. Doch diese Betrachtung erscheint tautologisch und zunächst sinnlos.

Aus der Sicht eines (einfachheitshalber unbeschleunigten) Beobachters stellt sich in einem Raum-Zeit-Diagramm die Bewegung eines Körpers als Weltlinie dar. Von Welt-“Linie“ zu sprechen, ist deshalb sinnvoll, weil die zeitliche Ausdehnung die räumliche weit übertrifft: Ein fünfzig Jahre alter Mensch ist nicht fünfzig Lichtjahre groß. Dies trifft erst recht für die langlebigen Elementarteilchen zu. Im Unterschied zu einer Bahnkurve im Raum, auf der eine Bewegung stattfindet, ist eine Weltlinie als unveränderlich konzipiert, da sie alle Zustände in Vergangenheit und Zukunft in einem selbst zeitlosen Diagramm beschreibt.

Nun ist die infinitesimale Bogenlänge ds einer Weltlinie proportional zur infinitesimalen Eigenzeit dτ des Körpers auf dieser Weltlinie – $ds = c\,d\tau$ – mit dem Proportionalitätsfaktor c. Diese Identifikation führt zur Vorstellung, Weltlinien würden mit Lichtgeschwindigkeit durchlaufen. Dabei wird im Gegensatz zum ursprünglichen Konzept die Weltlinie als eine Art Bahnkurve interpretiert, nicht im Raum, sondern in der Raumzeit. Im Unterschied zur Bahnkurve, die mit verschiedenen Geschwindigkeiten durchlaufen werden kann, hat ein Körper auf der Weltlinie stets Lichtgeschwindigkeit. Hierbei hüte man sich vor der anschaulichen Vorstellung, die Weltlinien würden überall mit derselben Geschwindigkeit "gezeichnet". Die Darstellung einer Weltlinie im Raum-Zeit-Diagramm ist euklidisch, die Bogenlänge in der Zeichnung $\mathrm{sqrt}\,((ct)^2 + x^2)$ stimmt nicht mit der pseudoeuklidischen Bogenlänge $\mathrm{sqrt}\,((ct)^2 - x^2)$ überein, welche der Eigenzeit entspricht. Ebenfalls irreführend wäre die Vorstellung, die Positionen der beiden "Stifte", welche jeweils eine von zwei Weltlinien zeichnen, seien korreliert. Es wäre zwar möglich, am Berührungspunkt zweier Weltlinien mit dem Zeichnen zu beginnen, doch wenn sie sich trennen und wieder begegnen, können sich die durchlaufenen Bogenlängen stark unterscheiden, wie es das Zwillingsparadoxon demonstriert.

Es gibt zwei Rechtfertigungen für diese Betrachtungsweise der Weltlinien:

1) Unter Verwendung des Geschwindigkeitsparameters θ, definiert durch $v = c \tanh \theta$, ergibt sich die Projektion eines Stückes ds der Bogenlänge einer Weltlinie auf die Zeitachse zu $ds \cosh \theta$ und die Projektion in dem Raum zu $ds \sinh \theta$. Eilt nun ein Körper während seiner Eigenzeit τ mit c das Stück $ds = c\,d\tau$ seiner Weltlinie entlang, beträgt die Projektion in den Raum $c\tau \sinh \theta$. In $t = \tau \cosh \theta$ ausgedrückt, lautet sie $ct \tanh \theta$, wodurch im Raum die tatsächliche Geschwindigkeit $v = c \tanh \theta$ vorliegt.

2) Für die folgende Untersuchung sei die x-Achse in Bewegungsrichtung des Körpers gewählt, sein Impuls ist $p_x = |\,\mathbf{p}\,| =: p$. Die Zeitkomponente des Viererimpulses eines Körpers mit der Masse m in Abhängigkeit vom Geschwindigkeitsparameter θ lautet $E/c = mc \cosh \theta$ und die Raumkomponente $p = mc \sinh \theta$. Aus der Ableitung des Viererimpulses nach der Eigenzeit erhält man die Minkowski-Kraft mit der Zeitkomponente $mc \sinh \theta \; d\theta/d\tau$ und der Raumkomponente $mc \cosh \theta \; d\theta/d\tau$. Der Betrag der Kraft ist $mc\,d\theta/d\tau$. Der Vergleich mit der Zentripetalkraft in der Newtonschen Mechanik $F = m\,v\,\omega$ zeigt strukturelle Ähnlichkeit, schreibt man die Winkelgeschwindigkeit als $\omega = d\varphi/dt$. Da der Geschwindigkeitsparameter θ das pseudoeuklidische Analogon zum Drehwinkel φ ist, nämlich $\theta = i\varphi$ – Ausführlicheres hierzu im Abschnitt über die Richtung der Zeit – , stimmen die Formeln sogar überein, wenn als Bahngeschwindigkeit v die Lichtgeschwindigkeit c gewählt wird.

