

D. Grundlagenanalyse der Relativitätslehre.

Traditionell wurde jeweils zu *Michaeli*, also in den letzten Septembertagen, erstmals im Jahreslauf das nun allabendliche Licht in den Stuben angezündet. Die Nächte werden jetzt spürbar länger, die Abendzeit erscheint gedehnt. Nach dem Volksbrauchtum pflegt man das Septemberereignis mit einem festlichen *Lichtbraten* zu feiern. Oder handelt es sich eher um einen *Satansbraten*?

Im Lichtschein von *Michaeli* verkohlte 1905 jedenfalls eine ganze Wissenschaft.

D. Grundlagenanalyse der Relativitätslehre.

Man schrieb
. . . das Jahr 1904. In Frankreich diskutierte ein Gremium von Wissenschaftlern über die zeitgemäße physikalische Arbeitsmethodik.

Das Resultat lautet:

"Aufgrund seiner Erfahrung kann der Physiker einen Zusammenhang vermuten, ohne daß er denselben experimentell festgestellt hat. Er nimmt eine Gleichung hypothetisch an und zieht durch eingehende mathematische Diskussion seiner Gleichung sämtliche Konsequenzen, die er dann alle eingehend experimentell prüfen muß."

Marie Curie, Paul Langevin, Henri Poincaré, Georges Sagnac und andere beschrieben nichts anderes als diejenige Erkenntnismethode, die Michelsons Nullergebnis als einen Bruch mit der vorausgesetzten Physik darlegte.

Sie ist, wie schon ausgeführt, als *indirekte Induktion* bekannt.

D. Grundlagenanalyse der Relativitätslehre.

Der Knigge für Physiker.

Die methodische Anleitung ermutigt dazu, physikalische Vorgaben ohne weiteres Ergründen zu rein mathematischen Komplexen umzusetzen. Sie führte exakt das gedankliche Muster ein, das dann mit der Veröffentlichung der Relativitätstheorie im Folgejahr maßgeblich wurde.

Brisanz verlieh ihr diese nachgeschobene Bedingung:

"Widerspricht ein einziger Fall der Hypothese, so muß sie auch dort fallengelassen werden, wo sie scheinbar bestätigt war."

Man könnte auch von einer Anstandsregel sprechen, die bei sauberer physikalischer Arbeit immer ganz selbstverständlich beachtet wurde.

Immer gehörte aber auch dazu, Standesunterschiede zu respektieren: Die mit *Meter* und *Sekunde* in die Rechnungen eingehenden Raum- und Zeitgrößen durfte niemand zu hinterfragbaren Hypothesen abrüsten.

Denn wenn auch Urgrößen fallen können, bleibt nur noch Unsicherheit. Allenfalls kann man von vorne beginnen und ein ganz neues Weltbild entwerfen.

Die neu postulierte Physik.

Der Schöpfer der Relativitätstheorie hält sich beim Herleiten der Längen- und Zeitdeformationen, wie zuvor Lorentz, an das Ergebnis des Experimentes von Michelson. Dessen Versuch, eine mit der Erdbewegung veränderliche Lichtgeschwindigkeit zu messen, war bekanntlich zu einem "Fehl-schlag" geraten.

Lorentz wollte das überraschende Nicht-Ergebnis damit

D. Grundlagenanalyse der Relativitätslehre.

erklären, daß sich zwei Effekte genau ausgleichen können. Es komme zu einem "kompensatorischen Nulleffekt".

Ein Anhänger der positivistischen Schule müßte jedoch darauf bestehen: "*Wo nichts gemessen wird, ist auch nichts.*"

Michelsons "fehlgeschlagene" Präzisionsmessung kann dann nur als Beleg für eine tatsächlich gegebene *Konstanz der Lichtgeschwindigkeit* verstanden werden. Licht vermag offenbar, den erwarteten Einfluß einer Fremdbewegung zu ignorieren. Dies ist eines der Postulate, an denen die Relativitätstheorie ansetzt. Es hat in der Relativitätstheorie den Rang einer wissenschaftlich festgestellten Tatsache.

Gleichberechtigt kommt noch eine Feststellung hinzu.

