

Philosoph. Jahrbuch der Görres-Gesellschaft.

35. Band. 2. Heft.

Ueber Raum und Zeit.

Von Prof. Dr. Anton Weber in Dillingen a. D.

Die alte Frage nach dem Wesen von Raum und Zeit ist durch die Erörterungen über die Relativitätstheorie in ein neues Stadium getreten. Einstein und Minkowski haben gezeigt, dass zwischen Zeit und Raum merkwürdige Zusammenhänge bestehen. Es verlohnt sich daher, von neuem die Frage zu stellen: Was sind Raum und Zeit? Man darf nicht hoffen, diese Frage jemals erschöpfend beantworten zu können. Raum und Zeit sind Grundbegriffe; sie gehören zu jenen primären Bausteinen des Erkennens, welche zur Erklärung des Weltgeschehens notwendig, selbst aber nicht vollständig erklärbar sind. Soweit das Problem von Raum und Zeit lösbar ist, scheint es sich auf folgende drei Fragen zu reduzieren: Welche räumlichen Grössen haben reale Existenz? Sind die Raum- und Zeitgrössen Substanzen oder Akzidentien? Welches sind im letzteren Fall die tragenden Substanzen?

Als Antwort auf diese Fragen wollen wir im folgenden drei Theorien aufstellen und ihre Wahrscheinlichkeit abwägen. Welches davon die richtige ist, lässt sich kaum mit mathematischer Sicherheit entscheiden. Doch sprechen verschiedene Gründe sehr nachdrücklich für diejenige, welche wir an dritter Stelle darlegen werden. Sicher könnte man noch mehr Theorien aufstellen. Es handelt sich aber nicht darum, alle Möglichkeiten zu erschöpfen; man muss sich einstweilen mit den einfachsten und naheliegendsten Hypothesen begnügen und erst, wenn diese als unzureichend erkannt werden sollten, wird man zu komplizierteren und fernerliegenden Annahmen greifen. Die Zahl der einfachen und naheliegenden Theorien glaube ich im folgenden erschöpft zu haben.

Für die Frage nach dem Wesen von Raum und Zeit ist das Einsteinsche Relativitätsprinzip, und zwar vor allem seine metaphysische Seite von einschneidender Bedeutung. Die Unterscheidung zwischen physikalischem und metaphysischem Relativitätsprinzip ist für die vorliegende Arbeit unerlässlich; deshalb möchte ich sie genau fixieren. Unter dem physikalischen speziellen Relativitätsprinzip verstehe ich mit Herrn E. Hartmann¹⁾ „den Satz, dass die

¹⁾ Herr Hartmann hat sich in seinem Vortrag auf der Tagung der Görresgesellschaft in Fulda (1920) über diese Unterscheidung ausgesprochen. Da der Vortrag noch nicht gedruckt ist, hatte Herr Hartmann die Güte, mir auf meine Anfrage die obige Formulierung brieflich mitzuteilen.

gesetzmässigen Beziehungen zwischen den Zahlen, die sich als Resultate der physikalischen Messungen ergeben, durch eine Lorentztransformation nicht geändert werden, sowie alles das, was aus diesem Satze über jene Beziehungen abgeleitet werden kann“. Unter der physikalischen allgemeinen Relativitätstheorie verstehen wir die von Einstein gefundenen und mathematisch formulierten Lehrsätze, welche bei beliebiger Transformation ungeändert bleiben. Es sind das die Gravitationsgleichungen, das Gravitationsprinzip sowie die verallgemeinerten Maxwell'schen und hydrodynamischen Gleichungen. Auch die Folgerungen, die sich auf mathematischem Wege daraus ergeben, gehören zum physikalischen Teil der allgemeinen Relativitätstheorie.

Unter dem metaphysischen Relativitätsprinzip verstehe ich den Satz, dass kein Raum-Zeit-System vor den übrigen irgendwie ausgezeichnet ist. Wer diesen Satz anerkennt, muss z. B. die Existenz des Weltäthers leugnen. Denn dieser würde ein Raumsystem unter allen übrigen auszeichnen und definierbar machen und das wäre gegen das Prinzip. Dagegen ist der Aether recht wohl vereinbar mit dem blossen physikalischen Relativitätsprinzip. Letzteres fordert nur, dass ein etwa ausgezeichnetes Raumsystem als solches für uns nicht erkennbar ist. Aus dem metaphysischen Prinzip folgt ferner, dass es keine absolute Bewegung und keine absolute Gleichzeitigkeit gibt und weiterhin, dass Raum und Zeit keine getrennte Existenz haben.

Diese beiden Folgerungen gehen weit über das physikalische Prinzip und über alles experimentell Beweisbare hinaus.

Dem metaphysischen Relativitätsprinzip gegenüber wollen wir in dieser Arbeit den Standpunkt einnehmen, dass es weder bewiesen noch widerlegt ist. Beide Möglichkeiten sollen Berücksichtigung finden, d. h. wir werden unsere Raum- und Zeittheorien zuerst ohne Rücksicht auf das Einsteinsche Prinzip aufstellen, und dann wollen wir jedesmal prüfen, ob sie mit dem genannten Prinzip im Einklang stehen oder durch geeignete Modifikationen in Einklang gebracht werden können.

I.

Drei-Parameter-Theorie.

In der Physik stellt man die räumlichen Grössen durch rechtwinklige Koordinaten x , y , z dar. Wenn es sich also um das Wesen des Raumes handelt, dann liegt dem Physiker der Gedanke am nächsten, dass die genannten Koordinaten reale Existenz besitzen. Diese Annahme bildet unsere erste Raumhypothese. In jedem Körperpunkt seien drei messbare Quantitäten vorhanden, deren Grösse eben durch die Zahlen x , y , z angegeben wird. Wir wollen die drei Quantitäten mit dem in der Mathematik gebräuchlichen Ausdruck Parameter bezeichnen. Unsere erste Raumhypothese möge dementsprechend Drei-Parameter-Theorie heissen.

Die drei Parameter sind veränderlich und zwar jeder für sich, unabhängig von den andern. Ändert sich der x-Parameter, während y und z ihre Grösse unverändert beibehalten, so ist dies ein Vorgang, der in der gewöhnlichen Sprechweise der Mechanik beschrieben wird durch die Aussage: „Der Körper bewegt sich parallel zur x-Achse“. Wenn sich zwei oder alle drei Parameter gleichzeitig ändern, dann sagen wir: „Der Körper bewegt sich in einer Ebene bzw. im Raume“.

