

12. *Relativität und Gravitation.*  
*Erwiderung*  
*auf eine Bemerkung von M. Abraham;*  
*von A. Einstein.*

---

In einer in diesen Annalen erscheinenden Notiz hat M. Abraham auf einige von mir geäußerte kritische Bedenken zu seinen Untersuchungen über Gravitation geantwortet, sowie seinerseits an meinen Arbeiten über diesen Gegenstand Kritik geübt. Ich will im folgenden auf die von ihm berührten Punkte einzeln eingehen und insbesondere meine Ansichten über den gegenwärtigen Stand der Relativitätstheorie den von ihm geäußerten gegenüberstellen.

Abraham bemerkt, ich hätte durch das Aufgeben des Postulates von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit und durch den damit zusammenhängenden Verzicht auf die Invarianz der Gleichungssysteme gegenüber Lorentztransformationen der Relativitätstheorie den Gnadenstoß gegeben. Um hierauf zu antworten, bedarf es einer Überlegung über die Grundlagen der Relativitätstheorie.

Die gegenwärtig als „Relativitätstheorie“ bezeichnete Theorie ruht auf zwei Prinzipien, die voneinander durchaus unabhängig sind, nämlich

1. dem Relativitätsprinzip (bezüglich gleichförmiger Translation),
2. dem Prinzip von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit.

Ich will diese beiden Prinzipien genauer formulieren, nicht in der Meinung, etwas Neues dabei vorzubringen, sondern nur, um mich nachher bequemer ausdrücken zu können. Wir stellen zwei Formulierungen des Relativitätsprinzipes einander gegenüber:

1. Beziehen wir die physikalischen Systeme auf ein solches Koordinatensystem  $K$ , daß die Naturgesetze möglichst einfach werden, so gibt es unendlich viele Koordinatensysteme, in bezug auf welche jene Gesetze dieselben sind, nämlich alle diejenigen Koordinatensysteme, die sich in gleichförmiger Translationsbewegung relativ zu  $K$  befinden.

2. Es sei  $\Sigma$  ein von allen übrigen physikalischen Systemen (im Sinne der geläufigen Sprache der Physik) isoliertes System, und es sei  $\Sigma$  auf ein solches Koordinatensystem  $K$  bezogen, daß die Gesetze, welchen die räumlich-zeitlichen Änderungen von  $\Sigma$  gehorchen, möglichst einfache werden; dann gibt es unendlich viele Koordinatensysteme, in bezug auf welche jene Gesetze die gleichen sind, nämlich alle diejenigen Koordinatensysteme, die sich relativ zu  $K$  in gleichförmiger Translationsbewegung befinden.

Es ist leicht einzusehen, daß lediglich das Relativitätsprinzip in der Form 2 durch die uns gegebenen Erfahrungen nahe gelegt wird. Es bezeichne nämlich  $\Sigma$  wieder das betrachtete „isolierte“ System,  $U$  die Gesamtheit aller übrigen Systeme der Welt. Um das Relativitätsprinzip in der Form 1 zu prüfen, müßte man zwei Versuche ausführen, in deren ersten  $U$  und  $\Sigma$  relativ zu  $K$  in genau denselben Zustand gebracht werden, wie im zweiten Versuche relativ zu  $K'$ . Dies ist niemals möglich gewesen und wird nie möglich sein. Um das Prinzip in der Form 2 zu prüfen, hat man dagegen nur  $\Sigma$  allein in verschiedene Zustände zu bringen, ohne sich um  $U$  zu kümmern; man hat zwei Versuche auszuführen, in deren ersten  $\Sigma$  allein relativ zu  $K$  in denselben Zustand gebracht wird wie in dem zweiten Versuche relativ zu  $K'$ .

