

Physik für Aperogespräche

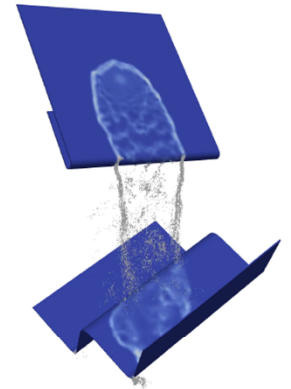
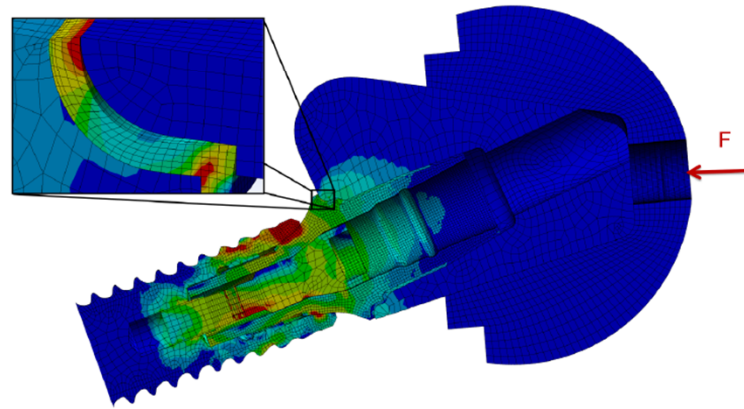
05.09.2025



Warum dieses Thema?

Es war einmal...

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla - \nu \nabla^2 \right) \mathbf{u} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{1}{\rho} \mathbf{f}$$



Software Engineer vs. Wissenschaftler

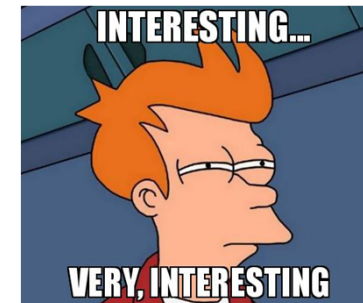
Beide

- Arbeiten mit Systemen
- Brauchen logisches Denken und analytische Vorgehensweise
- Sind Nerds tolle Personen

«Hm...das ist komisch...»

SW Engineer

Wissenschaftler



Inhalt

- Wie entsteht ein Regenbogen
- Nichts ist schneller als das Licht – Oder?
- Gleichzeitig – Was heisst das?
- Wieso der Energieerhaltungssatz nicht gilt
- Das Doppelspaltexperiment etwas weiter gedacht



Wie entsteht ein Regenbogen?

Wie entsteht ein Regenbogen?



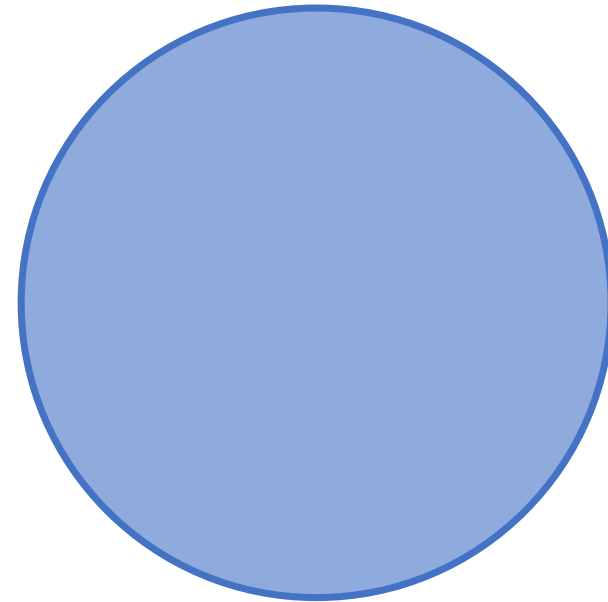
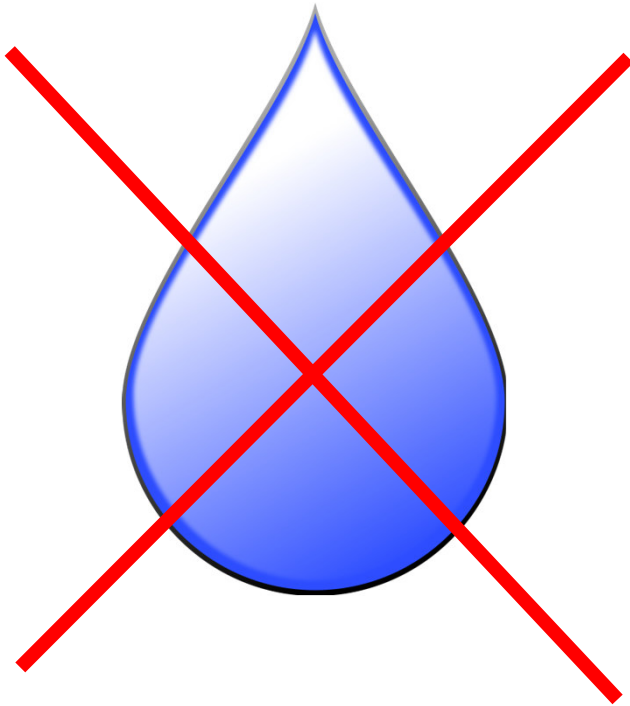
Album Cover: Pink Floyd – The dark side of the moon

Wie entsteht ein Regenbogen?