Wir können die drei Raumparameter in eine Linie stellen mit den übrigen physikalischen Zustandsgrössen der Körper, mit der Temperatur, der Massendichte, der elektrischen und magnetischen Ladungsdichte, mit den Komponenten der elektrischen und denen der magnetischen Feldstärke usw. Alle diese Zustandsgrössen sind messbare Quantitäten, ihnen reihen wir nun die drei Raumparameter x, y, z an.

Von den aufgezählten Quantitäten sind die einen selbständige Einzelgrössen, die anderen bilden Dreiergruppen. Einzelparameter sind z. B. Massendichte und Temperatur. Dagegen gehören zu je dreien zusammen die magnetischen Feldkomponenten. Innerhalb einer solchen Dreiergruppe stehen die drei Parameter einander gleichberechtigt gegenüber; sie spielen bei allen Naturgesetzen eine gleichartige Rolle. In den physikalischen Formeln sind sie derart symmetrisch vertreten, dass sich bei gegenseitiger Vertauschung der drei Parameter die Formeln nicht ändern. So z. B. berechnet sich die magnetische Energiedichte aus der Formel

$$E = L^2 + M^2 + N^2,$$

worin L, M, N die Komponenten der magnetischen Feldstärke bedeuten. Bei beliebiger Vertauschung dieser drei Buchstaben bleibt die Formel unverändert. Eine solche Dreiergruppe von Quantitäten wird auch gebildet durch die Raumparameter x, y, z.

Noch in anderer Weise können wir die Quantitäten eines Körperpunktes einteilen; wir können primäre oder Urparameter unterscheiden von den sekundären oder abgeleiteten. So ist z. B. die magnetische Energiedichte ein abgeleiteter Parameter, d. h. eine blosser Rechnungsgrösse, die sich aus den primären Parametern L, M, N mittels der eben angegebenen Formel bestimmen lässt. Man kann annehmen, dass neben den drei magnetischen Feldkomponenten nicht noch ein weiterer Parameter E real existiert und dass die magnetische Energiedichte E bloss eine mathematische Zusammenfassung der genannten drei Feldkomponenten ist.

Wir werden ganz allgemein nur den primären Parametern reale Existenz zuerkennen, die sekundären aber als Rechnungsgrössen betrachten. Die Entscheidung, ob ein gegebener Parameter primär oder sekundär ist, hängt natürlich vom jeweiligen Stand der physikalischen Forschung ab. Mancher Parameter, der uns heute primär und unabhängig zu sein scheint, wird sich vielleicht im Laufe der Zeit aus anderen Parametern berechnen lassen. Jedenfalls aber kann

es nicht lauter sekundäre Parameter geben, eine begrenzte Anzahl von Parametern muss sicher primär und unabhängig sein. Sie bilden die Grundlage alles physikalischen Rechnens und Denkens, aber eine nähere Beschreibung derselben ist nicht möglich. Es bleibt uns versagt, tiefer in die Erkenntnis ihres Wesens einzudringen, wir müssen uns begnügen, sie als messbare Quantitäten zu kennzeichnen. Damit sind wir in dieser Richtung an die Grenze des menschlichen Erkennens gelangt.

In unserer ersten Raumtheorie sind die drei Quantitäten x , y , z als primäre, selbständige Parameter gedacht. Alle übrigen Raumdinge, wie z. B. Abstände, Winkel, Flächen usw. sind blosser Rechnungsgrößen oder logische Beziehungen. Sind zwei Punkte gegeben mit den primären Parametern x , y , z bzw. x' , y' , z' , so berechnet sich der Abstand zwischen beiden mittels der Formel

$$r = \sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2 + (z' - z)^2}.$$

Wenn die Parameter einer Anzahl von Körperpunkten die lineare Gleichung

$$ax + by + cz = d$$

befriedigen, dann sagen wir, sie liegen in einer Ebene. Die Ebene ist also lediglich eine Zahlenrelation zwischen den Parametern verschiedener Punkte. Befriedigen die Parameter der nämlichen Körperpunkte noch eine zweite lineare Gleichung

$$mx + ny + pz = q,$$

so sagen wir, die Punkte liegen auf einer Geraden. Auch mit dem Wort Raum bezeichnen wir nichts Reales. Der Raum ist bloss der Inbegriff aller denkbaren Kombinationen von drei Parameterzahlen.

Nach der Drei-Parameter-Theorie unterscheidet sich der physikalische Raum wesentlich vom Vorstellungsraum. Unser Vorstellungsvermögen präsentiert uns den Raum als etwas Äusserliches, als ein Ding, das nicht einen Bestandteil oder eine Eigenschaft der Körper ausmacht, das vielmehr unabhängig von den Körpern existiert. Bewegt sich ein Körper nach einer anderen Raumstelle hin, so scheint er dabei keine innere Wandlung durchzumachen. Nach unserer Parameterhypothese hingegen erleidet der Körper bei der Bewegung eine innere Veränderung; diese besteht darin, dass drei seiner Akzidentien, nämlich die drei Parameter x , y , z an Grösse wachsen oder abnehmen.

Etwas Aehnliches ist zu sagen bezüglich der Homogenität und Isotropie des Raumes. Soweit uns das Experiment den Raum kennen lehrt, ist der Raum homogen und isotrop, wenigstens nach der älteren Physik. Homogen nennen wir den Raum, weil nach unserer Erfahrung alle Stellen des Raumes gleichartig und gleichberechtigt sind. Kein Raumpunkt besitzt Eigenschaften, die ihn vor den übrigen auszeichnen würden, und deshalb spielen sich alle physikalischen Vorgänge an jeder Stelle des Raumes in gleicher Weise ab. Der Raum ist ferner isotrop, d. h. alle seine Richtungen sind

gleichberechtigt, keine Richtung ist vor den übrigen durch irgendein Merkmal ausgezeichnet. Beide Eigenschaften, Homogenität und Isotropie, gelten, soweit sich die Eigenschaften des Raumes experimentell feststellen lassen, sie gelten aber nicht für die drei Parameter unserer Raumhypothese. Nach dieser Hypothese ist der Punkt

$$x = 0, y = 0, z = 0$$

vor allen übrigen ausgezeichnet. Unter den Richtungen existieren sogar drei ausgezeichnete, und zwar jene, die wir als natürliche Koordinatenachsen bezeichnen können. Die natürliche x-Achse z. B. ist die Gerade

$$y = 0, z = 0,$$

d. h. der geometrische Ort jener Punkte, für welche der y- und z-Parameter den Wert Null besitzen. Die innere Struktur des Raumes ist also nach unserer Hypothese weder homogen noch isotrop. Das beeinträchtigt aber den Wert der Hypothese nicht im mindesten.

