

Unverkäufliche Leseprobe

Alle Rechte vorbehalten. Die Verwendung von Text und Bildern, auch auszugsweise, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlags urheberrechtswidrig und strafbar. Dies gilt insbesondere für die Vervielfältigung, Übersetzung oder die Verwendung in elektronischen Systemen.

Dieses Buch ist der unveränderte Reprint einer älteren Ausgabe.

Erschienen bei FISCHER Digital

© S. Fischer Verlag GmbH, Frankfurt am Main 2015

Printed in Germany

ISBN 978-3-596-30903-0

Fischer

Weiterführende Informationen finden Sie unter

www.fischerverlage.de

Unberührt von Brotberuf und Weltgetriebe revolutioniert ein Genie die Physik: So wird Albert Einsteins Durchbruch zur Speziellen Relativitätstheorie im Jahr 1905 gerne dargestellt. Doch dass man sich die Sache so gerade nicht vorstellen sollte, führt Peter Galison eindrucksvoll und an Hand vieler neuer Quellen vor Augen. Denn sieht man nur genauer hin, zeigen sich überraschend viele und enge Verknüpfungen zwischen der Grundlagentheorie und sehr konkreten Fragestellungen, mit denen der junge Einstein ebenso wie der zweite »Vater« der Relativitätstheorie, der damals bereits weltberühmte französische Mathematiker und Physiker Henri Poincaré, durchaus zu tun hatten.

Peter Galison, Jahrgang 1955, ist Mallinckrodt Professor of the History of Science and of Physics an der Harvard University. Unter seinen weiteren Buchveröffentlichungen: ›How Experiments End‹, ›Image and Logic. A Material Culture of Microphysics‹, ›Picturing Science/Producing Art‹ (Hg.), ›The Architecture of Science‹ (Hg.), ›The Disunity of Science: Boundaries, Contexts and Power‹ (Hg.), ›Scientific Authorship: Credit and Intellectual Authorship in Science‹ (Hg.).

Unsere Adressen im Internet: www.fischerverlage.de
www.hochschule.fischerverlage.de

Peter Galison
**Einstiens Uhren,
Poincarés Karten**

Die Arbeit an
der Ordnung der Zeit

Aus dem Englischen von
Hans Günter Holl

Fischer
Taschenbuch
Verlag

Veröffentlicht im Fischer Taschenbuch Verlag,
einem Unternehmen der S. Fischer Verlag GmbH,
Frankfurt am Main, Juni 2006

© Peter Galison 2002

Für die deutsche Ausgabe:

© 2003 by S. Fischer Verlag GmbH, Frankfurt am Main

Satz: Fotosatz Otto Gutfreund GmbH, Darmstadt

Druck und Bindung: Clausen & Bosse, Leck

Printed in Germany

ISBN-13: 978-3-596-17237-5

ISBN-10: 3-596-17237-3

Inhalt

1. Gleichzeitigkeit 7
2. Kohlen, Chaos & Konventionen 45
3. Die telegraphische Weltkarte 82
4. Poincarés Karten 157
5. Einsteins Uhren 226
6. Der Ort der Zeit 308
- Anmerkungen 345
- Literatur 365
- Danksagung 379
- Namenregister 380

1 Gleichzeitigkeit

Die wahre Zeit konnten Uhren niemals anzeigen – da war sich Newton sicher. Selbst die größten Meisterwerke der Uhrmacherkunst vermochten nur blasse Abbilder jener höheren, absoluten Zeit zu bieten, die nicht der Menschenwelt angehörte, sondern dem »Sensorium Gottes«. Gezeiten, Planeten, Monde – alles in der Welt bewegte oder veränderte sich, wie Newton meinte, vor dem Hintergrund einer einzigen, stetig fließenden Zeit. In Einsteins elektrotechnischer Welt war jedoch kein Platz für ein solches »ewig gleichmäßig ablaufendes Ticktack«, ließ sich die Zeit nicht mehr ohne Rückgriff auf ein Netzwerk oder Verbundsystem von Uhren sinnvoll definieren, schon weil sie aus der Perspektive bewegter und ruhender Systeme unterschiedlich schnell abläuft: Ereignisse, die ein stationärer Beobachter als gleichzeitig wahrnimmt, scheinen für einen bewegten Beobachter nacheinander zu erfolgen. So löst sich »die Zeit« in »Zeiten« auf. Ein schwerer Schlag, der das solide Fundament der Newton'schen Physik erschütterte, und Einstein machte sich darüber keine Illusionen. Als er später seine autobiographischen Notizen abfasste, hielt er einen Moment ein, um Isaac Newton gleichsam persönlich über die Jahrhunderte hinweg anzusprechen. Im Blick auf die durch seine Relativitätstheorie außer Kraft gesetzte Verabsolutierung von Raum und Zeit schrieb er: »Newton, verzeih' mir; du fandest den einzigen Weg, der zu deiner Zeit für einen Menschen von höchster Denk- und Gestaltungskraft eben noch möglich war.«¹