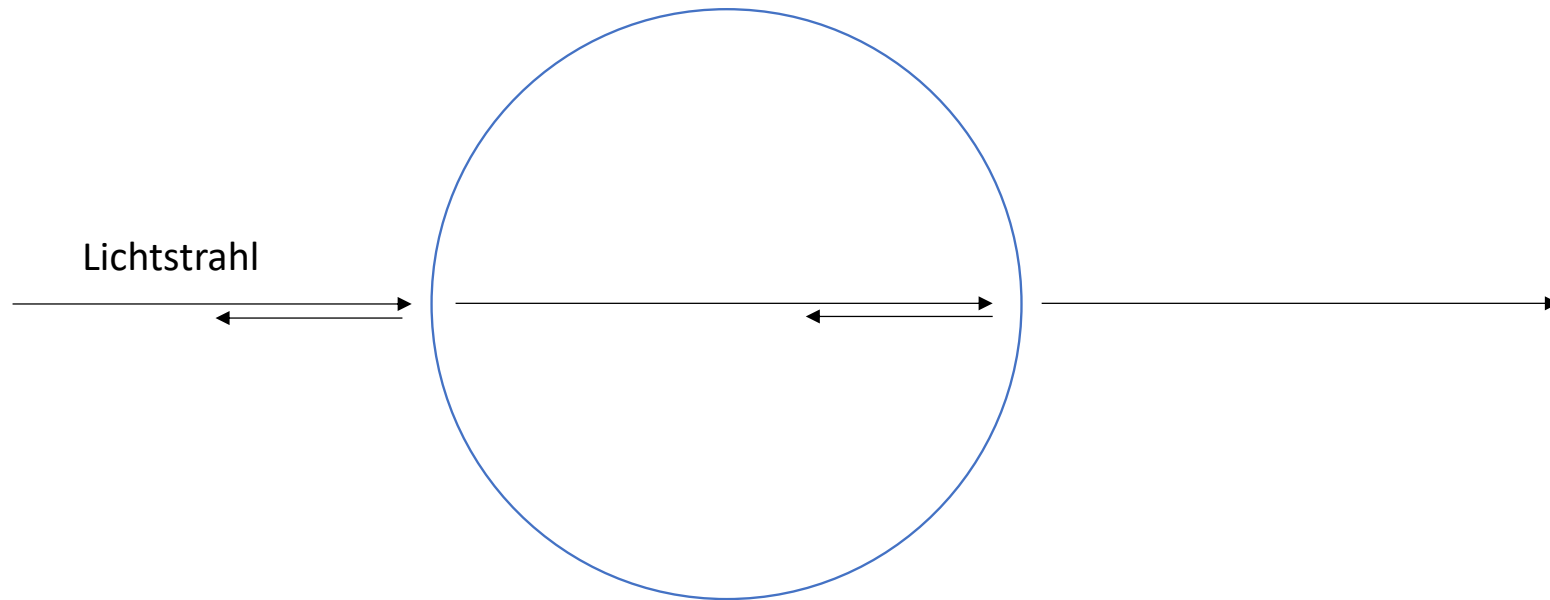


Quelle: <https://ausmalbilderfuerkinder.de/bilder-regenbogen-kostenlos/>

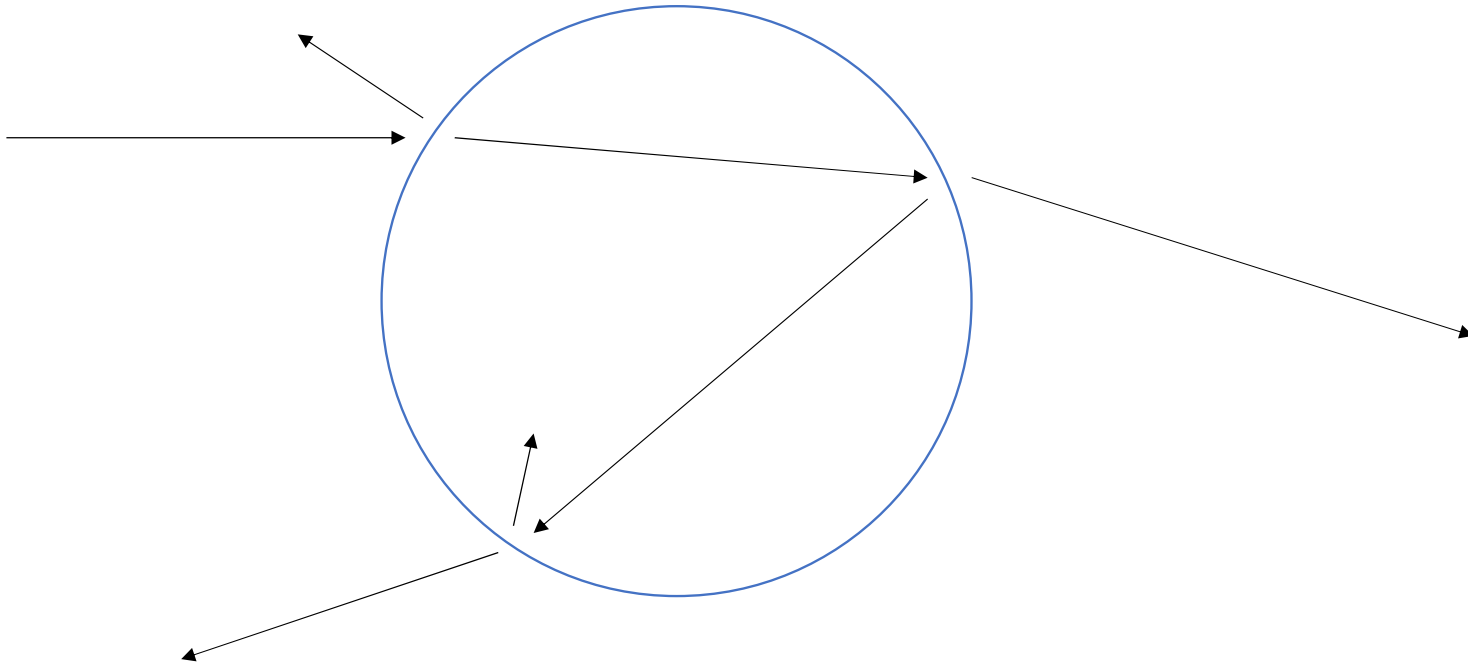
Regentropfen



Regentropfen



Regentropfen

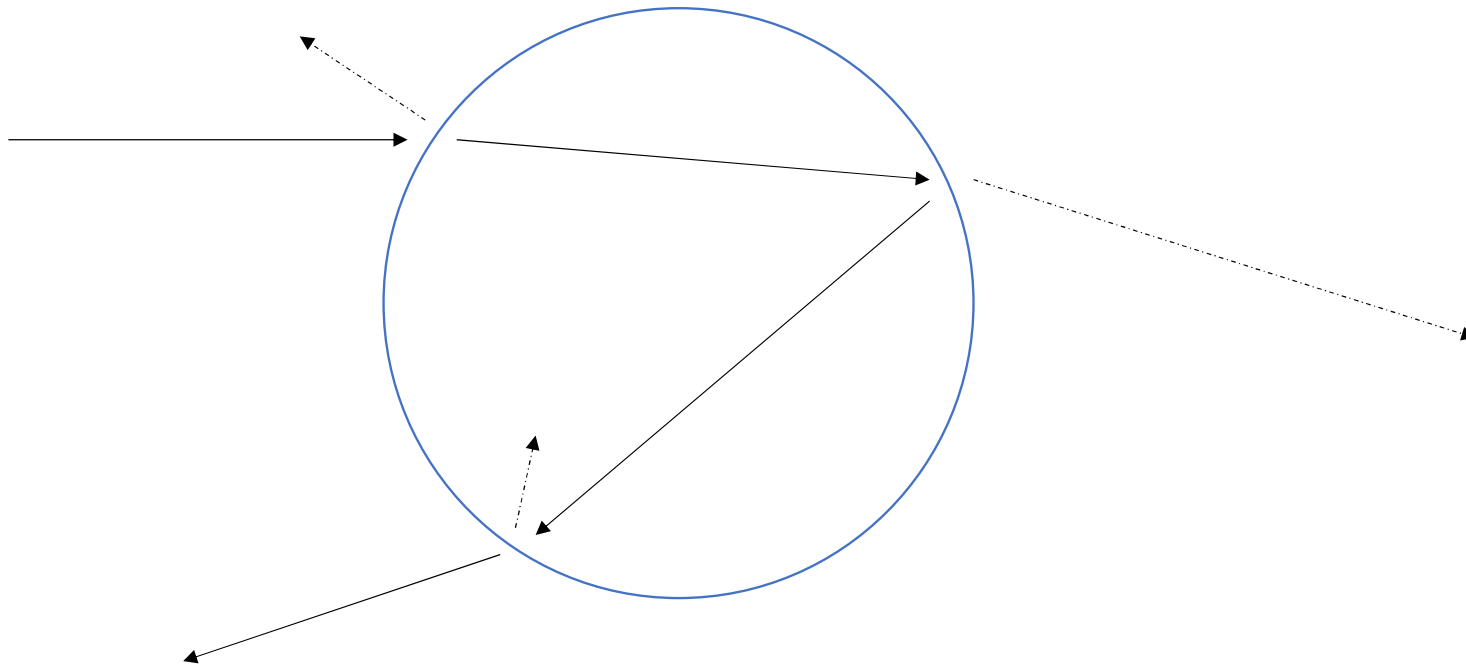


Regentropfen

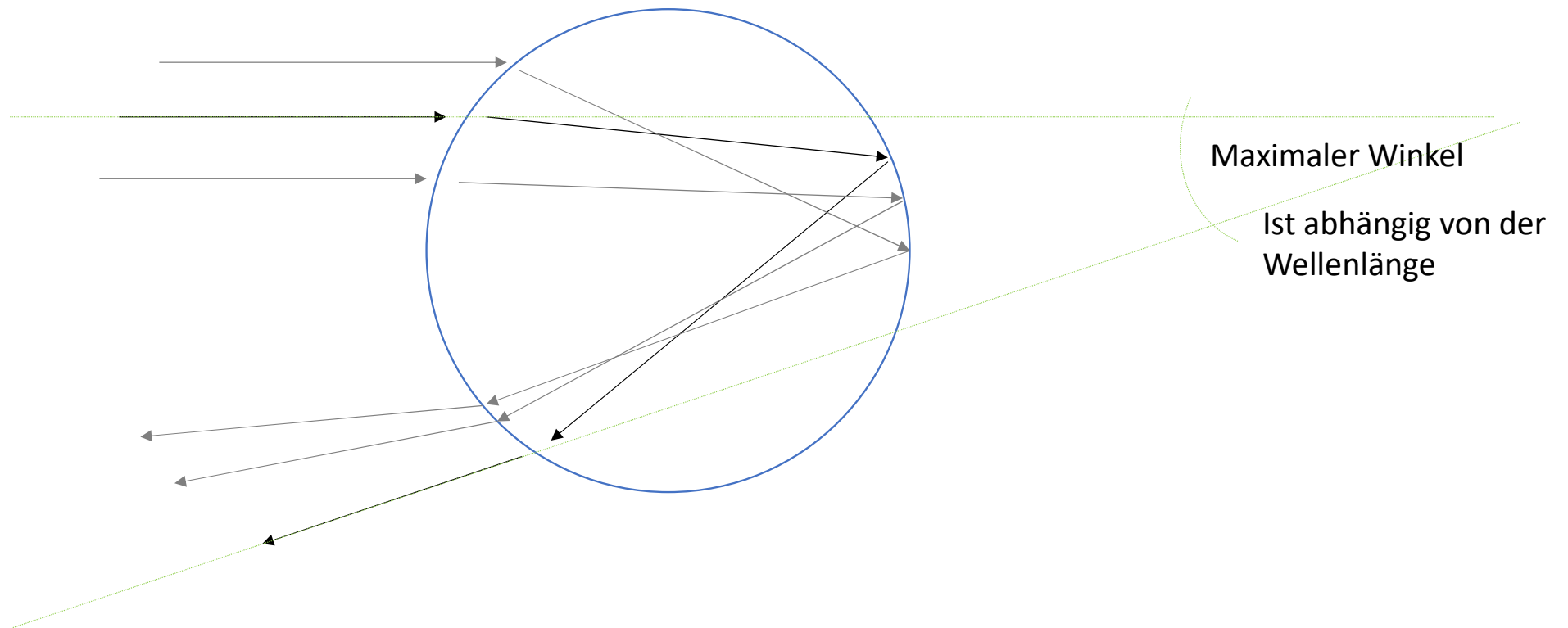


Quelle: Veritasium,
<https://www.youtube.com/watch?v=24GfgNtnjXc>

Regentropfen



Regentropfen



Wie entsteht ein Regenbogen



Quelle: <https://www.youtube.com/watch?v=24GfgNtnjXc>



Nichts ist schneller als Licht.
Oder?

Nichts ist schneller als das Licht – Oder?

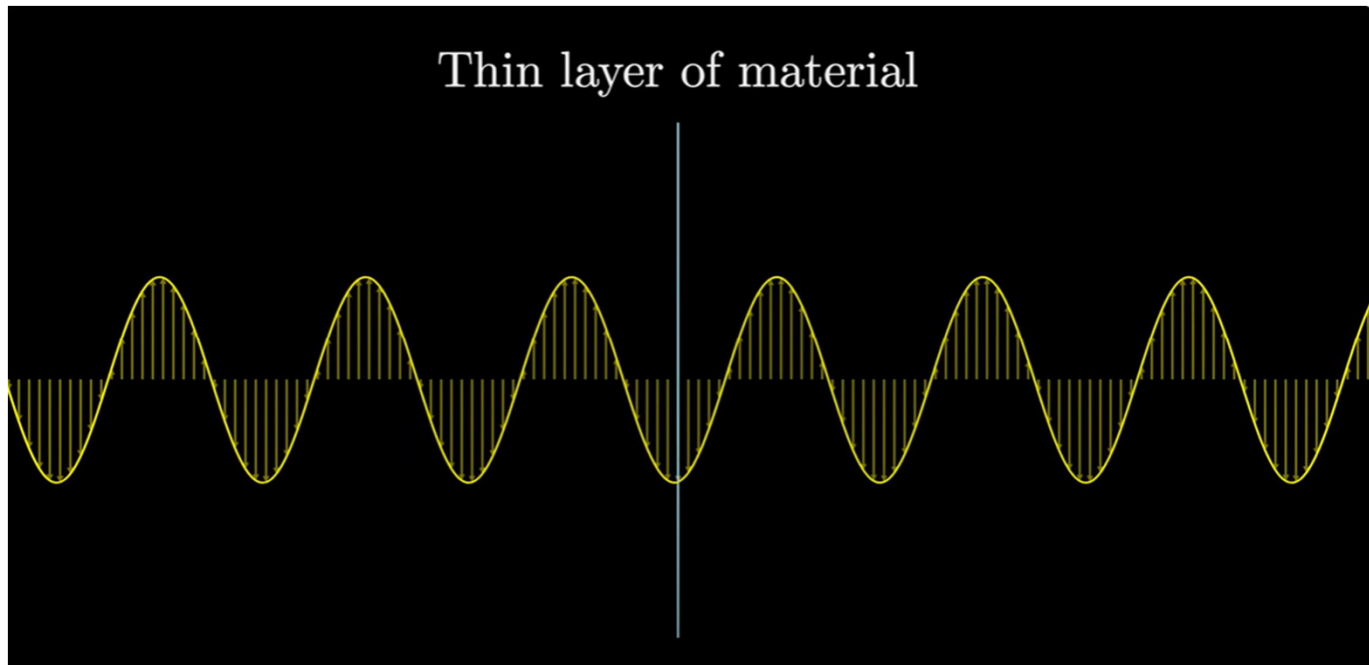
~~Die maximale Geschwindigkeit, mit der sich etwas fortbewegen kann, ist die Lichtgeschwindigkeit~~