Unter der Annahme, ein Körper bewege sich mit Lichtgeschwindigkeit auf seiner Weltlinie, wird also die Krümmung der Weltlinie unter Einwirkung einer Kraft zutreffend beschrieben. Darüber hinaus liefert die Lichtgeschwindigkeit in der Raumzeit projiziert in die drei Dimensionen des Raumes die dortige Bewegung.

Da die zunächst als statisch konzipierten Weltlinien nun ihrerseits als Bahnkurven gedeutet werden, liegt der Gedanke nahe, die Eigenzeit in Richtung einer fünften Dimension aufzutragen. Eine solche Darstellung hat aber wenig Nutzen, da die Eigenzeit nicht die Eigenschaft einer Koordiante aufweist.

Jeder Körper hat seine eigene Weltlinie, seine eigene Geschichte, und damit seine eigene Zeit. Eine andere Zeit als die individuellen Zeiten gibt es nicht. Universell ist nur die "Zeichengeschwindigkeit". Offenbar gehört zur Existenz von Materie, sich nicht anders als mit Lichtgeschwindigkeit durch die Raumzeit bewegen zu können. Da ein Beobachter Veränderungen außerhalb seiner selbst wahrnimmt, wird im Newtonschen Weltbild das Vergehen der Zeit als ein äußeres Phänomen gedeutet, das universell, also auch auf den Beobachter wirkt. In dem hier vorgestellten Modell ist das Vergehen individuell an jeden Körper gebunden, wie die Zeit auf einer bewegten – und unbelebten – Uhr belegt.

Manche vertreten die Ansicht, in einem über eine Weile materiefreien Raumbereich sei es nicht sinnvoll, von räumlichen oder zeitlichen Abständen zu sprechen, da sie nicht in Erscheinung treten können. Manche gehen sogar so weit, zu sagen, dort gebe es solche Abstände gar nicht. Dem hier vorgestellten Modell liegt die Annahme einer Raumzeit zugrunde, die unabhängig von der Anwesenheit von Materie existiert.

Fazit:

Frage: Existiert Zeit auch ohne Materie?
Antwort: Die Existenz einer metrischen Struktur der Raumzeit ist primär und unabhängig von Materie, obwohl die Materie entsprechend der Allgemeinen Relativitätstheorie die Form der Metrik bestimmt. Um Punkte in der Raumzeit durch Ereignisse zu markieren, ist Materie notwendig. Dadurch kann Zeit überhaupt erst als Aspekt der raumzeitlichen Differenz dieser Ereignisse in Erscheinung treten. Bei punktuellen Ereignissen ist der Begriff der Dauer noch nicht anwendbar. Hierzu bedarf es linienförmiger Existenzen in der Raumzeit, deren Bogenlänge wird dann als ihre Eigenzeit interpretiert. Diese Dauer besitzt aber noch nicht die Eigenschaft des Vergehens. Deshalb liefern diese Einsichten keine Antwort auf die philosophische Frage, die auf den Aspekt der Veränderung, also das Vergehen der Zeit, abzielt.

Frage: Ist die Zeit oder die Bewegung primär?
Antwort: Diese Frage wird mit einer Erweiterung des Bewegungsbegriffes aufgelöst: Bewegung findet nicht nur – mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten – in den drei Dimensionen des Raumes statt, sondern – mit konstanter Geschwindigkeit – in den vier Dimensionen der Raumzeit. Aus der speziell-relativistischen Perspektive stellt sich diese Frage gar nicht mehr, da Bewegung und zeitliche Entwicklung als dasselbe angesehen werden.

Frage: Vergeht die Zeit auch bei völligem Stillstand?
Antwort: Auch diese Frage erübrigt sich, da Bewegung oder Stillstand nur unterschiedliche Projektionen in den Raum aus der Perspektive des jeweiligen Beobachters sind.

Übrigens ist auch in der Newtonschen Mechanik das Vergehen der Zeit identisch mit dem Eilen entlang der Zeitachse. Doch dort bewegen sich nicht Körper auf individuellen Zeitachsen, sondern der absolute Raum verschiebt sich als ganzer, weshalb keine weiteren Schlüsse ziehbar sind.