Die Brauchbarkeit unserer Raumtheorie hängt nur davon ab, ob sie alle Erfahrungstatsachen auf dem Gebiete des physikalischen Raumes zu erklären vermag. Genügt wirklich die reale Existenz der drei Parameter oder brauchen wir daneben noch weitere reale Raumgrößen? Die Physik operiert z. B. viel mit Längen. Sind die Längen wirklich bloss Rechnungsgrößen? Darauf ist zu antworten, dass die Erfahrung niemals die reale Existenz einer Länge ergeben hat. Greifen wir eine der Methoden heraus, die zur Längenmessung Verwendung finden, etwa die Längenmessung durch Anlegen eines Maßstabes! Wir legen den Maßstab neben den zu messenden Stab, so dass sich ihre Anfangs- und Endpunkte berühren. In der Sprache unserer Drei-Parameter-Theorie ausgedrückt, heisst das: Die Anfangspunkte der beiden Stäbe stimmen in der Grösse ihrer Raumparameter überein und ebenso ihre Endpunkte. Durch das angegebene Experiment ist die Länge des Stabes festgestellt. Ob aber der Abstand zwischen seinen Endpunkten etwas Reales oder eine reine mathematische Grösse ist, lässt sich daraus nicht entnehmen. Die Annahme, dass nur die Raumparameter etwas Reales sind, leistet dem Messungsergebnisse jedenfalls Genüge.

Auch die Naturgesetze werden durch unsere Raumtheorie befriedigt. So sagt z. B. das Gravitationsgesetz aus, dass sich zwei materielle Punkte gegenseitig anziehen mit der Kraft

$$F = \frac{\alpha}{r^2},$$

wo α eine Konstante bedeutet. Die Anziehung hängt also von r ab. Das erfordert nun keineswegs die reale Existenz des Abstandes r . Wir können ja das Gravitationsgesetz auch in folgender Form schreiben:

$$F = \frac{\alpha}{(x' - x)^2 + (y' - y)^2 + (z' - z)^2}.$$

Jetzt hängt die Anziehung nur noch von den beiderseitigen Parametern ab, und es genügt die reale Existenz der Parameter allein.

Ganz in der gleichen Weise können wir bei allen übrigen Naturgesetzen vorgehen, in welchen der Abstand eine Rolle spielt.

Auch das Trägheitsprinzip besitzt nach unserer Raumtheorie einen leicht verständlichen Inhalt. Es besagt: Wenn ein Raumparameter im Wachsen oder Abnehmen begriffen ist, dann behält er ohne äussere Krafteinwirkung die Geschwindigkeit des Wachsens oder Abnehmens unverändert bei.

Alle Erfahrungstatsachen und alle Naturgesetze lassen sich so formulieren, dass die drei Parameter x , y , z die einzigen darin vorkommenden räumlichen Grössen sind. Unsere Drei-Parameter-Theorie stellt also eine der möglichen Raumhypothesen dar. Welches sind nun die Vorteile und welches die Nachteile derselben?

Was der Theorie zum Vorteil gereicht, springt in die Augen: Sie ist ausserordentlich einfach. Wegen der Einfachheit der Koordinatenrechnung hat man in Mathematik und Physik diese Rechnungsweise eingeführt, und der gleiche Grund empfiehlt die Koordinaten für die Erklärung des physikalischen Raumes.

Ungünstiger sind für unsere Theorie die Erwägungen, welche sich auf den freien Raum zwischen den materiellen Körpern beziehen. Hier bestehen zwei Möglichkeiten: Entweder ist dieser Raum leer oder er ist durch den Weltäther ausgefüllt. Unsere Drei-Parameter-Theorie ist mehr auf die erste der beiden Annahmen zugeschnitten, lässt sich aber auch der zweiten anpassen. Nehmen wir zunächst an, der Raum zwischen den Körpern sei leer. Dann finden zwischen den einzelnen Körpern sogenannte Fernwirkungen statt. Nun entsteht die Frage, ob die Annahme von Fernwirkungen zulässig ist. Es will mir scheinen, dass gerade unsere Raumtheorie zur Beantwortung dieser Frage das zureichende Material liefert. Nehmen wir der Einfachheit halber zwei Körper an, die auf der x -Achse liegen. Sie unterscheiden sich also nur in den x -Parametern. Der eine habe die Grösse x , der andere x' . Der Abstand r zwischen beiden Körpern ist dann

$$r = x' - x.$$

Unsere Vorstellung legt zwischen die beiden Körper ein Etwas hinein, das eine direkte Wirkung hindert, das sozusagen überbrückt werden muss. Dieses Etwas besitzt nach unserer Raumtheorie keine reale Existenz. Darum besteht kein Hindernis für eine direkte gegenseitige Wirkung. Nach unserer Parametertheorie ist der Abstand oder die Entfernung nichts als die Differenz der zwei Parameter x und x' , also lediglich ein mathematischer Begriff. Warum soll diese rechnerische Differenz eine direkte gegenseitige Wirkung ausschliessen? Vergleichen wir damit einen Vorgang aus dem Gebiet der Wärmelehre! Wir wollen uns zwei ungleich erwärmte Körper mit den Temperaturen \mathcal{J} und \mathcal{J}' vorstellen. Wem würde es einfallen zu behaupten, die zwei Körper könnten keine direkte Wärmewirkung aufeinander ausüben, weil sie verschiedenes \mathcal{J} haben? Man weiss, dass bei ihrer gegenseitigen Berührung aus dem heisseren

Körper umsomehr Wärme in den kälteren überströmt, je grösser der Unterschied zwischen ϑ und ϑ' ist. Warum soll nun der Unterschied zwischen x und x' eine gegenseitige Einwirkung hindern? x und x' sind ebenso gut Parameter wie ϑ und ϑ' und, was bei der einen Art von Parametern möglich ist, kann bei einer andern Art nicht a priori unmöglich genannt werden. Wir müssen also prinzipiell die Möglichkeit von Fernwirkungen zugeben. Wenn wir trotzdem Fernwirkungen negieren, so kann das nur auf Grund der Erfahrung geschehen. Die Erfahrung allerdings spricht durchaus gegen das Vorhandensein von direkten Einwirkungen auf entfernte Körper. Die heutige Physik will von Fernwirkungen nichts mehr wissen, sie hat alle Fernkräfte durch Nahkräfte ersetzt. Darum wird unsere Drei-Parameter-Theorie in den Augen der Physiker keine Gnade finden, solange wir damit die Annahme eines leeren Raumes verbinden.

