

# Über die Aufgabe der Physik und die Anwendung des Grundsatzes der Einfachtheit.

Von Dr. **Rudolf Carnap**, Buchenbach (Baden).

Nachdem lange Zeit hindurch die Frage nach den Quellen der physikalischen Erkenntnis heftig umstritten worden ist, darf heute vielleicht schon gesagt werden, daß der reine Empirismus seine Herrschaft verloren hat. Daß der Aufbau der Physik sich nicht auf die Versuchsergebnisse allein stützen kann, sondern auch nichterfahrungsmäßige Grundsätze verwenden muß, ist ja von der Philosophie schon längst verkündet worden. Doch erst nachdem Vertreter der exakten Wissenschaften die Eigenart der physikalischen Methode zu untersuchen begonnen hatten und dabei zu einer nicht-empiristischen Auffassung gelangt waren, ergaben sich Lösungen, die den Physiker selbst befriedigen konnten. Hier sind vor allem Poincaré und Dingler zu wichtigen Ergebnissen gelangt. Wir gehen hier von ihren Grundsätzen aus, wenden sie aber allgemeiner an, als es bisher geschehen ist. Dadurch finden wir eine Antwort auf die Frage nach der Leistung der Physik, die uns erkennen läßt, welche logischen Beziehungen zwischen einander scheinbar widersprechenden physikalischen Theorien bestehen, und unter welchen Voraussetzungen eine Entscheidung zwischen diesen Theorien getroffen werden kann.

## I. Die drei Festsetzungen: Raumgesetz, Zeitgesetz, Wirkungsgesetz.

Die Hauptthese des von Poincaré aufgestellten und von Dingler weitergeführten Konventionalismus besagt, daß zum Aufbau der Physik Festsetzungen getroffen werden müssen, die unserer freien Wahl unterliegen. Daraus folgt, daß diejenigen Inhaltsbestandteile der physikalischen Sätze, die aus diesen Festsetzungen hervorgehen, durch die Erfahrung weder bestätigt noch widerlegt werden können. Die Wahl dieser Festsetzungen soll aber nicht etwa willkürlich geschehen, sondern nach bestimmten methodischen Grundsätzen, wobei letzten Endes der Grundsatz der Einfachtheit die Entscheidung zu treffen hat.

Drei solche Festsetzungen müssen der Physik zugrunde gelegt werden: die des Raumsystems, des Zeitsystems und des Wirkungsgesetzes.

Die Einsicht in die Wählbarkeit des Raumsystems ist am frühesten gefunden worden. Schon Poincaré hat nachgewiesen, daß die Frage, ob in der Natur die euklidische oder eine nichteuklidische Geometrie

verwirklicht sei, sinnlos ist. Die Physik hat in freier Wahl darüber zu verfügen, welches der unendlich vielen geometrischen Systeme sie anwenden will. Je nach der Festsetzung über die zugrunde zu legende Maßnorm, gewöhnlich „starrer Körper“ genannt, ergibt sich dies oder jenes geometrische System. (Genau genommen darf die Maßsetzung nicht einen Körper als starr setzen, sondern nur den Abstand eines physikalischen Punktpaares als unveränderlich oder durch irgendeine Funktion bestimmt ansetzen. Sonst liegt Überbestimmung vor. Doch sei dies hier nicht berücksichtigt, sondern dem Nachweis an anderer Stelle vorbehalten.) Die weit verbreitete, empiristische Auffassung, daß der starre Körper in der Natur vorgebildet sei und vom Physiker durch bloße Versuche aufgefunden bzw. hergestellt werden könne, besteht also nicht zu Recht. Sondern der starre Körper kann entweder frei gewählt werden, oder er ergibt sich nach Wahl eines geometrischen Systems. Ebensowenig kann dieses System empirisch gefunden werden; sondern es muß gleichfalls entweder frei gewählt oder mit Hilfe einer frei gewählten Maßsetzung (eines starren Körpers) gefunden werden. Die Frage, welcher dieser beiden möglichen Wege einzuschlagen ist, wird unten besprochen werden.

Da die Wählbarkeit des geometrischen Systems durch Poincaré<sup>1</sup> und Dingler<sup>2</sup> längst bekannt ist, ferner die Grenzen und die Durchführbarkeit dieser Wahl, sowie das soeben angedeutete funktionelle Abhängigkeitsverhältnis zwischen dem Tatbestand der Erfahrung, der Maßnorm und dem geometrischen System schon an anderer Stelle dargestellt worden sind<sup>3</sup>, so sei diese erste Festsetzung hier nicht weiter erörtert.

Im Gegensatz hierzu pflegt die Notwendigkeit der Festsetzung einer Norm für die Zeitmessung („Zeitmaßsetzung“) nicht beachtet zu werden. Sie besteht darin, daß irgend eine Weltlinie ausgewählt wird, die mit einer anderen wiederholte Koinzidenzen hat. Dann ist festzusetzen, welche Zeitstrecken die durch die Koinzidenzen auf der ersten Weltlinie bewirkten Abschnitte darstellen und wie die Einteilung dieser Weltlinie durch bloße Benutzung von Koinzidenzen auf alle übrigen übertragen werden soll. Anschaulicher ausgedrückt: es wird ein physikalisches System gewählt, an dem ein „periodischer Vorgang“ stattfindet. Der Begriff „periodischer Vorgang“ setzt hierbei nicht etwa die Zeitbestimmung schon voraus; er soll nämlich noch nicht einschlie-

<sup>1</sup> Die bekannten Bücher, besonders: Wissenschaft und Hypothese, deutsch von Lindemann, 1906, S. 73ff.

<sup>2</sup> Dingler, Die Grundlagen der Physik. 1919. Ders., Ein Grundproblem der modernen Physik. Ann. d. Naturphil. XIV, 112, 1920. Ders., Physik und Hypothese. 1921.

<sup>3</sup> Carnap, Der Raum. Erg.-H. 56 der Kantstudien, 1922. S. 32—59.

ßen, daß die einzelnen Perioden gleiche Zeitdauer haben. Auch setzt dieser Begriff nicht die Raummaßsetzung schon voraus, etwa um den „gleichen Zustand“ des Systems wiedererkennen zu können. Wir definieren nämlich als „periodischen Vorgang“ einen solchen, bei dem zwei physikalische Punkte (materielle Punkte, Lichtstrahlen usw.) immer wieder zur Berührung kommen. Die Zeitmaßsetzung besteht dann darin, daß für dieses gewählte System (die „Uhr“) den Zeitabschnitten zwischen den genannten Punktberührungen irgendwelche Maßzahlen zugeschrieben werden, und daß weiter festgesetzt wird, wie hiernach die Vorgänge an anderen Systemen zeitlich zu messen sind.