Nach Machs positivistischem Wahrnehmungsprinzip kann man in Wirklichkeit nur eine gegenseitige Bewegung von Himmel und Erde erkennen. Das geozentrische Weltbild des Ptolemäus sei ebenso berechtigt wie das heliozentrische des Kopernikus. Der verallgemeinerte Befund ist, daß ein eigentlich bewegtes und ein eigentlich ruhendes Objekt physikalisch nicht zu *identifizieren*, sondern zu *definieren* sei. Man müsse einfach nur festlegen, was als ruhend zu betrachten sei. Als Kriterium könne dabei nur ein eventueller Vorteil bei der Denkanstrengung dienen.

Aus Machs Prinzip wurde nun das *Relativitätsprinzip*. Es hebt jedoch nicht mehr auf die Gestirne ab, sondern gleich auf eine paarweise Vertauschbarkeit sämtlicher Ruhe- und Bewegungsobjekte. - Jeder Reisende hat beim Blick aus dem Waggonfenster schon einmal diese Ungewißheit verspürt, ob sich der eigene Zug oder der auf dem Nachbargleis bewegt.

Aus der scherzhaften Kinderfrage, ob der Zug oder die Landschaft fährt, wurde philosophischer Ernst gemacht. Das

D. Grundlagenanalyse der Relativitätslehre.

Relativitätsprinzip ist das andere bedeutende Postulat.

Aus der Zusammenführung der beiden Postulate wurde die Relativitätstheorie entwickelt. Ihr erster Teil führt auf die Lorentz-Transformationen. Er beinhaltet eine neuartige Bewegungslehre.

Im zweiten Teil sind die abgeleiteten Formeln auf die Erscheinungen der Elektrodynamik angewandt.

Relativitätstheorie, erster Teil.

Grundsätzlich geht es in der mathematischen Herleitung der Relativitätstheorie um zwei Objekte, die an einer Bewegung beteiligt sind. Welches bewegt ist, und welches in Ruhe, bleibt nach dem Relativitätsprinzip unentschieden. Der Schöpfer der Relativitätstheorie betrachtet beide möglichen Standpunkte. Er codiert die Bewegungsauffassungen, jede für sich, in herkömmliche Formeln. Dabei bedient er sich einer Koordinatendarstellung, die der Mathematiker *Lange* kürzlich in die Physik eingeführt hatte. Als Novum setzt er dann die beiden Formeln zueinander in Bezug, indem er die wechselseitige Wahrnehmung berücksichtigt.

Dafür soll uns ein frei gewählter Alltagsvorgang als Beispiel dienen: Wenn ein Stein in einen uneinsehbaren Schacht fällt, wird die bis zum Bodenaufschlag dauernde Zeitmessung Überlänge anzeigen. Der Grund ist, daß die Messung außer der Fallzeit in die Tiefe noch die Signalzeit umfaßt. Der Bodenaufschlag und das Aufschlagsgeräusch erfolgen nicht gleichzeitig, weil ein Schallsignal das lauschende Ohr erst einholen muß. Der Schacht ist also weniger tief. Die verzögerte Wahrnehmung des Falles könnte auch, unter Ausblendung sonstiger Informationen, als Zeitlupeneffekt

D. Grundlagenanalyse der Relativitätslehre.

gedeutet werden.

Zeitlupenvorgänge faszinieren das Publikum, seit damals der Erfinder Edison die *Kinematographie* eingeführt hat.

Die Relativitätstheorie behandelt die Zeitanzeige selbst als Vorgang. Dementsprechend sind Uhren die betrachteten Objekte. Die ausgehenden optischen Signale seien stets nach dem *Prinzip der konstanten Lichtgeschwindigkeit* wahrzunehmen. Deshalb korrigierte ihr Schöpfer die Bewegungsformeln über zusätzliche Faktoren.

Unter Berufung auf das Relativitätsprinzip, nach dem die Standpunkte physikalisch gleichwertig sind, werden die konstruierten mathematischen Ausdrücke zu Gleichungen gegenübergestellt. Komplexe mathematiktheoretische Überlegungen und ermüdende rechnerische Umformungen ergeben schließlich die Formeln für Längenstauchung und Zeitdehnung, die als Lorentz-Transformationen bekannt wurden.

