

# 11. Grenzen der Speziellen Relativitätstheorie

---

Wie bereits ausführlich dargestellt wurde, gibt es eine beeindruckende Anzahl von Beispielen, die die Gültigkeit der Speziellen Relativitätstheorie stützen. Es handelt sich hierbei u. a. um kinematische Betrachtungen zwischen bewegten Beobachtern, außerdem um die Vorgänge beim Uhrentransport sowie um die Relationen für Masse, Impuls, Kraft, Energie und um die Verhältnisse bei Stoßprozessen oder relativistischer Betrachtung des Raketenantriebs. Für eine Vielzahl von Konfigurationen wurde gezeigt, dass bei Verwendung der Lorentz-Transformation keine Unterschiede für einen absolut ruhenden oder einen bewegten Beobachter vorliegen und es keine Möglichkeit gibt innerhalb eines Systems auf einen Ruhezustand zu schließen. Hierdurch sind gemäß dem zentralen Postulat der Speziellen Relativitätstheorie alle Beobachter als gleichwertig zu betrachten und die Theorie wäre daher als gültig anzusehen.

Alle bisher diskutierten Beispiele haben gemeinsam, dass die Übertragung von Signalen mit Lichtimpulsen erfolgt. Treten dagegen Überlichtgeschwindigkeiten auf, wie sie z. B. beim Tunneleffekt gemessen wurden, so wird hier gezeigt, dass – sofern sich hierbei auch Informationen überlichtschnell übertragen lassen – die auftretenden Effekte mit der Speziellen Relativitätstheorie nicht in Übereinstimmung gebracht werden können. Abschließend wird noch der Sachverhalt bezüglich der Synchronisation nach Beschleunigungen betrachtet, der ebenfalls Ansätze zu Widersprüchen beinhaltet.

## 11.1 Überlichtgeschwindigkeit beim Tunneleffekt und seine Bedeutung

Optische Untersuchungen an Prismen werden schon seit langer Zeit durchgeführt. So haben Newton, Huygens und viele andere Wissenschaftler die grundlegenden Zusammenhänge erforscht.

Mit der Entwicklung moderner Untersuchungsmethoden rückten dann quantenmechanische Effekte in den Fokus. Von Fritz Goos (1883-1968) und Hilda Hänchen (1919-2013) wurde entdeckt, dass eine linear polarisierte Welle (z. B. Licht) beim Übergang von einem optisch dichten in ein optisch dünneres Medium nicht an der Grenzfläche, sondern in einer dazu parallelen virtuellen Ebene im optisch dünneren Medium reflektiert wird. Der Effekt ist nur mit einem quantenmechanischen Ansatz zu deuten und kann mit Standardmethoden

nicht erklärt werden. Die Arbeiten fanden während des 2. Weltkriegs in Berlin statt und konnten teilweise erst 1947 veröffentlicht werden [60,61].

Weitere Untersuchungen ergaben, dass an optischen Grenzflächen Tunneleffekte auftreten, bei denen die Durchlaufzeiten unabhängig von deren Dicke sind [62] was zu intensiven Diskussionen über das Auftreten von Überlichtgeschwindigkeiten führte.

### 11.1.1 Der Tunneleffekt

Tunneleffekte und die damit verbundenen Messungen der Geschwindigkeiten beim Passieren einer Grenzfläche sind bereits Gegenstand zahlreicher Untersuchungen gewesen. Ein Überblick über die verschiedenen Versuche mit Prismen oder anderen Objekten, durchgeführt bei unterschiedlichen Frequenzbereichen wurde z. B. von H. G. Winful umfassend zusammengestellt [63].

Aus der Vielzahl der Möglichkeiten sollen hier beispielhaft Messungen mit Doppelprismen beschrieben werden. Ein hierzu typischer Versuchsaufbau lässt sich in folgender Weise darstellen (vgl. Abb. 11.1).

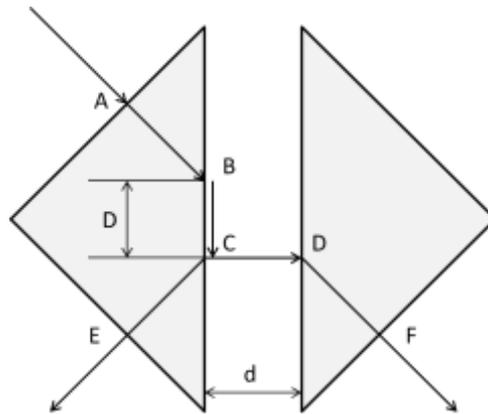


Abb. 11.1: Versuchsaufbau zur Messung eines Tunneleffekts (nach [64])

Eine elektromagnetische Welle trifft an der Stelle A auf ein Prisma und tritt in den Körper ein. Bei geeignetem Winkel (siehe hierzu z. B. [64]) wird die Welle am Punkt B reflektiert. Ist ein zweites gleichartiges Prisma gegenüber angeordnet, so wird ein (nur quantenmechanisch erklärbarer) Tunneleffekt auftreten. Dabei werden die Strecken  $\overline{BC}$  sowie  $\overline{CD}$  ohne Zeitverlust durchlaufen. Der größte Teil der Welle wird bei E austreten, ein kleiner Anteil am Punkt F. Der Austritt erfolgt dabei zu exakt der gleichen Zeit. Bei Versuchen dieser Art können auch größere Dimensionen untersucht werden, allerdings ist die Intensität des Strahls auf dem Weg  $\overline{DF}$  stark abhängig vom Abstand  $d$  der Prismen. Versuchsaufbauten mit  $d = 280$  mm konnten bereits realisiert und die entsprechenden Effekte gemessen werden. Bezüglich der Vielzahl der hier möglichen Versuche sei für weitere Details auf Übersichtsarbeiten verwiesen [63,64].