Anmerkung: Der pseudoeuklidische Zusammenhang zwischen Raum und Zeit ist für die obigen Überlegungen nicht grundlegend, ein euklidischer Zusammenhang erforderte lediglich die trigonometrischen statt der hyperbolischen Funktionen. Auszuschließen sind für den Maßstabsfaktor c lediglich die Fälle $c = \infty$, was dem Newtonschen Weltbild entspricht, und $c = 0$.

Zur Richtung der Zeit

Oft wird argumentiert, die Richtung der Zeit werde durch die Entropie festgelegt, weil die Entropie mit der Zeit zunimmt. Ohne letzteres anzuzweifeln, könnte ebensogut der Standpunkt vertreten werden, die Zunahme der Entropie sei nur ein Indikator für die Richtung der Zeit. Es stellt sich ohnehin die Frage, wie etwas so unregelmäßig Wachsendes wie die Entropie etwas so präzise Zunehmendes wie die Zeit steuern könnte. Eine klare gedankliche Trennung von Vergehen, Richtung und Maß der Zeit ist für eine Untersuchung erforderlich. Ein weiteres Argument liefert der radioaktive Zerfall. Die Zerfallszeit von Atomkernen ist zwar statistisch, hat aber einen reproduzierbaren Mittelwert. Bis zum Zerfall läuft also im Kern eine Art Uhr, aber ohne Energiedissipation, ohne Entropiezunahme.

Da der Zusammenhang zwischen Raum und Zeit rein geometrischer Natur ist, liegt der Versuch nahe, auch für die Richtung der Zeit eine vorwiegend geometrische Begründung zu suchen, in der die Materie zwar notwendig vorkommt – denn ohne Materie ließe sich keine Zeit beobachten – aber eine möglichst geringe Rolle spielt.

Der Schlüssel liegt in einem leicht übersehbaren Unterschied in der Parametrisierung von Kreis und Hyperbel. Der Einheitkreis um den Koordinatenursprung wird beschrieben durch $y^2 + x^2 = 1$ und die Einheitshyperbel durch $y^2 – x^2 = 1$, wobei der erste Zusammenhang parametrisiert werden kann durch $y = \cos \varphi$ und $x = \sin \varphi$, der zweite durch $y = \cosh \psi$ und $x = \sinh \psi$. Die trigonometrischen und die hyperbolischen Funktionen scheinen sich zu entsprechen. Beide Parametrisierungen erfüllen ihre biquadratische Gleichung, deren Form dazu dient, sowohl den oberen als auch den unteren Halbkreis zu erfassen beziehungsweise den oberen und den unteren Hyperbelast.

Es zeigt sich jedoch ein wichtiger Unterschied. In der Parametrisierung $y = \cosh \psi$ kann der Cosinus hyperbolicus nur Werte ≥ 1 annehmen, im Gegensatz zu $y = \cos \varphi$, worin der Cosinus negative Werte besitzt. Der untere Hyperbelast kann durch diese Parametrisierung also nicht beschrieben werden, erst das Quadrieren erweitert die Lösungsmenge entsprechend. Dagegen beschreibt die trigonometrische Parametrisierung den gesamten Kreis und bedarf keines Quadrierens, um vollständig zu sein. Hier erweitert die biquadratische Form die Lösungsmenge nicht.

Zusammenfassend ausgedrückt: Die Beziehung zwischen $y^2 + x^2 = 1$ und $y^2 – x^2 = 1$ ist der Beziehung zwischen der trigonometrischen Parametrisierung $y = \cos \varphi$, $x = \sin \varphi$ und der hyperbolischen $y = \cosh \psi$, $x = \sinh \psi$ nicht äquivalent, was leicht übersehen werden kann, da beide Parametrisierungen ihre jeweilige biqudratische Gleichung erfüllen. Dieser mathematische Unterschied hat, wie im Folgenden gezeigt wird, eine physikalische Konsequenz.

In der folgenden Betrachtung werden die Darstellungen eines Vektors in drei Koordinatensystemen miteinander verglichen. In der gewohnten euklidischen Ebene kann ein Vektor mit Radius r alle Richtungen, beschrieben durch den Winkel φ, einnehmen: $x = r \sin \varphi$ und $y = r \cos \varphi$, wobei in dieser Polarkoordinatendarstellung φ von der positiven y-Achse aus in Richtung der positiven x-Achse zunimmt. In der Minkowski-Beschreibung der Speziellen Relativitätstheorie stehen die Raumachsen im imaginären Verhältnis zu Zeitachse. Wird letztere reell gewählt, werden die Raumachsen imaginär. Die y-Achse vertritt hier die ct-Achse, die x-Achse steht stellvertretend für die (imaginären!) Raumrichtungen. Dieses zweite Koordinatensystem, das dem wirklichen, dem relativistischen Zusammenhang entspricht, unterscheidet sich von der euklidischen Ebene nur in der Imaginarität der x-Achse, die Lage des Vektors bleibt unverändert.

