

**Prof. Dr. rer.nat.habil Erik Jacobson**

Lehrveranstaltung "Einführung in die Relativitätstheorie"

**Abschlußvorlesung**

# **Überlichtgeschwindigkeit**

Superluminal velocity

trivial ? real ? revolutionär ? spekulativ ?

am Mi. 22.1.2003 um 18:00 im Physikhörsaal 7-305

## **Übersicht**

1. Transversalgeschwindigkeiten  
(Laserlicht, Elektronen, Tropfen)
2. Licht in Materie  
(Dispersion, Čerenkov-Strahlung, Lichtfalle)
3. Überlichtgeschwindigkeiten in der Theorie
4. Überlichtgeschwindigkeiten im Kosmos
5. Überlichtgeschwindigkeiten im Labor
6. Neue Dimensionen

Wozu eine Vorlesung über Relativitätstheorie für (FH) IngenieurInnen ?

1. Die Relativitätstheorie ist seit knapp 100 Jahren etabliert und sollte zum Allgemeinwissen von HochschulabsolventInnen insbesondere der technischen Fachbereiche gehören.

2. Die Konsequenzen zumindest der speziellen Relativitätstheorie machen sich bei den heutigen Genauigkeitsanforderungen bemerkbar, und werden zum Teil schon berücksichtigt:

- Die Basiseinheiten, insbesondere die Sekunde, das Kilogramm oder das Meter gehören zu solchen Größen.
- Physikalisch-Technische Grundgrößen wie die Gravitationskonstante ebenso.
- Beim Gebrauch von Messgeräten, wie (Atom)Uhren oder Waagen müssen relativistische Effekte berücksichtigt werden.

Eine Sonderstellung hat die Lichtgeschwindigkeit:

sie wurde inzwischen als die wichtigste Naturkonstante festgeschrieben.

Diese Geschwindigkeit wird als nicht überschreitbar angesehen, ihre Überschreitung ist aber Gegenstand vielfacher Untersuchungen und Spekulationen. Mit diesem Thema soll sich diese letzte Vorlesung beschäftigen.

Warum ist diese Begrenzung und ihre Überwindung so interessant ?

- Zunächst wurde eine Begrenzung der Lichtgeschwindigkeit  $c$  experimentell ermittelt und mit immer genaueren Verfahren verfeinert, bis sie heute als Naturkonstante für die Längeneinheit 1 m Referenzcharakter bekommen hat. ( $c_0 = 299\,792\,458$  m/s)

- Einstein forderte in seiner Speziellen Relativitätstheorie (1905) zur Erhaltung des Kausalitätsprinzips, daß grundsätzlich kein bewegtes Objekt die Vakuumlichtgeschwindigkeit  $c_0$  überschreiten darf.

Inzwischen gibt es jedoch eine Menge Ansätze in der Physik, in denen Wellen und Teilchen betrachtet werden, die sich mit Überlichtgeschwindigkeit bewegen (Tachyonen).

In diesem Zusammenhang soll der Unterschied zwischen Teilchen und Wellen ignoriert werden, da sowohl Teilchen als (de Brogli-) Wellen und Wellen als Teilchen (Photonen) betrachtet werden können.

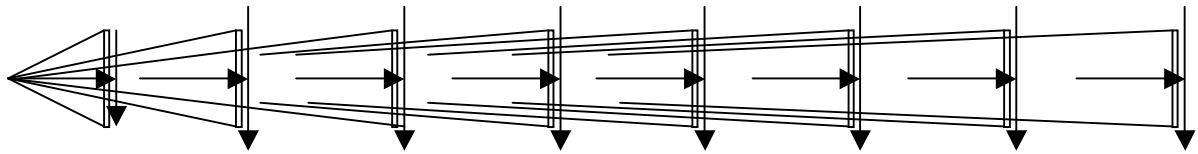
Solche Theorien treffen alle auf eine Reihe von (fast ?) unüberwindlichen Schwierigkeiten, die als das „Superluminal-Paradoxon“ bezeichnet werden.