Es besteht derzeit keine Einigkeit über die Interpretation dieser Ergebnisse. Häufig wird argumentiert, dass zwar tatsächlich Überlichtgeschwindigkeiten vorliegen, dass aber in diesen Fällen keine Informationen schneller als das Licht transportiert werden. Dies wird damit begründet, dass es sich bei den Ergebnissen der Messungen nicht um die

### 11.1 Überlichtgeschwindigkeit beim Tunneleffekt und seine Bedeutung

Geschwindigkeiten eines Impulses, sondern der Gruppengeschwindigkeit handelt. Da komplexe Informationen (z. B. Sprache) nur als Wellenpaket transportierbar sind würden sich diese maximal mit Lichtgeschwindigkeit bewegen. Wegen der Bedeutung dieses Arguments sollen vor einer abschließenden Bewertung im Folgenden zunächst diese Zusammenhänge genau beschrieben werden.

Um den Effekt der Gruppengeschwindigkeit auf einfache Weise zu verstehen, gibt es in der Literatur verschiedene bildhafte Vergleiche, z. B. im Verhalten zwischen Mücke und Elefant, das Ergebnis eines Schildkrötenrennens oder für die Betrachtung eines langen Zugs [63,65]. Letzteres Beispiel ist besonders geeignet und soll im Folgenden kurz dargestellt werden:

Ein Zug benötigt für die Zurücklegung einer Strecke zwischen 2 Zielen eine definierte Zeit. Ist dieser Zug aber sehr lang, so ist eine einfache Angabe nicht mehr ausreichend, sondern es ergeben sich Unterschiede zwischen den Ankunftszeiten der Lokomotive, der Mitte des Zugs und des letzten Wagens. Fährt danach ein gleich langer Zug mit gleicher Geschwindigkeit die gleiche Strecke und werden bei diesem unterwegs einzelne Wagen abgehängt so treffen Mitte und Ende, die sich dann nach vorn verlagert haben, früher ein als beim Beispiel zuvor. Die Lokomotiven sind jedoch unabhängig davon gleichzeitig da. Folgt man diesem Beispiel dann ist die Geschwindigkeit der Mitte des Zuges (die Gruppengeschwindigkeit) größer als die Geschwindigkeit der Lokomotive.

Übertragen auf das hier vorliegende Beispiel ergibt sich damit, dass die getunnelte Welle keiner gleichmäßigen Dämpfung unterliegt, sondern dass gezielt das Ende des Wellenpakets gekürzt wird. Damit breitet sich zwar das beobachtete Wellenpaket schneller als das Licht aus, der Beginn der Wellenfront ist aber trotzdem nicht überlichtschnell und somit tritt keine Verletzung des Relativitätsprinzips auf.

Von den Autoren, die sich mit dem Thema Überlichtgeschwindigkeiten bei Prismen und anderen Optiken befasst haben, werden stark unterschiedliche Interpretationen vorgenommen. Neben dem bereits beschriebenen Argument der Gruppengeschwindigkeit reicht dies von der völligen Ablehnung aufgrund von Fehlinterpretation [63], vermuteten Kontaminationseffekten, wenn sinnvolle Signalübertragung erwünscht ist, mit erforderlicher unendlicher Größe der eingesetzten Prismen [66] oder das Ergebnis dazu bleibt offen [67,68]. Es wird jedoch auch heute noch von einigen Autoren die Ansicht vertreten, dass in diesen Fällen eine Informationsübertragung überlichtschnell erfolgt [65,69]. Dies wird hauptsächlich damit begründet, dass die getunnelte Welle nach einer Verstärkung die gleiche Form hat wie die reflektierte Welle und keine Verkürzung aufweist wie aus dem dargestellten Beispiel zu folgern wäre.

Für einen eindeutigen Versuch würde es nicht auf komplexe Informationen ankommen, sondern es genügt hierfür ein einziger Impuls (vgl. Morsealphabet). Daher erscheint die These, dass Messungen aufgrund einer nicht durchführbaren Informationsübertragung unmöglich sind nicht stichhaltig zu sein. Wenn aber tatsächlich eine Impulsübertragung mit Überlichtgeschwindigkeit gemessen werden könnte, so ergeben sich weitreichende Konsequenzen, die im Folgenden diskutiert werden sollen.

