Zeitschrift: Helvetica Physica Acta

Band: 29 (1956)

Heft: [4]: Supplementum 4. Fünfzig Jahre Relativitätstheorie = Cinquantenaire de la Théorie de la Relativité = Jubilee of Relativity Theory

Artikel: Relativitätstheorie und Wissenschaft

Autor: Pauli, W.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-112751

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 04.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Relativitätstheorie und Wissenschaft

von W. Pauli (Zürich)

Wenn wir die Relativitätstheorie in einem allgemeineren Rahmen als der Physik einschließlich Astrophysik betrachten wollen, so handelt es sich wohl in erster Linie um ihre Beziehung zur Mathematik auf der einen Seite, zur Erkenntnistheorie oder Naturphilosophie auf der anderen Seite. Ja, man kann sagen, daß die Beziehung der Physik zu diesen beiden Gebieten, die der Naturwissenschaft seit dem 17. Jahrhundert ihre charakteristische Prägung gibt, durch die Relativitätstheorie erneut in den Mittelpunkt des allgemeinen Interesses gerückt wurde.

Die spezielle Relativitätstheorie knüpfte an den mathematischen Gruppenbegriff an, wie er bereits in der heute empirisch so wohlbegründeten Galilei-Newtonschen Mechanik zu Tage trat. In dieser sind ja alle Bewegungszustände des Beobachters, mathematisch ausgedrückt alle Koordinatensysteme, gleichberechtigt, die auseinander durch eine gleichförmige, drehungsfreie Translationsbewegung hervorgehen. Da der Zustand der Ruhe einer Masse keiner besonderen Ursache zu seiner Aufrechterhaltung bedarf, mußte in der klassischen Mechanik dasselbe für den Zustand der gleichförmigen Bewegung angenommen werden, da dieser aus dem Ruhezustand durch eine in der Gruppe der Mechanik enthaltene Transformation hervorgeht. Diese Formulierung des Trägheitsgesetzes der klassischen Mechanik ist wohl nicht die ursprüngliche, sondern trägt bereits der Entwicklung des Gruppenbegriffs in der Mathematik des 19. Jahrhunderts Rechnung.

Die Entwicklung der Elektrodynamik in der gleichen Zeitperiode gipfelte in den partiellen Differentialgleichungen von Maxwell und H. A. Lorentz. Es war evident, daß diese die Gruppe der klassischen Mechanik nicht erlaubten, da insbesondere die Unabhängigkeit der Vakuumlichtgeschwindigkeit vom Bewegungszustand der Lichtquellen als Konsequenz in ihnen enthalten ist. Mußte man nun die Eigenschaft der Naturgesetze, eine Gruppe zu gestatten, als nur annähernd gültig aufgeben, oder gilt vielleicht die Gruppe der Mechanik nur annähernd und ist diese durch eine allgemeinere, sowohl für mechanische wie für elektro-