Die Auseinanderhaltung dieser beiden Formulierungen war bisher überflüssig, da man dem „Restsystem“  $U$  keinerlei Einfluß auf die Vorgänge in bezug auf  $\Sigma$  einräumte. Aber meine und Abrahams Überlegungen über die Gravitation lassen eine solche Auffassung nicht zu. Nach diesen Überlegungen hängt der Ablauf der Vorgänge in  $\Sigma$  (z. B. die Lichtgeschwindigkeit) vom Zustande von  $U$  (z. B. vom mittleren Abstand der  $U$  konstituierenden Einzelsysteme von  $\Sigma$ ) ab. Es muß aber daran festgehalten werden, daß das Relativitätsprinzip in der Form 2 durch den Charakter unserer gesamten physikalischen Erfahrung und insbesondere durch den Versuch von Michelson und Morley derart gestützt wird, daß es mächtiger Argumente bedürfte, um einen Zweifel in jenem Prinzip zu begründen. Man kann das Relativitätspostulat in der durch die Erfahrung gestützten Form 2 abgekürzt, aber weniger präzis auch so aussprechen:

„Die Relativgeschwindigkeit des Bezugssystems  $K$  gegen das Restsystem  $U$  geht in die physikalischen Gesetze nicht ein.“

Die im vorigen angedeuteten Überlegungen bringen es nach meiner Ansicht mit sich, daß jede Theorie abzulehnen ist, welche ein Bezugssystem gegenüber den relativ zu ihm in gleichförmiger Translation befindlichen Bezugssystemen auszeichnet. Abraham macht sogar den Versuch, ein derartiges ausgezeichnetes Bezugssystem festzulegen mit den Worten: „Wenn unter allen Bezugssystemen dasjenige ausgezeichnet ist, in welchem das Schwerfeld statisch oder quasi-statisch ist, so ist es erlaubt, eine auf dieses System bezogene Bewegung „absolut“ zu nennen usw.“ Dies scheint mir selbst dann nicht richtig zu sein, wenn man jedes Element eines dynamischen Schwerfeldes durch eine Geschwindigkeitstransformation auf ein statisches transformieren könnte. Denn daß eine derartige Transformation gleichzeitig *alle* Elemente eines dynamischen Gravitationsfeldes in dieser Weise transformieren würde, ist ausgeschlossen; es kann also durch eine derartige Festsetzung kein Bezugssystem gegenüber allen relativ zu ihm gleichförmig bewegten ausgezeichnet werden.

Es ist allgemein bekannt, daß auf das Relativitätsprinzip allein eine Theorie der Transformationsgesetze von Raum und Zeit nicht gegründet werden kann. Es hängt dies bekanntlich mit der Relativität der Begriffe „Gleichzeitigkeit“ und „Gestalt bewegter Körper“ zusammen. Um diese Lücke auszufüllen, führte ich das der H. A. Lorentzschen Theorie des ruhenden Lichtäthers entlehnte Prinzip von der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit ein, das ebenso wie das Relativitätsprinzip eine physikalische Voraussetzung enthält, die nur durch die einschlägigen Erfahrungen gerechtfertigt erschien (Versuche von Fizeau, Rowland usw.). Dies Prinzip besagt:

Es existiert ein Bezugssystem  $K$ , in dem sich jeder Lichtstrahl im Vakuum mit der universellen Geschwindigkeit  $c$  fortpflanzt, unabhängig davon, ob der lichtscheidende Körper relativ zu  $K$  ruht oder bewegt ist.

Aus diesen beiden Prinzipien heraus läßt sich diejenige Theorie entwickeln, welche gegenwärtig unter dem Namen „Relativitätstheorie“ bekannt ist. Diese Theorie ist in dem Umfange richtig, als die beiden ihr zugrunde gelegten Prinzipie

zutreffen. Da diese in weitem Umfange zuzutreffen scheinen, so scheint auch die Relativitätstheorie in ihrer jetzigen Form einen wichtigen Fortschritt zu bedeuten; ich glaube nicht, daß sie die Fortentwicklung der theoretischen Physik gehemmt hat!