Physikalisch korrekt:

Die maximale Geschwindigkeit, mit der sich etwas fortbewegen kann, ist c ; die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum

Lichtwelle in einem Medium

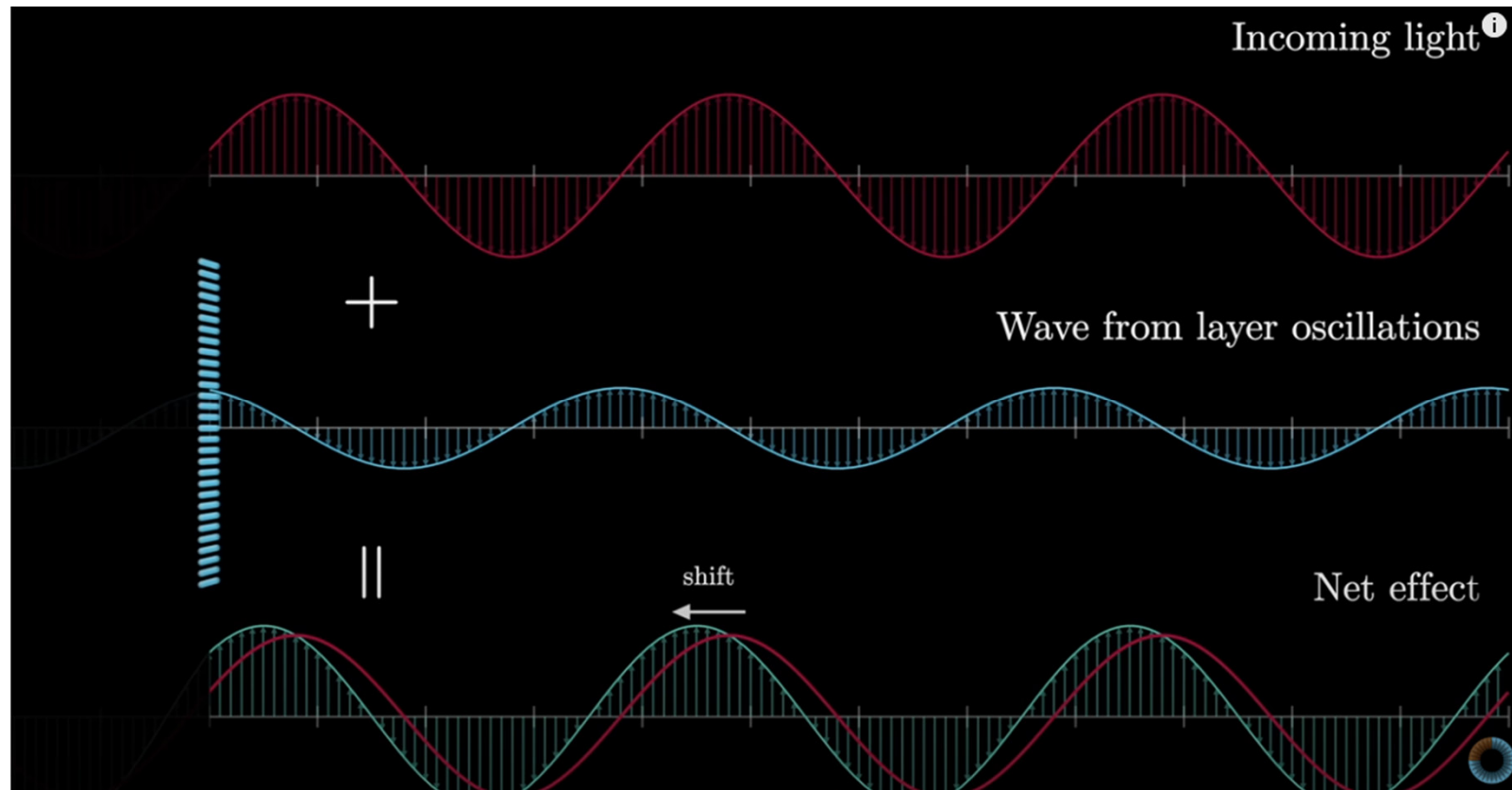
Interaktion einer Lichtwelle mit einem Material:
Schicht für Schicht



Quelle: 3Blue1Brown
<https://www.youtube.com/watch?v=KTzGBJPuJwM>

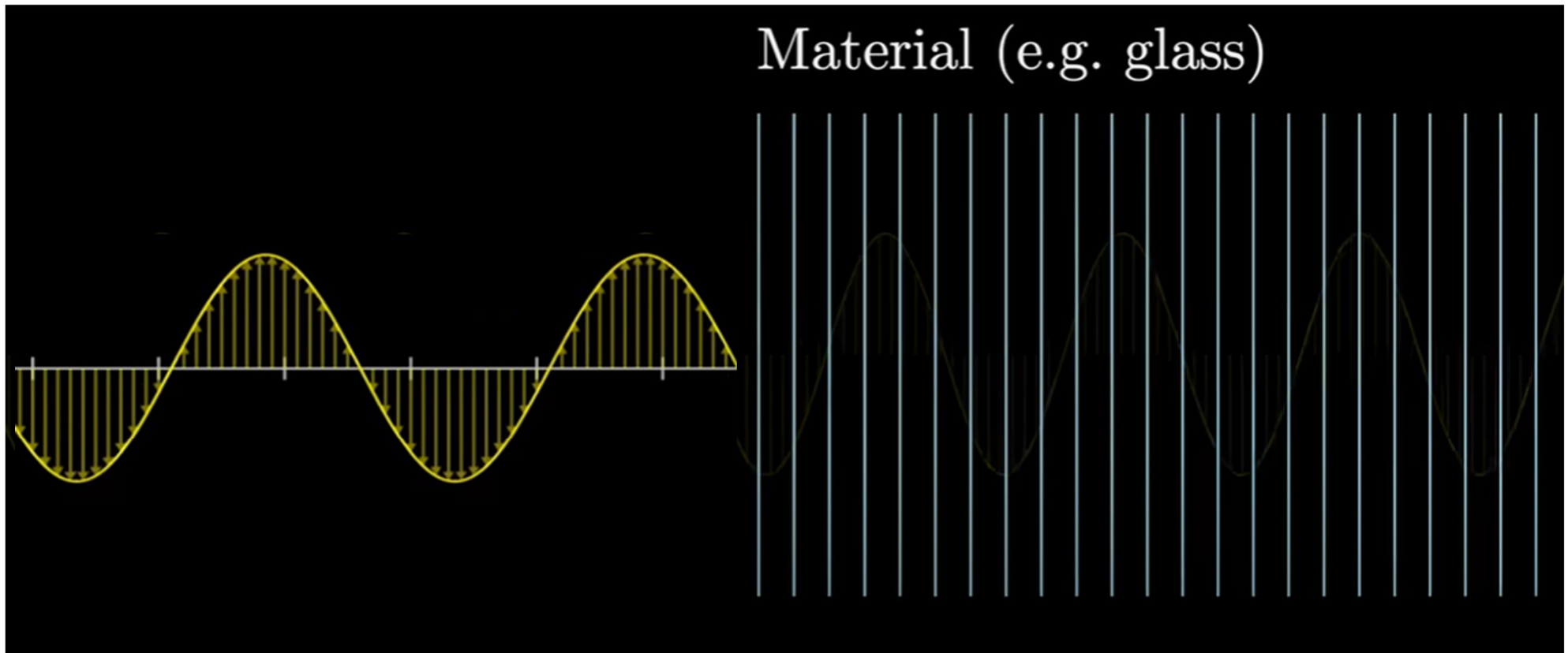
- Material besteht aus Atomen
- Elektromagnetische Welle bringt Atome zum Oszillieren
- Oszillierende Ladungen emittieren Welle
- Wellen interagieren miteinander

