

Zeit und die Kausalstruktur der Welt

Kausalität ist eine Erfahrungstatsache und nach Kant a priori gegeben ...

Kausalität (lat. *causa*, Ursache) bezeichnet die Beziehung zwischen Ursachen und Wirkungen. Umgangssprachlich ist ein Ereignis oder Zustand A die Ursache einer Wirkung B, wenn A ein Grund ist, der B herbeiführt.

Eine **Kausalkette** ergibt sich, wenn jede Wirkung selbst wieder Ursache eines neuen Ereignisses ist. Sie spiegelt die transitive Natur der Kausalität wieder.

Eine Ursache kommt immer vor einer von ihr bedingten Wirkung



Der Begriff des Ereignisses ...

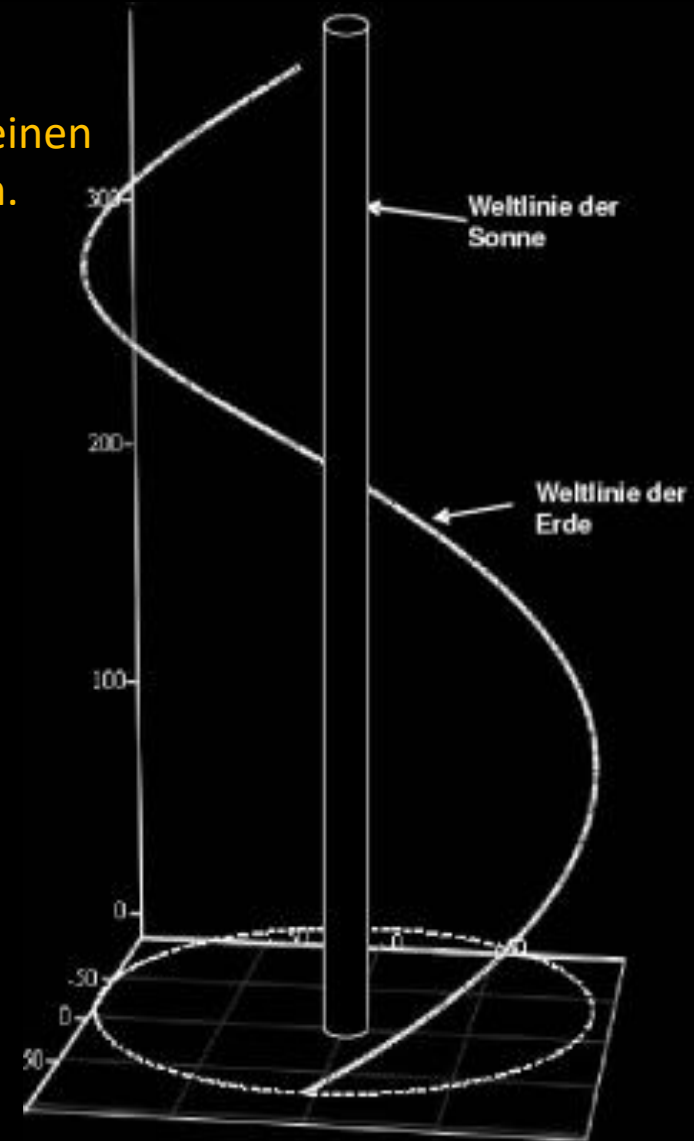
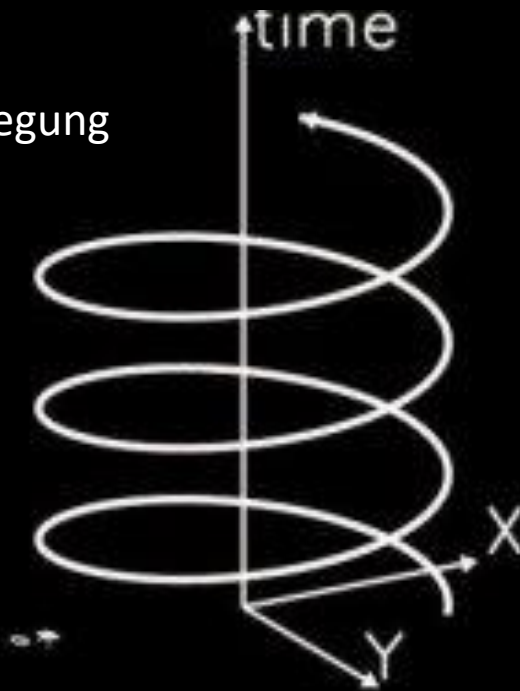
Ort (x,y,z) + Zeit (t) = Ereignis (x,y,z,t)

Ein „Ereignis“ ist eindeutig durch einen Zeitpunkt t und einen Ort x,y,z , an dem es zum Zeitpunkt t stattfindet, gegeben.