Der Schöpfer der Relativitätstheorie veranschaulichte die Wirkung der Lorentz-Transformation mit Beispielen. Zur Längenstauchung fiel ihm ein:

"Ein starrer Körper, welcher in ruhendem Zustand ausgemessen die Gestalt einer Kugel hat, hat also in bewegtem Zustand - vom ruhenden System aus betrachtet - die Gestalt eines Rotationsellipsoides."

Und zur Zeitdehnung:

"Eine am Erdäquator befindliche Unruhuhr muß langsamer laufen als eine an einem Erdpole befindliche Uhr".

Oder, für die akademischen Freunde des olympischen Geistes frei zusammengefaßt:

D. Grundlagenanalyse der Relativitätslehre.

"Ein rasch bewegter Kugelstoßer ist ein Diskuswerfer in Zeitlupe."

Relativitätstheorie, zweiter Teil.

In einem zweiten Teil zeigt der Urheber, wie die Ergebnisse elektrisch verursachte Erscheinungen beeinflussen.

Es geht um die Auswirkungen körperlicher Bewegung auf die elektromagnetische Strahlung. Nach den Lehren von Maxwell und Hertz gehört zu dieser insbesondere das Licht.

Optische Erscheinungen geben die ersten Beispiele für die neue Elektrodynamik.

Wenn Sternenlicht quer zur Erdbewegung einflutet, wird die *Aberration* hervorgerufen: Das astronomische Fernrohr muß unter Umständen etwas stärker angewinkelt werden, als der katalogisierte Sternort es erwarten läßt. Wenn jedoch die Bewegung in Richtung Licht erfolgt, treten *Wellenlängenänderungen nach Doppler* auf. Um zu den passenden Formeln zu gelangen, wandelt ihr Schöpfer die *"Maxwell-Hertzchen"* Grundgesetze der optischen Erscheinungen durch die Lorentz-Transformationen ab.

Die abgewandelten Grundgesetze werden dann noch herangezogen, um einige Phänomene der Elektrizität und des Magnetismus von verschiedenen Standpunkten aus zu beschreiben. Die Operationen erbringen als Ergebnis:

"Damit ist gezeigt, daß unter Zugrundelegung unserer kinematischen Prinzipien die elektrodynamische Grundlage der Theorie der Lorentzschen Elektrodynamik bewegter Körper dem Relativitätsprinzip entspricht."

D. Grundlagenanalyse der Relativitätslehre.

Bereits die Überschrift des Artikels *Zur Elektrodynamik bewegter Körper* spielt auf diesen engen Zusammenhang mit der überwundenen Physik des Hendrik A. Lorentz an.

Führen die Postulate zur physikalischen Wirklichkeit?

"Ich habe die Relativitätstheorie selbst in ihrer mathematischen Form - trotz heißen Bemühens - nicht erfaßt."

So klagte sogar ein überaus geduldiger Einstein-Anhänger in seiner selbstverfaßten Einstein-Schrift. Die mathematischen Entwicklungen der Relativitätstheorie und ihr Sinngehalt wurden - und werden - vielfach als unklar empfunden.

In der Relativitätstheorie erscheinen zwar die gleichen Grundformeln wie bei der ursprünglichen Lorentzschen Theorie. Diese galt damals noch als ein unangefochtener Ansatz der Ätherphysik. Doch die Relativitätstheorie ersetzt den Grundgedanken der Lorentzschen Theorie, wonach eine Äthersubstanz die Deformation der Längen- und Zeitmaße bewirkt. Der Äther ist in der Relativitätstheorie ausdrücklich für "überflüssig" erklärt. Die Lorentzschen Formeln wurden stattdessen positivistisch begründet.

Positivistisch heißt im Zusammenhang: Indem die beiden Postulate *Konstanz der Lichtgeschwindigkeit* und *Relativitätsprinzip* vorangestellt wurden, ist das Meß- und Wahrnehmbare angesetzt worden. Damit wurde der Schule Ernst Machs entsprochen.

Den grundsätzlichen philosophischen Unterschied zur Lorentzschen Vorstellung lassen die entwickelten Formelgebilde selbst gar nicht unmittelbar erkennen. Aber wer versucht, deren Aussagen an die physikalische Realität anzuschließen,

D. Grundlagenanalyse der Relativitätslehre.

erfährt jenseits von Lorentz sogar noch mehr Schwierigkeiten.