Lichtwelle in einem Medium



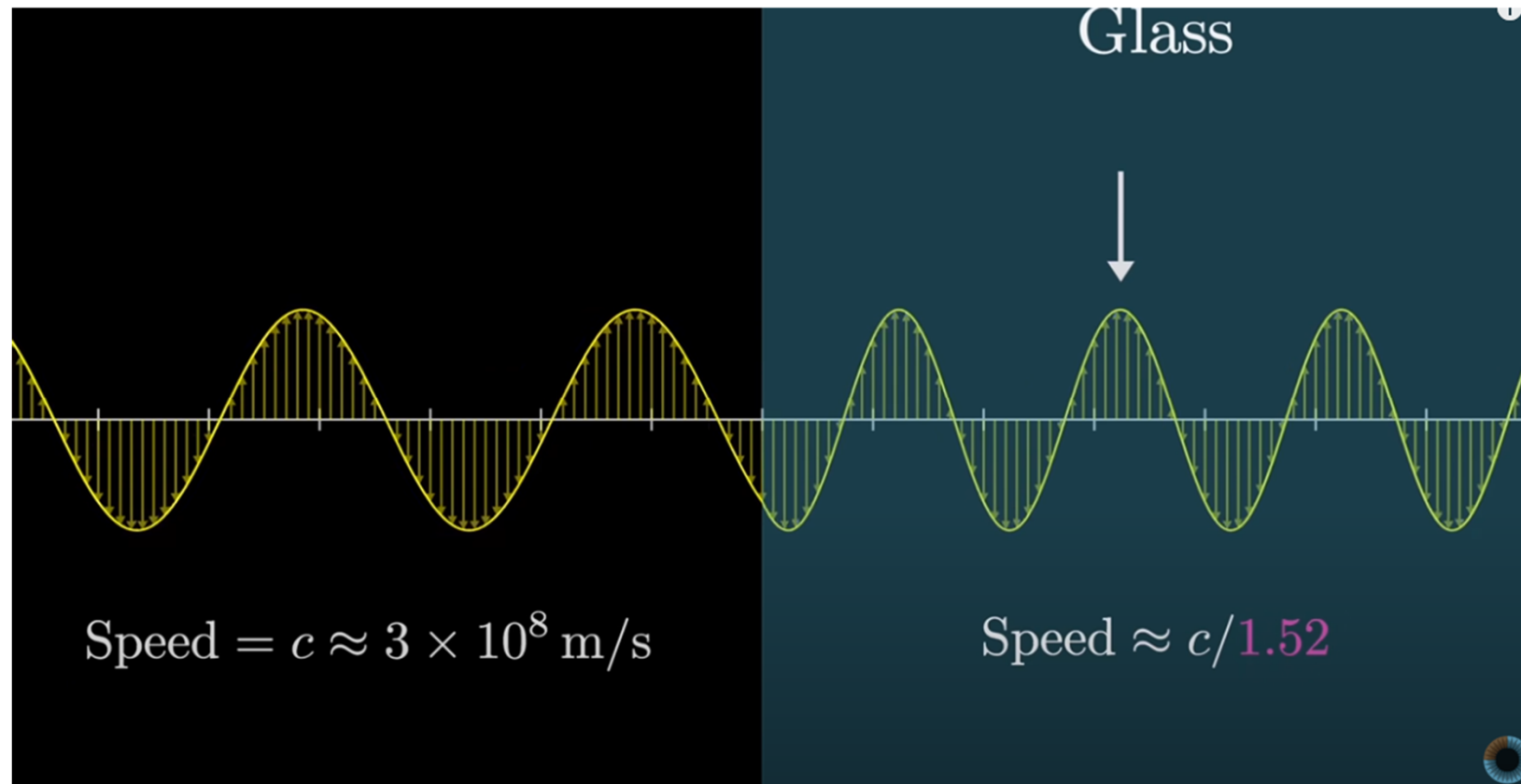
Quelle: 3Blue1Brown
<https://www.youtube.com/watch?v=KTzGBJPuJwM>

Lichtwelle in einem Medium



Quelle: 3Blue1Brown
<https://www.youtube.com/watch?v=KTzGBJPuJwM>

Lichtwelle in einem Medium



Quelle: 3Blue1Brown
<https://www.youtube.com/watch?v=KTzGBJPuJwM>

Lichtwelle in einem Medium

In einem Medium ist die Lichtgeschwindigkeit langsamer als im Vakuum

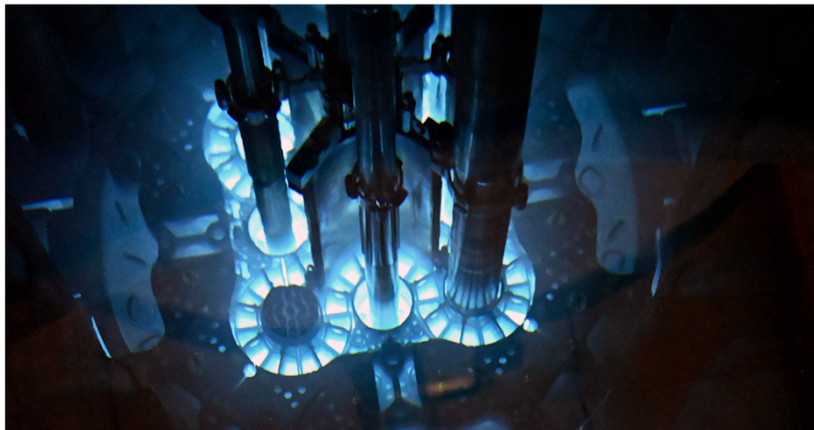
Lichtgeschwindigkeit in diesem Zusammenhang ist die **Phasengeschwindigkeit der Lichtwelle**

Was hat das jetzt für Konsequenzen?

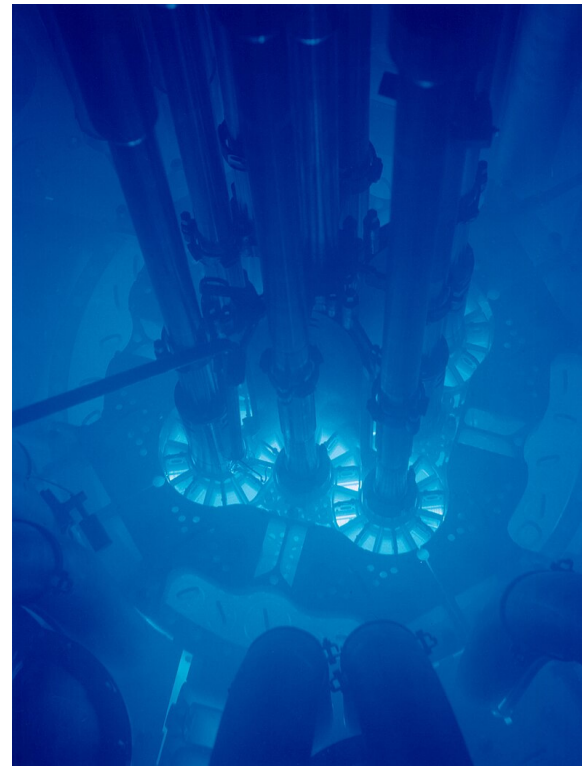
- Es ist möglich, sich in einem Medium schneller zu bewegen als Lichtwellen
- Analogie: Es ist auch möglich, sich in einem Medium schneller als Schallwellen zu bewegen
- Diese Überlichtblitze kommen in der Realität vor, sogar von Menschen gemacht

Tscherenkov - Strahlung

In Atomreaktoren:



<https://www.energy.gov/ne/articles/cherenkov-radiation-explained>



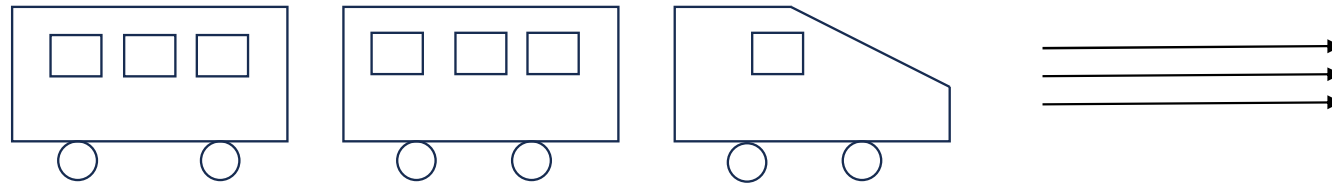
https://en.wikipedia.org/wiki/Cherenkov_radiation



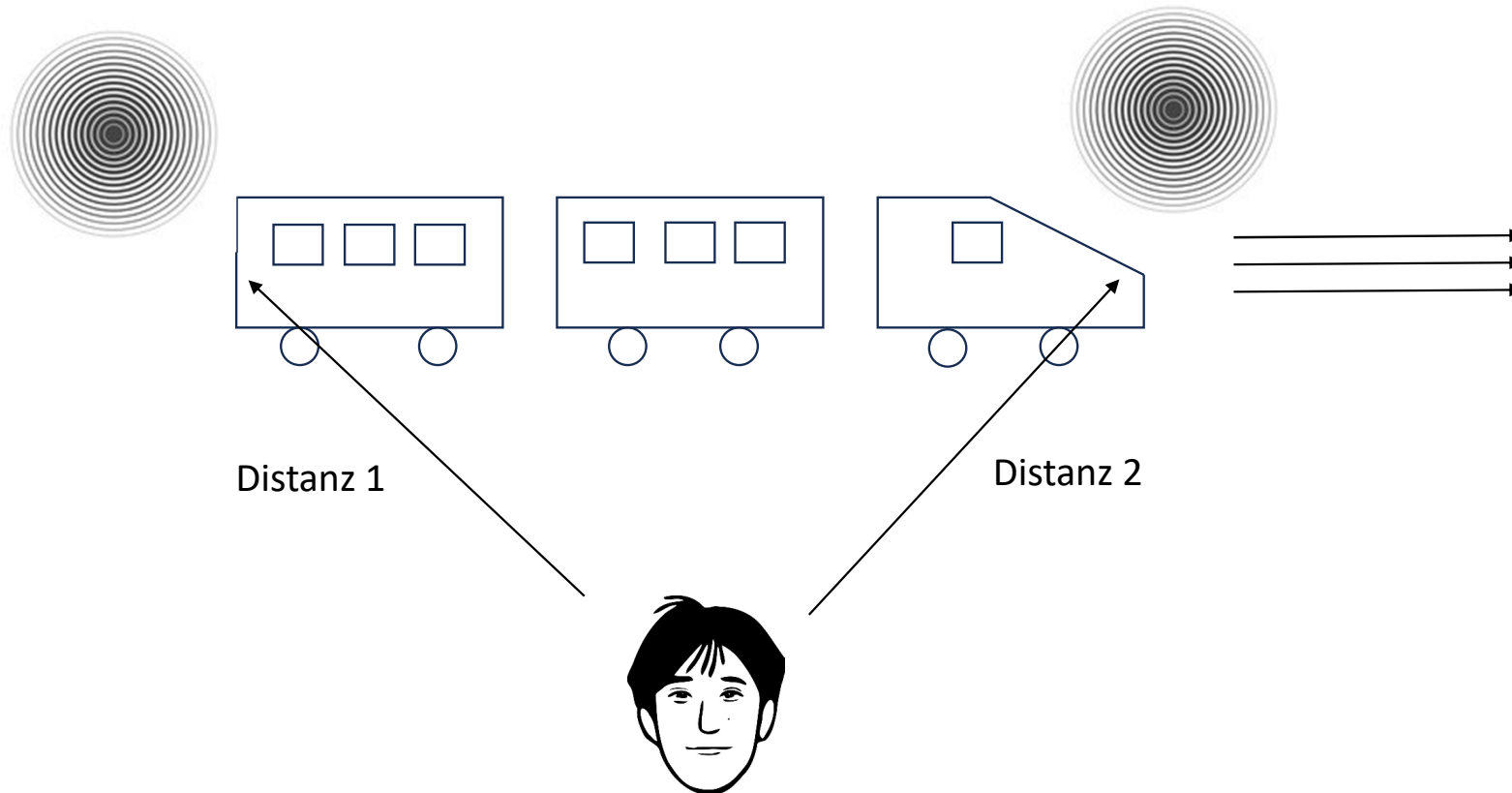
Gleichzeitig. Was heisst das?