### 11.1.2 Bedeutung von Überlichtgeschwindigkeiten für die Spezielle Relativitätstheorie

Während bisher alle Betrachtungen zu der Erkenntnis geführt haben, dass Beobachter beim Austausch von Signalen in einem ruhenden und einem bewegten System zu den gleichen Messergebnissen kommen, so ist dies beim Vorhandensein eines Informationsaustauschs mit Überlichtgeschwindigkeit nicht mehr der Fall. Dies kann aus der folgenden Darstellung (Abb. 11.2) entnommen werden.

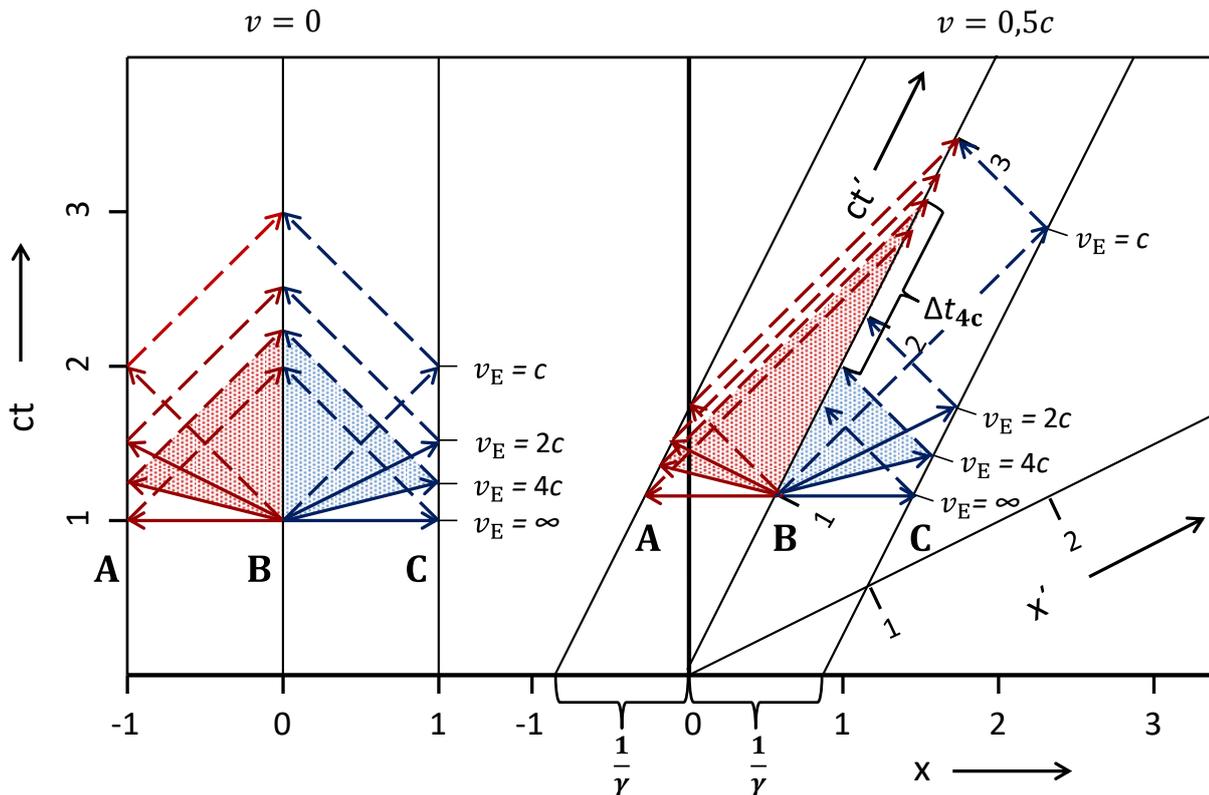


Abb. 11.2: Unterschiede zwischen einem System absoluter Ruhe und einem bewegten System bei einer Signalübertragung mit Überlichtgeschwindigkeit

Auf der linken Seite ist wie üblich das System absoluter Ruhe dargestellt. Eine Signalübertragung erfolgt nun mit Überlichtgeschwindigkeit  $v_E$  vom Beobachter B zu den Stellen A und C. Beim Eintreffen wird jeweils ein Lichtsignal ( $v = c$ ) an B zurückgeschickt. Die Ankunft der beiden Signale erfolgt aus Symmetriegründen gleichzeitig.

Auf der rechten Seite ist der gleiche Sachverhalt für ein bewegtes System dargestellt. Durch das Vor- bzw. Nacheilen der Beobachter C und A kommt es dazu, dass das zurückgeschickte Lichtsignal zu unterschiedlichen Zeiten eintrifft. Die Zeitdifferenz hängt hierbei ab von der Größe der Übertragungsgeschwindigkeit (eingetragen sind Werte für  $v_E = 2c, 4c$  und  $\infty$ ) sowie von der Systemgeschwindigkeit  $v_S$  (hier Werte von  $v_S = 0$  und  $0,5c$ ). In diesem Diagramm ist zusätzlich die Zeitdifferenz  $\Delta t_{4c}$  eingetragen, die sich bei einer Überlichtgeschwindigkeit von  $v_E = 4c$  einstellen würde.