Der verrückte Opel.

Da es um Bewegung, also um Mobilität geht, ist zur weiteren Klärung ein relativistisch betrachtetes Automobil das richtige gedankliche Werkzeug.

Nach den Lorentz-Transformationen müßte das fahrende Auto zunächst einmal deformiert erscheinen. Die Räder würden durch die Längenkontraktion zu Ellipsen.

Das Phänomen konnte anscheinend photographisch belegt werden. Das sensationelle Foto, das ein Sportreporter bei dem berühmten *Gordon-Bennett-Rennen* im Jahre 1904 schoß, zeigt ein Opel-Rennauto in atemberaubender Kurvenfahrt. An dem rasenden Wagen mit der Startnummer 5 sieht der Betrachter genau solche Verzeichnungen, wie sie von der Relativitätstheorie verkündet wurden.

Comic-Autoren entdeckten sie als graphisches Stilmittel, über das sie mit leichter Feder zum Beispiel die Rasanz von *Goofy's lustiger Autofahrt* bildlich vermitteln können. Beim Foto sind die "relativistischen" Verzeichnungen allerdings durch die veraltete Schlitzverschluß-Technik der Kamera verursacht.

Am Armaturenbrett würde die Borduhr wegen der Zeitdilatation nachgehen. Könnte man dem vorbeifahrenden Auto in den Motor sehen, müßte man ebenso ein verlangsamtes Auf- und Ab der Kolben wahrnehmen.

Technisch Versierte wissen, daß die Kolben Explosivkräfte aus den Zylindern über Pleuel, Kurbelwelle, Kupplung, Getriebe an die Antriebsräder weiterleiten. Es erscheint unbe-

D. Grundlagenanalyse der Relativitätslehre.

greiflich, wie das Auto bei verlangsamten Kolben seine Geschwindigkeit halten soll. Die behaupteten Effekte wären jedoch sogar für den geschosßschnellen Opel so klein, daß die Ergebniswerte mit ihren voranstehenden Nullen das Taschenrechnerdisplay sprengen würde.

Das Anwendungsproblem spitzt sich aber zu, wenn das Auto nach dem Relativitätsprinzip von einem anderen Standpunkt aus beobachtet wird.

Von einem Moped aus, das in die Gegenrichtung fährt, würden die Effekte nach den Lorentz-Formeln wegen der etwas größeren Geschwindigkeitsdifferenz um ein Geringes deutlicher ausfallen. Das Ergebnis wäre, daß ein- und dasselbe Auto mit verschiedener Länge und unterschiedlich stark nachlaufender Borduhr vorbeifahren würde.

Verrückterweise würde die höhere Gegengeschwindigkeit des Autos bei noch mehr verlangsamter Hubgeschwindigkeit der Motorkolben erzielt.

Die verrückte Lichtgeschwindigkeit.

Die wunderlichen Effekte, die sich aus den Lorentz-Formeln errechnen, hängen mit dem Einfluß des eingegebenen Lichtgeschwindigkeitswertes zusammen.

In die Lorentz-Transformationen der Relativitätstheorie gelangte er durch die Postulate. Sie bedeuten für die Lichtgeschwindigkeit: Ihr Meßwert soll gegenüber einer gegenseitigen Bewegung von aussendender Lichtquelle und empfangendem Beobachter gleichgültig sein.

Bereits an diese Grundidee schließen Szenarien an, deren Wunderlichkeit den Kuriosa der Lorentz-Transformationen nicht nachsteht. Ein Beispiel:

D. Grundlagenanalyse der Relativitätslehre.

Das Licht müßte unterschiedslos genausoschnell auftreffen, gleichgültig, ob man als Angestrahelter nun im Scheinwerferlicht stillsteht, oder sich gegen den Scheinwerfer bewegt.

Physikbücher des 19. Jahrhunderts wüßten die Situationen über den Rechenterm $c \pm v$ zu unterscheiden. Das Pluszeichen verwende man bei Annäherung, das Minuszeichen bei Entfernung, bei Stillstand entfällt der Summand v .

Nach der Relativitätstheorie ist diese Auffassung nicht mehr erlaubt.