Da nur reelle Werte gemessen werden können, ist es sinnvoll, eine reelle Raumachse R mit $R = ix$ zu definieren. Nun ist zu untersuchen, wie die Darstellung eines Vektors in der R,y-Ebene aussieht. Dieses dritte Koordinatensystem ist die pseudoeuklidische Ebene.

Durch Umformulierungen der Euler-Formel $\exp(i\varphi) = \cos\varphi + i \sin\varphi$ erhält man

$i \sin\varphi = \sinh i\varphi$, $\cos\varphi = \cosh i\varphi$ und damit $i \tan\varphi = \tanh i\varphi$.

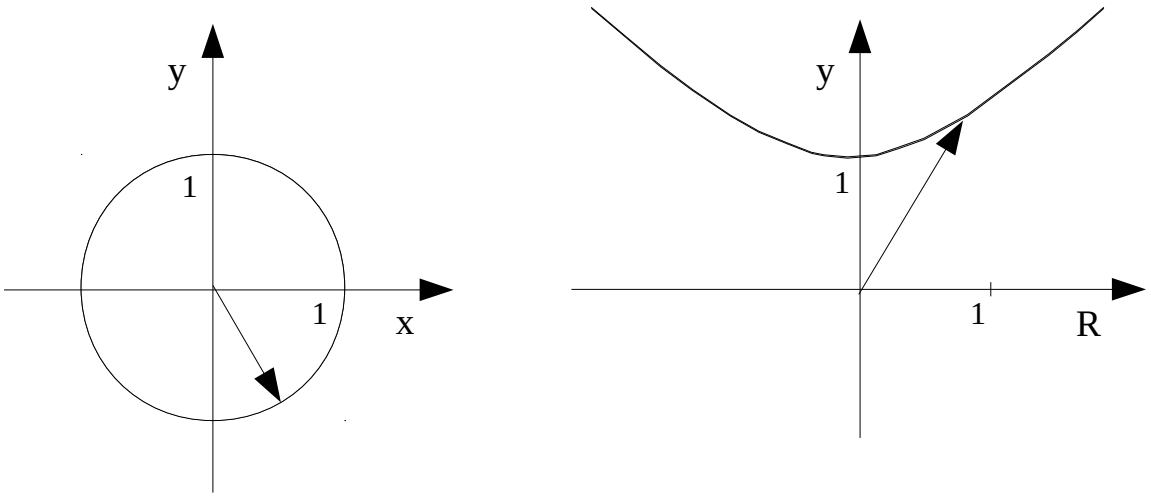
Der Tangens des Winkels φ berechnet sich zu $\tan\varphi = x/y = R/iy$, die zugehörige hyperbolische Formel lautet $R/y = \tanh i\varphi$. Aus dem reellen Verhältnis R/y folgt ein reelles Argument iφ der hyperbolischen Tangensfunktion. Eine imaginäre x-Achse geht also mit einem imaginären Winkel φ einher, nur dann wird iφ reell. Dieser Ausdruck iφ wird in der Speziellen Relativitätstheorie als Geschwindigkeitsparameter bezeichnet und mit θ abgekürzt.

Die Koordinaten in der R,y-Ebene lauten damit

$R = ir \sin\varphi = r \sinh i\varphi = r \sinh\theta$ und $y = r \cos\varphi = r \cosh i\varphi = r \cosh\theta$.

Während der Sinus hyperbolicus alle Werte annehmen kann, ist der Cosinus hyperbolicus größer gleich eins. In der pseudoeuklidischen Darstellung zeigt der Vektor daher nur in die positive y-Richtung. Entsprechend $-1 < R/y = \tanh\theta < +1$ liegt der Vektor nur im Winkelbereich zwischen $-45°$ und $+45°$ zur y-Achse.

Obwohl der gesamte Kreis durch $y^2 + x^2 = r^2$ beschrieben wird, und gemäß $R = ix$ die Entsprechung $y^2 - R^2 = r^2$ beide Hyperbeläste, also auch den im negativen y-Bereich, wiedergibt, kann der Vektor nur positive y-Werte ≥ 1 annehmen.