magnetische Vorgänge gültige Gruppe zu ersetzen? Die Entscheidung fiel zu Gunsten der zweiten Alternative. Man konnte dieses Postulat auf zwei Wegen erreichen. Erstens konnte man rein mathematisch untersuchen, welches die allgemeinste Transformationsgruppe ist, der gegenüber die damals wohl bekannten Gleichungen der MAXWELL-LORENTZschen Elektrodynamik ihre Form behalten. Diesen Weg beschritt der Mathematiker H. POINCARÉ. Oder man konnte diejenigen physikalischen Annahmen kritisch ermitteln, welche zur besonderen Gruppe der GALILEI-NEWTONschen Mechanik geführt haben. Diesen zweiten Weg beschritt EINSTEIN. Er zeigte, daß vom allgemeinen Standpunkt der Gleichberechtigung aller mit konstanter Geschwindigkeit gegeneinander bewegten Koordinatensysteme die Invarianz der Gleichzeitigkeit räumlich-distanter Ereignisse, wie sie in der klassischen Mechanik angenommen wird, die besondere zusätzliche Voraussetzung der Möglichkeit unendlich großer Signalgeschwindigkeiten einschließt. Läßt man diese fallen und ersetzt sie durch die Annahme einer endlichen maximalen Signalgeschwindigkeit, dann wird auch die Zeit mittransformiert und die Gruppe läßt, mathematisch gesprochen, eine indefinite quadratische Form von vier Dimensionen, drei Raum- und einer Zeitdimension, invariant. Die MAXWELL-LORENTZsche Elektrodynamik erwies sich in der Tat als invariant gegenüber der von EINSTEIN auf Grund dieser allgemeinen Überlegungen ermittelten Transformationsgruppe, wenn die maximale Signalgeschwindigkeit mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichtes im Vakuum identifiziert wurde. Sowohl EINSTEIN wie POINCARÉ fußten auf den vorbereitenden Arbeiten von H. A. LORENTZ, der dem Ergebnis schon recht nahe gekommen war, ohne es jedoch ganz erreicht zu haben. Ich sehe in der Übereinstimmung der Ergebnisse der unabhängig voneinander von EINSTEIN und POINCARÉ beschrittenen Wege die tiefere Bedeutung einer Harmonie der mathematischen Methode und der Analyse durch Gedankenexperimente, die sich auf allgemeine Züge der physikalischen Erfahrung stützt.

Diese frühen Arbeiten von EINSTEIN über die spezielle Relativitätstheorie zeigten bereits den Erfolg einer Methode in der Physik, die nicht von einem autoritativen Wissen darüber ausgeht, was die Dinge an und für sich sind. EINSTEIN hat uns immer wieder gezeigt, wie der Physiker ohne solche Stützen und ohne feste Regeln in einem uferlosen Meer von Ideen schwimmen lernen muß, von Ideen, zu denen er durch ein ebenso uferloses Meer von empirischem Material zwar inspiriert sein kann, die sich aber aus diesem nicht rein logisch ableiten lassen.

Der Physiker soll nicht a priori wissen was Äther ist, und er befolgt sogar seit EINSTEIN das Gebot „Du sollst dir kein Bildnis machen vom Bewegungszustand des Äthers". Dieser Grundsatz hat eine neue Beleuchtung erfahren in der relativistischen Gravitationstheorie oder allgemeinen

Relativitätstheorie, welche EINSTEIN in den Jahren 1908 bis 1916 allein aufgestellt hat. Die mathematischen Hilfsmittel, die er benützt hat, sind eine Kombination der RIEMANNschen Krümmungstheorie mit MINKOWSKIS vierdimensional-geometrischer Formulierung der speziellen Relativitätstheorie. Diese wird als Grenzfall im Kleinen beibehalten, im Großen aber verallgemeinernd durch ein Feld ersetzt, bestehend aus zehn stetigen Raumzeitfunktionen, den Koeffizienten der indefiniten quadratischen Differentialform der vierdimensionalen Raum-Zeitwelt. Dies entspricht dem Ideenkreis der Differentialgeometrie gekrümmter Räume, in denen die euklidische Geometrie nur im Kleinen gilt. Die Gruppe ist erweitert zur allgemeinen Gruppe stetig differenzierbarer Koordinatentranformationen, welche jedoch diese quadratische Differentialform als Absolutum invariant zu lassen haben. Diese mathematische Struktur war jedoch das schließliche Resultat, nicht der Ausgangspunkt der Überlegungen EINSTEINS zur allgemeinen Relativitätstheorie. Dieser ist vielmehr sein Prinzip der Äquivalenz einer gleichförmig beschleunigten Bewegung eines Beobachters und seines Bezugssystems mit einem homogenen Gravitationsfeld. Es beruht auf der exakten Gleichheit von träger und schwerer Masse, die seit NEWTON bekannt war, aus der jedoch vor EINSTEIN niemand diese Schlußfolgerung gezogen hatte. Das Äquivalenzprinzip garantiert die Harmonie zwischen der mathematischen Struktur des metrischen Feldes der Raum-Zeitwelt, von EINSTEIN kurz als G-Feld bezeichnet, und der Physik der Gravitationseffekte. Diese folgen in der Tat von selbst aus den einfachsten Differentialgesetzen, welche mit der allgemeinen Transformationsgruppe im Einklang sind. An Stelle der einen statischen POISSONschen Differentialgleichung der NEWTONschen Theorie folgen die zehn EINSTEINschen relativistischen Feldgleichungen, wenn an Stelle des LAPLACE-POISSONschen Differentialausdruckes auf der linken Seite eine passend gewählte Kombination von zehnkomponentigen Tensoren, aus dem RIEMANNschen Krümmungstensor durch Kontraktion gebildet, gesetzt wird; auf der rechten Seite der Gleichung an Stelle der Massendichte, EINSTEINS berühmter Folgerung der Gleichheit von Masse und Energie aus der speziellen Relativitätstheorie Rechnung tragend, der Tensor von Energie und Bewegungsgröße. Dieser wie die Gravitationskonstante bleiben das phänomenologische Element der allgemeinen Relativitätstheorie.