# 1. Transversalgeschwindigkeiten (Licht, Elektronen, Tropfen)

## 1.1 Laserstrahl

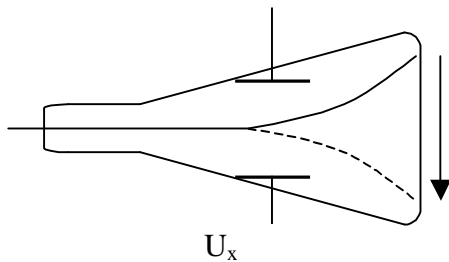
Winkelgeschwindigkeit  $\omega = 1 /s$  (ca.  $60^\circ$  in 1 Sekunde)

Bahngeschwindigkeit in 1 m Entfernung = 1 m/s  
 1 km 1 km /s  
 100 km 100 km /s  
 384000 km (Mond) = 384 000 km/s  $> c_0$



x =	1m	30m	1km	30km	1000km	30000km	100000km	300 000km
v =	1m/s	30m/s	1km/s	30km/s	1000km/s	30000km/s	100000km/s	300 000km/s

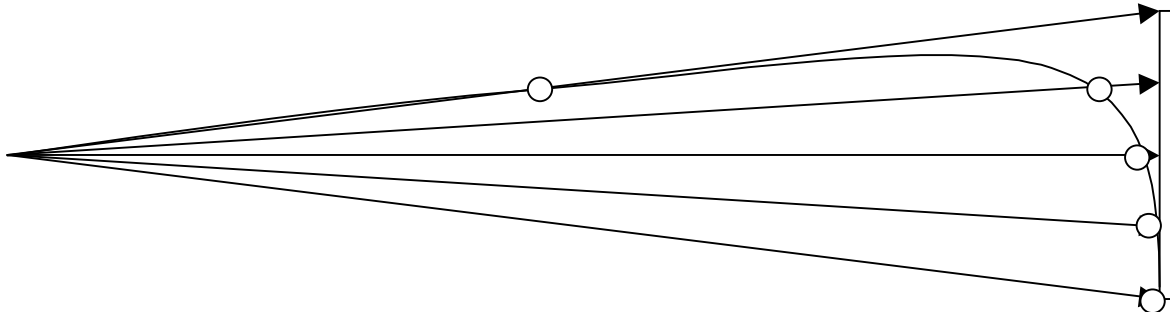
## 1.2 Elektronenstrahl



Horizontalablenkung:

$$v^{-1} = 0.1 \text{ ns/cm} \text{ bzw. } v = 10 \cdot 10^9 \text{ cm/s} = 100\,000 \text{ km/s}$$

## 1.3 Wasserstrahl



## 2. Licht in Materie

### 2.1 Der Brechungsindex

$$n = \frac{c_0}{c_n} = n(\lambda) > 1 \quad (\text{Dispersion})$$

Interaktion mit den Atomen der Materie (Resonanz)

a) Absorption  $A = A(\lambda)$  (Resonanzabsorption bei  $f_0 = c/\lambda_0$ )

b) Verzögerung  $t_A = t(\lambda)$  (Absorption und Reemission)

c) Dispersionskurve

hat einen Pol bei  $f = f_0$   
und liefert  $n < 1$  für  $f > f_0$

$$n = 1 + \rho_e \frac{1}{f_0^2 - f^2}$$

$c_n = c_\varphi = \omega/k = 2\pi f/k =$  Phasengeschwindigkeit ( $k = 2\pi/\lambda =$  Wellenzahl)

$c_g = d\omega/dk$  = Gruppengeschwindigkeit

$c_s = c_g$  = Signalgeschwindigkeit falls  $n = 1$

dann gilt  $c_g c_\varphi = c_0^2$

### 2.2 Die Čerenkov-Strahlung

Schnelle Teilchen (z.B. aus radioaktivem Material im Kernreaktor) schneller als die Lichtgeschwindigkeit  $c_s = c_g = c_\varphi$  in Wasser; erzeugen bläuliches Licht beim Abbremsen

### 2.3 Die Lichtfalle

Bei hohem Brechungsindex  $n$  (z.B. in der Nähe einer Absorptionsstelle (s.o.) oder im Bose-Einstein-Kondensat bei sehr tiefen Temperaturen  $T < 1 \mu\text{K}$ ) kann die Gruppengeschwindigkeit  $c_g$  von Licht sehr klein werden (ca. 20 m/s = .70 km/h)

## 2. Überlichtgeschwindigkeiten in der Theorie

### 3.1 Einsteins Spezielle Relativitätstheorie (SR)

Betrachtet man wie üblich, zwei Bezugssysteme S und S', die sich mit der Relativgeschwindigkeit v entlang ihrer x-Achsen bewegen, so werden die Bewegungen in S' vom (ruhend gedachten) System S aus gesehen durch die Lorentz-Transformation beschrieben

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - (v/c_0)^2}}; \quad y' = y; \quad z' = z; \quad t' = \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - (v/c_0)^2}}$$