Skizze: Der Einheitsvektor kann auf jeden Punkt des Einheitskreises zeigen, seine Entsprechung aber nur auf den oberen Ast der Einheitshyperbel.

Wäre der Zusammenhang zwischen Raum und Zeit euklidisch, könnten die Weltlinien beliebig verlaufen und ihre Tangentialvektoren in alle Richtungen zeigen, womit alle Möglichkeiten abgedeckt wären. Sieht man diese Darstellung als vollständig an und führt imaginäre Raumachsen ein, schränkt die Umrechnung auf reelle Werte die Richtungen der Vektoren ein. Daher hat eine Weltlinie eine nur positive Zeitrichtung. Selbstverständlich können in der R,y-Ebene andere Vektoren angegeben werden, aber diese rühren dann nicht von den ursprünglichen Tangentialvektoren.

Zum Jetzt

Physikalische Gleichungen erfassen das Jetzt nicht. Was ist mit dieser Aussage gemeint und wie könnte das Jetzt physikalisch angemessen beschrieben werden?

Ein einfaches Beispiel stellt die Formel für den freien Fall $s = ½ g t^2$ dar, in der kein Zeitpunkt ausgezeichnet ist. Dies ist auch der Sinn einer Formel, in der die Zeit t auftritt; jedem möglichen Zeitpunkt soll ein Funktionswert zugeordnet oder – bei mehreren noch offenen Parametern – ein Zusammenhang zwischen diesen hergestellt werden. Dabei geht man von der Unabhängigkeit der Naturgesetze von der Zeit aus, denn die Formel soll ja für alle t, die der physikalische Rahmen erlaubt, zutreffen.

Nun ist zu unterscheiden zwischen dem Erleben des Jetzt und seiner physikalischen Beschreibung. Das klassische Beispiel der Farbe Blau, deren individuelle Wahrnehmung nicht verglichen werden kann, die aber über ihre Frequenz objektivierbar ist, steht im Gegensatz zum Jetzt, das außerhalb der Weltlinie des Beobachters, der es erlebt, keine Bedeutung hat. Andere Weltlinien können unkorreliert verlaufen und sich entsprechend ihrer Bogenlänge in der Zeitdauer unterscheiden sowie entsprechend ihrer Steigung in der Gleichzeitigkeit nicht übereinstimmen. Dies steht im Gegensatz zu unserer Alltagserfahrung, bei der wir wegen der Größe des halben Erdumfanges von nur einer fünfzehntel Lichtsekunde uns mit allen Menschen gleichzeitig verbunden fühlen. Genaugenommen kann ein Beobachter sein Jetzt-Erlebnis mit einem anderen Beobachter nur teilen, wenn sich die Weltlinien berühren.

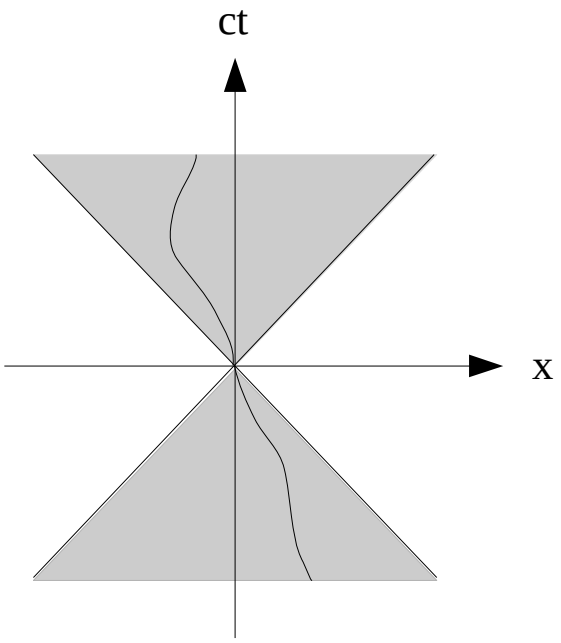
Der Begriff des Jetzt wirft im Newtonschen Weltbild philosophische Fragen auf, die speziell-relativistisch nicht mehr auftreten.

Für eine Reaktion auf aktuelle äußere Umstände ist ein Erleben nicht notwendig, wie Automaten demonstrieren. Wir Menschen sind jedoch mit der Fähigkeit des Erlebens ausgestattet. Außerdem verfügen wir über Erinnerungen und Zukunftsvorstellungen, ohne die wir ständig nur mit der jeweiligen Gegenwart konfrontiert wären. Erst das Wissen über die Existenz von Vergangenheit und Zukunft verbunden mit der Fähigkeit, Erinnerungen und Zukunftsvorstellungen von aktuellen Eindrücken – äußeren wie inneren – zu unterscheiden, ermöglicht das Erkennen der Gegenwart in einem Akt der Abgrenzung.