Diese radikale Umwälzung des Zeitverständnisses ging von einem ebenso außergewöhnlichen wie leicht beschreibbaren Gedanken aus, an dem sich Physik, Philosophie und Technik noch

heute orientieren: *Um bei fernen Ereignissen von Gleichzeitigkeit sprechen zu können, müssen wir unsere Uhren synchronisieren, und das setzt einen Signalaustausch voraus, in dem es die Übertragungszeit der Signale zu berücksichtigen gilt.* Was könnte einleuchtender sein? Doch diese verfahrensgestützte Definition der Zeit lieferte das letzte noch fehlende Stück im Puzzle der Relativität und veränderte dadurch die gesamte Physik von Grund auf.

Alles Folgende kreist um die Methodik der Uhrenkoordination, und so einfach das Thema auch erscheinen mag, es ist doch gleichermaßen hochfliegend abstrakt wie bodenständig konkret. Die Materialisierung der Simultanität erfolgte um die Jahrhundertwende in einer ganz anderen als unserer heutigen Welt, grenzten damals doch Höchstleistungen auf dem Gebiet der theoretischen Physik direkt an den profan materialistischen und imperialistischen Ehrgeiz, ein erdumspannendes, telegraphisch nutzbares Kabelnetz einzurichten, um Eisenbahnen aufeinander abzustimmen und die geographischen Karten zu vervollständigen. Ingenieure, Philosophen und Physiker arbeiteten dabei eng zusammen; der New Yorker Bürgermeister hielt Vorträge über die Konventionalität der Zeit; der Kaiser von Brasilien wartete an der Atlantikküste darauf, dass telegraphische Zeitsignale aus Europa eintrafen, und zwei führende Wissenschaftler der Epoche, Albert Einstein und Henri Poincaré, ordneten die Gleichzeitigkeit unterschiedlichen Schnittpunkten im Spannungsfeld von Physik, Philosophie und Technik zu.

Die Zeiten Einsteins

Wegen seiner nachhaltigen Wirkungen in diesem Spannungsfeld wurde Einsteins 1905 publizierte Arbeit »Zur Elektrodynamik bewegter Körper« zum bekanntesten physikalischen Aufsatz des 20. Jahrhunderts, und sein zentrales Thema ist die Aufhebung der absoluten Zeit. Seine Argumentation unterscheidet sich, zumindest in der herkömmlichen Deutung, so radikal von der älteren, »praktisch« angelegten klassischen Mechanik, dass der Text zu

einem Modell für revolutionäres Denken wurde und für eine Sichtweise, die sich grundlegend vom substantiell-anschaulichen Weltverständnis abwandte. Einsteins neue, teils philosophisch, teils physikalisch begründete Auffassung der Gleichzeitigkeit gilt seither als ein irreversibler Bruch zwischen der modernen Physik und den früheren Vorstellungen von Raum und Zeit.

Einstein eröffnete seinen Aufsatz über das Relativitätsprinzip mit dem Hinweis auf eine im damaligen Verständnis der Elektrodynamik bestehende, aber in den Naturphänomenen selbst nicht anzutreffende Asymmetrie. Um 1905 vertraten nahezu alle Physiker die Ansicht, dass Wellen – ob des Lichts, des Wassers oder des Schalles – auf ein Medium angewiesen seien. Im Fall des Lichts (oder der oszillierenden elektromagnetischen Felder, aus denen es bestand) dachte man dabei an einen alles durchdringenden »Äther«, dessen Einführung die meisten Physiker des ausgehenden 19. Jahrhunderts als einen der großen Fortschritte ihrer Zeit erachteten und die Hoffnung hegten, er werde – sofern erst einmal umfassend verstanden, veranschaulicht und mathematisch formalisiert – eine einheitliche wissenschaftliche Erklärung der Naturphänomene ermöglichen, von der Wärme und dem Licht bis zum Magnetismus und der Elektrizität. Doch gerade der Äther brachte die von Einstein abgelehnte Asymmetrie mit sich.²