Hier ist nicht der Raum für die Erörterung der wichtigen Frage, welche Voraussetzungen eine Zeitmaßsetzung erfüllen muß, um ein widerspruchloses Zeitmaßsystem zu ergeben, welche Ausdehnung das Bereich der diese Voraussetzungen befriedigenden Zeitmaßsetzungen hat, und ob eine oder einige hiervon eine bevorzugte Sonderstellung einnehmen oder ob alle logisch möglichen auch methodisch gleichwertig sind. Hier ist nur wesentlich, überhaupt die Wählbarkeit der Zeitmaßsetzung zu betonen. Die heute übliche Auffassung besagt im Gegensatz hierzu, daß die Gleichheit zweier Zeitstrecken nicht einer beliebigen Festsetzung unterliege, sondern in der Natur dadurch gegeben und empirisch festzustellen sei, daß zwei Vorgänge, die im Übrigen in gleicher Weise verlaufen, auch zeitlich als gleich anzusehen seien. Hierauf ist jedoch zu erwidern, daß die Feststellung dieses „gleichen Ablaufs“ nicht ohne vorher getroffene, konventionelle Festsetzungen möglich ist. Denn sie setzt zunächst voraus, daß über die Gleichheit zweier räumlicher Konstellationen des Systems entschieden werden kann. Das ist aber offenbar nur auf Grund einer Raummaßsetzung möglich. Die zweite Voraussetzung zum Erkennen des „gleichen Ablaufs“ führt aber nicht nur, wie die erste, auf eine zu wählende Festsetzung, sondern enthält einen Widerspruch. Denn bei der Begründung der Zeitmessung auf den gleichen Ablauf der Vorgänge eines Systems wird vorausgesetzt, daß dieses ein isoliertes System ist; z. B. ist nicht etwa gemeint, eine Pendeluhr gebe auf der Erde und auf dem Mond gleiche Zeiten an. Ob aber ein System isoliert ist, d. h. ob keine Kräfte von außen darauf einwirken, das kann nur auf Grund der dritten, nachher zu besprechenden Festsetzung entschieden werden, nämlich der des Wirkungsgesetzes. Dieses aber setzt seinerseits die Zeitmaßsetzung schon voraus, da es aussagt, welche Beschleunigungen aus bestimmten räumlichen Konstellationen folgen. Die empiristische Auffassung der Zeitbestimmung ist also unhaltbar.

Die dritte Festsetzung betrifft das Wirkungsgesetz. Daß Raum- und Zeitmessung sich auf nichtempirische Grundsätze stützen, bietet keine großen gedanklichen Schwierigkeiten. Daß aber auch, wenn diese

festliegen, die Naturgesetze nicht aus bloßem Erfahrungsbefund abgeleitet werden können, bedarf einer neuen Überlegung, die Dingler<sup>1</sup> angestellt hat. In den Naturgesetzen kommen Größen vor, deren Messung nicht unmittelbar möglich ist, sondern auf Raum-Zeit-Messungen zurückgeführt wird (z. B. Masse, Gravitationskraft, elektrische Ladung, elektrostatisches Feld usw.). Diese Zurückführung aber setzt ein allgemeines Wirkungsgesetz voraus. Definieren wir etwa die Masse als Quotient von Kraft und Beschleunigung, so können wir sie nicht messen, ohne ein Kraftgesetz vorauszusetzen (z. B. das Newtonsche Gravitationsgesetz oder das Grundgesetz der Elastizität). Denn Beschleunigung ist wohl meßbar, Kraft aber nicht, solange die Massen nicht bestimmt sind. Erinnerung man sich daran, daß in der Astronomie die Massen der Himmelskörper (und zwar nicht nur der Planeten, sondern auch unsichtbarer Fixsternbegleiter) nur auf Grund des Newtonschen Gesetzes bestimmt werden, so überzeugt man sich leicht, daß grundsätzlich auch irgendein anderes Massenwirkungsgesetz aufgestellt und ohne Widerspruch mit der Erfahrung durchgeführt werden könnte. Dazu brauchte nur auf Grund des gewählten Gesetzes die für die beobachteten Bewegungen erforderliche Massenverteilung berechnet und als „wirklich“ bezeichnet zu werden; nicht anders, als es in der Astronomie auf Grund des Newtonschen Gesetzes geschieht. Daß dabei u. U. eine weit kompliziertere Massenverteilung z. B. im Planeten- und Fixsternsystem anzusetzen wäre, spricht zwar zugunsten der Beibehaltung des üblichen Kraftgesetzes, aber nicht gegen die grundsätzliche Möglichkeit der Wahl eines anderen. In ähnlicher Weise wie bei der Festsetzung des Grundgesetzes der Raumbestimmung können wir auch die hier für das Wirkungsgesetz vorliegende Wahlfreiheit auf zwei verschiedenen Wegen benutzen: entweder wir wählen das Grundgesetz selbst (z. B. das Newtonsche Gesetz oder die elektromagnetischen Grundgesetze von Maxwell oder beliebige andere) und bestimmen danach empirisch die Verteilung der wirkenden Substanz (etwa der Masse bzw. der Elektronen); oder aber wir setzen umgekehrt in der Welt eine bestimmte Substanzverteilung an und leiten aus dieser das Wirkungsgesetz ab.

## II. Die Forderung der Einfachheit.

Wir gehen jetzt einen Schritt weiter: nach der Einsicht in die an drei Punkten des Aufbaues der Physik vorliegende Wahlfreiheit stellen wir einen Grundsatz auf, der die Wahl leiten soll: die Forderung der Einfachheit. Es zeigt sich aber nun bei näherer Betrachtung, daß diese Forderung auf zwei verschiedene Dinge bezogen werden kann. Infolge-

<sup>1</sup> Dingler, a. a. O. Dingler wählt Raumsystem (euklidisch) und Wirkungsgesetz (newtonisch), übersieht aber die Notwendigkeit einer Zeitmaßsetzung.

dessen stehen auch für den, der die dargelegten Grundsätze des „kritischen Konventionalismus“ anerkennt (nämlich die Wählbarkeit jener Festsetzungen und die Forderung der Einfachstheit), noch zwei verschiedene Wege offen.

