

Ein Dilemma der Physik im Jahr 1900

1 Der Erfolg der klassischen Elektrodynamik

Die Theorie der **Elektrodynamik** wird in der 2. Hälfte des 19. Jahrhunderts (ca. 1870) durch **James Clerk Maxwell** (1831 – 1879) zum vorläufigen Abschluss gebracht, indem dieser vier Gleichungen formuliert, die alle Aussagen dieser Theorie zusammenfassen:

Maxwell-Gleichungen (MG):

$$\begin{aligned}\vec{\nabla} \cdot \vec{E} &= \frac{\rho}{\varepsilon_0} \\ \vec{\nabla} \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{B} &= 0 \\ \vec{\nabla} \times \vec{B} &= \mu_0 \vec{J} + \frac{1}{c^2} \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}\end{aligned}$$

Zusammen mit der Gleichung

$$\vec{F}_{\text{em}} = q \cdot (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad ,$$

die beschreibt, wie das elektrische Feld \vec{E} und das magnetische Feld \vec{B} die **elektromagnetische Kraft** \vec{F}_{em} auf ein Teilchen mit Ladung q ausüben, bilden die **Maxwell-Gleichungen** eine abgeschlossene und konsistente (= in sich widersuchsfreie) Theorie des Elektromagnetismus. Sie legen zudem die Folgerung nahe, dass Licht eine **elektromagnetische Welle** (= Kombination aus elektrischem und magnetischen Feld) ist, die sich mit $c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \approx 3.0 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ausbreitet.

Die Theorie wird vielfach und umfassend bestätigt, am eindrücklichsten wohl durch **Heinrich Hertz** (1856 – 1894), der 1886 erstmals eine künstlich erzeugte elektromagnetische Welle (Radarwelle) mit einer Antenne aussendet und mit einer anderen Antenne wieder empfängt.

Die klassische Elektrodynamik war effektiv ein Prunkstück der Physik des 19. Jahrhunderts!

2 Widersprüche zur Newtonschen Mechanik

Die Elektrodynamik war allerdings nicht unumstritten, weil sie eine Unvereinbarkeit mit der uneingeschränkt als richtig erachteten Newtonschen Mechanik aufzuweisen schien:

- **Die Maxwell-Gleichungen sind nicht invariant unter der Galilei-Transformation!**

D.h., wenn die Galilei-Transformation auf die MG angewendet wird, entstehen dabei Zusatzterme. Die MG scheinen also von Inertialsystem zu Inertialsystem verschieden zu sein. In ihrer einfachsten Form (oben) gelten sie nur in einem einzigen Inertialsystem, wo sich das Licht in alle Richtungen mit $c = 3.0 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ausbreitet.

Die MG stehen also im Widerspruch zur Newtonschen Mechanik, bei der die Gesetze in allen Inertialsystemen identisch sind und der Wechsel zwischen Bezugssystemen eben durch die Galilei-Transformation gegeben ist. Die MG verletzen offenbar das Relativitätsprinzip.

- **Die Äther-Theorie soll die Maxwell-Gleichungen retten!**

Idee: Licht ist ein wellenartiges Phänomen und benötigt somit zur Ausbreitung ein Medium, so wie das z.B. bei Wasser- oder Schallwellen auch der Fall ist. Dieses Medium namens **Äther** soll alles durchdringen, also überall vorhanden sein, und natürlich wäre dann das Ruhesystem des Aethers ein System, das sich vor allen anderen auszeichnet. In diesem System würde sich Licht in alle Richtungen gleich schnell ausbreiten.

Das Problem: Mehrere Versuche das Ruhesystem des Äthers aufzuspüren waren gescheitert. Hervorzuheben ist vor allem das **Michelson-Morley-Experiment**, dessen Resultat wie folgt zusammengefasst werden kann:

Licht scheint sich in jedem beliebigen Bezugssystem in alle Richtungen mit $c = 3.0 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ auszubreiten.

- Für die MG gab es auch rein mathematische Rettungsversuche. So hielt beispielsweise **Hendrik Antoon Lorentz** (1853 – 1928) an der Äther-Theorie fest, erfand aber eine neue Transformationsvorschrift für Inertialsysteme, unter der die MG invariant bleiben. Später wurden diese Transformationsgleichungen mit dem Namen **Lorentz-Transformation** versehen.