Nach der üblichen physikalischen Deutung, so schrieb Einstein, sei es anhand des erzeugten Stromes ununterscheidbar, ob sich, jeweils auf den Äther bezogen, ein bewegter Magnet einer ruhenden Spule oder eine bewegte Spule einem ruhenden Magneten nähert. Allerdings sei der Äther selbst nicht nachweisbar. Daher gab es aus Einsteins Sicht nur *ein* relevantes Phänomen: die Annäherung von Spule und Magnet, die in jener einen (durch das Leuchten eines Lämpchens bezeugten) Strom induziert. Die Elektrodynamik (bestehend einerseits aus den Maxwell'schen Gleichungen über das Verhalten elektromagnetischer Felder, andererseits aus Kraftgesetzen über die Feldbewegungen geladener Teilchen) bot nach der damals herrschenden Meinung zwei grundverschiedene Erklärungen für das Geschehen. Als ausschlaggebend galt, was sich gegenüber dem Äther bewegte: die Spule oder der

Magnet. Im ersten Fall (ruhender Magnet, bewegte Spule) folgte aus den Maxwell'schen Gleichungen, dass auf die Elektrizität der Spule bei Bewegung im Magnetfeld eine Kraft einwirkte, die einen Stromfluss auslöste und das Lämpchen leuchten ließ. Im zweiten Fall (bewegter Magnet, ruhende Spule) verstärkte sich aufgrund der Annäherung des Magnetfelds im Umkreis der Spule, was (nach den Maxwell'schen Gleichungen) wiederum ein elektrisches Feld erzeugte, das den Strom durch die Spule und den Glühdraht des Lämpchens schickte. In der üblichen Darstellung machte es also einen ganz erheblichen Unterschied, ob man den Magneten oder die Spule als Ausgangspunkt wählte.

In Einsteins Neufassung des Problems blieb nur ein Phänomen übrig: Die Annäherung von Spule und Magnet, verbunden mit dem Leuchten des Lämpchens. Aus seiner Sicht verlangte *ein* beobachtbarer Vorgang auch nur *eine* Erklärung, und diese sollte ganz ohne den Äther auskommen. Insofern erschienen die ruhenden respektive bewegten Bezugssysteme der Spule und des Magneten bloß als zwei Sichtweisen auf ein und dasselbe Phänomen. Einstein zufolge ging es hier um ein Grundprinzip der Physik: die Relativität.

Fast dreihundert Jahre zuvor hatte Galilei die Bezugssysteme auf eine ganz ähnliche Weise in Frage gestellt. Wenn ein Schiff mit gleichförmiger Geschwindigkeit über das Meer glitt, so überlegte er, ließ sich seine Bewegung in einer abgeschlossenen Kabine unter Deck durch kein noch so raffiniertes mechanisches Experiment feststellen. Ein Fisch würde dort nicht anders durchs Aquarium schwimmen als an Land, ein Wassertropfen ebenso geradlinig zu Boden fallen. Es gab einfach keine Möglichkeit, mit Hilfe der Mechanik zu ermitteln, ob ein solcher Raum »in Wirklichkeit« ruhte oder sich bewegte. Darin erblickte Galilei eine grundlegende Eigenschaft der Fallgesetze, deren Formulierung ihm vieles verdankt.

Dieses traditionelle Verständnis von Relativität in der Mechanik griff Einstein auf, als er die »Relativität« 1905 zum Prinzip erhob und erklärte, physikalische Prozesse blieben völlig unbeeinflusst davon, in welcher Art von gleichförmig bewegten Bezugssystemen

sie ablaufen. Ihm zufolge sollte das Relativitätsprinzip nicht nur für fallende Tropfen, aufspringende Bälle und schwingende Federn gelten, sondern auch für die vielfältigen Effekte der Elektrizität, des Magnetismus und des Lichts.

