Was ist Relativitäts-Theorie?

« Der Aufforderung» Dem Ersuchen Ihres Mitarbeiters, für die „Times" etwas über „Relativität" zu schreiben, komme ich gerne nach. Denn nach dem beklagenswerten Zusammenbruch der früheren regen internationalen Beziehungen der Gelehrten ist mir dies eine willkommene, ja die einzige « Veranlassung» Gelegenheit, meinem Gefühl der Freude und Dankbarkeit den englischen Astronomen und Physikern gegenüber auszusprechen. Es entspricht ganz den großen und stolzen Traditionen der wissenschaftlichen Arbeit in Ihrem Lande, daß « Ihre besten Männer ihrer » bedeutende Forscher viel Zeit und Mühe, Ihre wissenschaftlichen Institute große materielle Mittel aufwendeten,[2] um eine Folgerung einer Theorie zu prüfen, die im Lande Ihrer Feinde während des Krieges vollendet und publiziert « ‚wenn auch nicht» worden ist. Wenn es sich bei der Untersuchung des Einflußes des Gravitationsfeldes der Sonne auf die Lichtstrahlen auch um eine rein objektive Angelegenheit handelte, so « kann ich doch nicht anders » drängt es mich doch, den englischen Fachgenossen auch meinen persönlichen Dank für ihr Werk zu sagen; denn ohne das selbe hätte ich die Prüfung der wichtigsten Konsequenz meiner Theorie wohl nicht mehr erlebt.»[3]

Man kann in der Physik Theorien verschiedener Art unterscheiden. Die Theorien erster Art nenne ich meisten sind konstruktive Theorien. Diese suchen aus einem relativ einfachen zu grunde gelegten Formalismus ein Bild der komplexeren Erscheinungen zu konstruieren. So sucht die kinetische Gastheorie die mechanischen, thermischen und Diffusionsvorgänge auf Bewegungen der Moleküle zurückzuführen, d. h. aus der Hypothese der Molekularbewegung zu konstruieren. Wenn man sagt, es sei gelungen, eine Gruppe von Naturvorgängen zu begreifen, so meint man damit immer, daß eine konstruktive Theorie gefunden sei, die die betreffenden Vorgänge umfaßt.

Es gibt aber neben dieser wichtigsten Klasse von Theorien eine zweite, ich will sie Prinzip-Theorien nennen. Diese bedienen sich nicht der synthetischen sondern der analytischen Methode. Ausgangspunkt und Basis bilden nicht hypothetische Konstruktionselemente sondern empirisch gefundene allgemeine Eigenschaften der Naturvorgänge (Prinzipe), aus denen dann mathematisch formulierte Kriterien folgen, denen die einzelnen Vorgänge bezw. deren theoretische Bilder zu genügen haben. So sucht die Thermodynamik aus dem allgemeinen Erfahrungsresultat, ein perpetuum mobile unmöglich sei, auf analytischem Wege Bedingungen zu ermitteln, denen die einzelnen Vorgänge genügen müssen.

Vorzug der konstruktiven Theorien ist Vollständigkeit, Anpassungsfähigkeit und Anschaulichkeit, Vorzug der Prinzip-Theorien ist logische Vollkommenheit und Sicherheit der Grundlage.[4]

Die Relativitätstheorie gehört zu den Prinzipttheorien. Um ihr Wesen zu erfassen, muß man also in erster Linie die Prinzipe kennen lernen, auf denen sie beruht. Bevor ich auf diese eingehe muß ich aber bemerken, daß die Relativitätstheorie einem Gebäude gleicht, das aus zwei gesonderten Stockwerken besteht, der speziellen und der allgemeinen Relativitätstheorie. Die spezielle Relativitätstheorie, auf welcher die allgemeine ruht, bezieht sich auf alle physikalischen Vorgänge mit Ausschluß der Gravitation; die allgemeine Relativitätstheorie liefert das Gesetz der Gravitation und deren Relationen zu den andern Naturkräften.