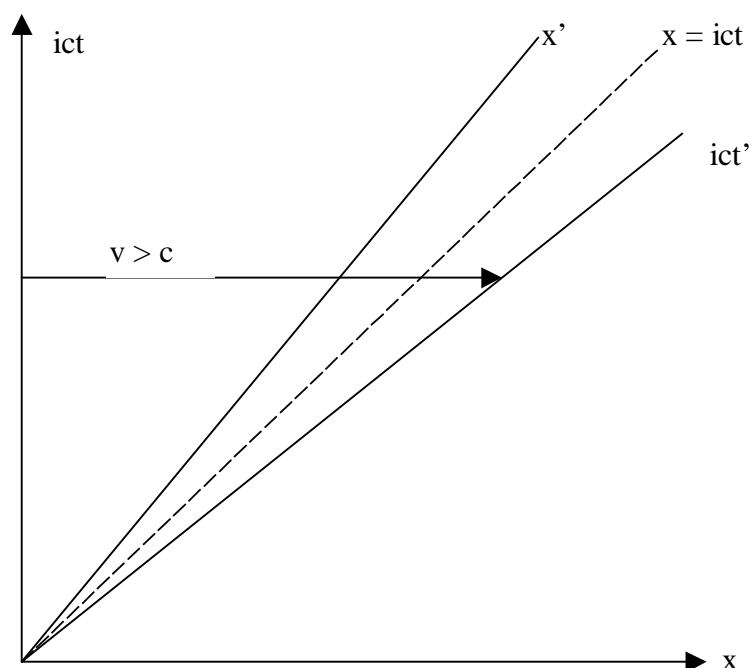
Für  $v > c_0$  wird lediglich die  $x'$ - und die  $t'$ -Komponente **imaginär**  
 Für die Addition von Geschwindigkeiten ergibt sich

$$u' = \frac{\vec{u} + \vec{v}}{1 - u \cdot v / c_0^2}$$

Diese Gleichung zeigt eine Singularität (Pol) für den Fall  $u \cdot v = c_0^2$

Falls  $v > c_0$  reicht auch eine kleinere Geschwindigkeit u, um  $u'$  divergieren zu lassen.

Im **Minkowski-Diagramm** sind die  $x'$ - Achse und die  $t'$ - Achse vertauscht angeordnet