Physikalisch hat das Jetzt lediglich lokale Bedeutung und kann nur verstanden werden als Beziehung zwischen Ereignissen. Diese Beziehung kann unmittelbar kausal sein – eine mittelbare Kausalität benötigt Zeit und zerstört das Jetzt – oder nur in der raumzeitlichen Nähe bestehen. Mit dem Begriff des Ereignisses als Markierung für einen Punkt der Raumzeit ist das Jetzt aus materieller Sicht hinreichend beschrieben. Des Erleben des Jetzt teilen sich Beobachter nur solange, wie sie beieinander sind.

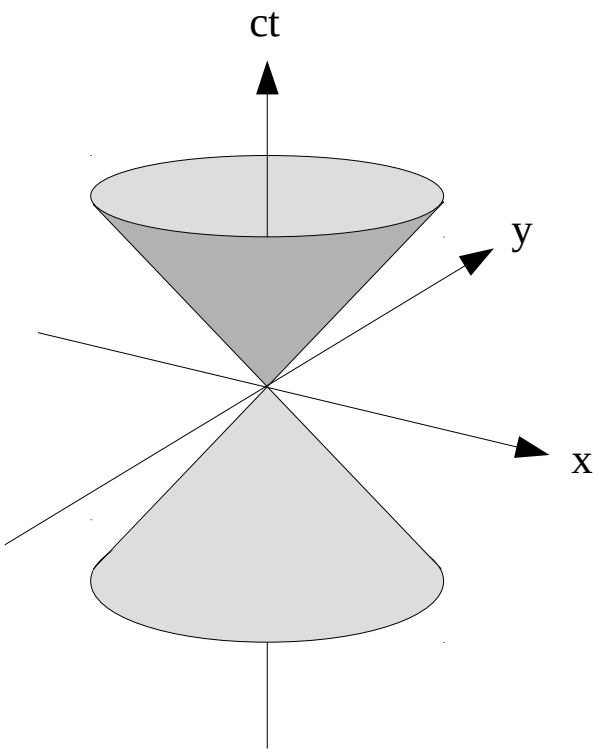
Zum Blockuniversum

Das aus der Speziellen Relativitätstheorie bekannte Blockuniversum, ein Erfassen der Gesamtheit aller Ereignisse – sowohl hinsichtlich des Ortes als auch des Zeitpunktes ihres Auftretens – in einer vierdimensionalen Raumzeit, ist bereits im Newtonschen Weltbild möglich. Mit der Zeit häuft sich Geschehnis auf Geschehnis, ähnlich, wie ein Wolkenkratzer beim Bauen wächst. Oft ist die Ansicht zu hören, das Blockuniversum beweise eine bereits feststehende Zukunft. Dieser Gedanke soll nun widerlegt werden. Zunächst ist klar: Da die Darstellung der Welt im Blockuniversum alle Zustände im Laufe der Zeit abbildet, ist die Darstellung selbst statisch. Die Zukunft kommt nun durch die Spezielle Relativitätstheorie auf eine neue Weise ins Spiel, weil das, was ein Beobachter als gleichzeitig einordnet, von seiner Geschwindigkeit abhängt. So kann ein Beobachter ein Ereignis als zukünftig einordnen, das für einen anderen in der Vergangenheit liegt. Die Folgerung allerdings, die Zukunft liege fest, weil sie für jemand anderen bereits Vergangenheit ist, beruht auf einer unzulässigen Vermischung zwischen der realen, relativistischen Welt und ihrer näherungsweisen Beschreibung im Newtonschen Weltbild. Bei Newton ist die Gleichzeitgkeit absolut und damit die Unterscheidung zwischen Vergangenheit und Zukunft für alle Beobachter verbindlich. Einstein hat die Lichtgeschwindigkeit als Höchstgeschwindigkeit erkannt. Zur realen Vergangenheit eines Beobachters kann nur gehören, was ihn beeinflussen konnte, oder wovon er Kenntnis erhalten hat. Dies konnte maximal mit Lichtgeschwindigkeit erfolgen. Eine Nachricht oder eine Wirkung, die, um ihn zu erreichen, Überlichtgeschwindigkeit benötigt hätte, existiert für den Beobachter zu diesem Zeitpunkt nicht, möglicherweise zu einem späteren. Den Bereich aller vorangegangenen Ereignisse, die mit diesem Beobachter in Verbindung stehen könnten, nennt man seine absolute Vergangenheit. Er wird begrenzt vom sogenannten Rückwärtslichtkegel, der eigentlich ein Hyperkegel ist. Entsprechend gibt es einen Vorwärtslichtkegel, innerhalb dessen alle Ereignisse liegen, die vom Beobachter erreicht werden könnten, die absolute Zukunft. Die Bezeichnung “absolut“ ist auch im folgenden Sinne zu verstehen: Da die Lichtgeschwindigkeit invariant ist und damit der Lichtkegel, beschreiben beliebige Beobachter übereinstimmend, welcher Raumzeitbereich für den ersten Beobachter an diesem Raumzeitpunkt absolute Vergangenheit und absolute Zukunft darstellt.