Eine stetige „Linie“ von Ereignissen durch die Raum-Zeit nennt man „Weltlinie“

Weltlinie einer Kreisbewegung

Weltlinien verbinden
Ereignisse kausal



Klassische Mechanik:

Kausalität definiert eine strenge Ordnung von Ereignissen, d.h. Ereignisse lassen sich in eine topologische Reihenfolge bringen, die eindeutig ist und für die eine Kausalkette gilt und die sich durchnummerieren lässt (durch Zuordnung von Zeitpunkten gemäß der absoluten Zeit Newtons).

Ereignisse, die in der Gegenwart liegen, sind gleichzeitig

$A(x,y,z,t) \rightarrow B(x^*,y^*,z^*,t)$ A und B sind gleichzeitig.

Ereignisse, die zusammen einmal in der Gegenwart lagen, waren gleichzeitig

Die Newtonsche Mechanik besitzt eine strenge Kausalstruktur im Sinn der Anordnung von Ereignissen, ist aber in Bezug auf die Zeitrichtung symmetrisch.

(d.h. alle Ereignisfolgen von der Vergangenheit in die Zukunft sind auch in umgekehrter Reihenfolge erlaubt, d. h. die Zeit dient nur als Parameter und definiert keine Richtung → Paradox der Zeit)

Das Prinzip der Konstanz der Vakuumlichtgeschwindigkeit

„Die Vakuum-Lichtgeschwindigkeit besitzt in Inertialsystemen unabhängig vom Bewegungszustand der Lichtquelle und des Beobachters immer denselben Wert. Sie ist eine Naturkonstante.“

$$c_0 = 2.998925 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$



Folgt explizit aus der Maxwellschen Elektrodynamik und wurde experimentell in dem Interferometrieversuch von Michelson und Morley 1889 bestätigt.

Albert Einstein machte dieses Prinzip und das „**Spezielle Relativitätsprinzip**“ (d. h. „die Gesetze der Maxwellschen Elektrodynamik sind in allen Inertialsystemen gleich“) zur Grundlage einer neuen physikalischen Weltbeschreibung, die bei Geschwindigkeiten, die klein gegenüber der Lichtgeschwindigkeit sind, nahtlos in die „Klassische Mechanik“ Newtons übergeht.

Da die Geschwindigkeit gleich Weg durch Zeit ist und die Lichtgeschwindigkeit in allen Inertialsystemen den gleichen konstanten Wert hat, gilt:

- **Lichtweg = Lichtgeschwindigkeit mal Zeit**
- Man kann mathematisch die Zeit wie eine Länge behandeln

Ereignis: $(x, y, z, -c \cdot t)$ \rightarrow „vierdimensionaler Raum“

Der Minkowski-Raum

1907: Ereignisraum der speziellen Relativitätstheorie

- Punkte sind Ereignisse
- Ereignisse bilden ein vierdimensionales Kontinuum
- Metrik ist pseudo-euklidisch (wegen der Zeitkoordinate)
- Teilräume repräsentieren die Kausalstruktur der Welt für einen Beobachter