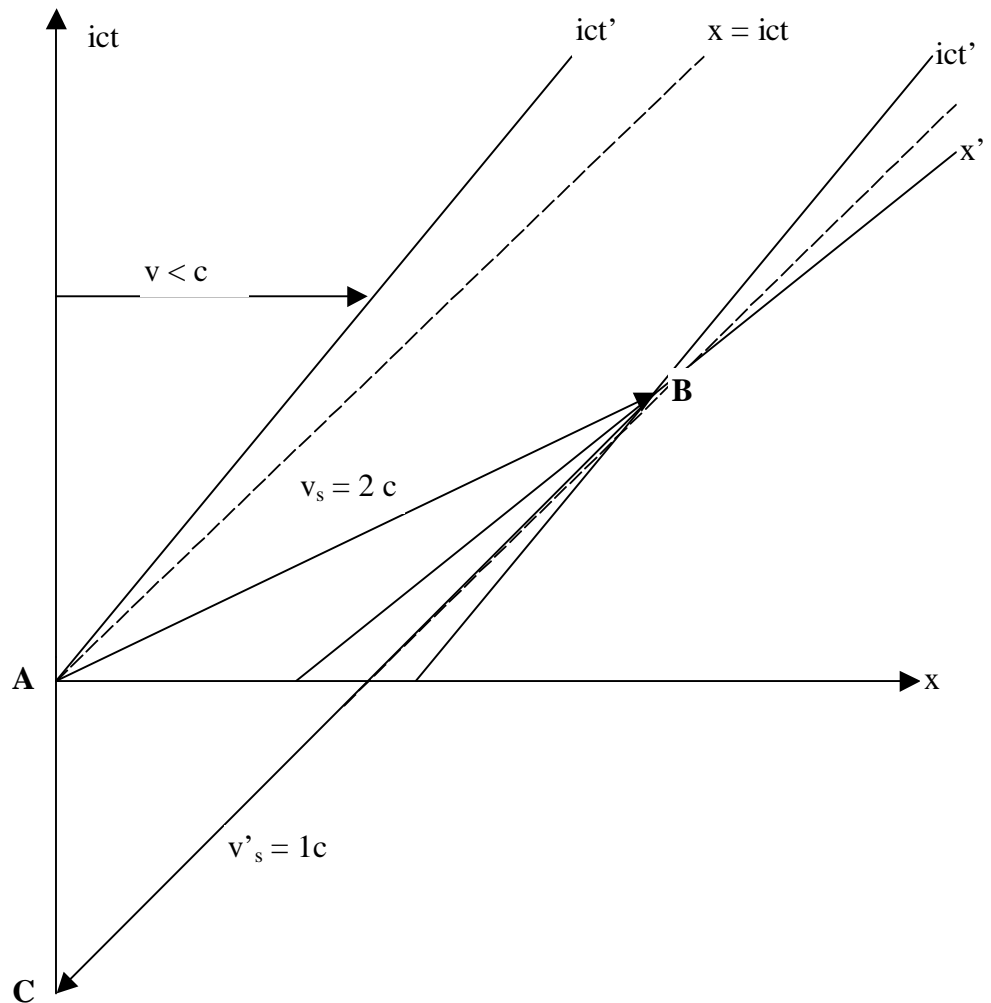


### 3.2 Verletzung des Kausalitätsprinzips

A sendet bei  $t = 0$  ein Signal (z.B. die Lottozahlen), ein Tachyon, mit Überlichtgeschwindigkeit ( $v_s = 2c$ ) an B, der sich in einem System befindet, das sich mit Unterlichtgeschwindigkeit ( $v < c$ ) bewegt.

B antwortet sofort (mit Lichtgeschwindigkeit  $v'_s = 1c$ )

Die Antwort trifft bei C früher ein als das Signal bei A losgeschickt wurde (C kennt die Lottozahlen vor der Ziehung !?)

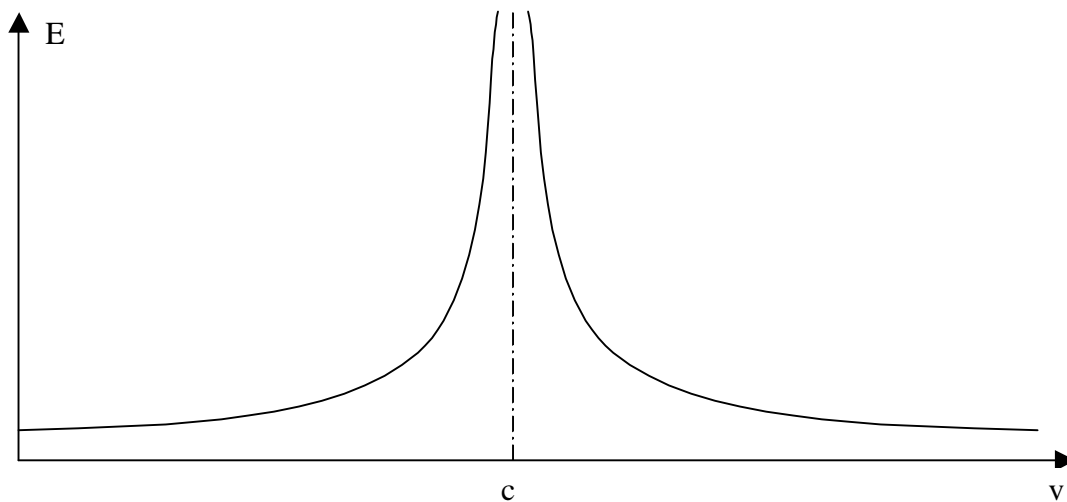


Die Lösung dieses Paradoxons kann durch die Prozesse der Emission und Absorption von Tachyonen erklärt werden (s. Erasmo Recami, 1998)

### 3.3 Tachyonen

Teilchen mit Überlichtgeschwindigkeit

- müssen durch die „Lichtmauer“ (bei  $v = c$ ) tunnelt
- müssen eine negative Ruhmasse besitzen !
- sie fliegen in der Zeit rückwärts