"Die Lichtgeschwindigkeit kann durch Zusammensetzung mit einer Unterlichtgeschwindigkeit nicht geändert werden."

So schrieb der Schöpfer der Relativitätstheorie.

Die Relativitätstheorie schafft die Angleichung der Terme zu ein- und demselben Lichtgeschwindigkeitswert c über einen Rechenrick. Aus den Lorentz-Transformationen löst der Relativitätstheoretiker einen Korrekturfaktor heraus. Dieser macht dann aus $c \pm v$ den Ausdruck $(c \pm v)/(1 \pm v/c)$.

Der Term ist einfach mit dem Lichtgeschwindigkeitswert c identisch. Das kann durch Ausklammern und Kürzen mathematisch bewiesen werden. Außerdem zeigen einfache Beispielrechnungen, daß dieses Additionstheorem eine Steigerung über die Lichtgeschwindigkeit hinaus nicht zuläßt.

Wenn hier mehr als bloß mathematische Symbolik, nämlich ein physikalisch gehaltvolles Gesetz vorliegen sollte, ist es logisch überraschend. Das Additionstheorem bestreitet überlichtschnelle Bewegungen nach $c+v$, baut aber auf der "Un-

D. Grundlagenanalyse der Relativitätslehre.

möglichkeit" seine Formulierung auf.

Michelson erhebt Einspruch.

Der Relativitätstheorie wurde fast unmittelbar, nachdem sie in der Fachzeitschrift *Annalen der Physik* veröffentlicht worden war, grundlegende Bedeutung zugesprochen.

Zunächst stieg mit der Publikation auch das Ansehen Michelsons und seiner experimentellen Arbeiten, obwohl er namentlich gar nicht erwähnt worden war. Selbst in dicken Lehrbüchern war er bisher nur ausnahmsweise aufgetaucht. Aber auf einmal wurde Albert Abraham Michelson als der "*Lichtfürst*" bekannt. Das ist eigentlich die biblische Umschreibung für den Erzengel Michael. - Er selbst gab sich als "*Spezialist für Lichterscheinungen*" aus.

Gerade zwei Jahre nach dem Michelstag 1905, als die Relativitätstheorie veröffentlicht worden war, wurde Michelson für sein Experiment mit dem Nobelpreis ausgezeichnet.

Aber das überraschende Vordringen der Relativitätstheorie in die Physik bereitete Albert Abraham Michelson Unbehagen. Schließlich bekannte er sich sogar dazu, daß sein Experiment eigentlich physikalisch zu schmal ist, um die von Lorentz unterbreitete Theorie zu begründen, oder gar die Entwicklung der Lorentz-Transformationen nach der Relativitätstheorie.

Michelson begann zu fragen, ob die gedanklichen Ansätze der Theorien überhaupt auf sein Experiment paßten.

Lorentz' *Theorie der Optik und Elektrodynamik bewegter Körper* gründet auf einer für faktisch genommenen Bewegung der Erde gegen den Fixsternhimmel beziehungsweise einen damit verbundenen Fixäther.

In der relativistischen *Elektrodynamik bewegter Körper*

D. Grundlagenanalyse der Relativitätslehre.

spielt der Äther gar keine Rolle. Optische Wahrnehmungen werden stattdessen von gegenseitig bewegten Standpunkten aus mathematisch beschrieben.

Keine der Theorien berücksichtigt aber, daß sich das Michelson-Interferometer während der Lichtmessungen tatsächlich in einem Ruhezustand befand. Die Apparatur war nämlich fest an der Erde verankert. Dadurch wurde sie zwar mit durchs Weltall geschleppt, aber das Experiment wurde *gegen die Felderscheinungen und die Masse des Erdplaneten ruhend* durchgeführt. Keine Spur von Bewegung! Die Lichtstrahlen unterlagen diesbezüglich in ihren sich kreuzenden Richtungen denselben Bedingungen, und zwar sowohl beim Vorwärts- als auch beim Rückwärtslauf.

Konnte es von daher eigentlich wundern, daß sie sich als gleichschnell herausstellten?

Michelsons Experiment wird umgedreht.

Um die Frage, die sein berühmtestes Experiment offengelassen hatte, zu klären, dachte Michelson an einen besonders pfiffigen Versuch.

