

14. Abschließende Bewertung der SRT

Zum Abschluss der dargestellten Untersuchungen werden in kurzer Form die verschiedenen in der Literatur verfügbaren Präsentationen der Speziellen Relativitätstheorie (SRT) diskutiert und bewertet. Dazu werden zunächst die Angaben für das „Relativitätsprinzip“ und die „Konstanz der Lichtgeschwindigkeit“ auf ihre Formulierung untersucht. Um die auftretende Bandbreite abzubilden, wurden die möglichen Darstellungen in „Objektives Beobachungskriterium“ und „Axiom“ aufgeteilt. Bei den neueren Publikationen wird meistens der axiomatische Ansatz gewählt. Die früheren Ansätze, z. B. von Einstein, sind dagegen einer objektiven Betrachtungsweise zuzuordnen.

Die heute übliche Interpretation der SRT beinhaltet den Aspekt, dass es kein System absoluter Ruhe geben kann. Es werden die diesbezüglich in der Literatur verwendeten Argumentationsketten zitiert und bewertet. Es zeigt sich, dass keiner dieser Ansätze einen allgemein gültigen Beweis liefern kann.

Einstein hat zur Formulierung der SRT einen Top-down-Ansatz gewählt. Dazu wurden Relativitätsprinzip und konstante Lichtgeschwindigkeit als Grundlagen definiert und daraus die Lorentz-Transformation und später auch der relativistische Massenanstieg abgeleitet. Es wird nunmehr hier mit der „erweiterten Lorentz-Theorie“ ein Bottom-up Konzept vorgestellt, bei dem sich dann das Relativitätsprinzip als Resultat ergibt; die Gültigkeit wurde anhand einer Vielzahl von Beispielen belegt.

Bei freier Wahl des Basis-Systems sind beide Ansätze vollständig äquivalent. Die Spezielle Relativitätstheorie hat jedoch den Nachteil, dass sie das Vorhandensein eines Systems absoluter Ruhe prinzipiell ausschließt, was aber beim erweiterten Lorentz-Ansatz durch einfache Wahl des Basissystems problemlos integrierbar ist. Aus heutiger Sicht erscheint es sinnvoll, das System zugrunde zu legen, welches die Basis für die gleichmäßige kosmischen Hintergrundstrahlung ist. Da bis heute aber kein experimenteller Nachweis gelungen ist, kann eine Entscheidung derzeit nicht getroffen werden. Es wurde im Rahmen dieser Ausarbeitung ein Vorschlag gemacht, wie ein Versuch ausgestaltet werden könnte, der eine eindeutige Entscheidung bezüglich der unterschiedlichen Ansätze ermöglicht (Kap.13.1).

14.1 Prinzipien der SRT und ihre Darstellung in der Literatur

Es ist überraschend, dass es bis heute keine einheitliche Formulierung der beiden zentralen Voraussetzungen „Relativitätsprinzip“ und „Konstanz der Lichtgeschwindigkeit“ gibt. Jeder

Autor einer Publikation über die SRT wählt hierzu seinen eigenen Ansatz (in Einzelfällen wird ganz auf eine Darstellung verzichtet und kommentarlos die Lorentz-Gleichungen benutzt [89]). Um die auftretende Bandbreite abzubilden, wurden die möglichen Darstellungen in „Objektives Beobachungskriterium“ und „Axiom“ aufgeteilt (Tab. 14.1). Bei neueren Publikationen wird eher (aber nicht ausschließlich) der axiomatische Ansatz gewählt.

Objektives Beobachungskriterium	Axiom der Relativitätstheorie
1. Die Durchführung von beliebigen physikalischen Versuchen führt in allen Inertialsystemen zu den gleichen Ergebnissen.	1. Relativitätsprinzip: Alle Inertialsysteme sind äquivalent.
2. Messungen der Lichtgeschwindigkeit in verschiedenen Raumrichtungen führen in allen Inertialsystemen zum gleichen Ergebnis.	2. Konstanz der Lichtgeschwindigkeit: Die Geschwindigkeit des Lichts in verschiedenen Raumrichtungen ist in allen Inertialsystemen gleich.

Tab. 14.1: Derzeit übliche Darstellungen der Grundlagen der Speziellen Relativitätstheorie

Um die Unterschiede zu zeigen seien einzelne Beispiele aufgeführt. Das Relativitätsprinzip wird in seiner ursprünglichen Form von Einstein folgendermaßen definiert [12]:

„Relativitätsprinzip: Die Gesetze, nach denen sich die Zustände der physikalischen Systeme ändern, sind unabhängig davon, auf welches von zwei relativ zueinander in gleichförmiger Translationsbewegung befindlichen Koordinatensystemen diese Zustandsänderungen bezogen werden.“

Hierbei handelt es sich also um eine Formulierung, die einem objektiven Beobachungskriterium zuzuordnen ist. Einige andere Autoren nutzen ebenfalls den Verweis auf Messungen, wobei die Darstellung auch völlig anders erfolgen kann [27]:

„Postulat I: Es ist unmöglich, die nicht beschleunigte Translationsbewegung eines Systems durch den leeren Raum oder bei der Durchdringung eines angenommenen beliebigen Äther-ähnlichen Mediums zu messen oder zu detektieren.“

Anders ist dies bei der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit. Hier gibt es nur wenige Fälle mit dem Verweis auf Messungen, wie z. B. Born mit folgender Formulierung [26]:

„Das Prinzip von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit: In allen Inertialsystemen hat die Lichtgeschwindigkeit, mit physikalisch gleichartigen Stäben und Uhren gemessen, denselben Wert.“

In nahezu allen anderen Fällen wird der Bezug zu Messmethoden nicht erwähnt und es wird die Form als Axiom genutzt. Einstein selbst nutzte eine kompliziertere Darstellung, die zwar ein Messverfahren beschreibt, aber eine eindeutige Zuordnung erschwert [12]:

„Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit: Jeder Lichtstrahl bewegt sich im „ruhenden“ Koordinatensystem mit einer bestimmten Geschwindigkeit V , unabhängig

14. Abschließende Bewertung der SRT

davon, ob dieser Lichtstrahl von einem ruhenden oder bewegten Körper emittiert ist. Hierbei ist

$$\text{Geschwindigkeit} = \frac{\text{Lichtweg}}{\text{Zeitdauer}}$$

wobei „Zeitdauer“ im Sinne der Definition des § 1 aufzufassen ist.“

Vereinfacht lässt sich die Gesamtsituation so darstellen:

- Objektive Beobachtung: Es lässt sich kein Unterschied feststellen. Der Sachverhalt ist durch Versuche abgesichert.
- Axiom: Es gibt prinzipiell keinen Unterschied.

Die mit diesen Darstellungen verbundenen Interpretationen sind in der Folge bedeutsam und werden daher ausführlich bewertet. Dabei wird mit der Diskussion zur Konstanz der Lichtgeschwindigkeit begonnen.

14.2 Konstante Lichtgeschwindigkeit in allen Inertialsystemen

Zunächst sollen die Möglichkeiten zur Messung der Lichtgeschwindigkeit prinzipiell dargestellt und bewertet werden (Tab. 14.2). Es gibt grundsätzlich die Unterscheidung zwischen direkten und indirekten Verfahren. Während bei den direkten Verfahren ein konkreter Messwert anfällt, können mit den indirekten Verfahren nur eventuell vorhandene Unterschiede in verschiedenen Raumrichtungen festgestellt werden.

1. <u>Direkt</u> Nutzung von Zeitmessungen	2. <u>Indirekt</u> Schwingungsvergleich
1a) Messungen mit Lichtimpulsen Messen der Zeitdifferenz am Sender/Empfänger zwischen Aussenden und Empfang eines Signals (nach Reflektion am Spiegel).	2a) Frequenzmessungen Vergleich der Frequenz am Sender/Empfänger zwischen Ausgangs- und Eingangssignal (nach Reflektion am Spiegel).
1b) Messungen mit bewegten Uhren Zwei oder mehrere Uhren werden synchronisiert. Nach dem Transport an definierte Referenzpunkte werden Signale ausgetauscht und die Zeiten gemessen.	2b) Oszillationsmessungen Vergleich der Lichtsignale zwischen Sender und Referenzobjekt bezüglich Anzahl der Oszillationen auf dem Hin- und Rückweg (nach Reflektion am Spiegel).

Tab. 14.2: Möglichkeiten für Messungen der Lichtgeschwindigkeit

Bei den direkten Verfahren ist es wichtig, dass der Abstand zwischen dem Sender eines Lichtimpulses und dem Referenzobjekt genau bekannt ist. Dabei spielt es keine Rolle, ob das Referenzobjekt bezüglich des Senders bewegt ist oder nicht. Es gibt als erstes die Möglichkeit zur Messung der Zeitdifferenz zwischen Aussenden und Empfang eines Lichtsignals nach Reflexion an einem Spiegel (1a). Weiterhin können Uhren synchronisiert und an definierte Referenzpunkte gebracht werden, anschließend werden dann Signale ausgetauscht

und Messungen durchgeführt (1b). Der Nachteil dieses Verfahrens ist aber, dass bei der Auswertung berücksichtigt werden muss, dass die Uhren während der Bewegung einer Zeitdilatation unterliegen.

Bei den indirekten Verfahren können nur eventuell vorhandene Differenzen zwischen den Lichtgeschwindigkeiten in verschiedenen Raumrichtungen bestimmt werden. Die Entfernung zu einem Referenzobjekt kann dabei unbekannt sein, muss aber während der Messung konstant bleiben. Zunächst ist der Vergleich der Frequenzen zwischen ein- und ausgehenden Signalen möglich (2a). Des Weiteren wurden in der Vergangenheit vielfach Oszillationsmessungen durchgeführt, wobei die Anzahl der Oszillationen auf dem Hin- und Rückweg zu einem Spiegel verglichen wird (2b). Hierbei ist die Nutzung von Interferenzmessungen besonders geeignet, wie zum Beispiel beim Michelson-Morley-Versuch.