Die Dicke der Barriere ist um so geringer, je höher die Teilchenenergie

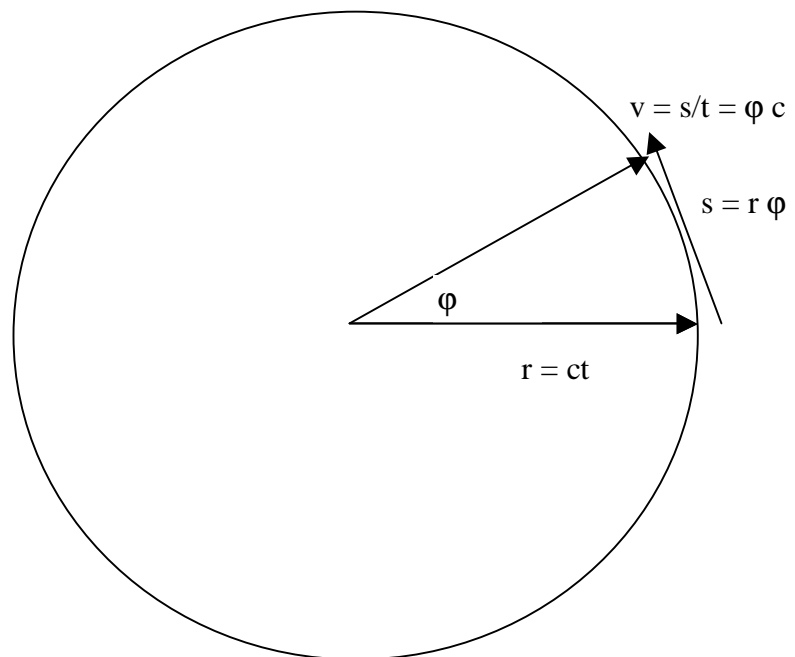
## 4. Überlichtgeschwindigkeiten im Kosmos

Wo gibt es denn wirklich Überlichtgeschwindigkeiten ?

### 4.1 Der Kosmische Horizont

Der Kosmos scheint sich fast mit Lichtgeschwindigkeit auszu dehnen (kosmische Inflation). Wird der Raum als eine in eine 4. Dimension eingebettete Kugeloberfläche betrachtet, so entfernen sich hier alle Objekte von einander, mit (Flucht)Geschwindigkeiten, die proportional von ihrer Entfernung abhängen.

Objekte, die weiter entfernt sind, entfernen sich mit Überlichtgeschwindigkeit und können von uns nie gesehen werden.



### 4.2 Kosmische Objekte

Kosmische Partikel wie Neutrinos stehen im Verdacht, mit Überlichtgeschwindigkeit zu reisen. (e.g. Shrum & Ziok, 1971)

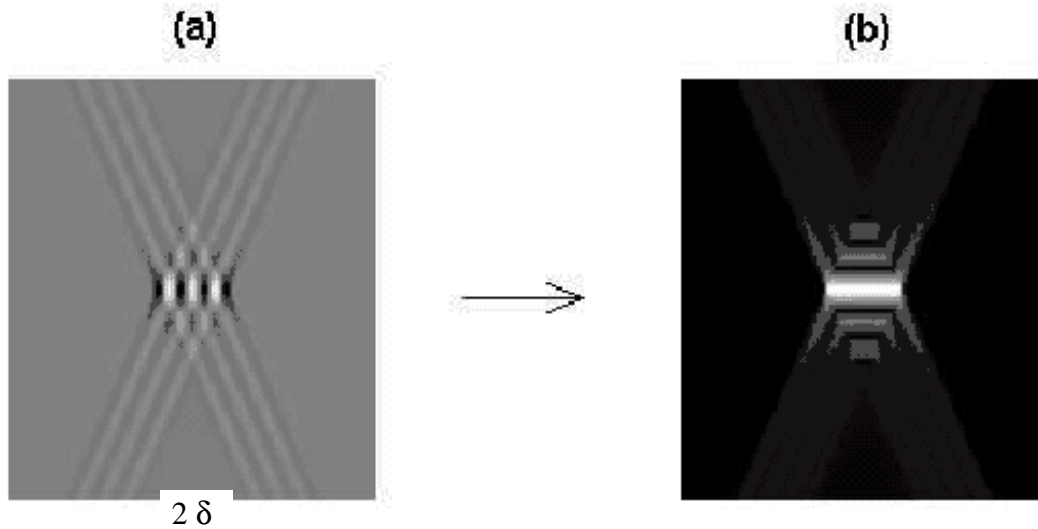
In Mini-Quasaren sollen Expansionen mit Überlichtgeschwindigkeit erfolgen (Zensus & Unwin, 1987)



# 5. Überlichtgeschwindigkeiten im Labor

## 5.1 Tachyonen im Labor

Elektromagnetische X-Wellen (e.g. P.Saari, 2002)



[1]

In the overlap region , if we introduce the radius vector of a field point  $\mathbf{r} = [x, y, z]$  the field is given by superposition