Wie steht es nun aber mit der Grenze der Gültigkeit der beiden Prinzipien? An der allgemeinen Gültigkeit des Relativitätsprinzips zu zweifeln, haben wir — wie schon hervorgehoben — nicht den geringsten Grund. Dagegen bin ich der Ansicht, daß das Prinzip der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit sich nur insoweit aufrecht erhalten läßt, als man sich auf raum-zeitliche Gebiete von konstantem Gravitationspotential beschränkt. Hier liegt nach meiner Meinung die Grenze der Gültigkeit zwar nicht des Relativitätsprinzips wohl aber des Prinzips der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit und damit unserer heutigen Relativitätstheorie. Zu dieser Meinung führen mich die im folgenden angedeuteten Überlegungen.

Eines der wichtigsten Resultate der Relativitätstheorie ist die Erkenntnis, daß jegliche Energie  $E$  eine ihr proportionale Trägheit ( $E/c^2$ ) besitzt. Da nun jede träge Masse zugleich eine schwere Masse ist, soweit unsere Erfahrung reicht, können wir nicht umhin, einer jeden Energie  $E$  auch eine schwere Masse  $E/c^2$  zuzuschreiben.<sup>1)</sup> Hieraus folgt sofort, daß die Schwere auf einen bewegten Körper stärker wirkt, als auf denselben Körper, falls dieser ruht.

Wenn sich das Schwerfeld im Sinne unserer heutigen Relativitätstheorie deuten läßt, so kann dies wohl nur auf zwei Arten geschehen. Man kann den Gravitationsvektor entweder als Vierervektor oder als Sechservektor auffassen. Für jeden dieser beiden Fälle ergeben sich Transformationsformeln für den Übergang zu einem gleichförmig bewegten Bezugssystem. Mittels dieser Transformationsformeln und der Transformationsformeln für die ponderomotorischen Kräfte gelingt es dann, für beide Fälle die auf in einem statischen Schwere-

---

1) Hr. Langevin machte mich mündlich darauf aufmerksam, daß man zu einem Widerspruch mit der Erfahrung kommt, wenn man diese Annahme nicht macht. Da nämlich beim radioaktiven Zerfall große Energiemengen abgegeben werden, muß dabei die *träge* Masse der Materie abnehmen. Nähme die schwere Masse nicht proportional ab, so müßte die Schwerebeschleunigung von aus verschiedenen Elementen bestehenden Körpern in demselben Schwerfeld eine nachweisbar verschiedene sein.

feld bewegte materielle Punkte wirkenden Kräfte zu finden. Man kommt hierbei aber zu Ergebnissen, die den genannten Konsequenzen aus dem Satz von der schweren Masse der Energie widerstreiten. Es scheint also, daß der Gravitationsvektor sich in das Schema der heutigen Relativitätstheorie nicht widerspruchsfrei einordnen läßt.