Gleichzeitig – Was heisst das?

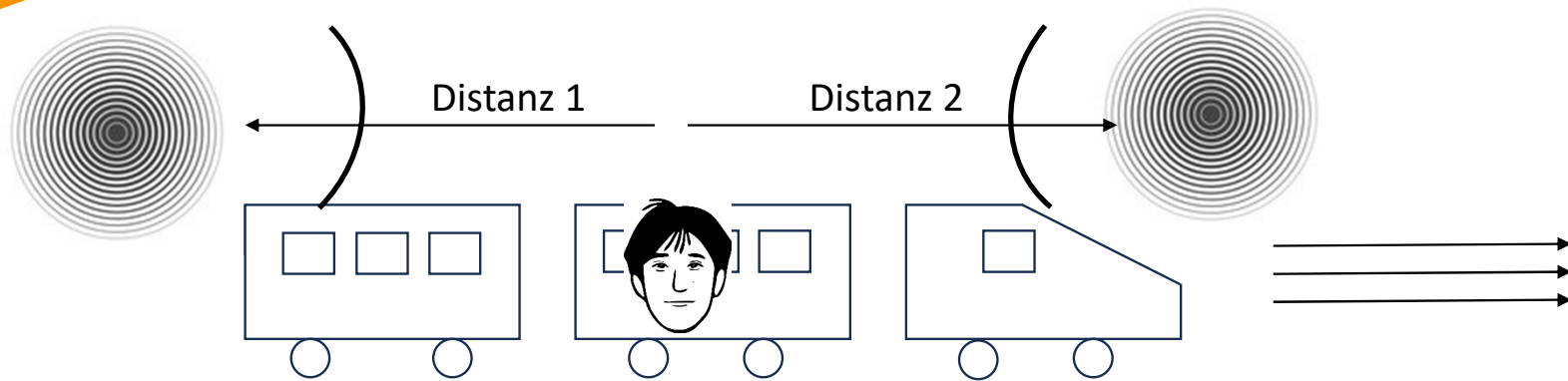
- Zwei Events in einem Zug: Gedankenexperiment von Einstein



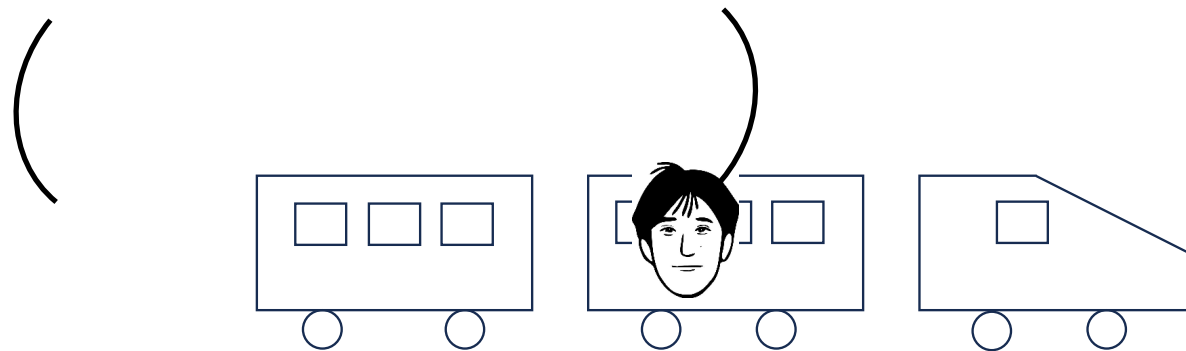
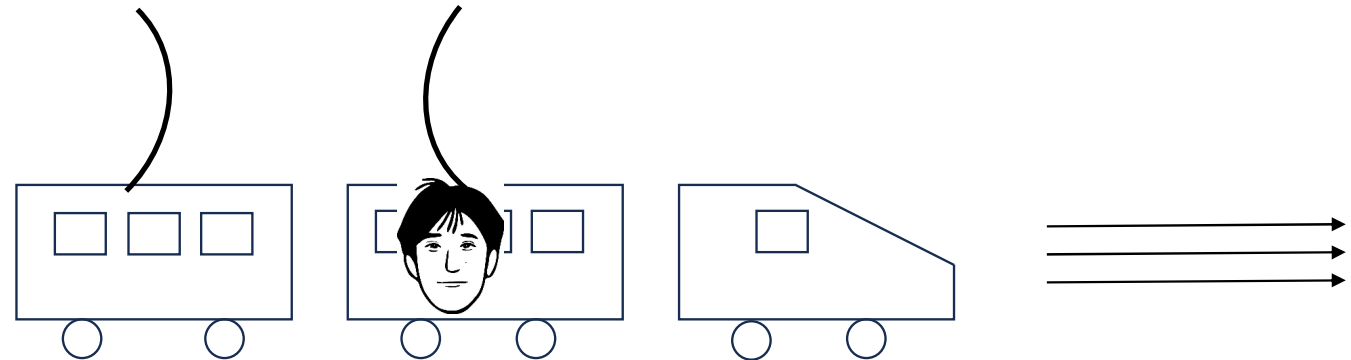
Knall in einem Zug



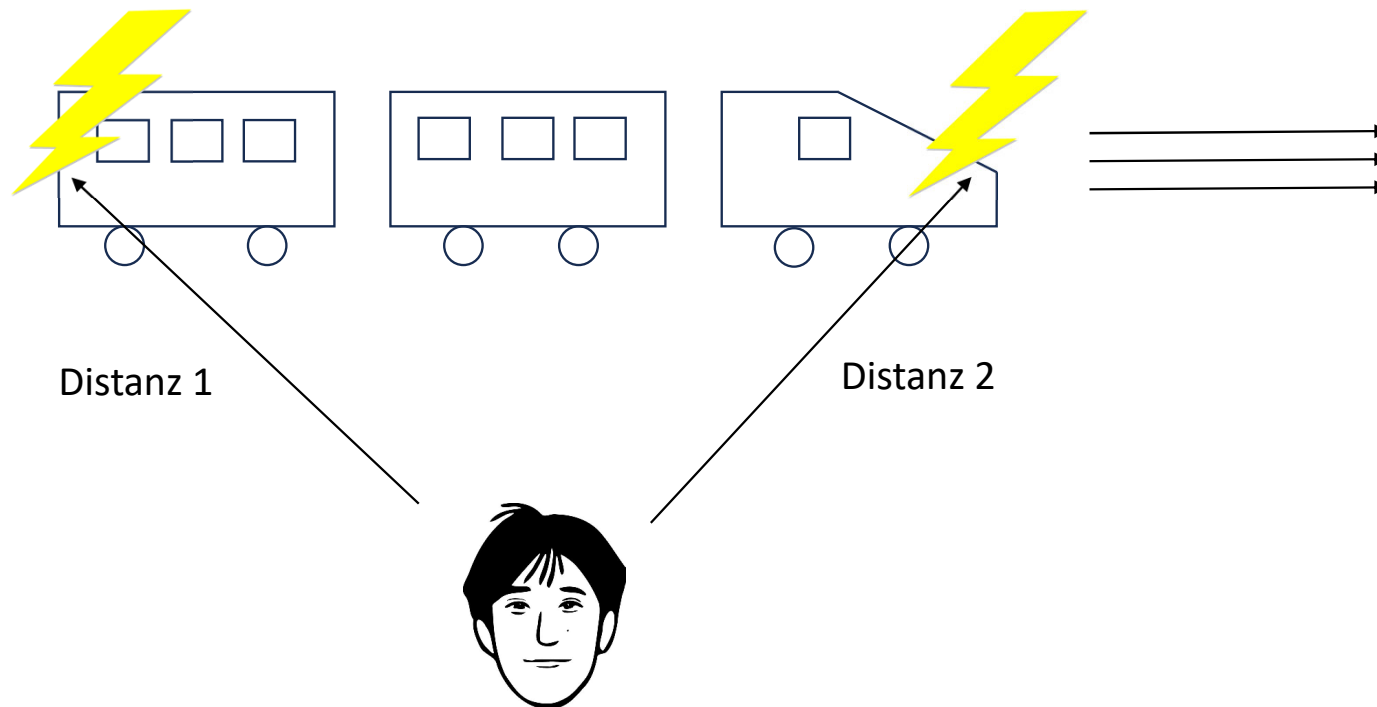
Gleiche Distanz, gleiche Geschwindigkeit => Gleiche Zeitdifferenz => Gleichzeitig



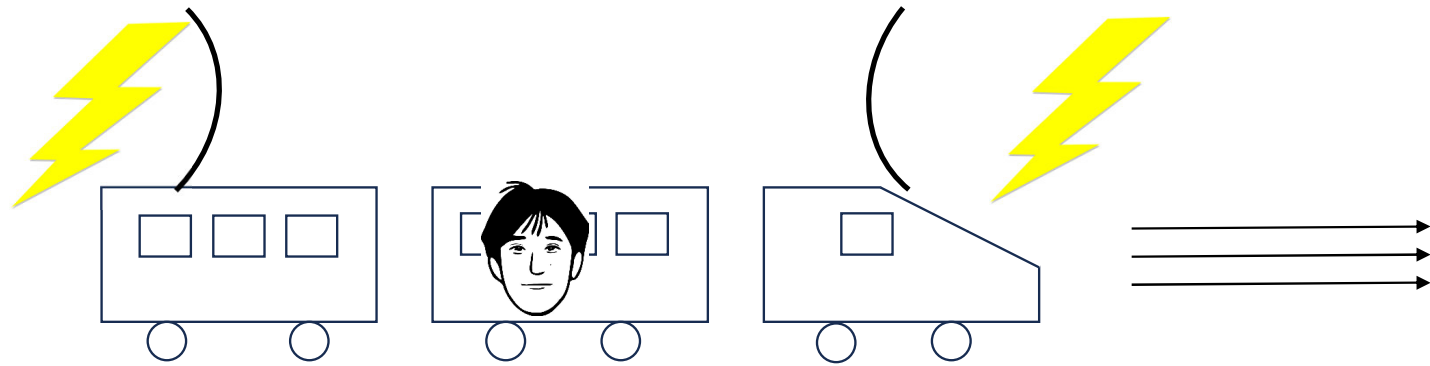
Gleiche Distanz, Unterschiedliche
(relativ) Geschwindigkeit =>
Unterschiedliche Zeitdifferenz
=> Gleichzeitig