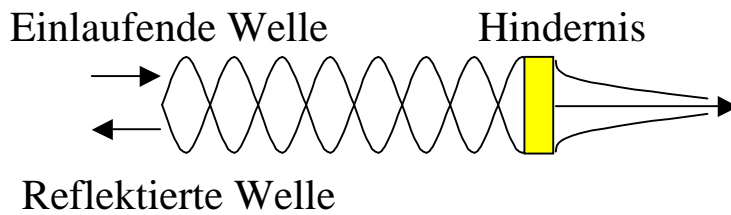
$$\Psi_P(\mathbf{r} \cdot \mathbf{n}_1 - ct) + \Psi_P(\mathbf{r} \cdot \mathbf{n}_2 - ct) = \Psi_P(x \sin \theta + z \cos \theta - ct) + \Psi_P(-x \sin \theta + z \cos \theta - ct) , \quad (1)$$

which is nothing but the well-known two-wave-interference pattern with doubled amplitudes. Altogether, the superposition of the pulse pair – as two branches \and / form the letter X – makes up an X-shaped propagation-invariant interference pattern moving along the axis  $z$  with speed  $v = c / \cos \theta$  which is both the phase and the group velocity of the wave field in the direction of the propagation axis  $z$ . This speed is superluminal in a similar way as one gets a faster-than-light movement of a bright stripe on a screen when a plane wave light pulse is falling at the angle  $\theta$  onto the screen plane. Let us stress that here we need not to deal with the vagueness of the physical meaning inherent to the group velocity in general – simply the whole spatial distribution of the field moves rigidly with  $v$  because the time enters into the Eq.(1) only together with the coordinate  $z$  through the propagation variable  $z_t = z - vt$ .

[1]

## 5.2 Wellen an Grenzflächen

- Evanescent Waves (Niemtz, 1972)



Nach dem Hindernis klingt die Welle exponentiell ab. Es entstehen keine Interferenzen

### Luftspalt als Hindernis:

Fig. 5 The tunneling time of the double prism experiment consists of two components:  $t_p$  for the Goos-Hänchen Shift  $D$  parallel to the prism's surface and  $t_s$  for crossing the gap in the direction perpendicular to the two surfaces of the gap.

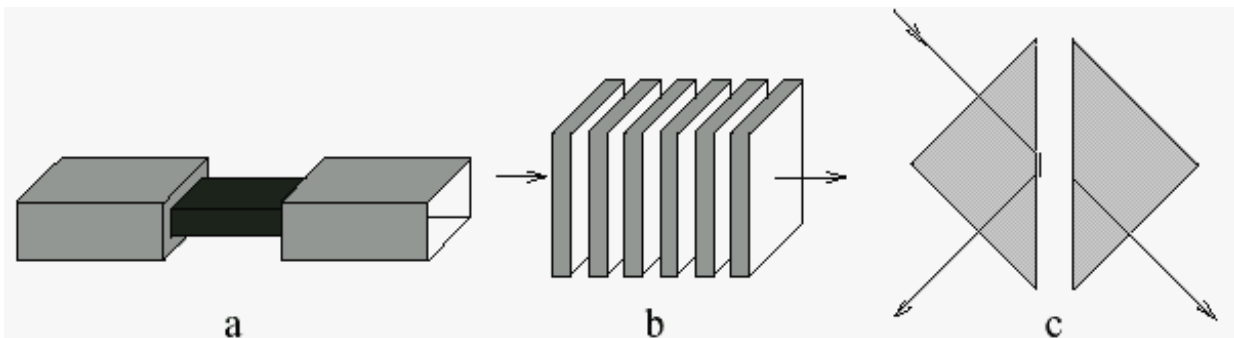
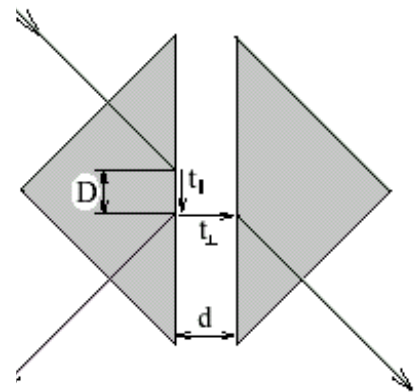


Fig. 3 Sketch of the three prominent photonic barriers. a) illustrates an undersized waveguide (the central part of the wave guide has a cross-section being smaller than half the wavelength in both directions perpendicular to propagation), b) a photonic lattice (periodic dielectric hetero structure), and c) the frustrated total internal reflection of a double prism, where total reflection takes place at the boundary from a denser to a rarer dielectric medium.