Dem Relativitätspostulat, wonach man unmöglich ermitteln kann, welches Inertialsystem »in Wirklichkeit« ruht, fügte Einstein eine noch erstaunlichere Annahme hinzu, nämlich dass sich Licht immer gleich schnell ausbreite – mit etwa dreihunderttausend Kilometern pro Sekunde –, *unabhängig von der Geschwindigkeit, mit der sich die Lichtquelle bewegt*. Für handfeste Dinge gilt das offensichtlich nicht. Ein Zug rollt im Bahnhof ein, und der Schaffner wirft einen Postsack in Fahrtrichtung auf den Bahnsteig: In diesem Fall fliegt der Sack zweifellos mit dem Zugtempo plus der Wurfbeschleunigung auf einen dort wartenden Beobachter zu. Anders, so Einstein, im Fall des Lichts. Schwenkt A in Sichtweite von B eine Laterne, dann sieht dieser das Licht mit dreihunderttausend Kilometern pro Sekunde auf sich zukommen, und daran würde sich auch nichts ändern, wenn A auf einem Zug stünde, der sehr schnell (zum Beispiel mit halber Lichtgeschwindigkeit) auf ihn zuraste. Einsteins zweitem Postulat zufolge spielt es für das Fortpflanzungstempo des Lichts überhaupt keine Rolle, ob und wie schnell sich die Lichtquelle bewegt.

Einsteins Lesern mussten diese beiden Annahmen durchaus plausibel erscheinen (zumindest teilweise). Nicht nur kannte man, wie erwähnt, das Relativitätsprinzip in der Mechanik schon seit Galilei, sondern neuerdings hatte sich (unter anderen) auch bereits Poincaré mit seinen Problemen und Aussichten in der Elektrodynamik befasst.³ Und wenn das Licht lediglich aus einer Erregung von Wellen in einem starren, alles durchdringenden Äther bestand, so lag die Vermutung nahe, dass seine Ausbreitung nicht von der Quelle abhing, sofern das Bezugssystem gewählt wird, in dem der Äther ruht. Schließlich gilt das Gleiche normalerweise auch für den Schall: Nach der Abstrahlung breitet er sich gewöhnlich stets mit konstanter Geschwindigkeit durch die Luft aus.

Doch wie konnte Einstein seine beiden Behauptungen miteinander in Einklang bringen? Nehmen wir an, in dem äthergestütz-

ten Bezugssystem, in welchem der Äther ruht, brennt eine Lampe. Müsste sich deren Licht nicht für einen gegenüber dem Äther bewegten Beobachter schneller oder langsamer fortpflanzen, je nachdem, ob es aus seiner Perspektive von hinten oder vorne käme? Und wenn sich dergestalt Schwankungen in der Lichtgeschwindigkeit beobachten ließen: Wie stünde es dann um das Relativitätsprinzip (da man nun doch eindeutig feststellen könnte, ob man sich gegenüber dem Äther bewegt oder nicht)? Allerdings war in der Tat keine solche Abweichung messbar. Selbst die raffiniertesten optischen Experimente ergaben keinerlei Hinweise auf eine Bewegung durch den Äther.

Daher meinte Einstein, man habe die elementaren Begriffe der Physik bisher ungenügend durchdacht und eine genauere Analyse werde den scheinbaren Widerspruch zwischen Relativitätsprinzip und konstanter Lichtgeschwindigkeit auflösen. Also beschloss er, noch einmal ganz vorne anzufangen und grundsätzlich zu fragen: Was ist Länge? Was ist Zeit? Was ist Gleichzeitigkeit? Obwohl jedermann wisse, dass die Physik des Elektromagnetismus und der Optik auf Zeit-, Längen- und Simultanitätstimmessungen beruhe, sei man bei der Ermittlung dieser Leitgrößen zu nachlässig vorgegangen. Wie ließen sich durch Maßstäbe und Uhren eindeutige Raum- und Zeitkoordinaten für die beobachteten Phänomene gewinnen? Die unter Physikern vorherrschende Ansicht, man müsse zuerst die komplexen Kräfte untersuchen, die für den Zusammenhalt der Materie bürgten, zäumte für Einstein das Pferd vom Schwanz her auf. In seinen Augen gebührte die Priorität der *Kinematik*, der Frage also, wie sich Uhren und Maßstäbe bei gleichförmiger, unbeschleunigter Bewegung verhalten. Erst dann könne man sich sinnvoll mit den Problemen der *Dynamik* auseinander setzen (zum Beispiel mit der Frage, wie sich Elektronen unter dem Einfluss elektrischer oder magnetischer Kräfte verhalten).