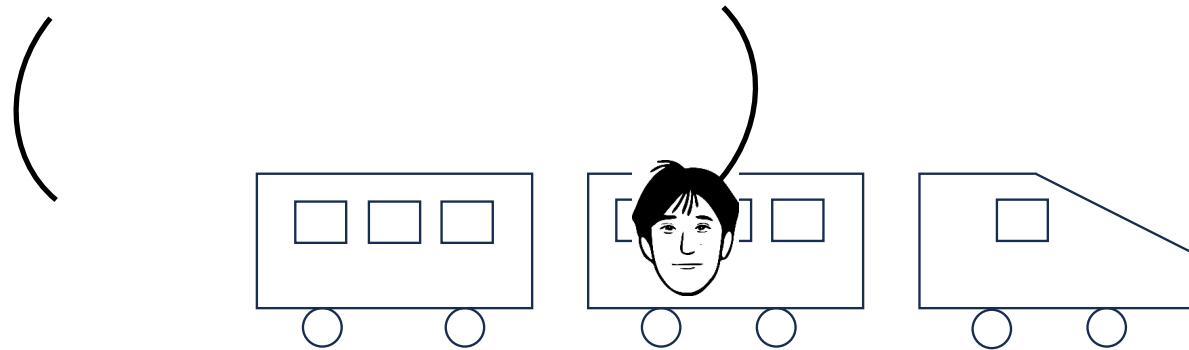
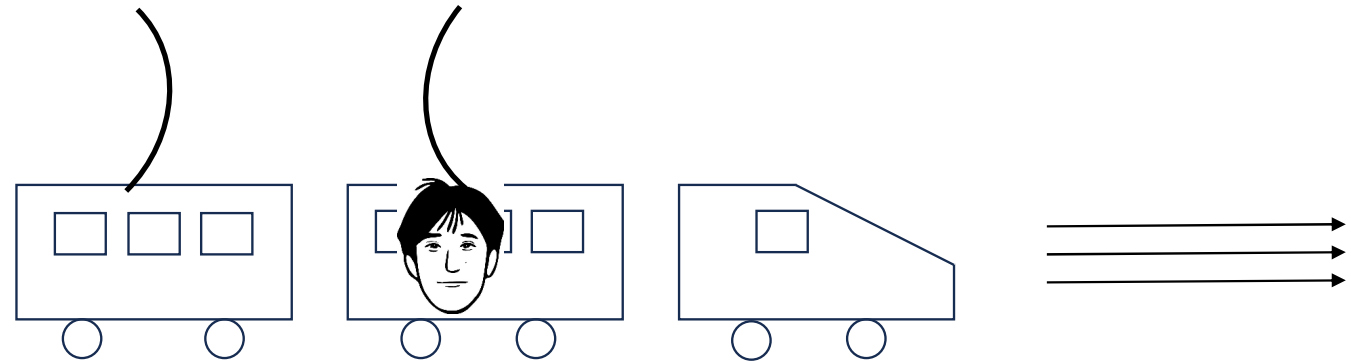
Blitz in einem Zug



Gleiche Distanz, gleiche Geschwindigkeit => Gleiche Zeitdifferenz => Gleichzeitig



Gleiche Distanz, **Gleiche**
Geschwindigkeit =>
Unterschiedliche Zeitdifferenz
=> Nicht Gleichzeitig



Gleichzeitig – Was heisst das?

- Für den Beobachter am Bahnsteig passieren beide Blitze gleichzeitig
- Für den Beobachter im Zug passiert der Blitz am vorderen Zugsende zuerst
- Für einen Beobachter in einem entgegenkommenden Zug passiert der Blitz am hinteren Zugsende zuerst

=> Solche Ereignisse heissen «raumartig». Die zeitliche Reihenfolge hängt vom Bezugssystem ab.

Direkte Konsequenz: Überlichtgeschwindigkeits-Reisen ermöglichen immer auch Zeitreisen (Grossvater-Paradoxon)

Philosophische Konsequenz: Unsere Zukunft ist die Vergangenheit in einem anderen Bezugssystem

Zeit und Relativitätstheorie

Beobachter unabhängige Aussagen:

- 1. Wenn es ein Bezugssystem gibt, in dem die Ereignisse A und B am gleichen Ort stattfinden, aber keines, in dem sie zur selben Zeit stattfinden, dann nennt man die Lage der Ereignisse zueinander zeitartig. Dann ist folgende Aussage immer wahr: „von Ereignis A erreicht man Ereignis B mit Unterlichtgeschwindigkeit.“
- 2. Wenn die Ereignisse A und B in keinem Bezugssystem am gleichen Ort noch zur selben Zeit stattfinden, dann nennt man die Lage der Ereignisse zueinander lichtartig. Dann ist folgende Aussage immer wahr: „von Ereignis A erreicht man das Ereignis B mit Lichtgeschwindigkeit“.
- 3. Wenn es ein Bezugssystem gibt, in dem die Ereignisse A und B zur selben Zeit stattfinden, aber keines, in dem sie am gleichen Ort stattfinden, dann nennt man die Lage der Ereignisse zueinander raumartig. Dann ist die folgende Aussage immer wahr: „Weder erreicht man Ereignis A von Ereignis B mit maximal Lichtgeschwindigkeit, noch umgekehrt.“
- 4. Wenn die Ereignisse A und B zur selben Zeit und am selben Ort stattfinden, stimmen alle Beobachter darin überein, dass es sich um dasselbe Ereignis handelt.

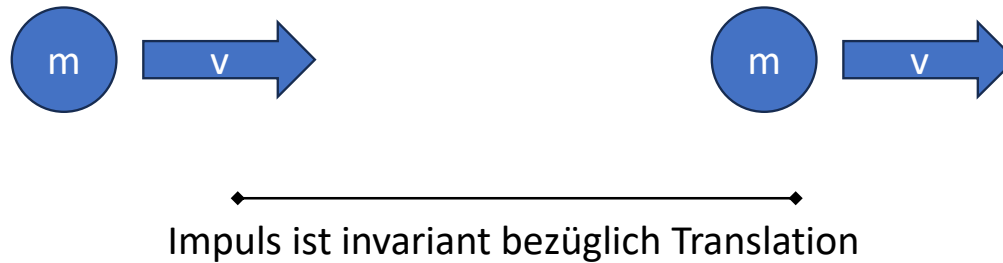


Wieso der Energieerhaltungssatz nicht gilt

Wieso der Energieerhaltungssatz nicht gilt

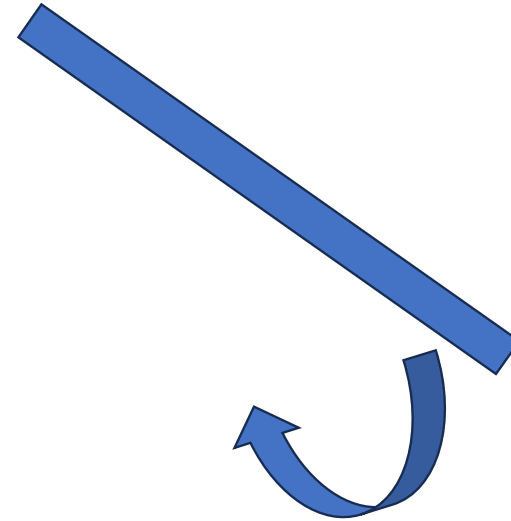
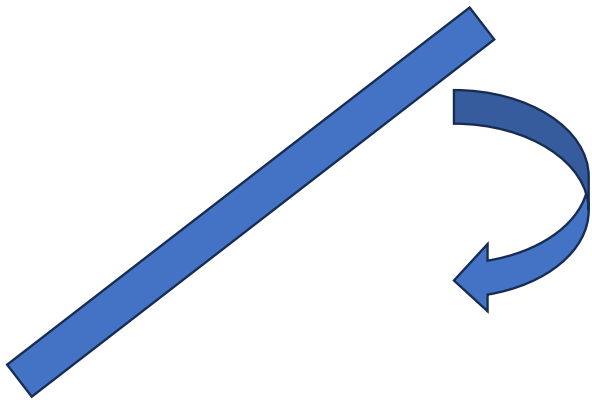
Woher kommen Erhaltungssätze?

Beispiel Impulserhaltung:



Wieso der Energieerhaltungssatz nicht gilt

Beispiel Drehimpulserhaltung:



Drehimpuls ist invariant bezüglich Rotation

Symmetrie und Erhaltung

Noether-Theorem:

Zu jeder kontinuierlichen
Symmetrie eines physikalischen
Systems gehört eine
Erhaltungsgröße.



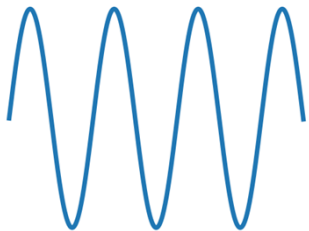
https://en.wikipedia.org/wiki/Emmy_Noether

Wieso der Energieerhaltungssatz nicht gilt

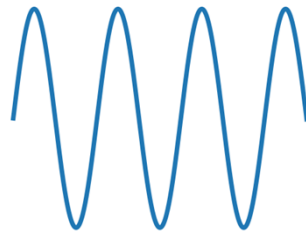
Energieerhaltung gehört zu der Symmetrie in der Zeit

=> Energie ist erhalten, solange sich die physikalischen Gesetze über die Zeit nicht ändern.