Die Zweiteilung des Weges wird an den drei besprochenen Punkten deutlich, an denen die Wahl einer Festsetzung zu treffen ist. Wie wir sahen, besteht dort Freiheit in der Wahl eines Grundgesetzes (Raummaßsetzung oder auch geometrisches System, Zeitmaßsetzung, Wirkungsgesetz), und von der getroffenen Wahl hängt dann die Beschreibung des Weltzustandes ab (die räumliche Anordnung der Dinge in der Welt; der zeitliche Ablauf der Vorgänge in der Welt; die den Dingen zuzuschreibenden Substanzzahlen, z. B. Massen). Die Frage lautet nun: gilt die Forderung der Einfachstheit für das Grundgesetz oder für die auf Grund dieses Gesetzes vorgenommene Beschreibung des Weltzustandes?

Die Frage sei zunächst an dem einfachsten Falle erörtert, nämlich dem des Raumesgesetzes. Hier bedeutet der erste Weg: der Grundsatz der Einfachstheit bezieht sich auf das geometrische System; unter allen logisch möglichen ist das einfachste auszuwählen. Das ist zweifellos das euklidische. Dieses ist der Raummessung zugrunde zu legen, indem die Maßnorm (der starre Körper) so bestimmt wird, daß er die Sätze der euklidischen Geometrie erfüllt. Dies Verfahren wählt Dingler („reine Synthese“). Die allgemeine Relativitätstheorie schlägt dagegen den anderen Weg ein; sie wählt (für das vierdimensionale Raum-Zeit-Gebiet) ein weniger einfaches geometrisches System (das Raum- und Zeitfestsetzung verbindet), weil dadurch die Beschreibung des Geschehens einfacher wird (Bewegungsbahnen sind geodätische Linien, Lichtstrahlen sind Nullinien).

Daß nicht einer der beiden Wege richtig, der andere falsch sei (im Sinne eines Widerspruches mit sich selbst oder mit der Erfahrung), ist nach den vorhergehenden Überlegungen nicht mehr zu bezweifeln. Es kann sich nur um die Frage handeln, welcher zweckmäßiger sei, welchen die Wissenschaft einschlagen solle.

Bevor wir die Vorzüge, die jeder von beiden Wegen hat, erörtern, sei auf den naheliegenden Einwand erwidert, es handle sich nur scheinbar um zwei verschiedene Wege, beide müßten zu demselben Ziele führen, indem sich aus dem einfachsten Grundgesetz stets auch die einfachste Gesamtbeschreibung ergebe. Das würde zwar die Abweisung jenes Anspruches der Relativitätstheorie auf Einfachstheit bedeuten, doch das könnte ja in der Absicht des Einwandes liegen. Daß aber die Identität der beiden Wege sicherlich nicht denknotwendig ist, wird deutlich an folgendem Gleichnis (nicht Beispiel, denn ein solches kann immer nur in dem irgendwie gedachten Zustand der gesamten Natur

bestehen). Es sei die Aufgabe gestellt, die räumliche Verteilung der Bäume einer Anpflanzung anzugeben. Falls wir gar keine Regelmäßigkeit in der Anordnung der Bäume entdecken, so müssen wir nach Festlegung eines Koordinatensystems die Koordinaten für jeden einzelnen Baum angeben. Zu dem Zwecke werden wir das einfachste System wählen, etwa ein rechtwinkliges, kartesisches. Bemerken wir dagegen, daß die Bäume auf den Schnittpunkten zweier Scharen von parallelen Geraden stehen, so wählen wir nicht jenes einfachste rechtwinklige System, sondern ein geeignet liegendes schiefwinkliges. Denn in bezug auf dieses ist mit wenigen Zahlenangaben die Lage aller Bäume beschrieben. Und falls die Bäume auf konzentrischen Kreisen liegen, so wird ihre Anordnung am einfachsten mit Hilfe von Polarkoordinaten angegeben. Angenommen nun, es herrsche nicht völlige Regellosigkeit, aber auch keine der beiden zuletzt genannten Anordnungen sei genau erfüllt, sondern eine konzentrische Kreisschar, gleichzeitig aber auch zwei sich kreuzende Parallelscharen seien durch die Stellung der Bäume annähernd bezeichnet. Wir nehmen nun an, es sei ein bestimmtes Koordinatensystem gewählt worden und bewähre sich auch, solange nur die Lage eines kleinen Teiles der Bäume und auch diese nur mit geringer Genauigkeit ausgemessen ist. Wenn aber die Ausmessung nach Umfang und Genauigkeit weitere Fortschritte gemacht hat, so kann sich herausstellen, daß ein anderes als das ursprünglich gewählte System die gesamte Anordnung der Bäume, soweit sie bekannt ist, am einfachsten darzustellen erlaubt.

Aus dem Gleichnis geht zunächst hervor, daß das in sich einfachste der anwendbaren Maßsysteme nicht unbedingt auch die einfachste Beschreibung des Zustandes liefert. Ferner werden auch Vorzüge und Nachteile der beiden Wege deutlich, zunächst in bezug auf das Raumsystem, dann auch allgemein. Der wichtigste Vorzug des ersten besteht darin, daß das ganze formale System ein für alle Mal festgesetzt wird, während beim zweiten die Möglichkeit nie ausgeschlossen ist, daß die Ergebnisse künftiger Erfahrung nötigen, ein völlig neues System aufzubauen und der Darstellung zugrunde zu legen. Die Nachteile eines solchen Umbaues vom Grundstein aus dürfen jedoch nicht überschätzt werden. Die Ergebnisse der früheren Messungen werden dabei nicht etwa als wertlos verworfen, sondern nur umgerechnet und umgedeutet, ähnlich wie auch sonst beim Umbau größerer Theorien in der Physik (z. B. beim Übergang vom ptolemäischen oder besser tychonischen zum kopernikanischen Planetensystem, von der Emissions- zur Wellentheorie des Lichtes und wiederum von der Theorie des elastischen Lichtmediums zu der des elektromagnetischen Feldes).

