

Gleichzeitigkeit und Uhrensynchronisation

F. Herrmann und M. Pohlig, Karlsruher Institut für Technologie



www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de

Gleichzeitigkeit ist relativ:

Zwei Ereignisse, die in einem Bezugssystem gleichzeitig sind, sind es nicht in einem anderen.

I. Kinematischer Teil.

§ 1. Definition der Gleichzeitigkeit.

Es liege ein Koordinatensystem vor, in welchem die Newtonschen mechanischen Gleichungen gelten. Wir nennen dies Koordinatensystem zur sprachlichen Unterscheidung von später einzuführenden Koordinatensystemen und zur Präzisierung der Vorstellung das „ruhende System“.

Ruhet ein materieller Punkt relativ zu diesem Koordinatensystem, so kann seine Lage relativ zu letzterem durch starre Maßstäbe unter Benutzung der Methoden der euklidischen Geometrie bestimmt und in kartesischen Koordinaten ausgedrückt werden.

Wollen wir die *Bewegung* eines materiellen Punktes beschreiben, so geben wir die Werte seiner Koordinaten in Funktion der Zeit. Es ist nun wohl im Auge zu behalten, daß eine derartige mathematische Beschreibung erst dann einen physikalischen Sinn hat, wenn man sich vorher darüber klar geworden ist, was hier unter „Zeit“ verstanden wird.

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.“¹⁾

Es könnte scheinen, daß alle die Definition der „Zeit“ betreffenden Schwierigkeiten dadurch überwunden werden könnten, daß ich an Stelle der „Zeit“ die „Stellung des kleinen Zeigers meiner Uhr“ setze. Eine solche Definition genügt in der Tat, wenn es sich darum handelt, eine Zeit zu definieren ausschließlich für den Ort, an welchem sich die Uhr eben befindet; die Definition genügt aber nicht mehr, sobald es sich darum handelt, an verschiedenen Orten stattfindende Ereignisreihen miteinander zeitlich zu verknüpfen, oder — was auf dasselbe hinausläuft — Ereignisse zeitlich zu werten, welche in von der Uhr entfernten Orten stattfinden.

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 gebend, durch den leeren Raum zu ihm gelangenden Lichtzeichen die entsprechende Uhrzeigerstellung zuordnet. Eine solche Zuordnung bringt aber den Übelstand mit sich, daß sie vom Standpunkte des mit der Uhr versehenen Beobachters nicht unabhängig ist, wie wir durch die Erfahrung wissen. Zu einer weit praktischeren Festsetzung gelangen wir durch folgende Betrachtung.

Befindet sich im Punkte *A* des Raumes eine Uhr, so kann ein in *A* befindlicher Beobachter die Ereignisse in der unmittelbaren Umgebung von *A* zeitlich werten durch Aufsuchen der mit diesen Ereignissen gleichzeitigen Uhrzeigerstellungen. Befindet sich auch im Punkte *B* des Raumes eine Uhr — wir wollen hinzufügen, „eine Uhr von genau derselben Beschaffenheit wie die in *A* befindliche“ — so ist auch eine zeitliche Wertung der Ereignisse in der unmittelbaren Umgebung von

¹⁾ Die Ungenauigkeit, welche in dem Begriffe der Gleichzeitigkeit zweier Ereignisse an (annähernd) demselben Orte steckt und gleichfalls durch eine Abstraktion überbrückt werden muß, soll hier nicht erörtert werden.

B durch einen in *B* befindlichen Beobachter möglich. Es ist aber ohne weitere Festsetzung nicht möglich, ein Ereignis in *A* mit einem Ereignis in *B* zeitlich zu vergleichen; wir haben bisher nur eine „*A*-Zeit“ und eine „*B*-Zeit“, aber keine für *A* und *B* gemeinsame „Zeit“ definiert. Die letztere Zeit kann nun definiert werden, indem man durch *Definition* festsetzt, daß die „Zeit“, welche das Licht braucht, um von *A* nach *B* zu gelangen, gleich ist der „Zeit“, welche es braucht, um von *B* nach *A* zu gelangen. Es gehe nämlich ein Lichtstrahl zur „*A*-Zeit“ t_A von *A* nach *B* ab, werde zur „*B*-Zeit“ t_B in *B* gegen *A* zu reflektiert und gelange zur „*A*-Zeit“ t'_A nach *A* zurück. Die beiden Uhren laufen definitionsgemäß synchron, wenn

$$t_B - t_A = t'_A - t_B.$$

Wir nehmen an, daß diese Definition des Synchronismus in widerspruchsfreier Weise möglich sei, und zwar für beliebig viele Punkte, daß also allgemein die Beziehungen gelten:

1. Wenn die Uhr in *B* synchron mit der Uhr in *A* läuft, so läuft die Uhr in *A* synchron mit der Uhr in *B*.

2. Wenn die Uhr in *A* sowohl mit der Uhr in *B* als auch mit der Uhr in *C* synchron läuft, so laufen auch die Uhren in *B* und *C* synchron relativ zueinander.