Einstein zufolge konnte die Physik zu widerspruchsfreien Aussagen gelangen, wenn die Darstellung von Zeit und Raum überzeugend geklärt würde. Für räumliche Messungen benötigte man ein Koordinatensystem, worunter er gewöhnliche starre Maßstäbe verstand. Zum Beispiel: Dieser Punkt liegt bei sechs Zentimetern

auf der x -, neun auf der y - und zweiundvierzig auf der z -Achse. So weit, so gut. Doch dann kam das Überraschende – die Umdeutung der Zeit, in der hellhörige Kollegen wie der Mathematiker und Physiker Hermann Minkowski den springenden Punkt der Argumentation sahen.⁴ Einstein schrieb: »Wir haben zu berücksichtigen, dass alle unsere Urteile, in welchen die Zeit eine Rolle spielt, immer Urteile über *gleichzeitige Ereignisse* sind. Wenn ich z. B. sage: ›Jener Zug kommt hier um 7 Uhr an‹, so heißt dies etwa: ›Das Zeigen des kleinen Zeigers meiner Uhr auf 7 und das Ankommen des Zuges sind *gleichzeitige Ereignisse*.‹«⁵ Bezuglich der Gleichzeitigkeit *an einem Ort* ergaben sich keine Probleme. Findet ein Ereignis direkt in der Nähe meiner Uhr statt, etwa wenn der Zug um Punkt sieben neben mir hält, so sind diese beiden Ereignisse offenbar gleichzeitig. Schwierig wird es erst, wenn wir einen Zusammenhang zwischen räumlich distanten Ereignissen herstellen müssen. Was heißt es zu sagen, zwei weit auseinander liegende Ereignisse seien gleichzeitig? Wie vergleiche ich das Ablesen meiner Uhr *hier* mit der um Punkt sieben Uhr erfolgenden Ankunft des Zuges *dort*, in einem fernen Bahnhof?

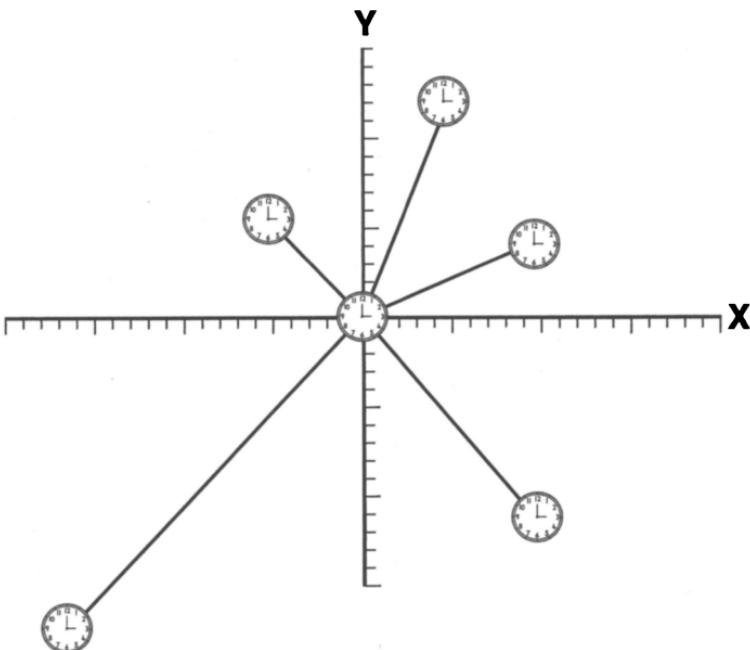
Newton löste das Zeitproblem durch ein absolutes Ideal: Die Zeit als solche konnte keine Sache »gewöhnlicher« Uhren sein. Doch als Einstein ein *Verfahren* verlangte, um dem Ausdruck »gleichzeitig« eine strenge Bedeutung zu geben, ließ er die Lehre von der absoluten Zeit hinter sich. Auf einer anscheinend philosophischen Ebene bestimmte er jenes Verfahren durch ein *Gedanken-experiment*, das lange Zeit nichts mit der Arbeit in Laboratorien und Fabriken zu tun zu haben schien. Er fragte: Wie lassen sich Uhren über große Abstände hinweg synchronisieren, also »an verschiedenen Orten stattfindende Ereignisreihen miteinander zeitlich verknüpfen, oder – was auf dasselbe hinausläuft – Ereignisse zeitlich werten, welche in von der Uhr entfernten Orten stattfinden.« Sein erster Vorschlag: »Wir könnten uns allerdings damit begnügen, die Ereignisse dadurch zeitlich zu werten, dass ein samt der Uhr im Koordinatenursprung befindlicher Beobachter jedem von einem zu wertenden Ereignis Zeugnis gebenden, durch den leeren Raum zu ihm gelangenden Lichtzeichen die entsprechende