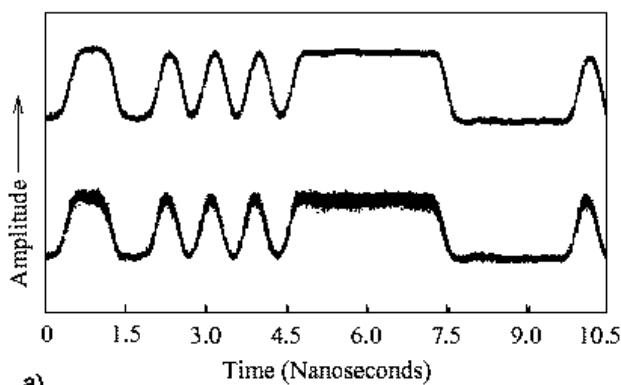
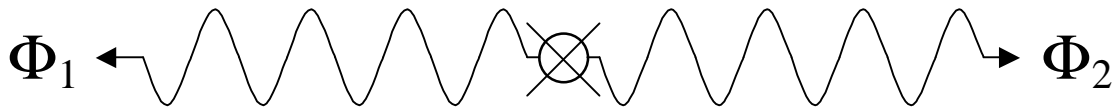


Fig.2 Signals: (a) measured fiber optical signal intensity in arbitrary units (a.u.) The half width corresponds to the number of bits: 1,1,0,0,1,0,1,0,1,0,1111... The lower signal was recorded after a distance of 9 000 km. The infrared carrier frequency of the signal is  $2 \cdot 10^{14}$  Hz, ( $\lambda = 1.5 \mu\text{m}$ )

## 5.3 Nichtlokalität

### Das Einstein-Podolsky-Rosen Paradoxon (1935)

„Grenzen der Quantenmechanik“

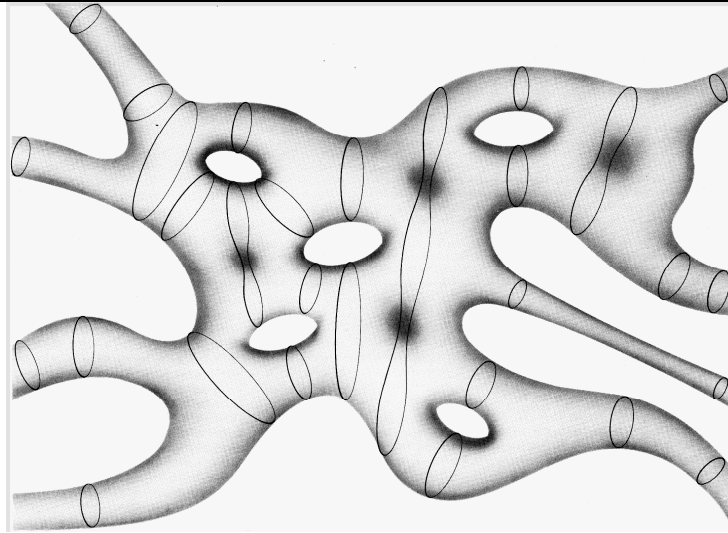


1. Zwei korrelierte Lichtquanten (aus einer Quelle) können solche Zustände (Überlagerungszustände) einnehmen, daß die Messung eines der beiden Quanten den Zustand des anderen vollständig bestimmt.
2. Zur Zeit der Messung können beide Quanten so weit voneinander entfernt sein, daß die Messung des einen nicht den Zustand des anderen Quants beeinflussen kann.
3. Dies widerspricht dem quantenmechanischen Prinzip, daß der reale Zustand eines Quants erst durch den Meßvorgang festgelegt wird. Der reale Zustand des gemessenen Quants 1 legt hier den realen Zustand des nicht gemessenen Quants 2 eindeutig fest. Die Information über die getroffenen Festlegung des Zustands des Quants 1 muß das Quant 2 mit Überlichtgeschwindigkeit erreichen.
4. Viele Physikalische Experimente haben dieses Paradoxon bestätigt, keines es widerlegt.