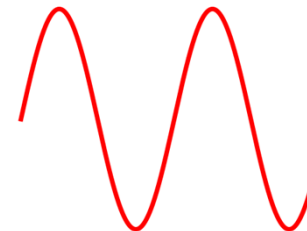
Beispiel: Photon mit Energie: $E = h \cdot c / \text{Wellenlänge}$



Jetzt

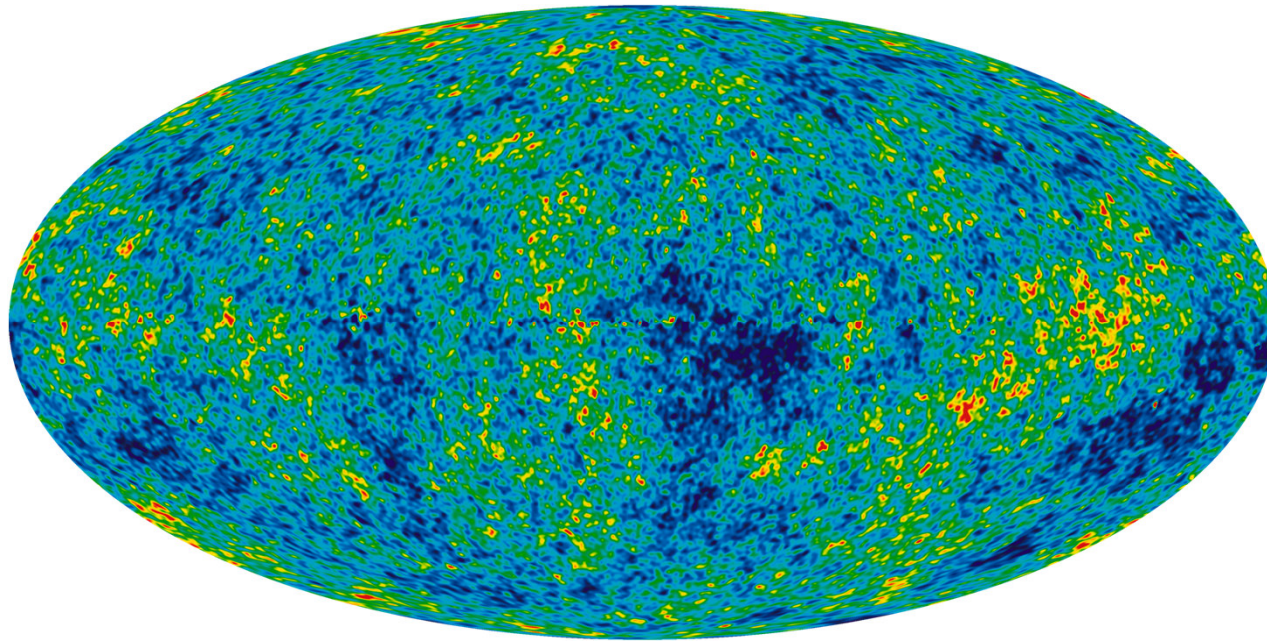


Morgen



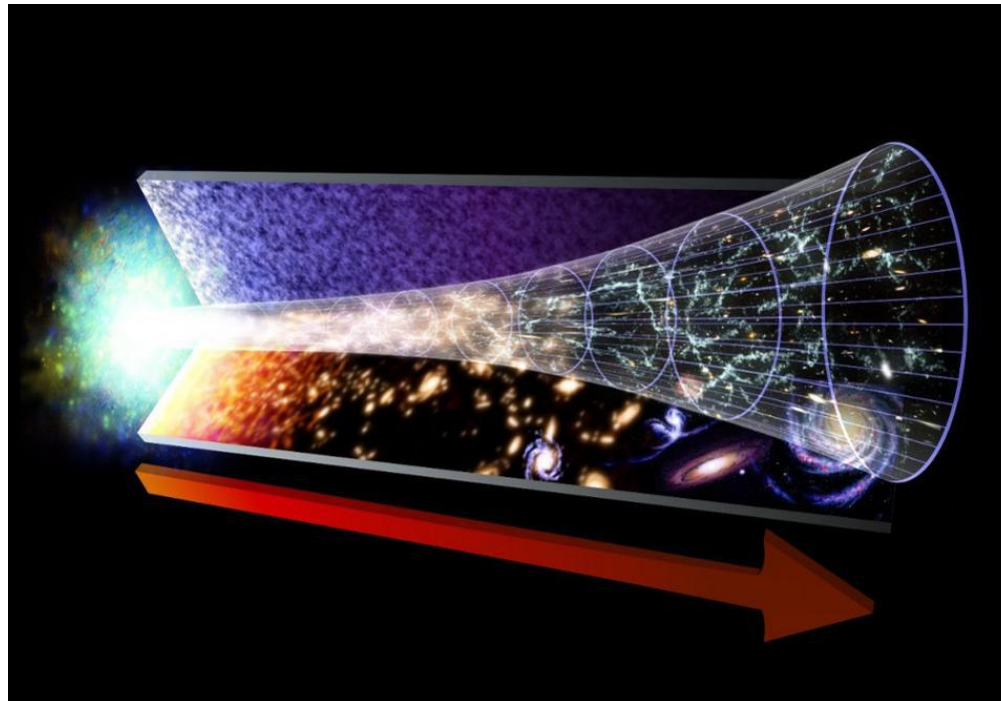
In 10 Milliarden Jahren

Wieso der Energieerhaltungssatz nicht gilt



Wieso der Energieerhaltungssatz nicht gilt

=> In unserem, expandierenden, Universum ist die Energie keine Erhaltungsgrösse

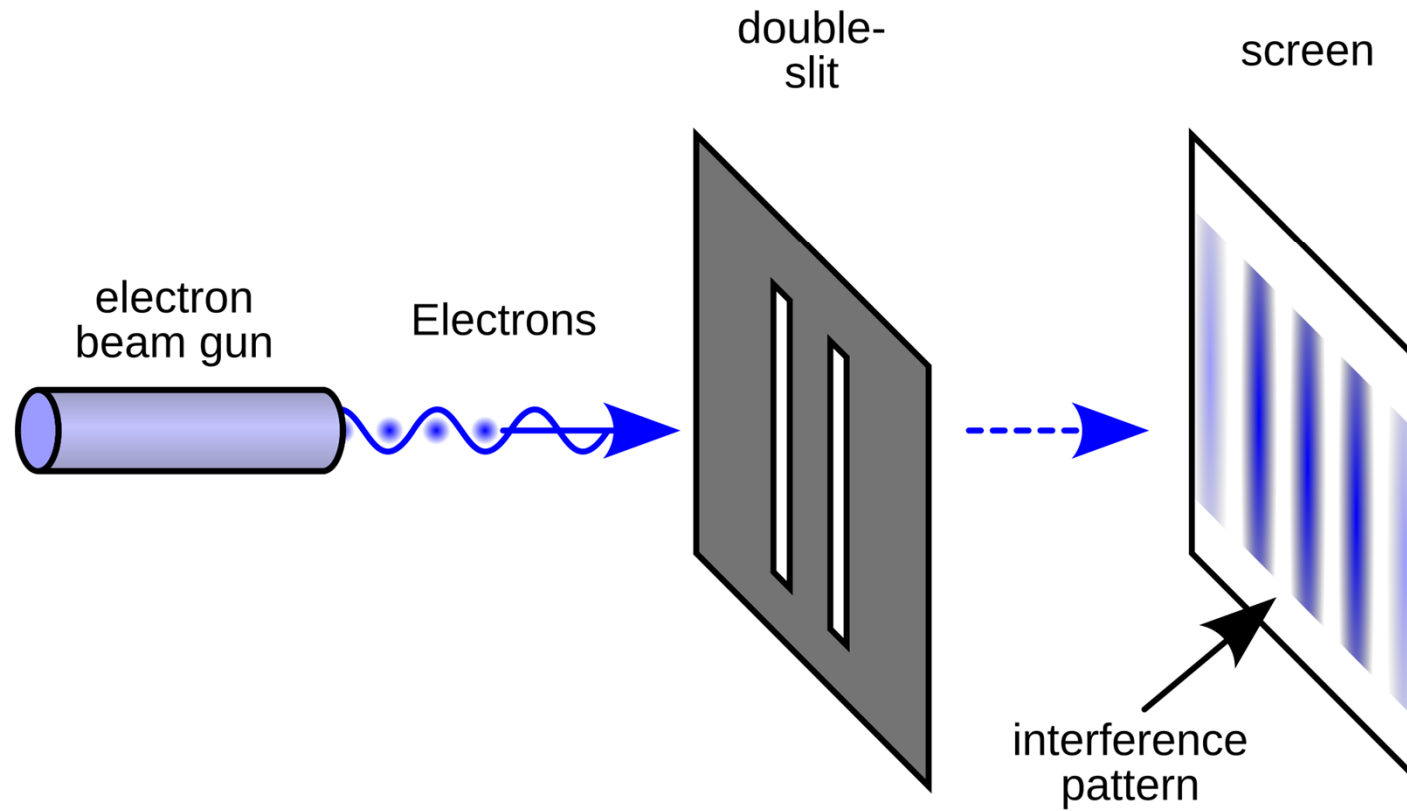


<https://svs.gsfc.nasa.gov/10128>



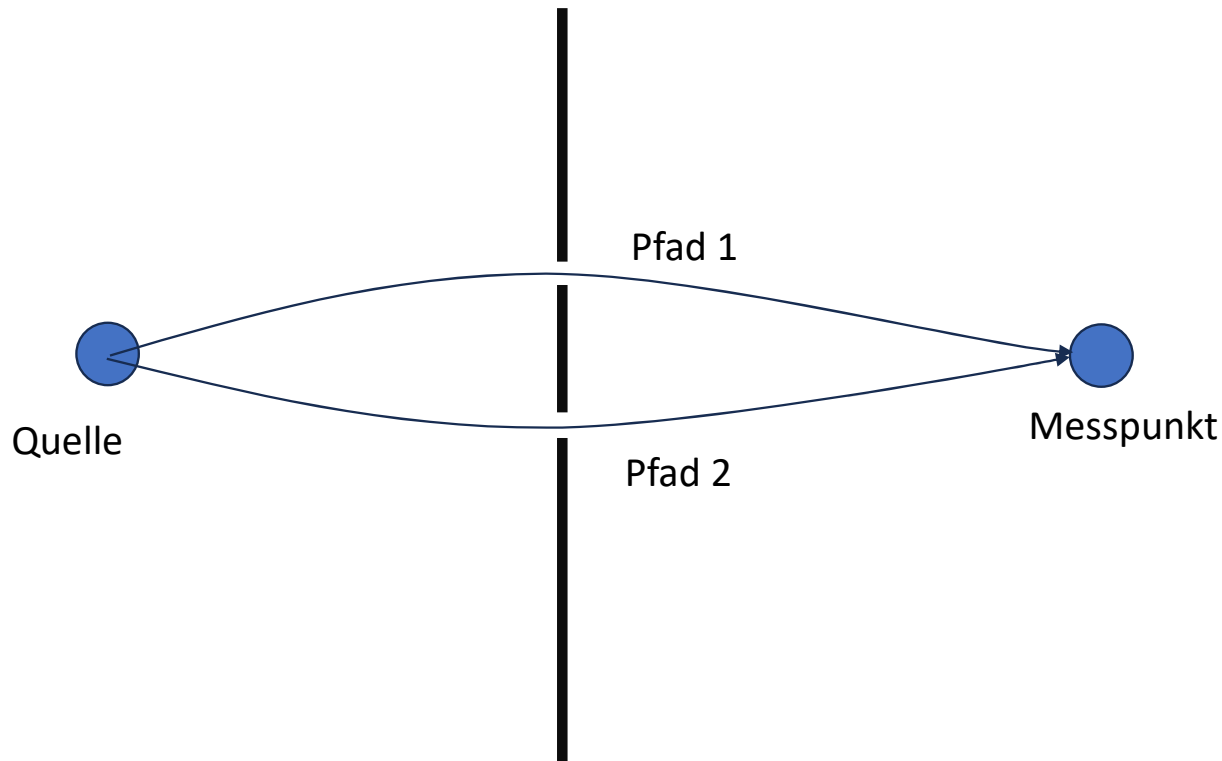
Das Doppelspaltexperiment ...etwas weiter gedacht

Das Doppelspaltexperiment



https://en.wikipedia.org/wiki/Double-slit_experiment

Das Doppelspaltexperiment



Die Wahrscheinlichkeit, dass das Partikel am Messpunkt ankommt:

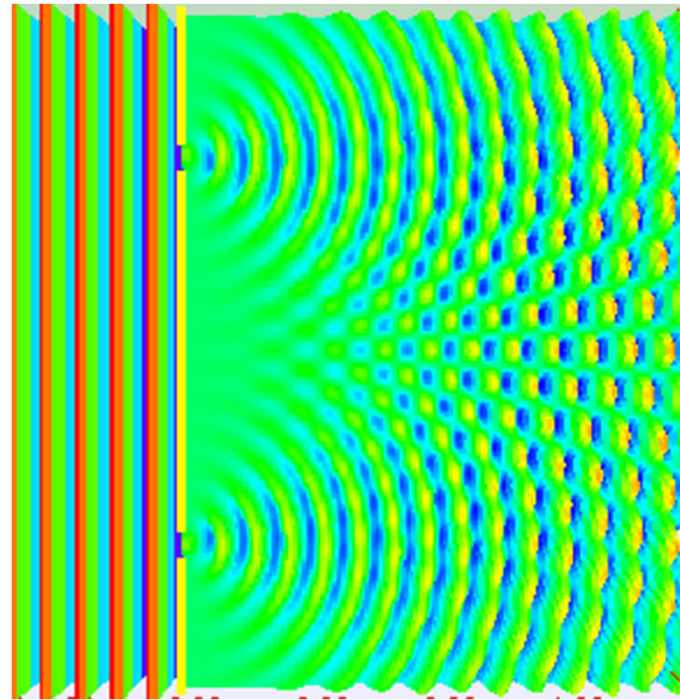
Wahrscheinlichkeit für Pfad 1 und Pfad 2

Wichtig:

Die Wahrscheinlichkeit muss einen Interferenzterm enthalten!

Die Wahrscheinlichkeit ist proportional zum Längenunterschied (Phase) der Pfade

Das Doppelspaltexperiment



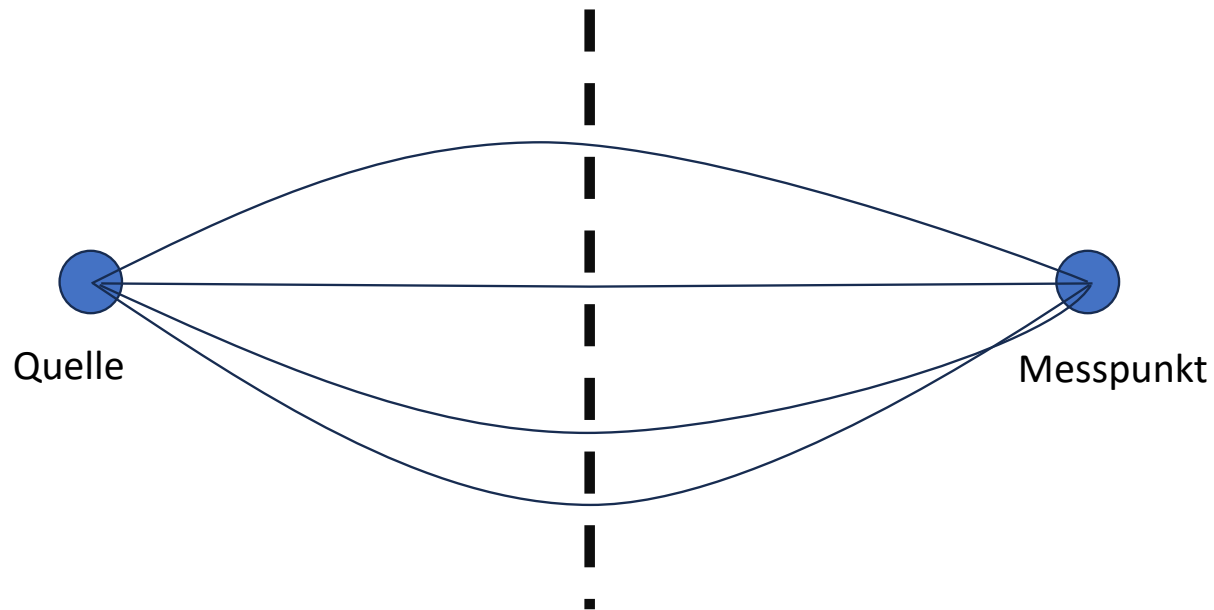
https://en.wikipedia.org/wiki/Double-slit_experiment

Interpretationen der Quantenmechanik

- Die Mathematik der Gleichungen besagt, mit welcher Wahrscheinlichkeit ein Partikel von Punkt A nach B kommt.