Er beruht wiederum auf dem Prinzip der Vergleichsmessung. Die Apparatur muß aber einer verschärften Bedingung gerecht werden: Sie hat sich gegen das Schwerfeld der Erde zu bewegen.

Dies muß so rasch vor sich gehen, daß der eventuell dabei erzeugte Bewegungseffekt nicht von der ungeheueren Schnelligkeit des Lichts geschluckt wird. Nur ein Rotationsversuch kann dem gerecht werden.

In Frankreich machte sich Georges Sagnac an die praktische Umsetzung. Bei seiner Version des Experiments sind ein

D. Grundlagenanalyse der Relativitätslehre.

Scheinwerfer, eine schwach silberbedampfte Glasscheibe, eine Fotoplatte und einige kleine Spiegel funktionsgerecht auf einer Karussellscheibe installiert.

Das Scheinwerferlicht wird durch die halbdurchlässige Silberschicht in zueinander entgegengesetzt gerichtete Lichtbündel aufgespaltet. Sie werden, jedes in seinem Richtungssinn, mit den geeignet eingestellten Spiegeln um das Karussell gelenkt. Nach dem Umlauf treffen sich die Lichtbündel wieder und werden auf die Fotoplatte gelenkt. Da sie sich auf der lichtempfindlichen Schicht gegenseitig beeinflussen, ergibt sich dort ein ganz bestimmtes Belichtungsmuster.

Die spannende Frage ist: Ändert sich dieses Belichtungsmuster, wenn das Karussell in rasche Umdrehungen versetzt wird, oder bleibt es nach dem *Additionstheorem der Relativitätstheorie* unbeeinflusst?

Das rotierende Karussell gab eine klare Antwort. Das Muster auf der Fotoplatte ändert sich. Mehr noch: Sagnacs Versuchsauswertung ergab, daß sich Lichtgeschwindigkeit und Karussellrotation in ganz gewöhnlicher Weise zu einer Summe addieren. Es ist, als würde sich die Geschwindigkeit eines Lichtstrahls genau so gegen das Schwerfeld der Erde bemessen, wie diejenige des Schalls gegen die Luft.

Was der Michelson-Versuch über den Äther verrät.

Michelsons Verdacht hatte sich bestätigt. Der Äther funktioniert ganz anders: Planetare Massen vermögen die Äthersubstanz der Umgebung festzuhalten.

Schon früher hatte in England ein Strömungstechniker namens *Gabriel Stokes* auf diese Wahrscheinlichkeit hingewiesen. Um seine Leistung zu ehren, wurde später immerhin die Maßeinheit Stokes eingeführt. Damit kann die Zähflüs-

E. Das Phantom aus der Mathematik.

sigkeit von Substanzen wie Honig oder Motorenöl bis zum Stockpunkt beschrieben werden.

Die Erde bewegt sich also nicht einfach durch einen im Weltall ruhenden Äther hindurch, und schon gar nicht wird sie von ihm gestaucht. Unser Planet zieht seine eigene Ätherhülle als zähklebriges, an der Erdmasse anhaftendes Etwas durch die Weiten des Weltraums mit.

Wenn eine Glühbirne gegen das Schwerfeld fixiert ist, muß sich das abgegebene Licht nach allen Richtungen durch den anhaftenden Äther gleichschnell ausbreiten, wie der Arienschall durch die Luft im Opernhaus.

Das Lichtwunder des ursprünglichen Michelson-Versuchs, der Nulleffekt, ist dann eine bloße Banalität.

Daß diese Resultate gegen die Relativitätstheorie vorliegen, wurde vor allem in Frankreich bereits 1914 öffentlich und in aller Deutlichkeit ausgesprochen.

Aber der Schlachtenlärm des beginnenden Weltkriegs übertönte alles.

E. Das Phantom aus der Mathematik.

Gerade wegen ihrer Anschaulichkeit
. . . fühle er sich zur Relativitätstheorie hingezogen, feixte aus dem Publikum der spätere Nobelpreisträger *Max Born*. Der Saal war brechend voll, die Stimmung geladen.

Das war 1920 im idyllischen Kurstädtchen Bad Nauheim, während einer Podiumsdiskussion mit dem Einstein-Kritiker Professor *Philipp Lenard*.