Wir müssen also diese Theorie durch die Annahme eines Weltäthers ergänzen. Viele Physiker haben allerdings mit Rücksicht auf die Relativitätstheorie die Aetherhypothese fallen lassen. Ein brauchbarer Ersatz für den Aether wurde aber einstweilen nicht gefunden, und so bleibt die Frage unbeantwortet, wie sich im leeren Raum die Wirkungen von Punkt zu Punkt fortpflanzen können. Da unsere Drei-Parameter-Hypothese ohnehin ein metaphysisches Relativitätsprinzip nicht zulässt, so können wir für unsere Zwecke den Aether ruhig beibehalten. In jedem Aetherpunkt mögen nun ebenfalls drei Parameter x , y , z existieren, genau so wie in den Körperpunkten. Damit haben wir unsere Drei-Parameter-Hypothese auch der Nahwirkungstheorie angepasst, und nun lässt sich gegen die Möglichkeit der Hypothese nichts Stichhaltiges mehr einwenden. Gleichwohl kann sie auch in dieser Form unseren Beifall nicht finden. Wenn wir nämlich die Existenz des Weltäthers annehmen, dann ist eine einfachere und bessere Raumtheorie möglich, und diese werden wir im dritten Abschnitt kennen lernen.

Nun haben wir noch die Aufgabe, unsere Raumtheorie zu einer Raum-Zeit-Theorie auszubauen. Das möge in der Weise geschehen, dass wir zu den drei räumlichen Parametern noch einen Zeitparameter t hinzufügen. Dieser vierte Parameter stellt sozusagen die Taschenuhr des betreffenden Raumpunktes dar. Er hat die Eigenschaft, von selbst unablässig zu wachsen. Damit steht er im Gegensatz zu den Raumparametern, die nur auf bestimmte Ursachen hin ihre Grösse ändern und die ebensowohl wachsen wie abnehmen können. Durch die Einführung des Zeitparameters wird unsere Hypothese zu einer Vier-Parameter-Theorie erweitert. Für diese vervollständigte Hypothese gilt jedoch das gleiche Urtheil wie vorhin: Sie ist durchaus möglich, aber aus den gleichen Gründen wie die Drei-Parameter-Theorie unwahrscheinlich.

Das metaphysische Relativitätsprinzip wird durch unsere Hypothese nicht befriedigt, weil die vier Parameter nicht relative, son-

dern absolute Grössen sind. Es besteht auch keine Möglichkeit, durch geeignete Modifikationen eine Uebereinstimmung mit der Einsteinschen Theorie herbeizuführen. Die Gegensätzlichkeit besteht aber nur auf metaphysischem Gebiet, das blosses physikalische Relativitätsprinzip wird durch die Parameterhypothese nicht verletzt. Unsere Vier-Parameter-Theorie fordert wohl ein ausgezeichnetes Raum-Zeit-System, aber dasselbe ist experimentell nicht als solches erkennbar, vorausgesetzt, dass innerhalb dieses Systems die Einsteinsche Mechanik gilt.

II.

Abstände - Theorie.

Wir erhalten eine zweite Raumtheorie, wenn wir die Abstände zwischen den verschiedenen Körperpunkten als real existierende Grössen betrachten. Diese Hypothese wollen wir als Abstände-Theorie bezeichnen. Um unsere Betrachtungen zu vereinfachen, werden wir die Annahme machen, dass die Materie aus Atomen zusammengesetzt ist. Unter Atomen verstehen wir hier die kleinsten und letzten Bausteine der Materie. Wir werden ferner annehmen, nur die Schwerpunkte der Atome seien untereinander durch reale Abstände verknüpft. Diese Abstände betrachten wir als messbare Quantitäten der Atome, deshalb werden wir auch hier wieder die Bezeichnung Parameter gebrauchen. Sind zwei Atome A und B gegeben, so werde ihr gegenseitiger Abstand durch zwei gleich grosse Parameter realisiert, von denen der eine in A, der andere in B seinen Sitz hat. Aendert sich der Abstand der beiden Atome, so ändern sich die beiden Parameter gleichzeitig, und zwar so, dass sie an Grösse stets einander gleich sind. Die Anzahl der Parameter ist hier viel grösser als bei unserer ersten Raumtheorie. Dort hatten wir in einem Atom drei Parameter; hier enthält ein Atom ebenso viele Parameter, als es andere Atome gibt. Ist die Anzahl aller existierenden Atome gleich n , dann enthält jedes Atom $(n - 1)$ Abstandsparameter. Die Abstandsparameter seien die einzigen real existierenden räumlichen Grössen. Der Raum selbst ist nur eine mathematische Abstraktion.

Diese unsere zweite Raumhypothese ist die nächstliegende für den messenden Praktiker. Denn von allen räumlichen Grössen erlauben nur die Abstände eine unmittelbare Messung. Ein Vorzug dieser Raumtheorie besteht darin, dass sie die Homogenität und Isotropie des Raumes gewährleistet. Noch wichtiger erscheint der Umstand, dass nach der Abständigkeitstheorie die Bewegung etwas rein Relatives ist. Denken wir uns alle Atome gemeinsam in der gleichen Richtung und mit der gleichen Geschwindigkeit bewegt, so ändern sich ihre Abstände nicht. Die Abstandsparameter behalten ihre Grösse unverändert bei und, da ausser den Parametern keine Raumgrössen real existieren, so findet bei der beschriebenen gemeinsamen Bewegung überhaupt kein realer räumlicher Vorgang statt. Was wir gemeinsame Bewegung aller Atome nennen, ist ein reines Produkt

der Phantasie. Wer also auf dem Standpunkt beharrt, dass es keine absolute, sondern nur relative Bewegung gibt, wird unserer Theorie der Abstandsparameter volle Beachtung schenken müssen. Darum wollen wir diese Theorie eingehend erörtern, obwohl sich gegen sie gewichtige Bedenken geltend machen lassen.

Unter den Bedenken steht obenan dasjenige gegen die grosse Anzahl der Parameter, die in jedem einzelnen Atom existieren sollen. Nach einer oberflächlichen Schätzung gibt es im Universum etwa 100 Dezillionen¹⁾ Atome. Das ist eine 63stellige Zahl. Ebenso zahlreich wären nach unserer Theorie die Abstandsparameter, die in einem Atom enthalten sind. Das klingt höchst unwahrscheinlich. Wir dürfen eine solche Möglichkeit bezweifeln, obgleich wir in den metaphysischen Bau der Materie keinen Einblick haben und daher nach dieser Richtung kein sicheres Urteil fällen können.