Seit dem griechischen Altertum ist es wohlbekannt, daß es zur Beschreibung der Bewegung eines Körpers eines zweiten Körpers bedarf, auf welchen die Bewegung des ersten bezogen wird. Auch die Physik Die Bewegung eines Wagens wird auf den Erdboden bezogen, die eines Planeten auf die Totalität der sichtbaren Fixsterne. In der

Albert Einstein, Was ist Relativitäts-Theorie? The collected Papers of Albert Einstein. Volume7, Seiten 206–211, Princeton University Press, 2002

Physik nennt man den Körper, auf den man die Vorgänge räumlich bezieht, Koordinatensystem. Es können z. B. die Gesetze der Mechanik von Galilei und Newton nur unter Benutzung eines Koordinatensystems formuliert werden.

Der Bewegungszustand des Koordinatensystems darf aber nicht willkürlich gewählt werden, wenn die Gesetze der Mechanik gelten sollen (es muß „drehungsfrei" und „beschleunigungsfrei" sein). Man nennt ein in der Mechanik zugelassenes Koordinatensystem ein „Inertialsystem". Der Bewegungszustand eines Inertialsystems ist aber nach der Mechanik kein durch die Natur eindeutig bestimmter. Es gilt vielmehr der Satz: Ein relativ zu einem Inertialsystem gradlinig und gleichförmig bewegtes Koordinatensystem ist ebenfalls ein Inertialsystem. Unter dem „speziellen Relativitätsprinzip" versteht man nun die Verallgemeinerung dieses Satzes auf beliebige Naturvorgänge: Jedes allgemeine Naturgesetz, welches in Bezug auf ein Koordinatensystem K gilt, muß auch unverändert gelten in Bezug auf ein Koordinatensystem K, welches relativ zu K in gleichförmiger Translationsbewegung ist.

Das zweite Prinzip, auf dem die spezielle Relativitätstheorie beruht, ist das „Prinzip von der Konstanz der Vakuum-Lichtgeschwindigkeit". Dieses sagt: Das Licht hat im Vakuum stets eine bestimmte Ausbreitungs-Geschwindigkeit c (unabhängig vom Bewegungszustand der Lichtquelle).[5] Das Vertrauen, welches der Physiker diesem Satz entgegenbringt, stammt aus den Erfolgen der Maxwell-Lorentz'schen Elektrodynamik.

Die beiden genannten Prinzipe sind durch die Erfahrung mächtig gestützt, schienen aber logisch miteinander nicht vereinbar zu sein. Ihre logische Vereinigung gelang schließlich der speziellen Relativitätstheorie durch eine Abänderung der Kinematik, d. h. der Lehre von den Gesetzen, die Raum und Zeit (vom physikalischen Standpunkt aus) betreffen. Es zeigte sich daß die Aussage der Gleichzeitigkeit zweier Ereignisse nur inbezug auf ein Koordinatensystem Sinn habe, daß die Gestalt von Meßkörpern und die Ganggeschwindigkeit von Uhren von deren Bewegungszustand zum Koordinatensystem abhängen müsse.

Die alte Physik inklusive der Galilei-Newton-'schen Bewegungs-Gesetze passten aber nicht zu der angedeuteten relativistischen Kinematik. Aus letzterer flossen allgemeine mathematische Bedingungen, denen die Naturgesetze entsprechen mußten, wenn die beiden genannten allgemeinen Prinzipien wirklich zutreffen sollten. Diesen mußte die Physik angepasst werden. Insbesondere gelangte man zu einem neuen Bewegungsgesetz für (rasch bewegte) Massenpunkte, welches an elektrisch geladenen Teilchen vortrefflich bestätigt wurde. Das wichtigste Ergebnis der speziellen Relativitätstheorie betraf die träge Masse körperlicher Systeme. Es ergab sich, daß die Trägheit eines Systems von seinem Energieinhalt abhängen müsse, und man gelangte geradezu zu der Auffassung, daß träge Masse nichts anderes sei als latente Energie. Der Satz von der Erhaltung der Masse verlor seine Selbständigkeit und verschmolz mit dem von der Erhaltung der Energie.