Die Beziehungen dieser Theorie zur Naturphilosophie und ihrer historischen Entwicklung sind mannigfaltig. Während die Überwindung der aristotelischen Vorstellung der physikalischen Qualität der Raumpunkte und die Verselbständigung des Raumbegriffes in der Zeit von GALILEI, DESCARTES und NEWTON eine so wesentliche Rolle spielten, ist EINSTEINS G-Feld eben eine mathematische Darstellung der physikalischen Qualitäten der Raumzeitpunkte. Diese Qualitäten stehen allerdings nicht un-

veränderlich fest, wie der Ort, den die materiellen Körper nach ARISTOTELES suchen, sondern sie sind selbst naturgesetzlich bestimmt und von der Materie abhängig. Das G-Feld, nach EINSTEIN eben der Äther in einer neuen Form, bewahrt jedoch seine begriffliche Selbständigkeit gegenüber der Materie. Wohl hat EINSTEIN wiederholt dargelegt, daß er es als befriedigender empfinden würde, wenn bei Verschwinden der Materie auch das G-Feld identisch verschwinden müßte. Er nannte diesen Grundsatz das „MACHsche Prinzip" zu Ehren von ERNST MACH, der mit seiner Kritik des absoluten Raumes den späteren Gedankengängen der allgemeinen Relativitätstheorie die Wege geebnet hat. Man kann jedoch sagen, daß ohne besondere, schwer zu rechtfertigende Zusatzannahmen aus den Gleichungen der allgemeinen Relativitätstheorie allein das MACHsche Prinzip nicht folgt. Das Bestehen eines nicht verschwindenden G-Feldes in einer materiefreien Raum-Zeitwelt bleibt nach diesen Gleichungen logisch möglich. Und insofern das G-Feld existiert, ist Raum und Zeit nicht leer.

Die weitere Entwicklung der naturwissenschaftlichen Ideen von Raum und Zeit und deren Abhängigkeit von dem sie erfüllenden Materiellen liegt als offenes Problem in der Zukunft, sowohl hinsichtlich der großen wie der kleinen Dimensionen. Sie hängt eng zusammen mit der Tragweite des nunmehr „klassischen" Feldbegriffes, einer Frage, die EINSTEIN so sehr am Herzen lag. Ich selbst gehöre zu denjenigen Physikern, die in den Grundlagen der heutigen, primäre Wahrscheinlichkeiten postulierenden Quantenmechanik eine Weiterbildung der von EINSTEIN geschaffenen Denkweise erblicken. Spezifizierte, unter Umständen komplementäre Versuchsbedingungen spielen hier die Rolle der spezifizierten Bewegungszustände der Beobachter in EINSTEINS Relativitätstheorie; die Endlichkeit des Wirkungsquantums, welche der Teilbarkeit der Phänomene im Atomaren eine Grenze setzt, spielt die Rolle der maximalen Signalgeschwindigkeit in EINSTEINS spezieller Relativitätstheorie; die alle möglichen Spezifizierungen der Versuchsbedingungen umfassende Gruppe der unitären Transformationen der Quantenmechanik spielt die Rolle der Gruppe der Koordinatentransformationen, welche in der allgemeinen Relativitätstheorie alle möglichen Bewegungszustände der Beobachter und ihrer gesetzmäßigen Aussagen verbindet. Auch in der Quantenmechanik diskutiert man, gestützt auf eine angenommene mathematische Struktur der hier statistischen Naturgesetze, mit Hilfe von Gedankenexperimenten mögliche Messungen, eine Methode, die gerade EINSTEIN in der Physik mit so großem Erfolg angewendet und dadurch wieder modern gemacht hat.