Die Verfahren wurden alle im Rahmen dieser Ausarbeitung untersucht, und zwar 1a) in Kap. 2, dann 1b) in Kap. 5 sowie 2a) und 2b) in Kap. 8. Wichtig für die Interpretation von Versuchen des Typs 2b) ist, dass hierbei die Phasengeschwindigkeit des Lichts zur Auswertung herangezogen werden muss. Dies wurde in der Vergangenheit nicht in ausreichender Weise durchgeführt, so dass bei einer Neu-Interpretation des Michelson-Morley- sowie des Kennedy Thorndike-Versuchs unter Berücksichtigung dieses Effekts neue und konsistente Ergebnisse sichtbar wurden. Wird dieser Effekt nicht berücksichtigt kommt es zu falschen Schlussfolgerungen.

Im Folgenden wird ein weiterer wichtiger Aspekt zum Thema Lichtgeschwindigkeit behandelt. Die Aussage: „Die Lichtgeschwindigkeit ist in allen Inertialsystemen gleich“ muss sorgfältig betrachtet und interpretiert werden. Gleiche Lichtgeschwindigkeit bedeutet:

In jedem Inertialsystem kann die Lichtgeschwindigkeit so gewählt werden, dass das eigene System als Basis dient. Alle Bedingungen der Relativitätstheorie gelten dann uneingeschränkt. Die folgende Beziehung wurde von Einstein für einen von ihm als „ruhend“ bezeichneten Ursprung, bezogen auf ein beliebig bewegtes anderes System definiert [12a]:

$$\frac{1}{2}(\tau_0 + \tau_2) = \tau_1 \quad (3.60)$$

Diese heute auch als der Einstein-Synchronisation bezeichnete Bedingung bedeutet, dass die Zeiten bei einem Signalaustausch zwischen zwei Punkten für Hin- und Rückweg genau zur Hälfte aufgeteilt sind (zu Details vgl. Kap. 3.4 und 12.2). Diese Aussage ist unabhängig davon, ob das Referenzobjekt bezüglich des Ursprungs ruht oder sich in Bewegung befindet. Zusammen mit der Aussage, dass die Lichtgeschwindigkeit in allen Richtungen konstant ist, müssen auch die Distanzen gleich sein.

Anders sieht die Sache aus, wenn das signalaussendende Objekt sich bewegt. Es sei der einfache Fall betrachtet, dass der Sender des Signals und das Referenzobjekt die gleiche Geschwindigkeit aufweisen. Auch hier ist es möglich, dass die Lichtgeschwindigkeit des Ursprungs als ruhend aufgefasst werden kann und die gleichen Bedingungen gelten wie bereits abgeleitet. Die gleiche Vorgehensweise ist für einen Signalaustausch ebenfalls für jedes beliebige andere System aus dessen subjektiver Sicht möglich.

Betrachten aber mehrere Versuchsteilnehmer aus verschiedenen gegeneinander bewegten Inertialsystemen das *gleiche* Ereignis, z. B. den Signalaustausch zwischen verschiedenen räumlich getrennten Punkten, so muss es zu unterschiedlichen Beobachtungen kommen.

14. Abschließende Bewertung der SRT

Wird für Messungen jeweils die Lichtgeschwindigkeit des eigenen Systems zugrunde gelegt und werden die für den Signalaustausch erforderlichen Zeiten und Distanzen für Hin- und Rückweg ermittelt, so kommen sie zu unterschiedlichen Ergebnissen. Weg und Zeit sind *nicht* symmetrisch aufgeteilt. Dieser Effekt wird durch die „Relativität der Gleichzeitigkeit“ verursacht.

Dieser Sachverhalt wurde bereits in Kap. 12.2 ausführlich dargestellt. An dieser Stelle soll zusätzlich gezeigt werden, dass die aus diesem Schaubild entnommenen Daten exakt den Ergebnissen der Lorentz-Transformation entsprechen. Dazu ist zunächst in Abb. 14.1 die linke Seite der Abb. 12.3 erneut dargestellt, die den korrekten Signalverlauf aus Sicht des bewegten Systems S zeigt.