Noch ein Weiteres erregt in der Abstände-Theorie unser Missfallen, nämlich der Umstand, dass jede Entfernung doppelt realisiert sein soll. Greifen wir aus der Gesamtzahl der Atome deren zwei heraus, so existiert nach unserer Theorie der zugehörige Abstandsparameter in jedem der beiden Körperchen. Die doppelte Realisierung der gleichen Grösse erscheint überflüssig. Wenn wir aber einen der beiden Parameter streichen, dann werden die Atome unsymmetrisch. Immerhin besteht die Möglichkeit einer solchen Annahme.

Es ist nun unsere Aufgabe, auch die Abstandstheorie zu einer Raum-Zeit-Hypothese zu erweitern. Zu diesem Zweck können wir einen Teil unserer Vier-Parameter-Theorie herübernehmen. Wir schreiben jedem Atom ausser den vielen Abstandsparametern noch einen Zeitparameter t zu. Damit wird allerdings unsere Auffassung von Zeit und Raum ungleichartig. Das kann uns aber nicht stören, denn nach der gewöhnlichen Vorstellung sind Zeit und Raum verschiedene Dinge. Immerhin werden wir es begrüßen, wenn es gelingen sollte, für Zeit und Raum gleichartige Daseinsformen zu finden. Bei aller Verschiedenheit haben nämlich die beiden viel Analoges. Das kommt schon dadurch zum Ausdruck, dass Zeit und Raum so häufig nebeneinander genannt werden.

Die Zusammengehörigkeit von Zeit und Raum findet ihren schärfsten Ausdruck in der Relativitätstheorie. Hier wird die Zeit mathematisch als vierte Koordinate den drei Raumkoordinaten an die Seite gestellt. Ist das bloss eine mathematische Form der Dar-

¹⁾ Zu dieser Zahl gelangen wir auf folgendem Wege. In einem Kubikzentimeter Gas befinden sich 28 Trillionen Moleküle und, wenn wir im Molekül wenigstens zwei Atome rechnen, dann erhalten wir im Kubikzentimeter reichlich 50 Trillionen Atome. Im gleichen Raumteil eines festen Stoffes dürfen wir das Tausendfache hiervon, d. h. 50 000 Trillionen Atome annehmen. Unser Erdkörper enthält gut 1000 Quadrillionen Kubikzentimeter, also etwa 50 Oktillionen Atome. Die Sonne fasst das 330 000fache und, wenn wir nur 7 Millionen Sonnen im Weltall annehmen, so erhalten wir 100 Dezillionen Atome.

stellung oder ist diese Auffassung im Wesen von Zeit und Raum begründet? Das metaphysische Relativitätsprinzip behauptet das letztere. Nach Einstein sind Raum und Zeit nur relative Grössen; sie gelten nur für das jeweils verwendete Koordinatensystem. Daraus folgt aber nicht, dass alle Grössen relativ sind. Auch in der Relativitätstheorie gibt es absolute Grössen. So sind unter anderen Ruhmasse, Eigenzeit, Entropie vom jeweiligen Koordinatensystem unabhängig, also absolute Grössen. Es entsteht nun die Frage: Sind die absoluten Grössen der Relativitätstheorie geeignet, für das Wesen von Zeit und Raum eine Basis zu bilden? Es wird sich mit andern Worten darum handeln, unsere Raum-Zeit-Theorien durch entsprechende Abänderungen dem metaphysischen Relativitätsprinzip anzupassen. Unsere erste Hypothese, die Vier-Parameter-Theorie lässt keine solche Abänderung zu. Wird das bei der Abstände-Theorie möglich sein?

Fragen wir zunächst: Welche mit Zeit und Raum zusammenhängenden Grössen sind in der Relativitätstheorie absolut, d. h. vom jeweils verwendeten Koordinatensystem unabhängig? Nach dem mathematischen Sprachgebrauch heissen solche Grössen Invarianten. Auch in der gewöhnlichen dreidimensionalen Geometrie gibt es Invarianten. Eine solche ist z. B. der Abstand zwischen zwei Punkten. Das will sagen: Man darf den Abstand in verschiedenen beliebig gewählten Koordinatensystemen messen, und man erhält stets die gleiche Grösse. Ist das System rechtwinklig, so gilt für den Abstand d die Formel:

$$(1) \quad d = \sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2 + (z' - z)^2}$$

Solche Invarianten kennt auch die Relativitätstheorie. Die wichtigste und für uns allein in Betracht kommende ist die folgende:

$$(2) \quad d = \sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2 + (z' - z)^2 - c^2 (t' - t)^2}$$

Hierin bedeuten x, y, z, t und x', y', z', t' die räumlichen und zeitlichen Koordinaten zweier Raum-Zeit-Punkte, c die Lichtgeschwindigkeit. Der Wurzelausdruck (2) zeigt eine deutliche Verwandtschaft mit Formel (1). Die Formel (2) wird noch symmetrischer, wenn wir statt t eine neue Variable s einführen, welche mit t zusammenhängt durch die Gleichung

$$s^2 = -c^2 t^2$$

Dann nimmt Formel (2) folgende Gestalt an;

$$(3) \quad d = \sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2 + (z' - z)^2 + (s' - s)^2}$$

Genau die gleiche Formel tritt auf in der vierdimensionalen Geometrie. Dort stellt sie den geometrischen Abstand der zwei Punkte x, y, z, s und x', y', z', s' dar.

Seit Minkowski verwendet man in der Relativitätstheorie gern ein vierdimensionales Koordinatensystem, worin drei Koordinaten räumlicher Art sind, während die vierte Koordinate die Zeit darstellt. Die mittels Formel (3) definierte Grösse spielt in diesem

Raum-Zeit-System eine ausschlaggebende Rolle. Sie bedeutet aber nicht den vierdimensionalen Abstand zweier Punkte, denn dieser hat die Formel

$$(4) \quad d = \sqrt{(x' - x)^2 + (y' - y)^2 + (z' - z)^2 + (t' - t)^2}.$$

Dieser Ausdruck unterscheidet sich von (3) dadurch, dass in der letzten Klammer t und t' , statt s und s' stehen. Wegen der formellen Uebereinstimmung der beiden Ausdrücke jedoch bezeichnet man die Grösse d in Formel (3) ebenfalls als Abstand. Eine Verwechslung mit dem gewöhnlichen Abstand ist nicht zu befürchten, weil derselbe in der Relativitätstheorie nie verwendet wird. Das Wort „Abstand“ hat also in dieser Theorie stets einen übertragenen Sinn, und es kann uns nicht wundern, wenn wir in unserem Raum-Zeit-System sehr ungewöhnliche und überraschende Abstandsverhältnisse antreffen. Wir finden z. B. Punkte, die zeitlich und räumlich weit voneinander entfernt sind und dennoch den gegenseitigen „Abstand“ Null haben.

