# 13 Konstanz der Lichtgeschwindigkeit

Die Lichtgeschwindigkeit kommt als Konstante $\boldsymbol{c}$ in vielen physikalischen Formeln vor. Eine von diesen ist die Relation des Impulses $\boldsymbol{p} = \boldsymbol{E}/\boldsymbol{c}$ der Lichtstrahlung. Es zeigt sich, dass bei ruhender Lichtquelle die Lichtgeschwindigkeit für jede Frequenz von den Radiowellen bis hin zu den Gammastrahlungen konstant ist. Eine Konstanz für alle Frequenzen verstößt nicht gegen die Gesetze der klassischen Physik.

In diesem Kapitel geht es aber nicht um dieses Konzept der Konstanz, sondern um die Tatsache, dass die Lichtgeschwindigkeit auch bei bewegter Lichtquelle und zwischen allen Inertialsystemen konstant bleibt, wie aus dem Experiment von Michelson und Morley hervorgeht.

Da diese Konstanz für jede Relativgeschwindigkeit zwischen Licht-Sender und Empfänger gilt, ist sie nicht mehr im Einklang mit der Galilei-Transformation und steht somit in Konflikt mit einem fundamentalen Grundsatz der klassischen Mechanik. Das ist auch der Grund, warum sich das Konzept „Konstanz der Lichtgeschwindigkeit im relativistischen Sinne“ allzu leicht der Intuition des Menschenverstandes entzieht. Was hat aber dieses Konzept so besonders an sich, um eine Revolution im Rahmen der Physik zu verursachen mit den bekannten Konsequenzen: Zeitdilatation, Längenkontraktion und den berühmten Paradoxen? In diesem Kapitel wollen wir versuchen anhand eines konkreten Beispiels für Klarheit zu sorgen:

Stellen Sie sich ein Raumschiff vor, das sich relativ zu einem Beobachter $\boldsymbol{O_a}$ (Index „a“ steht für „außerhalb des Raumschiffes“) mit einer konstanten, gleichförmigen Geschwindigkeit $\boldsymbol{v}$ bewegt. In der Mitte des Raumschiffes werden von einer Vorrichtung gleichzeitig zwei kleine Kugeln $\boldsymbol{k_1}$ und $\boldsymbol{k_2}$ mit gleicher Geschwindigkeit $\boldsymbol{v_k}$ ($\boldsymbol{v_k} > \boldsymbol{v}$; $\boldsymbol{v_k} \ll \boldsymbol{c}$) abgeschossen. Die Kugel $\boldsymbol{k_1}$ wird in die Bewegungsrichtung des Raumschiffes, die andere Kugel $\boldsymbol{k_2}$ in die entgegengesetzte Richtung geschossen. Aus der Sicht eines Beobachters $\boldsymbol{O_i}$ (Index „i“ steht für „innerhalb des Raumschiffes“), der im Raumschiff ruht, erreichen die Kugeln die vordere und die hintere Wand des Raumschiffs gleichzeitig. Wie sieht aber die Situation aus der Sicht des Beobachters $\boldsymbol{O_a}$ in relativer Bewegung zum Raumschiff aus? Während des Fluges von $\boldsymbol{k_1}$ hat sich das Raumschiff nach vorne bewegt. Somit hat sich die vordere Wand von der Startposition von $\boldsymbol{k_1}$ entfernt**.** Welche Kugel erreicht dann aus der Sicht von Beobachter $\boldsymbol{O_a}$ das Ziel zuerst?

Die richtige Antwort ist, dass auch für Beobachter $\boldsymbol{O_a}$ beide Kugeln ihre Ziele gleichzeitig erreichen, denn $\boldsymbol{O_a}$ misst für Kugel $\boldsymbol{k_1}$ nicht nur eine längere Weglänge, sondern auch eine höhere Geschwindigkeit als für Kugel $\boldsymbol{k_2}$: wegen der relativen Geschwindigkeit der Raumfähre, misst Beobachter $\boldsymbol{O_a}$ für die Kugeln $\boldsymbol{k_1}$ und $\boldsymbol{k_2}$ die Geschwindigkeiten $\boldsymbol{v_k} + \boldsymbol{v}$ bzw. $\boldsymbol{v_k} - \boldsymbol{v}$, im Einklang mit dem Additionstheorem der Geschwindigkeiten aus der Galilei-Transformation. Geschwindigkeiten und Längen kompensieren sich dann gegenseitig und somit sind die Laufzeiten der Geschosse gleich. Also, bei niedrigen Geschwindigkeiten ergibt sich für alle Beobachter eine Gleichzeitigkeit der Ereignisse.