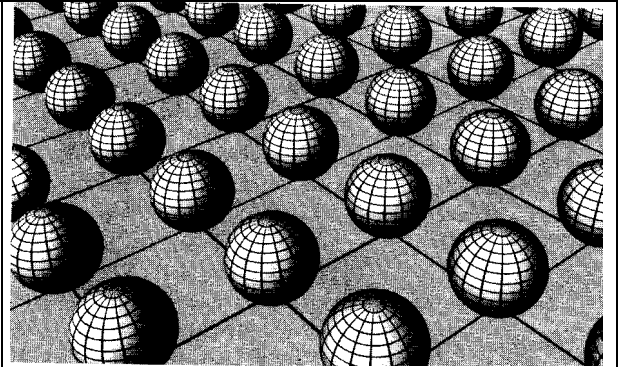
## 6. Neue Dimensionen

### 6.1 Superstrings

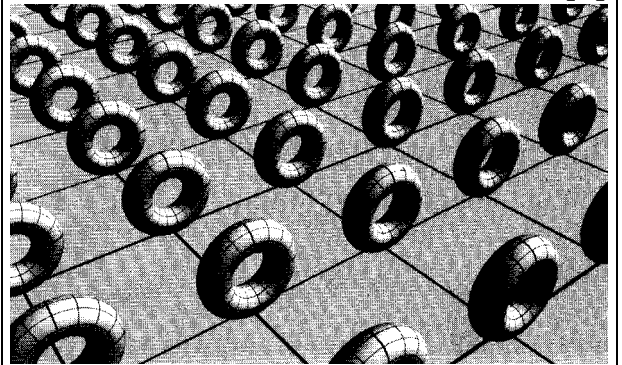
Vereinigung von Relativitätstheorie und Quantenmechanik in einem 10-dimensionalen Raum (Kaluza 1919)



Als Weltfläche bezeichnet man die Fläche, die ein string-artiges Teilchen überstreicht, das sich in der Raumzeit bewegt und dabei wechselwirkt. [3]



[4]



[4]

Wie eine gewöhnliche Saite ist ein stringartiges Teilchen ein eindimensionales Gebilde. In der Superstring-Theorie sind diese Strings äußerst klein und bewegen sich durch eine zehndimensionale Raumzeit. In dieser Figur ist in horizontaler Richtung die Zeit aufgetragen; geschlossene Strings (Schleifen) kommen von links und laufen nach rechts. Ihre Weltflächen sind unregelmäßig geformte Zylinder; sie sind also einem Zylinder topologisch äquivalent. Die entsprechenden Diagramme für die Wechselwirkung offener Strings sehen etwas komplizierter aus, da die Weltflächen offener Strings Ränder besitzen, die durch die Weltlinien der beiden Saitenenden bestimmt sind.

Wenn zwei Strings zusammenstoßen, vereinigen sie sich zu einem dritten String: Zwei Zylinder vereinigen sich zu einem dritten. Wenn Strings aufspalten und sich anschließend wieder vereinigen, entsteht ein Loch in der Weltfläche. Für quantenmechanische Rechnungen muß man zwischen einem vorgegebenen Anfangszustand und einem vorgegebenen Endzustand alle möglichen Aufspaltungen und Vereinigungen von Strings berücksichtigen. Die Topologie der Weltfläche, die eine solche Wechselwirkung beschreibt, ähnelt einem Torus mit einer beliebigen Anzahl von Löchern.

## 6.2 Information

Welche Rolle spielt die Information in der Physik ?

Welche Dimension hat die Information, welche Maßeinheit ?

Hinweise:

1. „Entropie“ (Zustand von (Un)Ordnung oder (Un)Wissen))

**Thermodynamik:**

**Entropie S** = S(Q, T, p, V)

$$= k \ln(w) \quad (k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K, Boltzmann } \sim 1889)$$

w = Wahrscheinlichkeit des physikalischen Zustands

$$w \ll 1$$

### Informationstheorie

**Information:** Kenntnis, die die Ungewißheit über das Eintreten eines bestimmten Ereignisses, aus einer Menge von möglichen Ereignissen, verringert oder beseitigt.

**Entropie H:** Erwartungswert des Informationsgehalts (quantitatives Maß für Information,  $-\log p(x) = -\log w$ ) der Ereignisse, die einander zugleich ausschließen und ergänzen.

$$H = \sum_{i=1}^n p(x_i) \log(1/p(x_i)) = -\sum_{i=1}^n p(x_i) \log(p(x_i))$$

### 2. Heisenbergs Unschärferelation:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq h/2\pi$$

Planck-Konstante

$$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js (Wirkung)}$$

Beschränkung des Wissens über (konjugierte) Zustandsgrößen eines Objekts, z.B

- Ort x und Impuls  $p = mv$
- Energie E und Zeit t

**Quellen:**

- [1] Peeter Saari: Superluminal Localized Waves of Electromagnetic Field in Vacuo.  
arXiv:physics/0103054 v1 19 Mar 2001 (Tartu)
- [2] G. Nimtz and A. Haibel: Basics of Superluminal Signals. Ann. Phys. (Leipzig) 9  
(2000) 1, 1 -5 arXiv:physics/0104063 v1 20 Apr 2001 (Köln)
- [3] M. Green: Superstrings. Spektrum der Wissenschaft November 1986 S. 54ff
- [4] B. Green: Das elegante Universum. BvT, Berlin. 2002