Die für die Überlichtgeschwindigkeit benötigte Zeit lässt sich mit Hilfe einfacher geometrischer Beziehungen ableiten, die in Abb. 11.3 dargestellt sind.

## 11.1 Überlichtgeschwindigkeit beim Tunneleffekt und seine Bedeutung

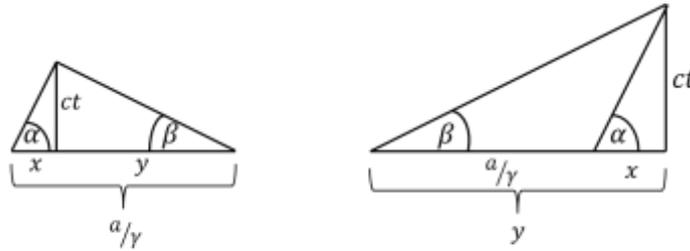


Abb. 11.3: Geometrische Beziehung der benutzten Größen am Beispiel für  $v_E = 2c$

Allgemein gilt

$$\tan\alpha = \frac{ct}{x} = \frac{c}{v_S} \quad \tan\beta = \frac{ct}{y} = \frac{c}{v_E} \quad \Rightarrow \quad xv_E = yv_S \quad (11.01)$$

Die Fälle für die Signalübertragung in Bewegungsrichtung und entgegengesetzt dazu müssen im Folgenden getrennt betrachtet werden. Es gilt dabei

*Signal entgegengesetzt zur  
Bewegungsrichtung*

$$\frac{a}{\gamma} = x + y$$

$$\Rightarrow xv_E = \frac{a}{\gamma}v_S - xv_S$$

$$t_1 = \frac{a}{\gamma(v_E + v_S)}$$

*Signal in  
Bewegungsrichtung*

$$\frac{a}{\gamma} = y - x$$

$$\Rightarrow xv_E = \frac{a}{\gamma}v_S + xv_S \quad (11.03)$$

$$t_3 = \frac{a}{\gamma(v_E - v_S)} \quad (11.04)$$

Um die Gesamtzeit für den Rückweg zu bestimmen, muss noch der Anteil für den Lichtimpuls hinzugefügt werden. Es ergibt sich für den Weg B→A→B:

$$t_T(C) = t_1 + t_2 = \frac{a}{\gamma(v_E + v_S)} + \frac{a}{\gamma(c - v_S)} \quad (11.05)$$

Für die Strecke B→C→B folgt

$$t_T(A) = t_3 + t_4 = \frac{a}{\gamma(v_E - v_S)} + \frac{a}{\gamma(c + v_S)} \quad (11.06)$$

Um den Einfluss der Signalgeschwindigkeit auf den Messeffekt zu ermitteln wird die Differenz betrachtet

$$t_T = t_T(C) - t_T(A) = \frac{a}{\gamma(v_E + v_S)} + \frac{a}{\gamma(c - v_S)} - \frac{a}{\gamma(v_E - v_S)} - \frac{a}{\gamma(c + v_S)} \quad (11.07)$$

und mit dem Messeffekt für  $v_E \rightarrow \infty$  ins Verhältnis gesetzt. Dies ergibt

$$t_D = \frac{t_T}{t_\infty} \quad (11.08)$$

In der Abb. 11.4 sind die Ergebnisse für unterschiedliche Signal- und Systemgeschwindigkeiten aufgetragen. Generell ist festzustellen, dass die Systemgeschwindigkeit erst bei sehr hohen Werten einen nennenswerten Einfluss auf das Messergebnis hat. Des Weiteren

## 11. Grenzen der Speziellen Relativitätstheorie

ist zu erkennen, dass die Signalgeschwindigkeit bereits bei  $v_E = 2c$  Werte erreicht, die der Hälfte des für  $v_E \rightarrow \infty$  erzielbaren Wertes entsprechen. Es ist also keineswegs nötig extrem hohe Signalgeschwindigkeiten vorauszusetzen da die Sensitivität der Messungen sehr stark ist.