Schauen wir aber was geschehen würde, wenn die Vorrichtung in der Mitte des Raumschiffes, anstatt der Kugeln, zwei Lichtquanten (oder Photonen) in entgegengesetzte Richtungen abstrahlen würde. Dabei nehmen wir für die Raumfähre eine viel höhere Geschwindigkeit $\boldsymbol{v}$ an, als im vorigen Beispiel. Analog zum Beispiel mit den Kugeln müsste Beobachter $\boldsymbol{O_a}$ für die Photonen die Geschwindigkeiten $\boldsymbol{c}+\boldsymbol{v}$, bzw. $\boldsymbol{c}-\boldsymbol{v}$ messen. Das ist aber nicht der Fall: So wie es durch Experimente bestätigt wird, misst Beobachter $\boldsymbol{O_a}$, wie $\boldsymbol{O_i}$ auch, exakt den gleichen Wert $\boldsymbol{c} \cong 300000\,Km/s$ für die Geschwindigkeiten der Photonen in beiden Richtungen. Damit wird das Versagen der Galilei-Transformation offensichtlich und die Notwendigkeit einer neuen Transformation für Raum und Zeit erkennbar: eine Transformation wird benötigt, welche die Invarianz der Lichtgeschwindigkeit mitberücksichtigt.

Jetzt sollte klar sein, was unter den Begriff Konstanz der Lichtgeschwindigkeit in relativistischem Sinn gemeint wird: anders als die Geschwindigkeit Massenhafter Körper, ist die Geschwindigkeit des Lichtes aus der Sicht aller Beobachter gleich, unabhängig von ihrer relativen Bewegung zur Lichtquelle und zueinander. Das führt in unserem Fall zur folgenden Konsequenz: für Beobachter $\boldsymbol{O_i}$ erreichen beide Photonen die Wände der Raumfähre gleichzeitig. Für Beobachter $\boldsymbol{O_a}$, erreicht das in Fahrrichtung abgestrahlte Photon das Ziel später, weil es, bei gleicher Geschwindigkeit $\boldsymbol{c}$, einen längeren Weg zurücklegen muss als das andere Photon. Also, eine Simultanität der Ereignisse für beide Beobachter ist nicht mehr gegeben. In Fällen wie diesem, spricht man von einer Relativität der Gleichzeitigkeit. Dabei erkennt der Physiker, dass das Konzept einer für alle Beobachter gleich fließenden Zeit, wie es sich Newton vorgestellt hatte, keinen Sinn mehr macht.

Noch am Ende des neunzehnten Jahrhunderts waren die Physiker mit dem Konzept einer absoluten Zeit und eines absoluten Raumes fest vertraut.

Als Michelson und Morley 1887 die Ergebnisse ihrer Experimente bekannt gaben, wurden die Wissenschaftler daher weltweit mit einer großen Überraschung konfrontiert: Die experimentellen Beobachtungen standen in Konflikt mit den Grundsätzen der Mechanik, denn es wurde mit dem Versuch am Interferometer von Michelson nachgewiesen, dass die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum immer konstant ist, unabhängig vom Ruhe- oder Bewegungszustand der Lichtquelle.

Aus dieser Erkenntnis entstand der Bedarf, dem Naturphänomen der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit das Attribut eines fundamentalen physikalischen Postulats zu verleihen.

Andererseits waren die Physiker der Ansicht, dass dieses Postulat nicht im Einklang mit den Gesetzen Newtons stünde. Als Konsequenz dieser Überzeugung verzichteten sie auf einen Erklärungsversuch der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit auf Basis der Newtonschen Mechanik im Rahmen der Gesetze der klassischen Physik.

Die Wissenschaftler kamen vielmehr zu der Überzeugung, dass es notwendig sei, eine neue physikalische Theorie zu entwickeln.