- Die Gleichung gilt nur, wenn das Partikel auf dem Weg keine Interaktion mit anderen Partikeln hat
- Was passiert dazwischen? Wie muss ich die Gleichung interpretieren?
 - Eine Messung bringt die Wellenfunktion zum Kollabieren, das Quantenobjekt wird von Welle zu Partikel
 - Es gibt die Welle und das Partikel, die Welle sagt dem Partikel wohin es soll
 - Alles sind Wellen, jede Interaktion erzeugt Parallelwelten mit je einem der möglichen Resultate
 - Es gibt keine Welle: Feynman-Pfad-Integral-Formulierung

Das Doppelspaltexperiment

- Was wäre, wenn da nicht zwei, sondern drei Schlitze wären?
- Oder vier?



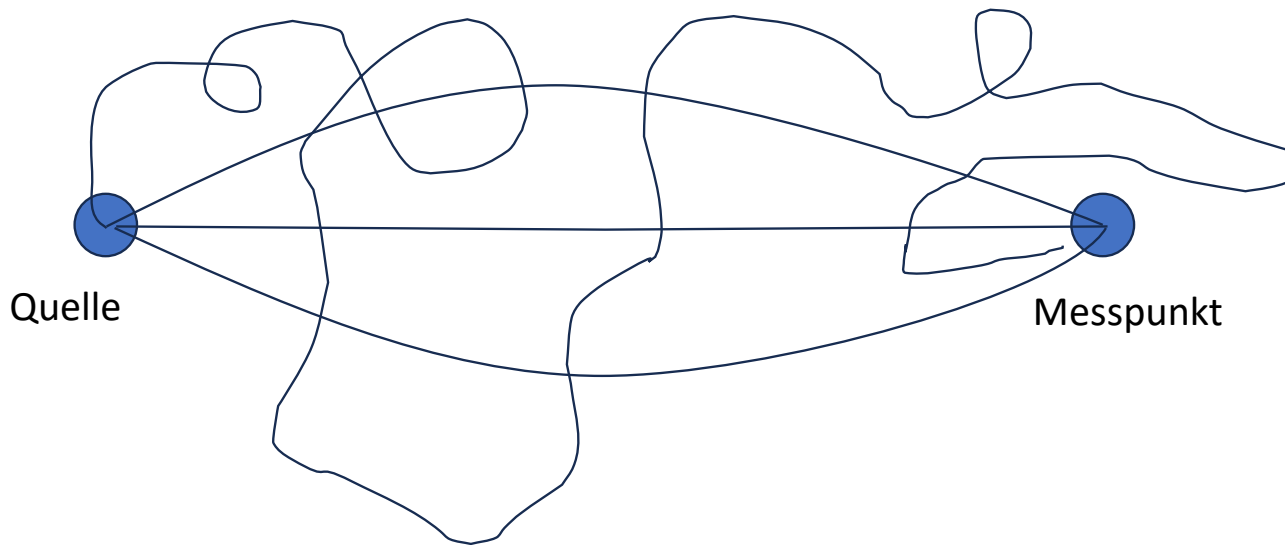
Die Wahrscheinlichkeit, dass das Photon am Messpunkt ist:

Wahrscheinlichkeit für Pfad 1 +
Wahrscheinlichkeit für Pfad 2 +
Wahrscheinlichkeit für Pfad 3 +
Wahrscheinlichkeit für Pfad 4 +
...

Auch hier: Wahrscheinlichkeit ist Amplitude der summierten Wellengleichung, enthält Interferenzterme

Das Doppelspaltexperiment

- Oder unendlich viele?



Die Wahrscheinlichkeit, dass
das Partikel am Messpunkt ist:

Amplitude der Summe der
Wahrscheinlichkeit aller Pfade

=> Pfad-Integral-Formulierung
der Quantenmechanik
(Feynman-Interpretation)



Danke