Der Vorzug des zweiten Weges liegt, wie auch das Gleichnis schon andeutet, in der einfacheren Gesamtdarstellung der (hier zunächst

räumlichen) Verhältnisse der Welt, genauer: der uns bekannten raumzeitlichen Umgebung. Hier könnte die Frage aufgeworfen werden, mit welchem Recht denn vermutet werden dürfe, daß die Beschaffenheit dieser im Verhältnis zum unbekanntem Gebiet doch verschwindend kleinen Umgebung auch nur einigermaßen gleichartig der in anderen Raum- und Zeitgebieten sei, oder wie man sonst begründen wolle, daß man die allgemeinen Grundgesetze von dieser Beschaffenheit abhängig mache. Darauf ist zu erwidern, daß anscheinend in den von uns während der letzten Jahrtausende durchschrittenen Raum- und Zeitgebieten keine in diesem Sinne beträchtliche Änderung der Beschaffenheit zu bemerken war. Und selbst wenn dies uns nicht wenigstens die Vermutung nahelegen würde, auch in der näheren Zukunft mit der gleichen Beschaffenheit rechnen zu dürfen, so würden wir doch gar keine andere Möglichkeit zu Schlüssen auf die Zukunft haben, als indem wir von der Gegenwart ausgehen und, ob wir nun den ersten oder zweiten Weg einschlagen, zu jeder Voraussage den Vorbehalt anfügen: sofern nicht bisher noch unbekannte Faktoren hinzutreten. Und wenn die Beschaffenheit unserer Umgebung auch nur wiederum einige weitere Jahrtausende sich im bisherigen Maße gleichbliebe, so würde es sich doch schon lohnen, die physikalische Theorie so einzurichten, daß diese Beschaffenheit in möglichst einfacher Gestalt dargestellt werden könnte.

Genau Entsprechendes gilt bei der Wahl des Wirkungsgesetzes. Auch hier hat der erste Weg den Vorzug, von der Erfahrung unabhängig und daher endgültig bestimmen zu können; der zweite wiederum den Vorzug der einfacheren Darstellung des Zustandes der Welt, oder genauer: unserer Umgebung. Anders ausgedrückt: beim ersten Weg liegt das Hauptaugenmerk auf den allgemeinen Gesetzen, beim zweiten auf den Vorgängen, die nach diesen Gesetzen verlaufen. Der Unterschied dieser beiden Gegenstandsgebiete ist für die Frage nach Aufgabe und Verfahren der Physik von großer Bedeutung. Er soll daher jetzt näher betrachtet werden. Danach sind auch Ziel und Bedeutung der beiden Wege schärfer faßbar.

### III. Gestalt und Leistung einer vollendeten Physik.

Für die Feststellung der Richtung, in der die Physik auf irgendeiner Stufe weiterschreiten soll, kann die Fiktion eines vollendeten Aufbaues der Physik, gewissermaßen als Zielpunkt im Unendlichen, gute Dienste leisten. Wie müssen wir uns dieses ideale physikalische System vorstellen; was leistet es, und was für Sätze enthält es? Die Leistung muß offenbar die des „Laplaceschen Geistes“ sein, der jedes zukünftige oder vergangene Ereignis berechnen kann. Hierfür müssen ihm Kenntnisse von dreierlei Art gegeben sein; die vollendete Darstel-

lung der Physik besteht, bildlich gesprochen, aus drei Bänden. Der erste verfährt *more geometrico*: er setzt einige wenige Axiome fest und leitet daraus rein logisch beliebig viele Sätze ab. Er braucht im Grunde nur beliebig wenige oder gar keine Sätze abzuleiten, ohne daß dadurch das Gesamtsystem der Physik weniger imstande wäre, jene Berechnungen auszuführen. Die Ableitungen sollen nur Arbeit für die Berechnungen ersparen, indem sie von diesen die häufigsten Bestandteile vorwegnehmen, die dann nicht immer wiederholt zu werden brauchen. Der ganze Erkenntnisgehalt des ersten Bandes steckt auch schon in den Axiomen allein. Diese bestehen aus den Grundsätzen der Raumbestimmung, Zeitbestimmung und Abhängigkeit der Vorgänge voneinander, kurz: Raumgesetz, Zeitgesetz, Wirkungsgesetz.

Die Ableitung der Naturgesetze aus diesen Axiomen geschieht, wenn auch in mancher Hinsicht veranlaßt durch die Erfahrung, doch ohne jede Begründung auf Erfahrung. Der erste Band enthält also synthetische Sätze *a priori*, allerdings nicht genau im Kantischen transzendental-kritischen Sinne. Denn das würde bedeuten, daß sie notwendige Bedingungen des Gegenstandes der Erfahrung ausdrückten, selbst bedingt durch die Formen der Anschauung und des Denkens. Dann aber könnte es nur eine mögliche Gestalt für den Inhalt dieses Bandes geben. In Wirklichkeit ist aber sein Aufbau vielfach unserer Wahl anheimgestellt. Daher finden wir auch die verschiedensten Entwürfe solcher axiomatischen Systeme der Physik (vgl. die folgenden Beispiele). Diese stehen nicht einander widersprechend gegenüber, sondern sind, wenn logisch einwandfrei, grundsätzlich gleichberechtigt. Die Wahl ist nur nach methodischen Grundsätzen zu treffen, insbesondere dem der Einfachheit. Zur Kennzeichnung des ersten Bandes ist demnach dem Kantischen *Apriori*-Begriffe vorzuziehen der Begriff „hypothetisch-deduktives System“, wie ihn die Peanosche Schule für die (formale) Geometrie geprägt hat, die ja auch einen Teil des ersten Bandes bildet.

### Beispiele von Axiomsystemen der Physik.

1. Axiome der euklidischen Geometrie, Newtonsche Bewegungssätze, Newtonscher Gravitationsatz,
  - a) ohne Hinzufügung weiterer Axiome. So Dingler. Aus diesen Grundsätzen werden deduktiv abgeleitet: die Lehrsätze der euklidischen Geometrie, die einer reinen Bewegungslehre (Phoronomie) und die der Dynamik: die drei Integralsätze, die Prinzipien von D'Alembert und Hamilton, und weiter beliebig viele andere. Ferner die Keplerschen Gesetze und aus ihnen die des pseudo-elastischen (Molekular-)Stoßes und daraus die der statistisch-kinetischen Theorie großer Elementen-Mengen: die Wärmelehre. Die Zurückführung der elektromagnetischen Gesetze auf die genannten

Axiome ist bisher nur als logische Möglichkeit grundsätzlich nachgewiesen, jedoch noch nicht durchgeführt worden.