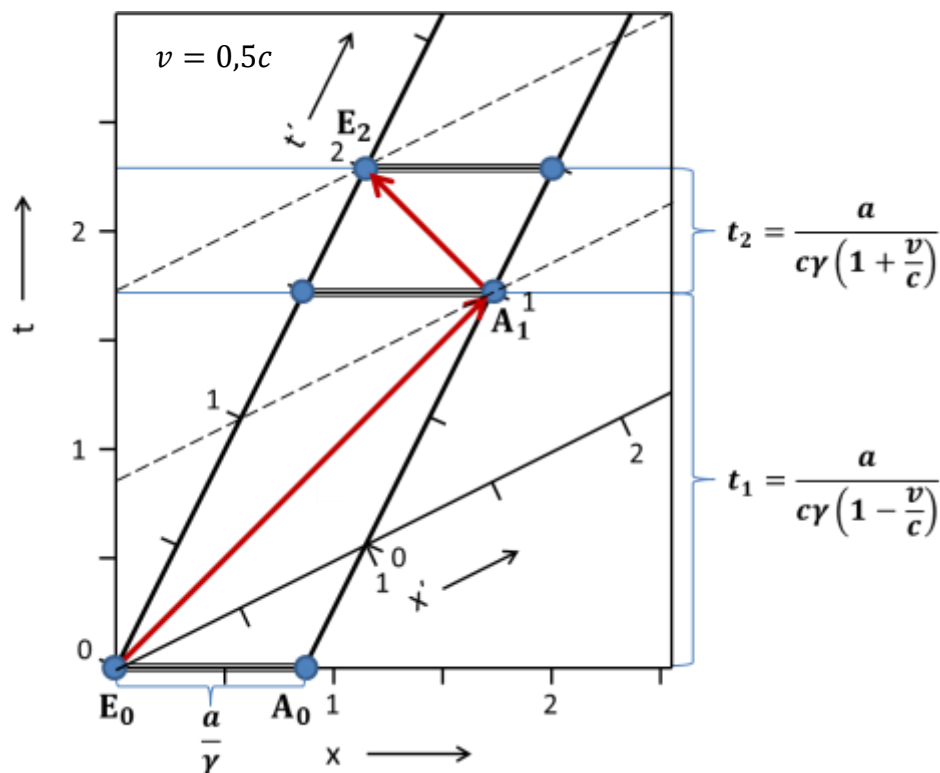


Abb. 14.1: Schematische Darstellung des Signalverlaufs in einem Labor L zwischen E und A aus Sicht eines relativ dazu bewegten Inertialsystems S ($v = 0.5c$)

	x	t	x'	t'
E_0	0	0	0	0
A_1	1,73205081	1,73205081	1	1
E_2	1,15470054	2,30940108	0	2

Tab. 14.3: Bestimmung der Koordinaten von E_0 , A_1 und E_2 aus Abb. 14.1
Die Werte von x' und t' wurden mit den Lorentz-Gleichungen berechnet.

In Tab. 14.3 sind die aus Abb. 14.1 entnommenen Koordinaten für Weg und Zeit zusammengestellt. Dabei wurden die subjektiv für das bewegte System geltenden Werte unter Nutzung der Lorentz-Gleichungen berechnet. Es ist unmittelbar erkennbar, dass in dieser

normierten Darstellung der Wert der Lichtgeschwindigkeit in allen Fällen c ist; für das Referenzsystem ergibt sich dies sofort aus der Lage des Signalverlaufs im Diagramm (45° zu x und t), für x' und t' aus den Relationen zwischen Weg und Zeit.

Zusammenfassend gilt also folgendes: Wird das gleiche Ereignis aus verschiedenen Inertialsystemen heraus betrachtet, führt dies subjektiv zu der Situation, dass in allen Fällen die Definition der eigenen Lichtgeschwindigkeit als Grundlage möglich ist. Der Zusammenhang zwischen den Systemen ist gegeben durch die Lorentz-Gleichungen, außerdem gilt hier das Prinzip der Relativität der Gleichzeitigkeit.

14.3 Relativitätsprinzip

Zum besseren Verständnis für die Besonderheiten dieses Punktes ist es sinnvoll, zunächst die historische Entwicklung zu betrachten. Hierbei ist als Erstes die bis in 20. Jahrhundert andauernde Überzeugung zu erwähnen, dass das Licht wegen der im zugeschrieben Welleneigenschaften ein Trägermedium zur Ausbreitung benötigt, das als „Äther“ bezeichnet wurde. Dies war Jahrhunderte lang allgemeiner Konsens, wobei es jedoch große Unterschiede in der Auffassung über die Struktur dieses Äthers gab.

Bis zur Durchführung des Michelson-Morley Versuchs im Jahre 1887 bestand die Vorstellung, dass dieser Äther alles durchdringt und in seinen Eigenschaften Ähnlichkeiten mit Luft und hierin transportierten Schallwellen aufweist. Aus verschiedenen Versuchsergebnissen abgeleitet gab es aber unterschiedliche Auffassungen darüber, ob der Äther von Materie beeinflusst wird und vollständig, teilweise oder gar nicht mitgeführt wird. (Weitere Details sind einer Zusammenstellung im Kap. 1.3 zu entnehmen).