In der Abbildung ist eine mögliche Weltlinie innerhalb des Lichtkegels skizziert.

Die Bereiche außerhalb des Kegels erscheinen in dieser Abbildung getrennt, weil nur die eine Raumrichtung, die der momentanen Bewegungsrichtung entspricht, aufgetragen ist. Eine Darstellung mit zwei Dimensionen x und y des dreidimensionalen Raumes x, y und z zeigt einen zusammenhängenden Bereich außerhalb des Lichtkegels. Diese Darstellung wird oft benutzt, da als weitere Achse die Zeit benötigt wird und sich vier Dimensionen in unserer dreidimensionalen Welt nicht zeichnen lassen. Vom Hyperkegel der Lichtausbreitung ist hier nur ein dreidimensionaler Kegel zu sehen, daher rührt der Name “Lichtkegel“. Entsprechend werden von dem als gleichzeitig festgestellten 3D-Raum nur zwei Dimensionen wiedergegeben, die sogenannte “Gleichzeitigkeitsebene“, hier die xy-Ebene.



Diese Gleichzeitigkeit ist formal, denn die gleichzeitigen Ereignisse können nur zu einem späteren Zeitpunkt registriert werden. Darüber hinaus werden sie gar nicht mehr als gleichzeitig eingeordnet, wenn der Beobachter inzwischen seine Geschwindigkeit geändert und damit seine Gleichzeitigkeitsebene gekippt hat. Gleichzeitigkeit ist nur für Beobachter verbindlich, die keine Relativgeschwindigkeit haben.

Das Denken im Newtonschen Weltbild mit seiner absoluten Zeit und der daraus resultierenden Einteilung in Vergangenheit und Zukunft für verschiedene Beobachter darf hier nicht übernommen werden.

Die Betrachtungsweise allen Geschehens in Form des Blockuniversums ist zwar bereits in Newtonscher Darstellung möglich, der wesentliche Nutzen, die pseudoeuklidische Geometrie und damit die Gleichzeitigkeitsebenen abzubilden, zeigt sich erst in der Speziellen Relativitätstheorie.

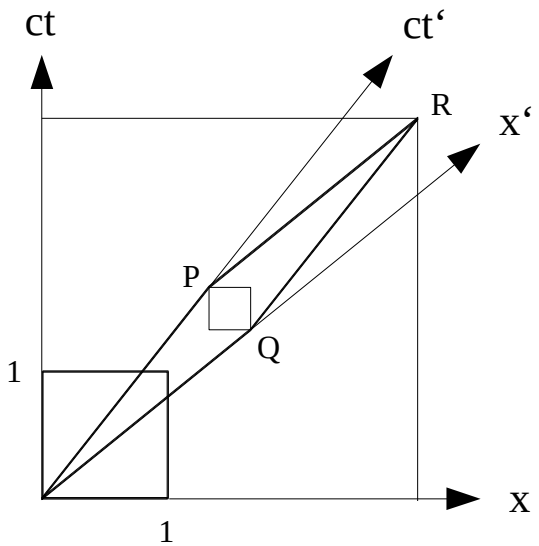
Dem Erleben der zeitlichen Entwicklung des Universums, einfachheitshalber zunächst aus der Sicht eines unbeschleunigten Beobachters A, liegt die subjektive Gleichzeitigkeit zugrunde, im zweidimensionalen Raum-Zeit-Diagramm beschrieben durch die auf der Zeitachse senkrecht stehende x-Achse. Ein Beobachter B, der sich relativ zum ersten gleichförmig bewegt, hat in dessen Diagramm eine geneigte Weltlinie, die seiner Zeitachse t‘ entspricht. Wegen der pseudoeukidischen Geometrie der Raumzeit ist die x‘-Achse in der Gegenrichtung geneigt. Der Beobachter A kann nun berechnen, wie sich das Universum aus der Sicht von B entwickelt. Da die Position von B auf der Weltlinie bekannt ist, kann auch A die Raumzeitpunkte oberhalb der Gleichzeitigkeitslinie x‘ ermitteln. Für B wächst das Blockuniversum in anderen Bereichen als für A. Für einen beschleunigten Beobachter C existiert sogar ein Bereich mit gegenüber A rückwärts laufender Zeit. B sieht die Vorgänge entsprechend der Zeitdilatation langsamer, als A sie beschreibt und infolge der Längenkontraktion alle Ereignisse um denselben Lorentzfaktor dichter.