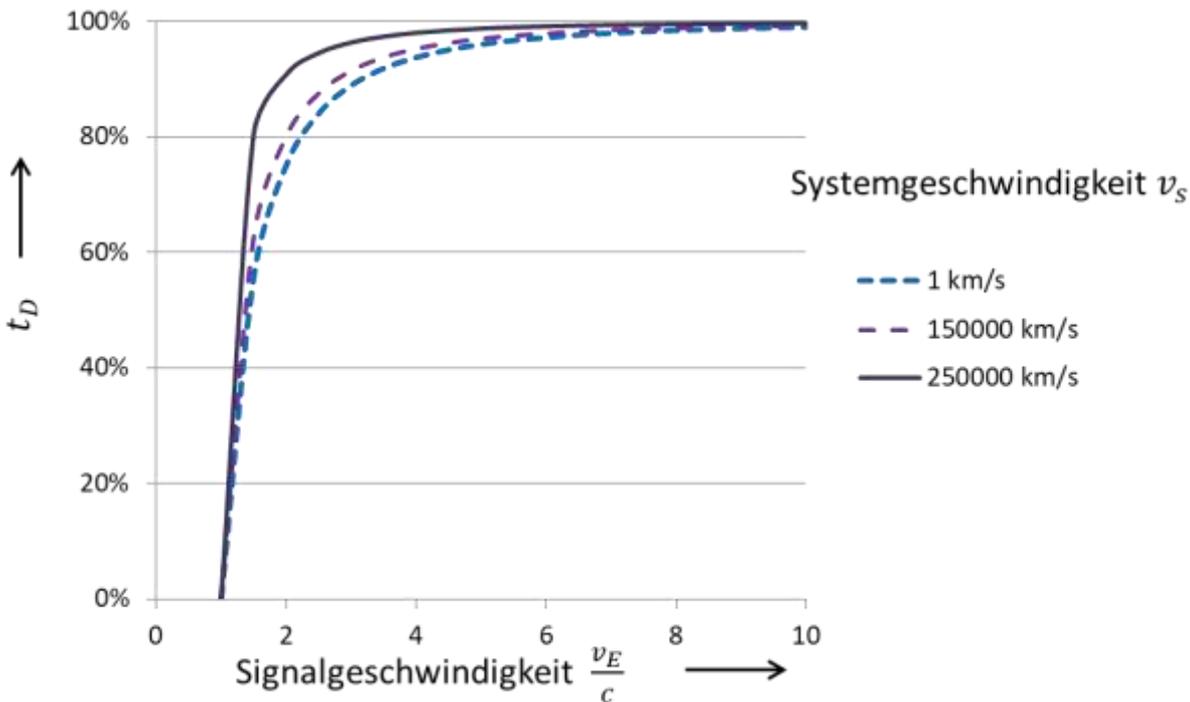


Abb. 11.4: Abhängigkeit der Größe des zu erwartenden Messeffektes  $t_D$  von der Signalgeschwindigkeit  $v_E$  und Systemgeschwindigkeit  $v_s$

In weiteren Überlegungen zum Auftreten von Überlichtgeschwindigkeiten wird angeführt, dass hiermit das Kausalitätsprinzip verletzt wird [63]. Es gibt zu diesem Thema aber auch Darstellungen, dass dies nicht der Fall ist [64,65].

Prinzipiell würde die Verletzung des Kausalprinzips bedeuten, dass ein zurückkommen- des Signal vor dessen Ausgang eintrifft. Dies würde aber einen negativen Zeitverlauf bedeuten, für den es experimentell keine Beweise gibt. Es ist aber klar, dass innerhalb eines Systems mit hoher Geschwindigkeit (z. B. dargestellt in Abb. 10.2, rechte Seite) das eingehende Signal vor der Zeit eintrifft, die aufgrund einer zuvor durchgeführten Synchronisation zu erwarten ist. Hiermit ist jedoch keine Verletzung des Kausalitätsprinzips verbunden, da das Signal zwar je nach Geschwindigkeit schneller (oder wenn der Signalverlauf umgekehrt ist, langsamer) zurückkommt als erwartet, aber niemals vor dessen Ausgang.

Abschließend ist festzuhalten, dass es bei der Überschreitung der Lichtgeschwindigkeit für eine Signalübertragung zu nicht auflösbaren Konflikten mit dem Relativitätsprinzip kommt. Es wären Unterschiede bei den Messeffekten zwischen Systemen feststellbar, die sich mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten bewegen. Ein eindeutiger Beweis für einen Effekt dieser Art wäre der eindeutige Nachweis, dass es einen Zustand absoluter Ruhe geben muss. In Kap. 13.1 werden die Größen der möglicherweise auftretenden Effekte und ein denkbarer Klärungsversuch diskutiert.

## 11.2 Synchronisation nach Beschleunigungen

Wie bereits ausgeführt, kann die Einweglichtgeschwindigkeit in einem bewegten System nicht direkt gemessen werden. Hierzu wurden vielfach Überlegungen angestellt; eine davon ist der „langsame Uhrentransport“. Die prinzipielle Idee hierbei ist, dass in einem bewegten Labor eine Uhr aus einem Ende (z. B. den hinteren Bereich) langsam in den vorderen Teil transportiert und dort mit einer vorhandenen und zuvor synchronisierten Uhr verglichen wird. Es wurde jedoch bereits gezeigt, dass bei einem solchen Transport, egal wie langsam er abläuft, die Synchronisation bestehen bleibt und ein Nullresultat entsteht (vgl. Kap. 5).

Eine andere, zunächst von E. Dewan und M. Beran [70], später ausführlich von J. S. Bell [71] sowie D. J. Miller [72] und F. Fernflores [73] betrachtete Möglichkeit ist die indirekte Bestimmung in Systemen vor und nach einer Beschleunigung. Hierbei werden mehrere Beobachter, deren Uhren zuvor synchronisiert wurden, gleichförmig in der Weise beschleunigt, dass sie jeweils vorher und nachher die gleichen Geschwindigkeiten aufweisen. Es wird hierbei die Forderung gestellt, dass die Beschleunigungsphase exakt gleich abläuft, weitere Voraussetzungen sind nicht erforderlich.