Es bestand aber allgemein die Auffassung, dass bei der Durchquerung des Äthers ein Effekt durch einen auftretenden „Ätherwind“ entstehen müsse. Auf Basis dieser Überlegungen wurde das Michelson-Morley-Experiment durchgeführt, das jedoch ein Nullresultat ergab. Dieses Ergebnis führte zu einer Vielzahl von Überlegungen, die aber über fast zwei Jahrzehnte hinweg keine verwertbaren Erkenntnisse brachten. Es wird berichtet, dass Lord Kelvin sich während des internationalen physikalischen Kongresses in Paris 1900 zum Thema „Äther“ geäußert hat. Er sagte damals: „The only cloud in the clear sky of the theory was the null result of the Michelson-Morley experiment“ [49h]. Er wie auch viele andere Physiker seiner Zeit waren der Meinung, dass das Experiment mit höherer Genauigkeit wiederholt werden sollte und dann das erwartet positive Ergebnis bringen würde; keiner dieser Versuche war jedoch erfolgreich.

Eine erste Lösung zeigte sich, als von Hendrik A. Lorentz die später nach ihm benannten Gleichungen entwickelt wurden, die eine widerspruchsfreie Berechnung der Zusammenhänge erlaubten. Kernpunkt war hierbei die Einführung von unterschiedlichen Ortszeiten und ein Effekt, der später von Einstein als „Relativität der Gleichzeitigkeit“ bezeichnet wurde. Wesentlich war bei der Entwicklung, dass diese Beziehungen einen ähnlichen Aufbau aufwiesen wie die zuvor entwickelten Maxwell-Gleichungen für den Elektromagnetismus. Lorentz war der Überzeugung, dass der weiterhin von ihm für erforderlich gehaltene Äther diese Eigenschaften aufweisen müsse.

Erst Einstein revolutionierte die Sicht auf dieses Problem, in dem er im Jahr 1905 zunächst zeigte, dass Lichtausbreitung kein Medium benötigt, sondern als Aussendung von

„diskontinuierlichen Energiequanten“ aufgefasst werden kann [48]. Bis dahin hatte es die Vorstellung von deren Existenz nicht gegeben, sondern es stand ausschließlich die Wellennatur des Lichts und damit verbunden die Existenz eines Transportmediums im Fokus. Mit diesem Ansatz konnte Einstein die Grundlagen der von ihm vorgelegten Theorie auf die beiden bereits dargestellten Prinzipien reduzieren. Der für die Physik heute selbstverständliche Dualismus zwischen Korpuskel und Welle war zu diesem Zeitpunkt noch nicht bekannt und wurde erstmals im Jahre 1924 von Louis de Broglie formuliert.

Das von Einstein formulierte Relativitätsprinzip erfordert ebenfalls eine genaue Interpretation. Zunächst kann dies in folgende Detailaussagen aufgeteilt werden:

- a) Werden von verschiedenen Beobachtern in zueinander gleichförmig bewegten Bezugssystemen identische Versuche durchgeführt, so führen diese zu den gleichen Ergebnissen.
- b) Ein Beobachter kann Messergebnisse von stattfindenden Versuchen in einem gleichförmig zu ihm bewegten Bezugssystem mit den von Lorentz formulierten Transformationsgleichungen und der relativistischen Massenzunahme widerspruchsfrei beschreiben. Insbesondere ist die Beobachtung der zeitlichen Abfolge von Ereignissen in allen Fällen gleich.
- c) Alle zueinander gleichförmig bewegten Systeme sind gleichwertig und es existiert kein absolutes „Ruhesystem“.

Die Aussage in Punkt a) kann abkürzend als „Identitätsprinzip“, in Punkt b) als „Äquivalenzprinzip“ und in Punkt c) als „Prinzip der völligen Gleichwertigkeit von Inertialsystemen“ bezeichnet werden. Während die Punkte a) und b) durch vielfache Versuchsergebnisse abgesichert sind, muss dies für den Punkt c) differenziert betrachtet werden. Dies soll im Folgenden durchgeführt werden. Aus der Literatur sind verschiedene Argumentationen bekannt, die die Aussage des Punktes c) stützen, und zwar:

1. Die Ergebnisse des Michelson-Morley-Versuchs zeigen, dass es kein System absoluter Ruhe geben kann.

Deutlich wird dies z.B. bei der Formulierung von Kneubühl [46c] mit der Bewertung des Michelson-Morley Experiments:

„Die Galilei-Transformation gilt nicht für das Licht! Das Konzept des „ruhenden“ Weltalls ist nicht haltbar.“

Während der erste Satz ohne Zweifel gültig ist (es gelten wie bekannt die Lorentz-Transformationen) kann daraus die Schlussfolgerung im zweiten Satz nicht abgeleitet werden. Wird das Prinzip der Konstanz der Phasengeschwindigkeit des Lichts zugrunde gelegt, ist die Integration eines Systems absoluter Ruhe ohne Widersprüche möglich, wie dies bereits in Kap. 8 ausführlich dargestellt wurde. Das Michelson-Morley-Experiment liefert daher entgegen der Auffassung des Autors keinen Beweis für diese These.