Trotzdem hielt EINSTEIN an dem engeren Wirklichkeitsbegriff der klassischen Physik fest, von dem aus ihm eine Naturbeschreibung, die

gesetzmäßig nicht determinierte Einzelereignisse zuläßt, als „unvollständig“ erscheinen mußte. Er verband damit eine regressive Sehnsucht nicht etwa nach der alten mechanistischen Idee des Massenpunktes, sondern nach seinem geometrisierten Feldbegriff der allgemeinen Relativitätstheorie. Als Motiv seiner Haltung legte er offen dar, daß ihm ein Abweichen von der engeren Wirklichkeitsidee der Physik vor der Quantenmechanik als eine bedenkliche Annäherung an einen Standpunkt erscheine, bei dem man Traum oder Halluzination nicht deutlich genug vom „Wirklichen“ unterscheiden könne. Dagegen erschien uns anderen der objektive Charakter der Naturbeschreibung der Quantenmechanik dadurch genügend gewahrt, daß deren statistische Gesetze reproduzierbare Vorgänge beschreiben und daß die Resultate der Beobachtung, allen zur Kontrolle zugänglich, vom Beobachter nach Wahl seiner Versuchsanordnung nicht beeinflußt werden können.

Die Diskussionen über diese Fragen mögen noch lange fortdauern. EINSTEIN gab zu, daß er die Möglichkeit einer reinen Feldtheorie, die auch die atomistische Struktur der Materie wiedergibt, nicht beweisen könne, hielt aber daran fest, daß auch das Gegenteil, die Unmöglichkeit einer solchen Theorie, nicht bewiesen sei.

Auch Physiker, die wie ich EINSTEINS allgemeiner Einstellung zur heutigen Quantenphysik nicht folgen, können jedoch seine Grundhaltung zu den verschiedenen auf „-ismus“ endenden Richtungen der traditionellen Philosophie leicht annehmen. Er bewertete diese nicht absolut als richtig oder falsch, sondern als relativ zueinander. Nach seiner Meinung kann der Physiker von jeder dieser Richtungen etwas annehmen. In dem ihm gewidmeten Band der „Library of living philosophers” sagt er in seiner „reply to criticisms” (p. 684):

„(The scientist) appears as *realist* insofar as he seeks to describe a world independent of the acts of perception; as *idealist* insofar as he looks upon the concepts and theories as the free inventions of the human spirit (not logically derivable from what is empirically given); as *positivist* insofar as he considers his concepts and theories justfied *only* to the extent to which they furnish a logical representation of relations among sensory experiences. He may even appear as *Platonist* or *Pythagorean* insofar as he considers the viewpoint of logical simplicity as an indispensable and effective tool of his research.”

Es fällt mir leicht, mich in diese Sätze einzufühlen, während mir das Denken in „-ismen“ fremd, ja unmöglich ist.

Möge EINSTEINS große synthetische Kraft als Mensch und als Denker auch der Physik der Zukunft ein Vorbild sein, wenn sie das empirisch Gegebene und die mathematisch-logische Struktur der Theorie gegeneinander abzuwägen hat.

LABORATOIRE DE PHYSIQUE UNIVERSITÉ NEUCHATEL