Diese Sachlage bedeutet nach meiner Ansicht aber keineswegs das Scheitern der auf das Relativitätsprinzip gegründeten Methode, ebensowenig als die Entdeckung und richtige Deutung der Brownschen Bewegung dazu führt, die Thermodynamik und Hydromechanik als Irrlehren anzusehen. Die heutige Relativitätstheorie wird nach meiner Ansicht stets ihre Bedeutung behalten als einfachste Theorie für den wichtigen Grenzfall des zeiträumlichen Geschehens bei konstantem Gravitationspotential. Aufgabe der nächsten Zukunft muß es sein, ein relativitätstheoretisches Schema zu schaffen, in welchem die Äquivalenz zwischen träger und schwerer Masse ihren Ausdruck findet. Einen ersten, recht bescheidenen Beitrag zur Erreichung dieses Zieles habe ich in meinen Arbeiten über das statische Gravitationsfeld zu geben gesucht. Dabei ging ich von der nächstliegenden Auffassung aus, daß die Äquivalenz von träger und schwerer Masse dadurch auf einer Wesensgleichheit dieser beiden elementaren Qualitäten der Materie bzw. der Energie zurückzuführen sei, daß das statische Gravitationsfeld als physikalisch wesensgleich mit einer Beschleunigung des Bezugssystems aufgefaßt wird. Es ist zuzugestehen, daß ich diese Auffassung nur für unendlich kleine Räume widerspruchsfrei durchführen konnte, und daß ich hierfür keinen befriedigenden Grund anzugeben weiß. Aber ich sehe hierin keinen Grund, jenes Äquivalenzprinzip auch für das unendlich Kleine abzuweisen; niemand wird leugnen können, daß dies Prinzip eine natürliche Extrapolation einer der allgemeinsten Erfahrungssätze der Physik ist. Andererseits eröffnet uns dies Äquivalenzprinzip die interessante Perspektive, daß die Gleichungen einer auch die Gravitation umfassenden Relativitätstheorie auch bezüglich Beschleunigungs- (und Drehungs-) Transformationen invariant sein dürften. Allerdings scheint der Weg zu diesem Ziele ein recht schwieriger zu sein. Man sieht schon aus dem bisher behandelten, höchst speziellen

Falle der Gravitation ruhender Massen, daß die Raum-Zeit-Koordinaten ihre einfache physikalische Deutung einbüßen werden, und es ist noch nicht abzusehen, welche Form die allgemeinen raumzeitlichen Transformationsgleichungen haben könnten. Ich möchte alle Fachgenossen bitten, sich an diesem wichtigen Problem zu versuchen!

Nun noch einige Bemerkungen zu Abrahams Notiz. In seiner Erwiderung sagt Hr. Abraham über seine Theorie: „Es kann von irgend einer Art von Relativität, d. h. von einer Korrespondenz der beiden Systeme, die sich in Gleichungen zwischen ihren Raum-Zeit-Parametern  $x, y, z, t$  und  $x', y', z', t'$  ausdrücken würde, keine Rede sein.“ Ich will mir kein Urteil darüber anmaßen, ob dies Abrahams ursprüngliche Annahme war oder nicht. Jedenfalls verliert beim Aufgeben des Relativitätsprinzips das von Abraham in seiner Theorie als Richtschnur benutzte relativitätstheoretische Schema jegliche überzeugende Kraft. Abraham macht mich ferner darauf aufmerksam, daß er bereits in seiner Arbeit<sup>1)</sup> den Ausdruck

$$\frac{m c}{\sqrt{1 - \frac{q^2}{c^2}}}$$

für die Energie des materiellen Punktes im Schwerfeld angegeben hat; ich hatte dies leider übersehen. Allerdings ist dies Resultat mit den Grundgleichungen von Abrahams Theorie im Widerspruch. Es folgt nämlich aus diesem Ausdruck für die Energie, daß die auf einen im Schwerfeld ruhenden materiellen Punkt wirkende Kraft  $-m \text{ grad } c$  sei; dem widersprechend folgt aber für dieselbe Größe aus den Gleichungen (2) und (6) von Abrahams Arbeit der Ausdruck  $-m c \text{ grad } c$ . Abraham behauptet ferner, ich hätte seine Ausdrücke für die Energiedichte und für die Spannungen im Schwerfeld benutzt. Dies trifft nicht zu; nach Abraham ist beispielsweise die Energiedichte im statischen Schwerfeld  $\frac{c^2}{\gamma} \text{ grad}^2 c$ , nach meiner Theorie  $\frac{1}{2k} \frac{\text{grad}^2 c}{c}$ . Das Eingehen von  $c$  ist in beiden Theorien verschieden.

1) M. Abraham, Physik. Zeitschr. 13. Nr. 19. p. 2. 1912.

(Eingegangen 4. Juli 1912.)