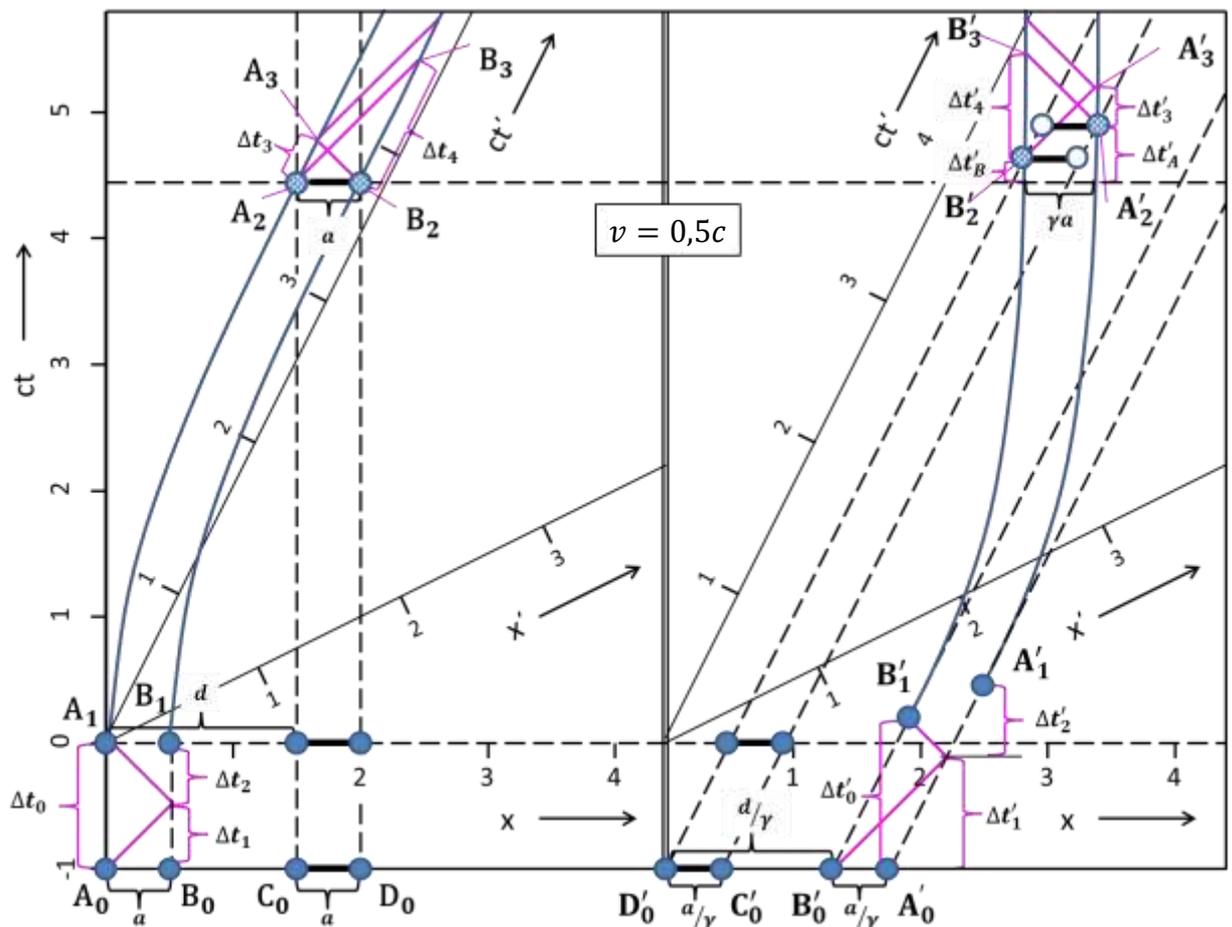


Abb. 11.5: Signalaustausch vor und nach Beschleunigung (Beispiel für  $v = 0,5c$ )  
 a) Links: Vom ruhenden ins bewegte System  
 b) Rechts: Vom bewegten ins ruhende System

## 11. Grenzen der Speziellen Relativitätstheorie

Zunächst wird hierbei der Fall betrachtet, dass die Beobachter in Bewegungsrichtung angeordnet sind. Die dabei entstehende Situation ist in Abb. 11.5 zusammengestellt. Die linke Seite zeigt den Fall, dass aus einem ruhenden System die Versuchsteilnehmer A und B ihre Uhren synchronisieren und dann zum gleichen Zeitpunkt mit der Beschleunigung beginnen. Hierzu wurde vereinbart, dass A beim Eintreffen des Signals von B startet, B hingegen hat die Startzeit berechnet und startet bei  $\Delta t_2$  nach dem Eintreffen des Signals von A (vgl. Diagramm). Die Zeit  $\Delta t_2$  ist genau die Hälfte von  $\Delta t_0$ , die ein Signal von B nach A und zurück benötigt. Die Beschleunigung läuft so lange, bis sie die fest miteinander verbundenen Punkte C und D erreichen (A begegnet C; B trifft auf D). Zu diesem Zeitpunkt wird die Beschleunigung beendet und jeweils ein Signal ausgestrahlt.