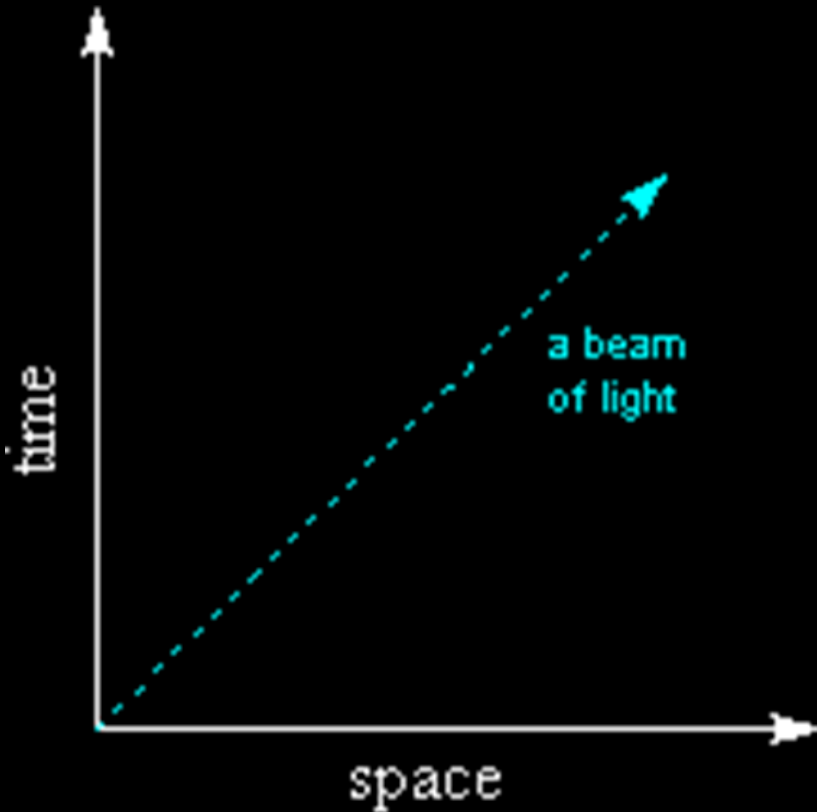
Von nun an sollen Raum und Zeit für sich völlig zu Schatten herabsinken, und nur eine Art Union der beiden soll Selbständigkeit bewahren ...

Zur Vereinfachung: Raum wird zur Ebene (nur x und y –Koordinate)
Zeit wird als 3. räumliche Koordinate dargestellt (d. h. als Lichtweg)



Hermann Minkowski
(1864-1909)

Raum – Zeit - Diagramm



$$x_1 = x$$

$$x_2 = y$$

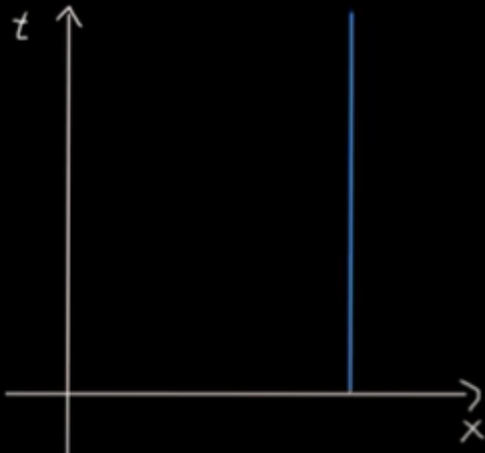
$$x_3 = z$$

$$x_4 = -c_0 t$$

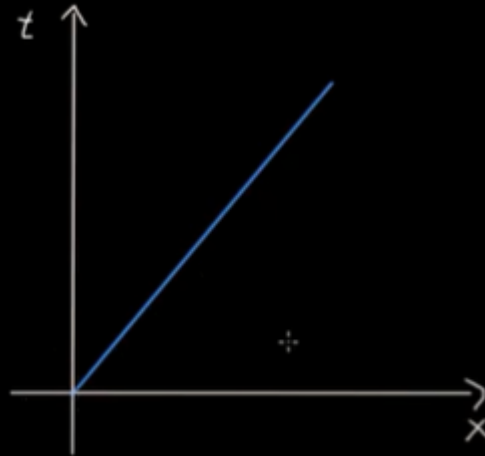
Jeder Punkt in diesem Diagramm stellt ein Ereignis, jede stetige Linie eine Weltlinie dar

Das Diagramm ist so skaliert, dass die Kurve eines lichtschnellen Teilchens (Photon) eine Gerade mit einem Anstellwinkel von 45° bildet (Beispiel: zweidimensionale Raum-Zeit)

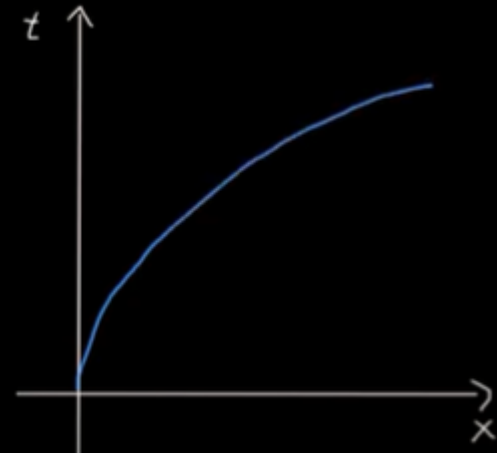
Beispiel: Relativität der Gleichzeitigkeit



$v=0$



$v > 0 = \text{const.}$



$v = a \cdot t$ (beschleunigt)