Wir haben so unter Zuhilfenahme gewisser (gedachter) physikalischer Erfahrungen festgelegt, was unter synchron laufenden, an verschiedenen Orten befindlichen, ruhenden Uhren zu verstehen ist und damit offenbar eine Definition von „gleichzeitig“ und „Zeit“ gewonnen. Die „Zeit“ eines Ereignisses ist die mit dem Ereignis gleichzeitige Angabe einer am Orte des Ereignisses befindlichen, ruhenden Uhr, welche mit einer bestimmten, ruhenden Uhr, und zwar für alle Zeitbestimmungen mit der nämlichen Uhr, synchron läuft.

Wir setzen noch der Erfahrung gemäß fest, daß die Größe

$$\frac{2AB}{t'_A - t_A} = V$$

eine universelle Konstante (die Lichtgeschwindigkeit im leeren Raume) sei.

Wesentlich ist, daß wir die Zeit mittels im ruhenden System

ruhender Uhren definiert haben; wir nennen die eben definierte Zeit wegen dieser Zugehörigkeit zum ruhenden System „die Zeit des ruhenden Systems“.

1. Die Begriffe „synchron“ und „Synchronisation“
2. Die Synchronisation von Uhren in der RT
3. Wie wichtig ist das Thema?
4. Der „Beobachter“ in der RT

Autogetriebe

Generator mit dem Netz

Kino: Bild und Ton

Kino: Änderung der Sprache

Autogetriebe

Frequenzen (Winkelgeschwindigkeiten) angleichen

Generator mit dem Netz

Frequenz und Phase angleichen

*Phase kann nur angeglichen werden, wenn
Frequenzen gleich sind*

Zwei Uhren, die gleich schnell laufen, in Phase bringen.

Was heißt gleich schnell laufen?

Signale in bestimmtem Zeitabstand von einer Uhr zur anderen schicken.

Ist der zeitliche Abstand beim Sender derselbe wie beim Empfänger, so laufen die Uhren gleich schnell.

Zwei Uhren, die in demselben schwebenden BS beide ruhen, laufen gleich schnell.

Was heißt „in Phase bringen“?

gewisse Willkür

„Einstein-Synchronisation“

Das geht nicht immer.

Es stellt sich heraus, dass auch gleich gebaute Uhren nicht immer gleich schnell laufen.

Beispiel: Uhr in GPS-Satellit läuft schneller (höheres Gravitationspotenzial)

Damit sie „synchron“ zu Erduhr läuft wird ihre Frequenz um $1 - 0,43 \cdot 10^{-9}$ vermindert.

Synchronisation nur in flacher Raumzeit möglich.

In ART sinnlos.

Koordinatenzeit

3. Wie wichtig ist das Thema?



hier



dort unten



dort oben



hier



Schwarzschildradius

„Zwei Ereignisse, die für einen Beobachter gleichzeitig sind, sind es nicht für einen anderen.“

Nur sinnvoll, wenn die Ereignisse an verschiedenen Orten passieren.

Wie kann ein „Beobachter“ entscheiden, ob zwei Ereignisse, die in 1 Lichtjahr Entfernung voneinander stattfinden, gleichzeitig sind?

Mit „für ihn“ ist gemeint: in dem BS, in dem er ruht.

„Zwei Ereignisse, die für einen Beobachter gleichzeitig sind, sind es nicht für einen anderen.“

Wheeler, Gravitation und Raumzeit:

„Dieser harmlos klingende, aber doppeldeutige Begriff [Beobachter] hat länger als ein halbes Jahrhundert eine endlose Verwirrung hervorgerufen. Er unterscheidet nämlich nicht zwischen zwei völlig verschiedenen Vorstellungen, die man von Beobachtern haben kann. Die eine ist adäquat, die andere nicht. Die Kamera verkörpert die falsche Vorstellung – falsch deshalb, weil sie sich nicht am Ort des Geschehens befindet.“

„Zwei Ereignisse, die für einen Beobachter gleichzeitig sind, sind es nicht für einen anderen.“

Wheeler, Gravitation und Raumzeit:

„Dieser harmlos klingende, aber doppeldeutige Begriff [Beobachter] hat länger als ein halbes Jahrhundert eine endlose Verwirrung hervorgerufen. Er unterscheidet nämlich nicht zwischen zwei völlig verschiedenen Vorstellungen, die man von Beobachtern haben kann. Die eine ist adäquat, die andere nicht. Die Kamera verkörpert die falsche Vorstellung – falsch deshalb, weil sie sich nicht am Ort des Geschehens befindet.“

„Das Wort Beobachter ist eine verkürzte Sprechweise für die Gesamtheit der registrierenden Uhren, die mit einem frei schwebenden BS verknüpft sind.“

Facit

Wir vermeiden die Begriffe *Synchronisation* und *Beobachter*.

Ende