Es existiert darüber hinaus ein weiteres Argument:

2. Was nicht messbar ist, existiert auch nicht.

Diese Ansicht wird z. B. von Born [26c] vertreten. Die von ihm verwendete Formulierung lautet:

„Wenn von zwei relativ zueinander bewegten Beobachtern jeder das gleiche Recht hat zu sagen, er ruhe im Äther, so kann es keinen Äther geben.“

Der Ätherbegriff ist hier als Synonym für ein System absoluter Ruhe zu verstehen, dessen Existenz aufgrund der vorliegenden Erkenntnisse vollständig zurückgewiesen wird. Einstein selbst hat im Jahre 1920 zum Thema Äther und Relativitätstheorie in seiner Antrittsrede als Gastprofessor in Leiden folgendes gesagt (wobei es sich bei den von ihm angesprochenen Systemen K und K1 um unterschiedlich zueinander bewegte Inertialsysteme handelt) [86]:

„Es entsteht nun die bange Frage: Warum soll ich das System K, welchem die Systeme K1 physikalisch vollkommen gleichwertig sind, in der Theorie vor letzterem durch die Annahme auszeichnen, daß der Äther relativ zu ihm ruhe? Eine solche Asymmetrie des theoretischen Gebäudes, dem keine Asymmetrie des Systems der Erfahrungen entspricht, ist für den Theoretiker unerträglich. Es scheint mir die physikalische Gleichwertigkeit von K und K1 mit der Annahme, daß der Äther relativ zu K ruhe, relativ zu K1 aber bewegt sei, zwar nicht vom logischen Standpunkte geradezu unrichtig, aber doch unannehmbar.“

Der Ätherbegriff wird von ihm nicht vollständig abgelehnt. In seinen weiteren Ausführungen weist er sogar darauf hin, dass dieser für die Allgemeine Relativitätstheorie erforderlich ist; er spricht ihm aber ab die Eigenschaft ab, ein System absoluter Ruhe zu sein und ist hier der Meinung, dass der Äther für jedes Inertialsystem existieren muss.

Aus dieser Darstellung wird ein weiteres Argument erkennbar, dass sich folgendermaßen formulieren lässt:

3. Die Relativitätstheorie ist gemäß „Ockhams Prinzip“ der Äthertheorie vorzuziehen.

„Ockhams Prinzip“ ist die grundsätzliche Betrachtungsweise eines Problems und ist benannt nach William von Ockham (1287-1347) und betrifft das „Gesetz der Sparsamkeit“ („law of parsimony“). In Kurzform beschreibt dieses ein Problemlösungsverfahren, wonach beim Vorliegen von mehreren möglichen Erklärungen stets die einfachste Theorie allen anderen vorzuziehen ist. Die einfachste Theorie hat dabei die wenigsten Variablen und Hypothesen. Die Anwendung dieses Prinzips wird auch „Ockhams Rasiermesser“ genannt, weil es alles Überflüssige abschneidet und nur eine einzige hinreichende Erklärung zulässt.

Vergleicht man die Theorien auf dieser grundsätzlichen Basis miteinander, so enthält die Relativitätstheorie 2 Grundannahmen, die Äthertheorie benötigt dagegen mit der Voraussetzung eines absoluten Ruhezustands (der sich derzeit nicht experimentell nachweisen lässt) eine weitere. Gemäß dem allgemeinen Ansatz, dass eine Theorie auf möglichst wenigen Annahmen beruhen sollte, ist demnach die Spezielle Relativitätstheorie vorzuziehen.

Das Thema Äther versus Relativitätsprinzip war zum Anfang des 20. Jahrhunderts Gegenstand langer und kontroverser Diskussionen. Insbesondere wegen der hier dargestellten Überlegungen wurde die Kontroverse eindeutig zugunsten der speziellen Relativitätstheorie entschieden und es gab viele Jahrzehnte keine ernstzunehmenden Einwände dagegen.

Dies änderte sich erst in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts mit der Entdeckung der gleichmäßigen kosmischen Hintergrundstrahlung. Unser Sonnensystem bewegt sich mit

einer Geschwindigkeit von 369,1 km/s relativ hierzu. Dabei liegt der maximale Messfehler derzeit bei 0,9 km/s, d. h. weniger als 0,25%. Es wurden verschiedene Ansätze entwickelt, um dieses Messergebnis mit der Speziellen Relativitätstheorie in Einklang zu bringen. Diese waren jedoch alle mit der Überlegung verbunden, die „Relativität der Gleichzeitigkeit“ aufzuheben und auf dieser Basis einen absolut ruhenden Grundzustand einzuführen. Keiner der Ansätze war jedoch erfolgreich und es traten stets Widersprüche zu experimentellen Befunden auf. Kennzeichnend für alle formulierten Theorien war dabei, dass das einfache Konzept der unveränderlichen Phasengeschwindigkeit des Lichts keinen Eingang in die Überlegungen gefunden hatte und demzufolge die nachfolgenden Interpretationen nicht zielführend sein konnten.