- b) Zu den genannten Axiomen treten Maxwells Grundgleichungen des Elektromagnetismus. Ableitung von Geometrie, Phoronomie und Dynamik wie bei 1a. Die optischen Gesetze bestehen in den für periodische Vorgänge des elektromagnetischen Feldes abgeleiteten Sätzen. Die Deduktion der Gesetze der Elastizität und der Molekularvorgänge wird als möglich angenommen, aber nicht ausgeführt.
  - c) Eine Abart von b. Die elastischen Stoßgesetze für kleinste Teilchen werden als Axiome anstelle des Newtonschen Gravitationsgesetzes aufgestellt, und dieser aus ihnen abgeleitet (statistisch-kinetische Theorie der Gravitation).!
2. Euklidische Axiome, Newtonsche Bewegungssätze, Grundsätze der Elektronentheorie, Quantenaxiom.
- Ableitung von Geometrie, Phoronomie und Dynamik wie bei 1a. Die zu berechnenden stabilen Formen von Elektronenkomplexen werden als Atomarten bezeichnet, und ihr Verhalten aus den Grundsätzen abgeleitet (mechanische, thermische, optische, chemische Eigenschaften der Atome). Diese Ableitungen sind nur zum Teil durchgeführt. Herleitung der Gravitation etwa in der von Lenard angedeuteten Weise.
3. Einsteins Allg. Relativitätstheorie; ein einziges Weltgesetz: Nullsetzung der Variation einer gewissen „Weltfunktion“. Zwei verschiedene Formen:
- a) Mie — Hilbert. Aus dem Weltgesetz gehen hervor: die allgemeine Riemannsche Geometrie für vier Dimensionen; die zehn Grundgleichungen von Mies Theorie der Materie.
- Genau genommen fehlen hier Raum- und Zeitmaßsetzung. Diese sind nicht etwa durch die Riemannsche Geometrie schon festgelegt (wie in den Fällen 1a, b, c und 2 die Raummaßsetzung durch die euklidische Geometrie), sondern werden hier durch die Wahl des Maßnormkörpers und der Uhr bestimmt; diese Wahl wird aber nicht ausdrücklich genannt, weil die stillschweigende Annahme gemacht wird, daß alle „natürlichen“ Maßnormkörper und Uhren die gleichen Maßsetzungen ergeben (unausgesprochener Grundsatz der metrischen Aequivalenz der Maßstäbe und Uhren).
- Die zehn Grundgleichungen müssen hier in der Form gedacht werden, die sie haben würden, wenn sie nur die zehn primären Zustandsgrößen enthielten: elektrische Dichte, je drei Komponenten des Vektorpotentials, der elektrischen und der magnetischen Verschiebung. Für die zehn anderen, von ihnen abhängigen Zustandsgrößen (skalares Potential, je drei Komp. der elektrischen Stromdichte, der elektr. und der magnet. Feldstärke) sind also die entsprechenden, größtenteils noch unbekanntten Funktionen jener primären eingesetzt zu denken.
- b) Weyl. Hier sind Zeit- und Raummaßsetzung durch ein Vierervektorfeld („elektromagnetisches Vektorpotential“) ausgedrückt, das zu dem Einsteinschen Tensorfeld („Gravitationspotential“) hinzutritt. Diese beiden Felder sind bestimmt durch das eine Weltgesetz. Von ihnen hängen nicht nur räumliche und zeitliche Maßverhältnisse, sondern auch die Gravitations- und elektromagnetischen Zustandsgrößen, und damit alle physikalischen Vorgänge ab. Hier sind also Raum-, Zeit- und Wirkungsgesetz in eine Einheit zusammengeschlossen.

- c) Kaluza<sup>1</sup>. Entwurf einer Abart der Weylschen Theorie: anstelle von Vektor- und Tensorfeld nur das eine Feld eines metrischen Fundamental-tensors einer fünfdimensionalen Welt. Also noch stärkere Vereinheitlichung.

Die Deduktion der Naturgesetze aus dem einen Weltgesetz der Rel.-Th. (in den verschiedenen Darstellungsformen) ist in zwei Stufen zu denken: aus dem Weltgesetz werden die grundlegenden Differentialgleichungen abgeleitet, und aus diesen wiederum die einzelnen Naturgesetze. Die zweite Ableitung ist zum großen Teil durchführbar (analog Fall 2), die erste aber gegenwärtig nur in einigen Zügen andeutbar, da die genaue Gestalt der „Weltfunktion“ noch unbekannt ist.

4. Die Äthertheorie von Wiener<sup>2</sup>. Nur eine Zustandsgröße: die (absolute) Strömungsgeschwindigkeit des Äthers, die für jedes Ätherteilchen konstant bleibt. Ein einziges Grundgesetz: die (Normal-) Beschleunigung als Funktion des Geschwindigkeitsvektorfeldes. Das ist das Wirkungsgesetz; Raum- und Zeitgesetz werden nicht ausdrücklich angegeben. Vielleicht ist als Raumgesetz stillschweigend das euklidische vorausgesetzt; dann würde durch dieses und den Grundsatz der Geschwindigkeitskonstanz das Zeitgesetz eindeutig festgelegt sein. Trifft diese Annahme zu, so liegen also drei Axiome zugrunde: das Grundgesetz, der Grundsatz der Geschwindigkeitskonstanz und die euklidische Raumbestimmung. Die Deduktion der Gravitation, der Maxwellschen Gleichungen und der anderen Naturgesetze ist bisher nur angedeutet, ihre Möglichkeit jedoch nahegelegt worden.

Der zweite Band stellt die Vermittlung zwischen dem Bereich der Wahrnehmung und dem Bereich her, das den Gegenstand der physikalischen Theorie bildet. Daß diese beiden Gebiete vollständig auseinanderfallen, kann gar nicht scharf genug betont werden. Das erste enthält die Empfindungsinhalte: Farben, Töne, Gerüche, Drücke, Wärmeempfindungen usw., von denen streng genommen in der theoretischen Physik überhaupt nicht die Rede ist. Dieser Sachverhalt wird durch die vielfache Benutzung der gleichen Ausdrücke in beiden Gebieten („Druck“, „Wärme“, auch „Farben“, „Töne“ usw.) sehr verwischt. Dieser vereinfachende, aber ungenaue Sprachgebrauch kann innerhalb der Physik kaum Schaden anrichten, wohl aber bei der Untersuchung der Beziehungen zwischen dieser und den anderen Wissenschaften. Auch wird die Trennung dadurch undeutlich, daß man bei der Behandlung einer physikalischen Frage die Bestandteile, die wir auf den ersten und zweiten Band verteilen, zu vermengen pflegt.

Der zweite Band verknüpft nun die beiden Gebiete gewissermaßen durch eine Art von Wörterbuch, das angibt, welche Gegenstände (Elemente, Komplexe, Vorgänge) im zweiten Gebiet den einzelnen des ersten entsprechen. Da heißt es etwa: „Einem solchen Blau (bezeichnet z. B. nach dem Ostwaldschen Farbsystem) entspricht eine gewisse periodische

<sup>1</sup> Th. Kaluza, Zum Unitätsproblem der Physik. Sitz.-Ber. d. Berl. Akad. d. Wiss. LIV, 966—972, 1921. Die Literatur zu den vorhergehenden Beispielen ist bekannt; außer den genannten Namen vgl. Laue, Die Relativitätstheorie, II.