A und B stellen nun fest, dass

1. der Abstand zwischen ihnen (subjektiv) auf  $\gamma a$  angewachsen ist,
2. die Zeiten  $\Delta t_3$  größer und  $\Delta t_4$  kleiner als  $\Delta t_2$  sind.

Der unter Punkt 1 dargestellte Sachverhalt wird auch als „Bell'sches Raketenparadoxon“ bezeichnet. Von Bell wurde hierzu angenommen, dass zwischen den Raketen ein Seil gespannt sei, das ebenfalls der Längenkontraktion unterworfen ist.

In einer weiteren Untersuchung wird ein bewegtes System unter den subjektiv für die Teilnehmer A bis D genau gleichen Bedingungen getestet (rechte Seite). Hierbei stellt ein ruhender Beobachter fest, dass  $\Delta t_1$  hier größer ist als im ruhenden System. Aus diesem Grunde wird A seine Beschleunigung später starten als B, da er  $\Delta t_2 = \Delta t_0/2$  nach dem Eintreffen des Signals von B beginnt. Daher wird A den Teilnehmer C später erreichen als B den Teilnehmer D. Nach Beendigung des Versuchs werden erneut Abstand und Zeiten gemessen und es wird festgestellt, dass exakt die gleichen Ergebnisse wie zuvor erzielt worden sind. Im Folgenden sind im Detail die Berechnungen für die Zeit- und Ortskoordinaten dargestellt.

### a) Vom ruhenden in ein bewegtes System

Hier ist die Ableitung einfach. Aufgrund der parallel verlaufenden Beschleunigungskurven bleibt (aus Sicht des ruhenden Beobachters) der Abstand  $a$  auch im bewegten System erhalten. Darüber hinaus gilt

$$\Delta t_0 = \frac{2a}{c} \quad (11.11)$$

$$\Delta t_1 = \Delta t_2 = \frac{a}{c} \quad (11.12)$$

$$\Delta t_3 = \frac{a}{c \left(1 - \frac{v}{c}\right)} \quad (11.13)$$

$$\Delta t_4 = \frac{a}{c \left(1 + \frac{v}{c}\right)} \quad (11.14)$$

### b) Vom bewegten ins ruhende System

Hier sind einige Zwischenrechnungen erforderlich.

## 11.2 Synchronisation nach Beschleunigungen

$$\Delta t'_0 = \frac{2a\gamma}{c} \quad (11.15)$$

$$\Delta t'_1 = \frac{a}{c\gamma\left(1 - \frac{v}{c}\right)} = \frac{a\gamma}{c}\left(1 + \frac{v}{c}\right) \quad (11.16)$$

$$\Delta t'_2 = \frac{a\gamma}{c} \quad (11.17)$$

$$\Delta t'_B = \Delta t'_0 - \Delta t_0 + t_2 = \frac{2a}{c}(\gamma - 1) + t_2 \quad (11.18)$$

$$\Delta t'_A = \Delta t'_1 + \Delta t'_2 - \Delta t_0 + t_2 = \frac{a}{c}\left(2\gamma + \gamma\frac{v}{c} - 2\right) + t_2 \quad (11.19)$$

$$x(B'_2) = \Delta t'_B \cdot v = \left(\frac{2a}{c}(\gamma - 1) + t_2\right)v \quad (11.20)$$

$$x(A'_2) = \Delta t'_A \cdot v + \frac{a}{\gamma} = \left(\frac{a}{c}\left(2\gamma + \gamma\frac{v}{c} - 2\right) + t_2\right)v + \frac{a}{\gamma} \quad (11.21)$$

$$\begin{aligned} \Delta x\left(\frac{A'_2}{B'_2}\right) &= \left(\frac{a}{c}\left(2\gamma + \gamma\frac{v}{c} - 2\right) + t_2\right)v + \frac{a}{\gamma} - \left(\frac{2a}{c}(\gamma - 1) + t_2\right)v \\ &= \frac{av}{c}\gamma\frac{v}{c} + \frac{a}{\gamma} = a\gamma \end{aligned} \quad (11.22)$$

$$\Delta t'_3 = \frac{a\gamma}{c} + \Delta t'_B - \Delta t'_A = \frac{a}{\gamma c\left(1 - \frac{v}{c}\right)} = \frac{1}{\gamma}\Delta t_3 \quad (11.23)$$

$$\Delta t'_4 = \frac{a\gamma}{c} + \Delta t'_A - \Delta t'_B = \frac{a}{\gamma c\left(1 + \frac{v}{c}\right)} = \frac{1}{\gamma}\Delta t_4 \quad (11.24)$$

Aus diesen Berechnungen folgt, dass  $a$ ,  $\Delta t_3$  und  $\Delta t_4$  im ruhenden und bewegten System durch  $\gamma$  gekoppelt sind und es subjektiv für die Beobachter A und B nach Beendigung nicht unterscheidbar ist, ob sie ihren Standort vom ruhenden ins bewegte System verändert haben oder umgekehrt.