Die Geburt der Relativitätstheorie ist deshalb eng verbunden mit der vorausgesetzten Unvereinbarkeit der Newtonschen Mechanik mit dem Naturphänomen der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit.

Wir sind jedoch nun in der Lage die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit für beliebige Relativgeschwindigkeiten mittels der im zehnten Kapitel durchgeführten Herleitung der Geschwindigkeitsaddition theoretisch herzuleiten.

Zur besseren Übersicht wird hier noch einmal eine kurze Zusammenfassung des gesamten Weges gegeben, der zur Herleitung des Additionstheorems der Geschwindigkeiten geführt hat:

- Die Relation der Geschwindigkeitsaddition (10.6) wurde durch die Anwendung der Erhaltungssätze auf den Zusammenstoß zweier Teilchen hergeleitet.
- Für die Energiebilanz wurden die gesamten Energien der Teilchen, d.h. die Summen aus ihrer kinetischen und inneren Energie, verwendet.
- Die Formel für die gesamte Energie eines Teilchens (6.5) wurde im sechsten Kapitel durch die Verwendung der Relation (5.4) hergeleitet, welche die Abhängigkeit der Masse von der Geschwindigkeit ausdrückt.
- Im fünften Kapitel wurde aber andererseits gezeigt, dass die Relation der Abhängigkeit der Masse von der Geschwindigkeit (5.4) eine direkte Folge des zweiten Gesetzes der Dynamik und des Äquivalenzprinzips von Energie und Masse ist.
- Das Äquivalenzprinzip Energie-Masse wurde schließlich in den Kapiteln 3 und 4 unter ausschließlicher Verwendung der klassischen Physik hergeleitet.

**Die Schlussfolgerung dieser Argumentation ist, dass in dieser Arbeit der Beweis des Additionstheorems der Geschwindigkeiten ohne den Gebrauch des Postulats der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit erbracht wurde.**

An dieser Stelle versetzt uns nun das Additionstheorem der Geschwindigkeiten (Relation 10.6) in die Lage, das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit rein theoretisch herleiten zu können.

Zu diesem Zweck nehmen wir eine Lichtquelle an, die sich relativ zu einem Beobachter bewegt. Dieser kann die Gleichung (10.6) verwenden …

$$\boldsymbol{v_{12} = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}}} \qquad (10.6)$$

… um die relative Geschwindigkeit $\boldsymbol{v_l}$ des ausgestrahlten Lichtes zu berechnen: Wenn $\boldsymbol{v_1}$ durch die Geschwindigkeit $\boldsymbol{c}$ des Lichtes aus einer ruhenden Lichtquelle und $\boldsymbol{v_2}$ durch die Geschwindigkeit $\boldsymbol{v_q}$ der Lichtquelle ersetzt werden, ergibt sich dann:

$$\boldsymbol{v_l = \frac{c + v_q}{1 + \frac{c v_q}{c^2}}} \qquad \Rightarrow$$

$$\boldsymbol{v_l} = \frac{\boldsymbol{c} + \boldsymbol{v_q}}{\frac{\boldsymbol{c} + \boldsymbol{v_q}}{\boldsymbol{c}}} \qquad (13.1)$$

Es lässt sich nun leicht zeigen, dass die Gleichung (13.1) für jede beliebige Geschwindigkeit $\boldsymbol{v_q}$ der Lichtquelle immer die Lösung $\boldsymbol{v_l} = \boldsymbol{c}$ annimmt.

Dies weist nach, dass die Lichtgeschwindigkeit in jedem gleichförmig bewegten Bezugssystem, unabhängig von dessen Bewegungszustand, immer die gleiche ist.

Bei genauer Betrachtung der gesamten Vorgehensweise, die zu diesem Beweis führte, lässt sich feststellen, dass:

**Die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit für beliebige Relativ-geschwindigkeiten zwischen Lichtquelle und Empfänger kann rein theoretisch, d.h. auch ohne den Einsatz von Experimenten aber zur Bestätigung dieser, nachgewiesen werden.**

> Durch die Verwendung des Additionstheorems der Geschwindigkeiten lässt sich das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit theoretisch herleiten. Aus dieser Sicht betrachtet, ist der Satz der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit kein Postulat, sondern ein durch die Gesetze der Physik beweisbares Prinzip.