<sup>2</sup> Abh. Sächs. Akad. d. Wiss. XXXVIII, 1921.

Elektronenbewegung (bezeichnet durch die Schwingungszahl)“ (im Beispiel 2) oder „... ein Bereich des elektromagnetischen Vierervektorfeldes mit periodischer Anordnung“ (im Beispiel 3b). Offenbar hängt die zweite Rubrik des zweiten Bandes vom Inhalt des ersten Bandes ab; die Elemente des physikalischen Bereiches und ihre Beziehungen, die physikalischen Vorgänge, sind bestimmt durch das gewählte Axiomensystem.

Die erkenntnistheoretische (oder eigentlich metaphysische) Frage nach der Seinsbedeutung der beiden Gebiete soll hier ganz beiseite gelassen werden. Für die Lösung unserer Aufgabe kommt es auf ihre Beantwortung gar nicht an. Denn für die Physik ist es (im Gegensatz zu einer weitverbreiteten Auffassung) ohne Bedeutung, ob man im phänomenalistisch-realistischen Sinne die Inhalte des ersten Gebietes (z. B. die wahrgenommene Farbe Blau) „bloße Erscheinungen“, die des zweiten (z. B. die entsprechenden elektromagnetischen Schwingungen) „Wirklichkeit“ nennt, oder umgekehrt im positivistischen Sinne die ersteren als „das wirklich Gegebene“, die des zweiten als „nur begriffliche Komplexe jener Empfindungsinhalte“ bezeichnet. Darum heißt es nicht: „wo dieses Blau erscheint, ist in Wirklichkeit ein solcher Elektronenvorgang“, und auch nicht: „anstelle dieses Blau fingieren wir, um Berechnung zu ermöglichen, einen solchen Elektronenvorgang“, sondern die Physik drückt sich neutral mit Hilfe der rein formalen Zuordnungsbeziehung aus und überläßt jene Ausdeutungen einer nicht physikalischen Untersuchung.

Weitere Sätze sind etwa (für Beispiel 2): „Einem solchen stechenden Geruch (Chlorgeruch, Bezeichnungssystem fehlt) entspricht ein Gemenge von Elektronenkomplexen bestimmter Struktur (Cl-Atome)“; „Einer solchen Wärmeempfindung (Bezeichnungssystem fehlt) entspricht eine gewisse durchschnittliche kinetische Energie einer Menge von Elektronenkomplexen (Atomen oder Molekülen).“ — Das Wörterbuch ist in beiden Richtungen benutzbar: es dient sowohl zur Übersetzung eines phänomenalen Tatbestandes in den entsprechenden physikalischen, wie auch umgekehrt. Es ist jedoch zu bemerken, daß nur im zweiten Falle die Zuordnung eindeutig ist; während aus zwei verschiedenen Gründen einem bestimmten Empfindungsinhalt i. A. nicht nur ein bestimmter physikalischer Tatbestand entspricht, sondern eine unendliche Menge von solchen. Der erste Grund ist an dem letzten angeführten Satze ersichtlich, wo zu derselben durchschnittlichen kinetischen Energie einer Molekülmenge, und damit zu derselben Wärmeempfindung, die unendlich vielen, nach Betrag und Richtung verschiedenen Geschwindigkeitsverteilungen gehören, die den gleichen durchschnittlichen Betrag ergeben. Der zweite Grund liegt in der psychophysischen Tatsache der Empfindungsschwelle.

Der dritte Band enthält die Beschreibung des physikalischen Zustandes der Welt für zwei beliebige Zeitpunkte. Um berechnen zu können, was zu irgendeiner Zeit an irgendeinem Orte geschieht, genügt nicht die Angabe des Zustandes für nur einen Zeitpunkt. Wenigstens dann nicht, wenn nur die Zustandsgrößen selbst angegeben werden, nicht aber ihre zeitlichen Differentialquotienten. Diese gehören, wie die logische Analyse zeigt (Russell, Mougré-Hausdorff), nicht zu den Momentaneigenschaften, obwohl sie mathematisch-formal als solche behandelt werden können. Die beiden zu beschreibenden Zustände brauchen auch nicht, wie zuweilen angenommen wird, zeitlich benachbart zu sein. Denn aus zwei beliebigen Zuständen können zwei benachbarte und damit jene Differentialquotienten berechnet werden. Dafür ist allerdings erforderlich, daß die Identität der Substanzelemente kenntlich gemacht wird; z. B. im Falle der Elektronentheorie darf (außer der Feldverteilung) nicht nur die räumliche Verteilung der Elektronen für die beiden Zeitpunkte angegeben, sondern es muß auch kenntlich gemacht werden, welches Elektron der einen Anordnung mit je einem der anderen identisch ist. Wenn aus den Angaben der Koordinaten der  $n$  Elemente zur Zeit  $t_0$  und der  $3n$  Komponenten ihrer Geschwindigkeiten ihre  $3n$  Koordinaten zur Zeit  $t_1$  berechenbar sind, so brauchen wir uns nur die  $3n$  Gleichungen, die die letzteren Koordinaten angeben, nach jenen  $3n$  Geschwindigkeitskomponenten aufgelöst zu denken, um einzusehen, daß diese dann auch durch die Koordinaten in den Zeitpunkten  $t_0$  und  $t_1$  bestimmt sind.

Es liegt übrigens nahe, zu vermuten, daß die Beschreibung sich nicht gerade auf zwei Schnitte so spezieller Art ( $t = \text{const.}$ ) durch die vierdimensionale Zeit-Raumwelt beziehen müsse, sondern daß vielleicht zwei beliebige dreidimensionale Schnitte gewählt werden können. Doch sind bisher hierüber anscheinend noch keine Untersuchungen angestellt worden.

Zuweilen wird die Auffassung vertreten, aus den beiden Zustandsbeschreibungen könnten nur die zukünftigen, nicht aber die vergangenen Ereignisse eindeutig berechnet werden. Dies gilt allerdings für den Fall, daß nicht die räumliche Verteilung der einzelnen Elemente (z. B. der Elektronen) angegeben wird, sondern nur die Durchschnittswerte gewisser Zustandsgrößen für Gebiete, die sehr viele Elemente enthalten (z. B. Temperatur, Gasdruck). Praktisch ist freilich nur dieses möglich (wegen der erwähnten Mehrdeutigkeit der Zuordnungen des zweiten Bandes). Hier aber gehen wir von der Voraussetzung der idealen Physik aus und verstehen unter einer Zustandsbeschreibung die Angabe der Verteilung der Elemente. Dann ist kein Unterschied zwischen der Berechnung der Vergangenheit und der der Zukunft.