Die Spezielle Relativitätstheorie sagt bisher nichts über die kosmische Hintergrundstrahlung aus. Wird dieses Phänomen mit betrachtet, so muss hierbei die Tatsache ergänzt werden, dass ein bisher nicht näher bestimmter Zusammenhang zur gleichmäßigen Ausrichtung dieser Strahlung geführt hat. Hierbei ist die Auffassung einer zufälligen Gegebenheit möglich; diese Theorie wird in z. B. von Johann Rafelski in „Relativity Matters“ (2017) vertreten. Dabei wird der kosmischen Hintergrundstrahlung der Status eines auftretenden „Leuchtfuers“ (‘beacon’) zugeschrieben, auf den man sich beziehen kann [93].

Werden nun die beiden in Konkurrenz stehenden Theorien erneut verglichen, so wird klar, dass Ockhams Prinzip hier wegen der gleichen Anzahl von grundlegenden Annahmen nicht mehr greifen kann, da die SRT durch das Auftreten der kosmischen Hintergrundstrahlung eine zusätzliche Hypothese benötigt. Dies ist bei der Äthertheorie nicht erforderlich. Es ist also auf Basis dieser Überlegungen keine Entscheidung möglich, welche der Theorien vorzuziehen ist. Klarheit könnte nur ein eindeutiger Versuch schaffen.

Wie bereits erwähnt, wurde in dieser Zusammenstellung der grundlegende Ansatz angewendet, dass alle Phänomene aus der Sicht eines ruhenden und eines bewegten Beobachters betrachtet werden. Keine der durchgeführten Berechnungen hat jedoch einen Unterschied gezeigt. Dabei handelt es sich um folgende Themen, zu denen das jeweils relevante Kapitel in dieser Ausarbeitung angegeben ist:

- Austausch von Signalimpulsen zwischen punktförmigen Körpern (2.1)
- Austausch von Signalimpulsen innerhalb von bewegten Körpern (2.2)
- Winkelbeziehungen beim Austausch von Signalimpulsen (2.3)
- Signalaustausch in beliebigen Raumrichtungen (2.4)
- Experimente mit Licht in transparenten bewegten Medien (4.2)
- Ansteuerung von Aggregaten nach Synchronisation (4.3)
- Signalaustausch zwischen räumlich ausgedehnten Körpern (4.4)
- Uhrentransport (5.1)
- Zwillingsparadoxon (5.2)
- Relativistische Massenzunahme und Energie (6.1)
- Federparadoxon (6.2)
- Relativistischer elastischer Stoß (6.3)
- Signalaustausch bei Systemen mit konstanter Beschleunigung (6.4.1)
- Relativistische Raketengleichung (6.4.2)
- Relativistischer nicht elastischer Stoß (7.1)

- Teilchenzerfall in 2 Partikel (7.2.1)
- Teilchenzerfall in 2 Photonen (7.2.2)
- Konstanz der Phasengeschwindigkeit des Lichts beim Übergang zwischen verschiedenen Inertialsystemen (8.)

Zusammengefasst gibt es also nur einen Grund, die Spezielle Relativitätstheorie dem Ansatz von Lorentz vorzuziehen. Dabei handelt es sich um die Tatsache, dass die SRT generell alle denkbaren physikalischen Experimente umfasst, während die reine Lorentz-Transformation nur den Signalaustausch zwischen verschiedenen Inertialsystemen beschreibt. Um eine allgemeine Gültigkeit zu gewährleisten, muss demnach eine Ergänzung vorgenommen werden, welche durch den Ansatz der Einstein-Gleichung zur kinetischen Energie gegeben ist. Dies wird im nachfolgenden Kapitel dargestellt.

14.4 Alternative Darstellung: Erweiterte Lorentz-Theorie

Wie bereits in Kap. 1.6 ausgeführt, hat Einstein für die Spezielle Relativitätstheorie einen Top-down-Ansatz gewählt. Dazu wurden Relativitätsprinzip und konstante Lichtgeschwindigkeit als Grundlagen definiert und daraus die Lorentz-Transformation und später auch der relativistischen Massenanstieg abgeleitet. Zur Formulierung des Relativitätsprinzips muss nach den hier getroffenen Feststellungen eine ähnliche Variante gewählt werden wie von Einstein selbst, und zwar die Darstellung als objektives Beobachungskriterium. Auch die Aussage zur Lichtgeschwindigkeit kann so erfolgen, besser ist hier aber die Nutzung der Konstanz der Phasengeschwindigkeit des Lichts. Der Vorschlag für eine widerspruchsfreie und eindeutige Formulierung der Prinzipien der SRT lautet demnach:

1. Die Durchführung von beliebigen physikalischen Versuchen führt in allen Inertialsystemen zu den gleichen Ergebnissen.
2. Die Phasengeschwindigkeit des Lichts ist in allen Inertialsystemen gleich und entspricht dem in jedem Inertialsystem messbaren Wert der Lichtgeschwindigkeit.