Bemerkung: Tatsächlich hatte Lorentz die Transformationsgleichungen entdeckt, die Einstein in der Relativitätstheorie aus dem Speziellen Relativitätsprinzip und dem Prinzip von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit ableitet. Lorentz hatte bereits ein paar wirklich richtige und gute Ideen zur Lösung des Problems gefunden, aber er konnte noch nicht die Klarheit schaffen, mit der Einstein ein paar Jahre später das Problem aufzulösen vermochte.

Alles in allem lautete um 1900 der Grundtenor in der physikalischen Welt: “*Die MG funktionieren zwar tadellos in allen Inertialsystemen, aber wir trauen der Sache nicht so richtig, denn eigentlich müssen Inertialsysteme durch die Galilei-Transformation ineinander übergeführt werden, wie uns die Newtonsche Mechanik lehrt. Die MG sind allerdings nur unter der Lorentz-Transformation invariant. Sie scheinen damit im Widerspruch zur altehrwürdigen und lang bewährten Newtonschen Mechanik zu stehen. Irgendetwas an dieser neuen Elektrodynamik müssen wir noch besser verstehen!*”

Die Sache war also ein wenig festgefahren...

3 “Welches sind die wirklich wichtigen Prinzipien?” – die Genialität Albert Einsteins

Wie konnte der Widerspruch zwischen Elektrodynamik und Newtonscher Mechanik aufgelöst werden? Was wurde denn übersehen oder falsch verstanden? Was musste neu gedacht werden?

Albert Einstein, zu dieser Zeit Angestellter am Patentamt in Bern, lieferte die Antworten. In seiner Arbeit *Zur Elektrodynamik bewegter Körper* aus dem Jahre 1905, in der die **Spezielle Relativitätstheorie** vorgestellt wird, schreibt er:

“*Die zu entwickelnde Theorie stützt sich – wie jede andere Elektrodynamik – auf die Kinematik des starren Körpers, da die Aussagen einer jeden Theorie Beziehungen zwischen starren Körpern (Koordinatensystemen), Uhren und elektromagnetischen Prozessen betreffen. Die nicht genügende Berücksichtigung dieses Umstandes ist die Wurzel der Schwierigkeiten, mit denen die Elektrodynamik bewegter Körper gegenwärtig zu kämpfen hat.*”

Mit der “Kinematik des starren Körpers” ist die Mechanik gemeint. Einstein sagt hier, dass man innerhalb dieser Mechanik genauer über das Verhalten von **Massstäben** und **Uhren** nachzudenken hat. Seine Genialität liegt nun darin, dass er realisiert, welches die wirklich entscheidenden Grundaussagen sind, die aller Physik zugrunde liegen müssten. Das Erkennen und die Ausrichtung an übergeordneten, allem zugrunde liegenden Konzepten war vielleicht seine grösste Stärke.

So geht Einstein bei seinen neuartigen Überlegungen von lediglich zwei Grundprinzipien aus, vom **Speziellen Relativitätsprinzip** einerseits und vom **Prinzip von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit** andererseits. Ersteres war altbekannt, denn bereits Newton wusste, dass alle Inertialsysteme gleichwertig sind, Letzteres ist bahnbrechend neu, aber zu Einsteins Zeit doch irgendwie naheliegend, weil diverse Versuche diese Aussage stützten. Das Problem, dass für die Lichtgeschwindigkeit in allen Inertialsystemen offenbar in alle Richtungen derselbe Wert ermittelt wird, erhebt er zu einem Prinzip. D.h., er orientiert sich an den realen Messungen seiner Zeit und erkennt darin ein fundamentales Verhalten der Natur.

Schliesslich ist entscheidend, dass Einstein durch rigoroses, klares Denken aus diesen Prinzipien eine neue Theorie schafft, die die Unverträglichkeit von Elektrodynamik und Newtonscher Mechanik auflöst. Sie ist zu verstehen als eine fundamentale Korrektur der Newtonschen Mechanik, die aber nur im Bereich sehr hoher Relativgeschwindigkeiten und natürlich in der Theorie der Elektrodynamik wirklich benötigt wird. Für unseren Alltag genügt nach wie vor die Newtonsche Mechanik, die auch weiterhin als das Fundament aller Physik und Naturwissenschaft zu verstehen ist.