Ersichtlich hängt die Gestalt des dritten Bandes davon ab, welches

Axiomensystem für den ersten Band gewählt worden ist. Denn je nach der Wahl dieses Systems wird der Weltzustand eines Augenblicks beschrieben als Momentanverteilung von Materieteilchen, oder von strömenden Ätherteilchen, oder von Elektronen und elektromagnetischem Feld, oder als dreidimensionaler Schnitt durch das vierdimensionale Vektor- und Tensorfeld usw.

Das Verhältnis der drei Bände bei der Leistung jener Aufgabe der fingierten, vollendeten Physik ist nun folgendes. Um zu bestimmen, was zu einer gewissen Zeit an einem gewissen Orte geschieht, d. h. wahrnehmbar ist, wird aus den gegebenen Zustandsbeschreibungen des dritten Bandes mit Hilfe der Sätze des ersten der Zustand in der Umgebung jenes Raum-Zeitpunktes berechnet und durch die Rückübersetzung mit Hilfe des zweiten Bandes (in dieser Richtung eindeutig) in Angaben von Empfindungsqualitäten ausgedrückt.

Um dem wirklichen Sachverhalt etwas näher zu kommen, wollen wir für einen Augenblick die Fiktion der Vollendetheit nur für den ersten und zweiten Band gelten lassen, nicht aber für den dritten. Wir nehmen also an, wir hätten völlige Kenntnis der Naturgesetze und der Beziehungen zwischen physikalischen Tatbeständen und Empfindungsinhalten, nicht aber des Zustandes der gesamten Welt. Dann lautet die Aufgabe: aus dem beobachteten Zustande eines beschränkten Bereiches, nämlich unserer raumzeitlichen Umgebung, den Zustand eines anderen Raum-Zeitbereiches zu berechnen. Hierzu muß aber zunächst der zweite Raum-Zeit-Bereich dem ersten zeitlich nahe und räumlich kleiner und völlig in ihm eingeschlossen sein (und zwar so, daß die kleinste Entfernung zwischen einem Grenzpunkt des ersten und einem des zweiten Bereiches stets größer ist, als der mit der Lichtgeschwindigkeit multiplizierte zeitliche Abstand). So müßte, damit z. B. der Zustand eines noch so kleinen Raumteiles für nur eine Sekunde vorausberechnet werden könnte, bei Beginn der Sekunde der Zustand innerhalb einer Kugel von mehr als 300000 km Halbmesser bekannt sein. Doch das ist im Grunde genommen nur eine technische Schwierigkeit. Schwerwiegender ist aber der Umstand, daß der Zustand eines Bereiches aus Beobachtungen bestimmt werden soll. Diese Bestimmung ist aber infolge der Mehrdeutigkeit der Beziehungen des zweiten Bandes grundsätzlich unmöglich. Also ist auch die Lösung selbst jener beschränkten Aufgabe nicht möglich. Daß trotzdem eine Physik, die auch von dieser vorsichtigeren Fiktion noch sehr weit entfernt ist, überhaupt Vorausberechnungen auf Grund von Beobachtungen anstellen kann, hat folgenden Grund. Zu einem bestimmten Beobachtungsbefund gehört allerdings eine unendliche Menge physikalischer Zustände des Bereiches, und damit auch eine gleichmächtige Menge solcher Zustände für den zu erkundenden zukünftigen Augenblick, und sogar eine noch mächtigere Menge, wenn man,

wie stets in der praktischen Ausführung, jene Voraussetzungen der zeitlichen Nähe und räumlichen Eingeschlossenheit nicht genau erfüllt. Aber bei der Rückübersetzung dieser unendlichen Menge physikalischer Zustände in Empfindungsinhalte ergibt sich in vielen Fällen eine verhältnismäßig kleine Menge von Empfindungsinhalten, die in günstigen Fällen ein stetiges Qualitätsbereich bilden (z. B. ein Bereich ähnlicher Farbtöne). Das Bestreben ist nun zunächst darauf gerichtet, die Beobachtungen so anzustellen, daß sich nicht mehrere unzusammenhängende Qualitätsbereiche für den zukünftigen Zeitpunkt ergeben, und dann darauf, die Grenzen des einen Qualitätsbereiches möglichst zu verengern. Die beiden Mängel der Voraussage, Mehrdeutigkeit und Ungenauigkeit, können so im Fortgange der Wissenschaft immer mehr verringert werden. In besonderen Fällen für nicht zu lange Zeitabstände können sie völlig beseitigt, also Eindeutigkeit der Voraussage erreicht werden. Doch bleibt ihre Beseitigung für beliebige Zeitabstände grundsätzlich unmöglich. Das gilt für die praktisch allein verlangte Voraussage von Wahrnehmungsinhalten. Von der eindeutigen Voraussage physikalischer Zustände dagegen bleibt die Wissenschaft auch bei noch so kleinen Zeitabständen immer unendlich weit entfernt.

#### IV. Die beiden Möglichkeiten zur Anwendung des Grundsatzes der Einfachtheit.

Nachdem wir so gesehen haben, wie die ideale Physik aus drei Teilen besteht, dem axiomatischen, dem der phänomenal-physikalischen Zuordnung („Wörterbuch“) und dem deskriptiven, können wir die Frage des Abschnittes II genauer fassen: auf welchen Teil der Physik bezieht sich die Forderung der Einfachtheit? Je nach der Beantwortung dieser Frage ergeben sich zwei verschiedene Wege zu einer einheitlichen Wissenschaft.