Wollen wir nun die absolute Grundlage der relativen Raum- und Zeitgrössen finden, so bietet sich von selbst der vierdimensionale Abstand dar, den wir soeben in den Formeln (2) und (3) definiert haben. Wir machen also die Annahme, dieser sogenannte Abstand sei das real Existierende. Soweit die Formeln imaginäre Werte ergeben, möge an deren Stelle der absolute Wert der Wurzeln treten, der ja stets reell ist. Nun wählen wir zwei Atome A und A' und setzen für das erste den Zeitpunkt t , für das zweite den Zeitpunkt t' fest. Nach unserer Hypothese besitzt der vierdimensionale Abstand der beiden Atome reale Existenz. Er haftet als Akzidens einem der zwei Atome oder beiden an, aber nicht gleichzeitig. Vielmehr existiert er in A zur Zeit t , und ein gleich grosser Parameter existiert in A' zur Zeit t' . Ist zu allen Atompaaren das zugehörige d bekannt, dann lassen sich für jedes Atom und für jedes Koordinatensystem die Werte von x , y , z , t berechnen. Die vierdimensionalen Abstände d können somit als Ersatz für alle Zeit- und Raumgrössen dienen.

Man bemerkt aber, dass wir jetzt eine viel grössere Anzahl von Abstandsparametern bekommen als vorhin, wo es sich um die gewöhnlichen, dreidimensionalen Abstände handelte. Nach unserer erweiterten Hypothese besitzen zwei Atome nicht bloss einen einzigen Abstand, sondern unendlich viele. So oft wir für die beiden Atome neue Zeitpunkte wählen, gehört auch ein neuer Abstand dazu. Da es unendlich viele Zeitpunkte gibt, müssten eigentlich unendlich viele Abstände existieren. Ob diese letzte Forderung in irgend einer Form erfüllt werden kann, möge dahingestellt bleiben. Wir können sie umgehen durch die Annahme, die Zeit, und zwar die Eigenzeit der Atome sei atomistisch geteilt. Dann bleibt die Zahl der existierenden Raum-Zeit-Abstände endlich.

In dieser Form begegnet die Hypothese den gleichen Bedenken wie die früher entwickelte Theorie der dreidimensionalen Abstandsparameter. Sie ist wegen der grossen Anzahl der erforderlichen Parameter höchst unwahrscheinlich.

Darum dürfte es sich nicht verlohnen, sie durch weitere Annahmen auszubauen. Soweit ich die Verhältnisse bis jetzt überblicken kann, würde man auch hier ohne die Annahme eines Aethers kaum auskommen. Dann aber tut man besser, an Stelle der Abstände-Theorie jene Hypothese zu akzeptieren, welche den Weltäther zur Grundlage von Raum und Zeit macht, eine Hypothese, die nunmehr ihre Darstellung finden soll.

III.

Aether - Theorie.

In den beiden bisherigen Raumtheorien wurden die Raumgrößen als Akzidentien der Körper aufgefasst. Unsere dritte Theorie betrachtet den Raum als eine Substanz; sie schreibt ihm eine selbstständige, von den materiellen Körpern unabhängige Existenz zu. Wir betrachten jetzt den Raum als identisch mit dem Weltäther. Dieser Substanz haben die Physiker seit langem eine Reihe wichtiger Funktionen zuerteilt, und nun soll sie mit einer neuen Aufgabe betraut werden, sie soll den Raum verkörpern.

Unsere dritte Raumtheorie entspricht annähernd dem Vorstellungsräum, d. h. jenem eigenartigen Raumbild, das wir uns in frühester Jugend auf der Grundlage unserer Gesichts- und Tastempfindungen gebildet haben. Der Vorstellungsräum ist ein dreidimensionales Ding von ungeheurer Ausdehnung, aber unbestimmter Begrenzung, ein Ding, das unabhängig von allen materiellen Substanzen innerhalb und ausserhalb aller Körper existiert, das aber bei genauerem Zusehen überall in ein Nichts zerfliesst. Von diesem Vorstellungsbild übernehmen wir in unsere Raumtheorie die erste Hälfte, nämlich die weitausgedehnte Substanz; den zweiten Teil, das Zerfliessen in Nichts, ersetzen wir durch die Annahme, dass die Raumsubstanz von der gewöhnlichen Materie ganz verschieden ist und dass sie die materiellen Körper ungehindert in sich eindringen lässt.

Der Aether ist nach unserer Theorie der substanziierte Raum. Darum dürfen wir nicht fragen: Wo ist der Aether? Das wäre gleichbedeutend mit der Frage: In welchem Raum liegt der Raum? Der Aether ist Raum, aber er ist nicht **im** Raum. Was von dem ganzen Aether gesagt wurde, gilt auch von seinen einzelnen Punkten. Ein Aetherpunkt ist ein Raumpunkt, aber er ist nicht **in** einem Raumpunkt.

Nur bei den materiellen Körpern kann nach dem Wo gefragt werden. Jeder Körperpunkt befindet sich in einem Aetherpunkt. Hierdurch ist die räumliche Lage des Körperpunktes fixiert; er hat keinerlei räumliche Parameter in sich. Seine einzige räumliche Eigenschaft besteht in der Fähigkeit, zu irgendeinem Aetherpunkt in eine bestimmte Beziehung zu treten, die wir Inhärenz oder Koexistenz oder sonstwie nennen mögen, die wir aber nicht anschaulich beschreiben können. Diese Beziehung ist es, die wir a posteriori „Ineinandersein“ nennen. Das Atom hat die Fähigkeit, die Verbindung mit dem bisher besetzten Aetherpunkt aufzugeben und sich

der Reihe nach mit immer neuen Aetherpunkten zu vereinigen. Einen solchen Wechsel der Aetherpunkte nennen wir Bewegung. Endlich vermag ein Körperpunkt auf jenen Aetherpunkt, mit dem er gerade in Verbindung steht, Wirkungen auszuüben und umgekehrt Wirkungen von ihm zu empfangen. Damit sind die räumlichen Eigenschaften des Atoms und seine Beziehungen zum Aether erschöpft. Das Stoffatom tritt mit fremden Stoffatomen in keine direkte Beziehung. Jede Wechselwirkung wird durch den Aether vermittelt, ähnlich wie die Schallwirkung durch die Luft. Als Abstand zweier Atome können wir die Entfernung jener zwei Aetherpunkte definieren, in welchen sich die Atome befinden. So gewinnt der innere Bau der Atome eine Einfachheit, die nicht mehr zu übertreffen ist. In dieser Beziehung unterscheidet sich die Aether-Raumhypothese vorteilhaft von unserer zweiten Raumtheorie.