Die spezielle Relativitäts-Theorie, welche nichts anderes war als eine systematische Fortsetzung der Maxwell-Lorentz'schen Elektrodynamik, wies aber über sich selbst hinaus. Sollte die Unabhängigkeit der physikalischen Gesetze vom Bewegungszustande des Koordinatensystems auf gleichförmige Translationsbewegungen der Koordinatensysteme zu einander beschränkt sein? Was hat die Natur mit den von uns eingeführten Koordinatensystemen und deren Bewegungszustand zu thun? Wenn es schon für die Naturbeschreibung nötig ist, sich eines von uns willkürlich eingeführten Koordinatensystems zu bedienen, so sollte die Wahl von dessen Bewegungszustand keiner Beschränkung unterworfen sein; die Gesetze sollten von dieser Wahl ganz unabhängig sein (Allgemeines Relativitäts Prinzip).

Die Durchführung dieses allgemeinen Relativi-

tätsprinzips wird nahe gelegt durch eine längst bekannte Erfahrung, nach welcher die Schwere alle Körpern diesselbe Beschleunigung erteilt. und die Trägheit eines Körpers durch dieselbe Konstante beherrscht wird (Gleichheit der trägen und schweren Masse). Man denke etwa an ein Koordinatensystem, welches relativ zu einem Inertialsystem im Sin- ne Newtons in gleichförmiger Rotation begriffen ist. Die relativ zu diesem System auftretenden Zentrifugalkräfte müssen im Sinne von Newtons Lehre als Trägheitskräfte Wirkungen der Trägheit aufgefaßt werden. Diese Zentrifugalkräfte sind aber genau wie die Schwerewirkungen[6] proportional der Masse der Körper. Sollte es da nicht möglich sein, das Koordinatensystem als ruhend und die Zentrifugalkräfte als Gravitationskräfte aufzufassen? Die Auffassung liegt nahe, aber die klassische Mechanik verbietet es.

Diese flüchtige Überlegung läßt ahnen, daß eine allgemeine Relativitätstheorie die Gesetze der Gravitation liefern muß, und die konsequente Verfolgung des Gedankens hat die Hoffnung gerechtfertigt.

Aber der Weg war schwerer als man denken sollte, weil er das Aufgeben der Euklidischen Geometrie verlangte. Dies bedeutet: Die Gesetze, nach welchen sich die festen Körper im Raume anordnen lassen, stimmen nicht genau überein mit den Lagerungsgesetzen, welche die euklidische Geometrie den Körpern zuschreibt. Dies meint man, wenn man von „Krümmung des Raumes" redet. Die Grundbegriffe „Gerade", „Ebene" etc. verlieren dadurch ihre exakte Bedeutung in der Physik. In der allgemeinen Relativitätstheorie spielt die Lehre von Raum und Zeit, die Kinematik nicht mehr die Rolle eines von der übrigen Physik unabhängigen Fundamentes. Das geometrische Verhalten der Körper und der Gang der Uhren hängt vielmehr von den Gravitationsfeldern ab, die selbst wieder von der Materie erzeugt sind.

Die neue Theorie der Gravitation weicht in prinzipieller Hinsicht von der Theorie Newtons bedeutend ab. Aber ihre praktischen Ergebnisse stimmen mit denen der Newton'schen Theorie so nahe überein, daß es schwer fällt, Unterscheidungs-Kriterien zu finden, die der Erfahrung zugänglich sind. Solche haben sich bis jetzt gefunden

1) in der Drehung der Ellipsen der Planetenbahnen um die Sonne (beim Merkur bestätigt)

2) in der Krümmung der Lichtstrahlen durch die Gravitationsfelder (durch die englischen Sonnenfinsternis-Aufnahmen bestätigt).

3) in einer Verschiebung der Spektrallinien nach dem roten Spektralende hin des von Sternen bedeutender Masse zu uns gesandten Lichtes (bisher nicht bestätigt).

Der Hauptreiz der Theorie liegt in ihrer logischen Geschlossenheit. Wenn eine einzige aus ihr gezogene Konsequenz sich als unzutreffend erweist, muß sie verlassen werden; eine bloße Modifikation erscheint ohne Zerstörung des ganzen Gebäudes unmöglich.

Niemand aber soll denken, daß durch diese oder irgend eine andere Theorie Newtons große Schöpfung im eigentlichen Sinne verdrängt werden könnte. Seine klaren und großen Ideen werden als Fundament unserer ganzen modernen Begriffsbildung auf dem Gebiete der natural philosophie ihre eminente Bedeutung in aller Zukunft behalten.[7]

Albert Einstein