Uhrzeigerstellung zuordnet.⁶ Da sich das Licht jedoch mit endlicher Geschwindigkeit ausbreitet, ist dieses Verfahren nicht unabhängig vom Standort der Uhr. Angenommen, X steht an einem Punkt in der Nähe von A und in einiger Entfernung von B und Y genau in der Mitte zwischen A und B.

A — X ————— Y ————— B

Von A und B gehen jeweils Lichtsignale aus, die X gleichzeitig erreichen. Kann er daraus nun schließen, dass auch beide gleichzeitig abgesendet wurden? Selbstverständlich nicht. Das von B kommende Signal hatte bis zu ihm einen sehr viel weiteren Weg zurückzulegen als das von A, und dennoch erreichten beide ihn gleichzeitig. Daher muss B früher gesendet haben als A. Nehmen wir an, X beharre auf einer gleichzeitigen Ausstrahlung der Signale von A und B, da sie schließlich gleichzeitig bei ihm eintrafen. Damit käme er ernsthaft in die Bredouille, denn in diesem Fall müsste der genau auf halbem Wege stehende Y ja das Signal B's vor dem A's empfangen haben. Um Mehrdeutigkeiten zu vermeiden, wollte Einstein die Gleichzeitigkeit zweier Ereignisse »A sendet Licht aus« und »B sendet Licht aus« nicht vom Standort des Empfängers abhängig machen. Als Kriterium für Simultanität ist »der gleichzeitige Empfang von Signalen« vollständig ungeeignet, ein erkenntnistheoretischer Trugschluss, der keine widerspruchsfreie Erklärung zu stützen vermochte.

Um diesen Trugschluss auszuräumen, schlug der junge Einstein ein besseres System vor: Ein Beobachter A im Zentrum des Bezugssystems sendet ein Lichtsignal aus, wenn seine Uhr Punkt zwölf Uhr anzeigt. Ein im Abstand d befindlicher Beobachter B empfängt das Signal und stellt seine Uhr auf zwölf plus der Übertragungszeit des Lichts von A nach B, also zwölf plus ($Entfernung \div Lichtgeschwindigkeit$). Das Licht reist bekanntlich mit dreihunderttausend Sekundenkilometern. Ist B beim Empfang des Signals sechs-hunderttausend Kilometer von A entfernt, so stellt er seine Uhr auf 12:00:02 Uhr, das heißt zwölf plus zwei Sekunden. Wäre er neun-hunderttausend Kilometer entfernt, so ergäbe sich 12:00:03 Uhr.



1.1 Zentraluhr. In seinem Aufsatz von 1905 über »Zur Elektrodynamik bewegter Körper« mit den Grundgedanken der speziellen Relativitätstheorie führte Einstein – allerdings ablehnend – ein Schema ein, bei dem eine Zentraluhr Signale an alle Nebenuhren schickte und diese damit koordinierte, zum Beispiel alle übereinstimmend auf 3 Uhr stellte, wenn der Impuls zu diesem Zeitpunkt eintraf. Das Problem lag allerdings in den unterschiedlichen Distanzen der Filialen vom Zentrum, sodass die näheren ihr Signal früher erhielten als die ferneren. Einstein lehnte das System ab, weil in ihm die Simultanität zweier Uhren von der völlig willkürlichen Wahl des Standorts jener »Zentrale« abhing.

Auf diese Weise könnten sich *A*, *B* und alle sonst an dieser Koordinierungsübung Beteiligten darauf einigen, ihre Uhren synchronisiert zu haben. Eine Änderung des Zentrums würde daran nichts ändern, denn alle Uhren berücksichtigen ja bereits die Übertragungszeit des Lichtsignals. Das gefiel Einstein: keine privilegierte »Zentraluhr« und doch eine eindeutige Definition von Simultanität.

Mit dem Verfahren der Uhrenkoordination hatte Einstein sein