Bezüglich des Verhaltens eines „Bell’schen“ Seils, das zwischen beiden Raketen gespannt wird, ist hier aber zunächst ein Unterschied zu den Bedingungen zwischen den Betrachtungen von a) und b) festzustellen. Während bei a) der Abstand und damit die Belastung des Seils zwischen den Versuchsteilnehmern kontinuierlich steigt, tritt bei b) zu Beginn eine starke Veränderung auf. Diese ist darauf zurückzuführen, dass Versuchsteilnehmer B vor A mit der Beschleunigung beginnt und damit ungleichmäßige Belastungen auftreten. Dieser Unterschied ist jedoch nur scheinbar, da das Seil nicht als unendlich starrer Körper aufgefasst werden darf. Vergleichbar mit der Situation bei der Ansteuerung von Aggregaten nach einer Synchronisation (Kap.4.4) wird sich die Beanspruchung des Seils mit beliebiger Unterlichtgeschwindigkeit im Seil fortpflanzen und damit heben sich alle Unterschiede auf.

Die Gültigkeit dieser Behauptung soll im Folgenden an einem einfachen Beispiel gezeigt werden. Für den Beginn des Versuchs gilt im Fall absoluter Ruhe, dass beide Raketen zur gleichen Zeit starten. Wenn nun keine völlige Starrheit des Körpers unterstellt wird, sondern eine Kraftübertragung mit einer beliebigen Geschwindigkeit, so folgt zwangsläufig,

## 11. Grenzen der Speziellen Relativitätstheorie

dass sich beim nachlaufenden Körper eine Schlaufe bilden muss, die eine quantitative Auswertung außerordentlich erschwert. Um dies zu vermeiden, wird in einem stark vereinfachten Modell angenommen, dass

1. die Kraft nicht nur durch Zug (von B, vgl. Abb. 11.5) sondern auch durch Druck (von A) in einen Stab (kein Seil) eingeleitet wird,
2. eine Ausknickung des Stabs nicht auftritt.

Für den Fall des Starts bei absoluter Ruhe ergibt sich aus Symmetriegründen sofort, dass bei beliebiger Geschwindigkeit der Kraftübertragung im Stab die Mitte gleichzeitig von Zug- und Druckkomponenten erreicht wird. Im bewegten System gelten die bereits in Kap. 4.3 und 4.4 dargestellten Bedingungen. Die relativistische Geschwindigkeitsaddition führt in Zusammenhang mit der Synchronisationsdifferenz ebenfalls zum Effekt, dass beide Komponenten gleichzeitig in der Mitte eintreffen. Es treten also subjektiv bei den Versuchsteilnehmern keine Unterschiede auf.

In der Literatur gibt es unterschiedliche Auffassungen darüber, ob das Seil nach der Beschleunigung einer Spannung ausgesetzt ist oder nicht, oder einfacher gesagt, ob es reißt oder hält (Der Betrachtung liegt an dieser Stelle selbstverständlich die Annahme zugrunde, dass das Seil als annähernd masselos angenommen wird und keine Rückwirkung auf die Positionierung der Raketen hat). Nach den hier vorgenommenen Berechnungen ist von einer Belastung auszugehen, d. h. es reißt. Dies ergibt sich einfach aus der Überlegung, dass die Beschleunigungsphasen für die einzelnen Raketen auch jeweils separat durchgeführt und beobachtet werden können und dann, weil die Raketen unabhängig voneinander agieren, die gleichen Ergebnisse liefern müssen.

Abschließend soll hier noch der Fall betrachtet werden, dass die Beobachter nicht in Beschleunigungsrichtung angeordnet sind, sondern senkrecht dazu. In einem solchen Fall tritt der einfache Fall ein, dass bei einem Signalaustausch nach einer Beschleunigung der Weg des Signals um den Faktor  $\gamma$  länger ist als im Ruhezustand. Dieser Effekt wird jedoch subjektiv genau kompensiert durch die langsamer ablaufende Zeit im bewegten System.

Zusammenfassend lassen sich hier zwei Punkte festhalten. Einerseits treten bei den gewählten Versuchsbedingungen zwischen zwei voneinander unabhängig, aber vollständig gleichförmig beschleunigten Beobachtern Spannungen auf, die Gegenstand von Messungen sein könnten. Es sind hier also Unterschiede bei Messergebnissen zu erwarten, je nachdem ob ein Körper als punktförmig oder räumlich ausgedehnt betrachtet wird. Zum Zweiten zeigen die Berechnungen, dass es im Fall von hintereinander angeordneten synchronisierten Uhren nach einer Beschleunigung zu Synchronisationsdifferenzen kommen muss; dies gilt sowohl für unabhängige Beobachter wie im vorliegenden Beispiel aber auch innerhalb eines geschlossenen räumlich ausgedehnten Körpers. Bei nebeneinander angeordneten Uhren treten diese Effekte dagegen nicht auf. Dies wird wegen der „Relativität der Gleichzeitigkeit“ durch die Spezielle Relativitätstheorie gefordert und stellt daher einen grundlegenden Test dar. Details dazu werden in Kap. 13.2 diskutiert.