Als wichtigster Teil der Physik gilt wohl meist der erste. Er wird sogar häufig als einziger angesehen. Das ist z. B. der Fall, wenn die Physik als Wissenschaft von den Naturgesetzen definiert wird, oder wenn angegeben wird, daß sie die „subjektiven Qualitäten“, womit die Empfindungsinhalte gemeint sind, ausschalten müsse. Diese Auffassung läßt sich halten; es müssen dann die von uns als zweiter und dritter Teil der Physik bezeichneten Gebiete der physiologischen Psychologie der Sinne und einer (nicht bestehenden) deskriptiven Gesamtwissenschaft zugewiesen werden, zu der u. a. Astronomie und Geographie gehören. Bei dieser Abgrenzung des Wissenschaftsgebietes (deren Beurteilung im Grunde nur eine Frage des Sprachgebrauches ist) hat Haas Recht, die ideale „Physik als geometrische Notwendigkeit“, d. h. als axiomatisches System reiner Deduktion aufzufassen<sup>1</sup>. In diesem Falle dürfte

<sup>1</sup> Die Naturwissenschaften VIII, 1920, S. 121.

es für die Physik wohl auch naheliegen, die Einfachstheitsforderung auf diesen ersten Teil zu beziehen, ohne Berücksichtigung der anderen, dann nicht zu ihr gehörenden Teile. Schlägt sie diesen ersten Weg ein, so sind euklidische Geometrie und Newtonsches Gesetz als die in sich einfachsten axiomatisch aufzustellen; es liegt in diesem Falle kein Grund vor, andere Gesetze zu wählen. Dann ist also von den aufgeführten Axiomsystemen dem Beispiel 1a der Vorzug zu geben. Da Dingler von der genannten Voraussetzung (Physik als axiomatische Wissenschaft) ausgeht, so hat er demnach Recht, dieses System seinem Verfahren der „reinen Synthese“ zugrunde zu legen, unter Ablehnung der anderen Systeme. Wird ein Fernwirkungsgesetz für unzulässig gehalten (die Gründe dafür können hier nicht erörtert werden), so dürfte dem Wienerschen System der Vorzug zukommen.

Ganz anders liegt aber die Sache, wenn nicht nur der erste, sondern auch der zweite und dritte Teil der Physik (bei unserer Einteilung) mitberücksichtigt werden, und die Forderung der Einfachtheit sich auch auf sie beziehen soll. Die früheren Überlegungen haben schon gezeigt, daß je nach Wahl der Axiome des ersten Bandes sich verschiedene Gestalten für den zweiten und dritten ergeben. Und zwar wird der dritte um so einfacher, je einfacher der zweite ist. Denn da das Gefüge unserer Wahrnehmungen gegeben ist und keiner Wahlbestimmung mehr unterliegt, so wird der aus ihm durch die Übersetzung sich ergebende Weltzustand um so einfacher, je einfacher die zweite Rubrik des der Übersetzung zugrunde liegenden Wörterbuches ist. Deshalb kommt es im Ergebnis auf dasselbe heraus, ob der Maßstab der Einfachtheit an den zweiten oder an den dritten Band angelegt wird. Da aber die Nachprüfung der Einfachheit der den einzelnen Empfindungsinhalten entsprechenden physikalischen Vorgänge leichter ist, als die der Einfachheit des (praktisch nie bekannten) Zustandes der gesamten Welt, so wird das Kriterium zweckmäßiger auf den zweiten Band bezogen und die Forderung so ausgedrückt: die physikalischen Axiome sind derart zu wählen, daß die physikalischen Vorgänge, die den einzelnen Empfindungsinhalten und den Komplexen von solchen zugeordnet werden, möglichst einfach sind; und unter den Axiomsystemen, die dieser Forderung in gleicher Weise genügen, ist das in sich einfachste auszuwählen. Das ist der zweite Weg.

Ein sicheres Urteil darüber, auf welches der angeführten oder sonstigen Axiomsysteme beim Einschlagen dieses Weges die Wahl fallen muß, kann noch nicht abgegeben werden. Denn weder ist irgendeine der Theorien im Hinblick auf diesen Weg aufgebaut, noch sind Untersuchungen darüber angestellt worden, wie sich die einzelnen Theorien verhalten, wenn sie von diesem Gesichtspunkte aus auf Einfachheit geprüft werden. Auch müßten zuvor genauere Kriterien zur Bestimmung des Grades der

Einfachheit eines physikalischen Vorganges aufgestellt werden. Doch lassen sich immerhin schon einige abschätzende Vermutungen aussprechen. Die axiomatisch einfachsten Systeme von Dingler und Wiener scheinen hierbei nicht den Vorrang zu haben. Besonders für die optischen Vorgänge wird Dingler, der die Ausführung noch nicht versucht hat, zu den gewöhnlichen materiellen Atomen noch Atome zweiter und vermutlich einiger höherer Stufen annehmen müssen, die eine äußerst komplizierte Struktur ergeben werden. Denn eine dem verhältnismäßig einfachen Aufbau des Atoms aus Elektronen entsprechende Struktur ist in seinem System nicht möglich, da nur anziehende Kräfte angenommen werden. Bei Wiener ist der Aufbau der Theorie in den Grundzügen angedeutet. Danach scheint die Struktur sehr kompliziert zu werden; z. B. entspricht dem Elektron wahrscheinlich ein schraubiger Wirbelring dritter Ordnung aus Ätherteilchen.

Nach der allgemeinen Relativitätstheorie dagegen ergibt sich vermutlich eine einfachere Struktur. Es handelt sich da z. B. bei den Elektronen um bestimmte Gestaltungen des Vierervektorfeldes auf Grund gewisser singulärer Lösungen der Gleichungen (die aber noch nicht durchgeführt sind). Diese Gestaltungen zeigen vielleicht, abgesehen von den minimalen, im allgemeinen zu vernachlässigenden Änderungen durch die gegenseitige Einwirkung, Kugelsymmetrie. Vor allem ist aber hervorzuheben, daß es sich sowohl bei dem Vektor-, wie bei dem Tensorfeld nur um Bestimmungen der Weltmetrik handelt. Im eigentlichen, alten Sinne „physikalische“ Zustandsgrößen, nämlich solche, die nicht nur die geometrischen Maßverhältnisse der Welt bestimmen, gibt es in dieser Theorie (in der Weylschen Form, 3b) überhaupt nicht. Andererseits ist aber die Struktur der physikalischen Vorgänge nach dieser Theorie vorläufig noch nicht sicher vor weiteren Komplizierungen, die sich vielleicht noch aus den mit der Quantentheorie zusammenhängenden Erscheinungen ergeben; während, wie es scheint, die (an sich schon kompliziertere) Struktur nach der Wienerschen Theorie hiervon weniger zu befürchten hat.

## V. Das Ergebnis. Voraussetzungen zur Beurteilung physikalischer Theorien.

Unsere Überlegungen haben gezeigt, daß für den Aufbau der Physik drei frei zu wählende Festsetzungen getroffen werden müssen: Raumgesetz, Zeitgesetz, Wirkungsgesetz. Und zwar soll die Wahl nach dem Grundsatz der Einfachheit erfolgen. Für dessen Anwendung zeigen sich aber zwei verschiedene Möglichkeiten: er kann entweder auf den axiomatischen Teil der Physik bezogen werden, oder auf die phänomenal-physikalischen Zuordnungen und damit auch auf den