Der Aether wird gewöhnlich als ein Kontinuum betrachtet. Doch taucht immer wieder der Gedanke an einen atomistisch gebauten Aether auf, und neuerdings hat der Physiker Gehrke zur Erklärung der Gasspektren einen atomistischen Aether herangezogen ¹⁾. Obwohl die Hypothese des atomartig geteilten Aethers in der Physik eine sehr untergeordnete Rolle spielt, werden wir dennoch auch diese Annahme in den Kreis unserer Erwägungen ziehen. Wir wollen sie sogar an erster Stelle berücksichtigen, weil sie die Vorteile der Aetherhypothese viel anschaulicher und greifbarer erkennen lässt als der kontinuierliche Aether. Es werde also zunächst angenommen, dass der Aether aus lauter einzelnen Atomen besteht, die in regelmässiger Weise untereinander verknüpft sind. Um die Verknüpfung anschaulich darzustellen, wollen wir die Aetheratome in unseren Anschauungsraum einordnen; sie mögen darin ein sogenanntes Raumgitter bilden. Die Atome können sehr verschiedenartig zu einem Raumgitter angeordnet werden. Wir haben zur Zeit noch keine Möglichkeit, die im Weltäther tatsächlich befolgte Anordnung anzugeben. Deshalb greifen wir willkürlich eine der möglichen Gruppierungen heraus, und zwar jene, bei welcher die benachbarten Atome gegeneinander wie die Ecken eines Würfels liegen. Jedes Aetheratom hat sechs andere Aetheratome in seiner nächsten Nähe: je eines oben und unten, je eines links und rechts, je eines vorn und hinten. Diese sechs Atome wollen wir seine Nachbarn nennen.

Die Lage eines Aetheratoms in dem Raumgitter lässt sich durch drei Zahlen kennzeichnen, wenn man eines der Atome als Koordinatenanfang wählt. Die drei Zahlen geben an, wie oft man vom Koordinatenanfang ausgehend in jeder der drei Koordinatenrichtungen den Schritt von einem Atom zum nächsten machen muss, um zu dem gewünschten Aetheratom zu gelangen. Das als Koordinatenanfang gewählte Atom ist also durch (0, 0, 0) gekennzeichnet. Seine Nachbarn sind: (0, 0, 1); (0, 0 — 1); (0, 1, 0) usw. Allgemein gilt

¹⁾ *Phys. Zeitschr.* 21, 7 (1920). 172 ff.

von zwei Nachbarn, dass sie in zweien von den Zahlen übereinstimmen und in der dritten um eine Einheit differieren. Somit erkennt man aus den Zahlen leicht, ob zwei Atome benachbart sind oder nicht.

Die Anwendung von Zahlen ist von Vorteil; sie macht uns unabhängig von der räumlichen Vorstellung, die wir soeben zur Gruppierung der Aetheratome benutzt haben. Eine solche Verwendung des Anschauungsraumes hat insofern etwas Unbefriedigendes an sich, als hier zur Beschreibung des Aethers der Raum verwendet wird, während doch umgekehrt der Aether den Raum erklären soll. Wollen wir uns von dem Hilfsmittel der psychologischen Raumvorstellung unabhängig machen, dann müssen wir Zahlen verwenden. Wir ordnen jedem Aetheratom drei Zahlen zu und fordern ausserdem, dass zu jeder Kombination von drei Zahlen ein, und zwar nur ein einziges Aetheratom existiert. Damit die Anzahl der Atome endlich bleibt, soll keine der verwendeten Zahlen eine gegebene Grenze überschreiten. Zwei Atome, die in zweien von den zugeordneten Zahlen übereinstimmen, während sie in der dritten um eine Einheit differieren, nennen wir Nachbarn. Endlich fordern wir, dass zwischen zwei Nachbarn eine bestimmte Art des Zusammenhangs besteht, dagegen sollen nichtbenachbarte Atome keine direkte Beziehung zueinander haben. Jedes Aetheratom ist also dauernd mit seinen sechs Nachbarn verknüpft, um die übrigen Aetheratome kümmert es sich nicht. Nur von den sechs Nachbarn empfängt es Wirkungen, und nur an sie gibt es Wirkungen ab.

Ausser den Aetheratomen existieren noch Stoffatome. Jedes Stoffatom befindet sich in einem Aetheratom. Von da aus kann es unmittelbar nur zu den sechs benachbarten Aetheratomen gelangen. Will es einen grösseren Weg zurücklegen, so muss das schrittweise von einem Aetheratom zum nächsten geschehen; keines der Aetheratome kann übersprungen werden. Um die Länge des Weges zu finden, zählen wir die Anzahl der Schritte. Diese einfache Längenbezeichnung ist allerdings nur möglich, wenn der Weg geradlinig ist und in der Richtung der Würfelkante liegt. Hat der Weg eine andere Richtung, dann lässt sich der Abstand zweier Atome mittels des pythagoräischen Lehrsatzes definieren. Die Abstände sind also keine real existierenden Parameter, sondern blossе Rechnungsgrössen.

Die Homogenität des Raumes ist in der atomistischen Aetherhypothese gewahrt, weil ein Aetheratom dem andern vollkommen gleich sowohl seinem inneren Bau nach wie in seinen Beziehungen zur Umgebung. Dagegen ist der Raum nicht isotrop, es existieren drei ausgezeichnete Richtungen, nämlich die Würfelkanten.