Die hier dargestellten Untersuchungen haben jedoch auch gezeigt, dass auch ein Bottom-up-Ansatz mit einer erweiterten Lorentz-Theorie möglich ist. Dabei werden die erforderlichen physikalischen Grundgesetze definiert und daraus lässt sich dann das Relativitätsprinzip ableiten. Dieser Ansatz lautet folgendermaßen:

1. Aus der unbegrenzten Anzahl der vorhandenen Inertialsysteme wird eines als Basissystem ausgewählt und mit Index 0 gekennzeichnet.
2. In diesem Basissystem weist die Geschwindigkeit des Lichts in alle Richtungen den gleichen Wert c auf.
3. Die Eigenschaften aller anderen Inertialsysteme sind über deren Relativgeschwindigkeit v zum Basissystem definiert, und es gilt für die Zeit t , den Weg x und die Masse m

$$\text{a) } t = \gamma \left(t_0 - \frac{v}{c^2} x_0 \right), \quad x = \gamma (x_0 - vt_0)$$

$$\text{b) } m = \gamma m_0$$

mit:
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Zunächst einige formale Anmerkungen: Bei den Gleichungen unter a) handelt es sich um die Lorentz-Transformation (bezogen auf das Basissystem mit Index 0). Um die Formeln zu vereinheitlichen, wurde hier nicht die traditionelle Darstellung mit t' und x' verwendet (vgl. hierzu Kap. 1.6). Gleichung b) betrifft die relativistische Massenerhöhung und beinhaltet die Einstein-Gleichung zur kinetischen Energie (vgl. auch Kap. 1.6 und 6.1)

$$E_{kin} = m_0 c^2 (\gamma - 1) \quad (6.14)$$

In dieser Darstellung sind die Spezielle Relativitätstheorie und der erweiterte Lorentz-Ansatz mathematisch vollständig äquivalent. Die Spezielle Relativitätstheorie schließt jedoch bei üblicher Interpretation das Vorhandensein eines Systems absoluter Ruhe aus, welches aber beim erweiterten Lorentz-Ansatz durch einfache Wahl des Basissystems ohne weitere Annahmen oder Einschränkungen integrierbar ist. Hierbei ist es sinnvoll, das System zugrunde zu legen, welches die Basis für die gleichmäßige kosmischen Hintergrundstrahlung ist. Da aber bis heute kein experimenteller Nachweis gelungen ist, kann eine Entscheidung derzeit nicht getroffen werden.

Aus heutiger Sicht liegt die einzige Möglichkeit für einen experimentellen Nachweis eines Systems absoluter Ruhe in der Durchführung von Versuchen mit Überlichtgeschwindigkeiten. Es gibt heute Untersuchungen innerhalb der Quantenmechanik, z. B. bei Tunnelexperimenten, bei denen überlichtschnelle Effekte nachgewiesen worden sind. Bezüglich der Interpretation der Ergebnisse gibt es jedoch noch große Unterschiede. Einerseits wird angenommen, dass trotz überlichtschnellen Effekten hierbei keine Information schneller als das Licht übertragen wird und somit die Gültigkeit der Speziellen Relativitätstheorie nicht in Frage gestellt werden muss, andererseits wird davon ausgegangen, dass eine einfache Signalübertragung, z. B. durch einen Impuls, durchaus überlichtschnell erfolgen kann. Es wurde im Rahmen dieser Ausarbeitung ein Vorschlag gemacht, wie ein Versuch ausgestaltet werden könnte, der eine eindeutige Entscheidung bezüglich der unterschiedlichen Ansätze ermöglicht (Kap. 13.1).

Es wurden außerdem noch weitere Versuche vorgestellt, die andere interessante Aspekte wie die „Relativität der Gleichzeitigkeit“ und „Massenzunahme nach einem plastischen Stoß“ experimentell bestätigen müssten.

Bei einer Durchführung dieser Versuche könnten wichtige Grundsatzfragen der Physik untersucht und möglicherweise abschließend entschieden werden. Es ist sicher einiger Aufwand damit verbunden aber verglichen mit heute üblichen Kosten für Experimente sollte dies möglich sein. Es ist zu hoffen, dass sich Forscherteams finden, die die Durchführung der Versuche übernehmen.

Abschließend betrachtet ist es bemerkenswert, dass auch mehr als ein Jahrhundert nach Formulierung der Speziellen Relativitätstheorie bei intensiver Prüfung noch neue Aspekte sichtbar werden.