Im Hypervolumen der Raumzeit ist daher die “Ereignisdichte“ für A und B dieselbe. Dies ist direkt der Lorentztransformation

$$\begin{pmatrix} ct' \\ x' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cosh\theta & \sinh\theta \\ \sinh\theta & \cosh\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} ct \\ x \end{pmatrix}$$

entnehmbar, denn deren Determinante $\mathrm{Det} = \cosh^2\theta - \sinh^2\theta = 1$ zeigt die Invarianz der Fläche in der ct,x-Ebene unter Lorentztransformation. Da die Richtungen y und z bei der Transformation unverändert bleiben, bleibt auch das vierdimensionale Volumen invariant.

Wie das Blockuniversum für B aus der Sicht von A wächst, ist anschaulich aus dem folgenden Diagramm ablesbar. Dort ist das Einheitsquadrat für A mit den Ecken (0,0), (1,0), (0,1) und (1,1) abbgebildet. Das entsprechende Quadrat für B liegt im Diagramm von A auf den Punkten (0,0), P, Q und R eines Parallelogrammes. Gemäß der Lorentztransformation haben diese die Koordnaten P: (cosh θ, sinh θ), Q: (sinh θ, cosh θ), R: (cosh θ + sinh θ, sinh θ + cosh θ) = (exp θ , exp θ) . Die Differenzen zwischen den x-Koordinaten von P und Q sowie zwischen ihren ct-Koordinaten haben beide den Betrag $\cosh\theta - \sinh\theta = \exp(-\theta)$.



$\beta = v/c = \tanh\theta = 0{,}8$

$\exp\theta = 3$

Das Parallelogramm entstand also aus dem Einheitsquadrat durch Streckung in Richtung der einen Diagonalen und durch Stauchung in Richtung der anderen, wobei die Fläche unverändert bleibt. Die Beobachter A und B stellen damit – wenn auch an unterschiedlichen Bereichen – dieselbe "Wachstumsgeschwindigkeit" des Blockuniversums fest. Wäre dies nicht der Fall, ließe sich in der Tat auf eine feststehende Zukunft schließen. So erlaubt uns das Blockuniversum eine anschauliche Einordnung aller Ereignisse – soweit ein vierdimensionales Diagramm überhaupt anschaulich sein kann – zur Frage, ob die Zukunft bereits feststehe, liefert es keine Aussage.

Abschließende Betrachtung

Im vorrelativistischen Weltbild erscheint die Zeit als etwas, das einerseits individuell erfahrbar ist, jedoch andererseits auf geheimnisvolle Weise im gesamten Universum wirkt. Dies stellt eine große philosophische Herausforderung dar. Das Erkennen der Aspekte Dauer und Gleichzeitigkeit als rein individuelle Erfahrung und subjektives Einordnungsschema für Ereignisse in der Raumzeit nimmt der Zeit einen Teil ihrer vorrelativistischen Tragweite. Die absolute Zeit Newtons, die nicht hinterfragt werden konnte, wird ersetzt durch die ebenfalls nicht zu hinterfragende Raumzeit. Das Durchqueren der Raumzeit mit Lichtgeschwindigkeit erscheint als intrinsische Eigenschaft alles Materiellen, wodurch sich die Bewegung als Projektion in den Raum erweist. Wenn auch einige Warum-Fragen offen bleiben und neue auftreten, ist doch ein wesentlicher Erkenntnisfortschritt zu verzeichnen.

In Anspielung auf Platons Höhlengleichnis, in dem die projizierten Schatten für die Wirklichkeit gehalten werden, ist es dank der Speziellen Relativitätstheorie gelungen, die Projektion als solche zu erkennen und damit zumindest einen kleinen Teil der Wirklichkeit zu enträtseln.