Wollen wir die Isotropie wahren, dann dürfen wir dem Aether keine atomistische Struktur zuschreiben. Damit gelangen wir zur Hypothese des kontinuierlichen Aethers. Sein Bau ist allerdings nicht so einfach zu beschreiben. Es gibt hier keine festdefinierten Nachbarpunkte mehr; sobald wir uns einbilden, zu einem Aetherpunkt den nächstbenachbarten gefunden zu haben, kann man uns

sofort einen noch näher gelegenen angeben. Ferner existieren solch nahe Punkte nicht bloss nach sechs Richtungen, sondern nach unendlich vielen. Auch beim kontinuierlichen Aether ist festzuhalten, dass seine Punkte nur mit ihrer unmittelbaren Umgebung in Verbindung und Wirkungsaustausch stehen. Wie weit sich aber diese unmittelbaren Beziehungen erstrecken, lässt sich nicht sagen. Jedenfalls müssen wir das Gebiet, in welchem das Aetheratom seine unmittelbare Tätigkeit entfaltet, sehr klein annehmen. Eine genauere Rechenschaft über die Zusammenhänge und Vorgänge in diesem winzigen Gebiet können wir nicht geben. Darum habe ich die Besprechung des atomistischen Aethers vorangestellt. Für den kontinuierlichen Aether können wir wenigstens analoge Verhältnisse annehmen, und diese Analogie gewährt uns in denselben einigen Einblick.

Ein grosser Vorteil der Aethertheorie besteht darin, dass sie eine lokale Veränderung der geometrischen Eigenschaften des Raumes denkbar erscheinen lässt. Keine andere Hypothese bietet diesen Vorteil. Nach der verallgemeinerten Relativitätstheorie Einsteins besitzt der Raum nicht genau die Eigenschaften der euklidischen Geometrie. Seine Krümmung hängt von der vorhandenen Materie ab und wechselt von Punkt zu Punkt. Auch zeitlich erfährt die Krümmung eine Veränderung; nimmt an einer Stelle die Massendichte zu, dann wächst auch die Krümmung. Unsere beiden ersten Raumtheorien vermögen eine solche Abweichung von der euklidischen Geometrie nicht zu erklären. Um so leichter ist eine Erklärung möglich auf dem Boden der Aethertheorie. Das Stoffatom beeinflusst eben das betreffende Aetheratom und dessen Nachbarn derart, dass ihre gegenseitigen Entfernungen sich ändern. Das hat aber notwendig eine Krümmung des Raumes zur Folge. Wer sich also zur verallgemeinerten Relativitätstheorie Einsteins bekennt, muss auch die Aethertheorie mit in Kauf nehmen. Allerdings muss dann die Aetherhypothese noch derart ausgebaut werden, dass sie ausser dem Raum auch die Zeit umfasst.

Diese Erweiterung wollen wir nun vornehmen, und zwar zunächst unabhängig von der Relativitätstheorie. Wir legen jedem Atom und jedem Aetherpunkt einen Zeitparameter bei. Das gleiche haben wir bezüglich der Atome schon in unserer Vier-Parametertheorie getan. Den dortigen Ausführungen über den Zeitparameter brauchen wir hier nichts hinzuzufügen.

Wollen wir aber dem metaphysischen Relativitätsprinzip gerecht werden, dann können wir einen Zeitparameter nicht brauchen. Derselbe hat eine absolute Grösse, während nach Einstein die Zeit etwas Relatives ist. Wir werden deshalb zu einer neuen Hypothese greifen müssen. Das vierdimensionale Raum-Zeit-System Minkowskis bringt uns auf den Gedanken, einen vierdimensionalen Aether zu supponieren. Jeder Punkt stellt einen Raum-Zeit-Punkt dar, d. h. einen Raumpunkt zu bestimmter Zeit. Alle Raum-Zeit-Punkte,

welche überhaupt möglich sind, besitzen nach unserer Hypothese auch ein wirkliches, und zwar substanzielles Dasein. Um die Punkte durch Koordinaten ausdrücken zu können, ziehen wir durch irgendeinen Aetherpunkt vier zueinander senkrechte Achsen; hierbei ist der Ausdruck „senkrecht“ im Sinne Minkowskis zu verstehen. Durch die vier Achsen ist ein bestimmtes Raum-Zeit-System fixiert, also auch eine bestimmte Zeitrechnung. Jedem Punkt der Zeitachse entspricht ein bestimmter Zeitpunkt t . Legen wir durch diesen Punkt einen dreidimensionalen Raum senkrecht zur Zeitachse, so enthält dieser Raum zur Zeit t die ganze Materie. Im Lauf der Zeit rückt der senkrecht gelegte Raum auf der Zeitachse nach oben, wobei er dauernd seine senkrechte Lage zu dieser Achse beibehält. Mit ihm bewegt sich die Materie nach oben. Die gesamte Materie wandert demnach durch den vierdimensionalen Aether hindurch.

Jeder Punkt des Aethers wird nur in einem einzigen Zeitpunkt benutzt; vorher und nachher leistet er keine Dienste. Er hat also nur im Augenblick seiner Dienstleistung Existenzberechtigung. Man könnte so auf den Gedanken kommen, dass der Aetherpunkt erst im kritischen Moment ins Dasein tritt und dann wieder ins Nichts versinkt. Demgegenüber ist zu betonen, dass der Zeitbegriff auf unseren erweiterten Aether ganz anders anzuwenden ist als auf die Materie. Der vierdimensionale Aether ist Zeit und ist Raum, ist aber nicht in der Zeit und nicht im Raum. Man darf nicht fragen: Wann existiert ein gegebener Aetherpunkt? Das wäre gleichbedeutend mit der Frage: In welcher Zeit existiert die Zeit? Damit erledigt sich die Frage nach den Zeitverhältnissen eines Aetherpunktes von selbst. Er ist ein einziger Zeitpunkt, wie er auch ein einziger Raumpunkt ist.

Auch den vierdimensionalen Aether können wir atomistisch auffassen. Dann ist aber das metaphysische Relativitätsprinzip nicht mehr erfüllt, und es fällt der Grund weg, der uns zur Annahme einer vierten Aetherdimension veranlasst hat. Trotzdem wollen wir diese Annahme nicht verwerfen. Sie verkörpert die Zeit in idealerer Weise, als es bei der Parameterhypothese möglich war.

Abschliessend möchte ich urteilen, dass von den drei aufgestellten Raum-Zeit-Hypothesen nur die Aethertheorie vollkommen befriedigt. Ob dem Aether drei oder vier Dimensionen zukommen, diese Frage wage ich noch nicht endgiltig zu beantworten. Wenn man aber den vierdimensionalen Aether für unmöglich erachtet, dann besteht kaum eine Möglichkeit, das metaphysische Relativitätsprinzip aufrechtzuerhalten.