

Seminar über philosophische Aspekte der Physik

Seminarleitung: Prof. Dr. Münster und Dr. Suhm

Ausarbeitung:

**Die Unterscheidung von empirischen und
theoretischen Gesetzen und die Bedeutung von
Korrespondenzregeln (Rudolf Carnap)**

Bernd Krippendorf

Inhaltsverzeichnis

Zitat von Richard P. Feynman	3
Zum Autor	3
Empirische und Theoretische Gesetze	3
1. Zwischenbilanz	7
Korrespondenzregeln	7
2. Zwischenbilanz	9
Wie neue Empirische Gesetze aus Theoretischen Gesetzen abgeleitet werden	9
Zusammenfassung	12
Quelle	12

Zitat von Richard P. Feynman

„Übrigens grenzt die Tatsache, dass überhaupt Regelmäßigkeiten existieren, die überprüft werden können, an ein Wunder; die Möglichkeit, eine Regel wie das invers-quadratische Entfernungsgesetz der Gravitation aufzustellen, kommt einem Wunder gleich. Man versteht sie überhaupt nicht, doch sie ermöglicht Vorhersagen – das heißt, sie sagt einem, womit bei einem Experiment zu rechnen ist, das man noch nicht durchgeführt hat.“

Zum Autor

Der Philosoph Rudolf Carnap (1891-1970) war einer der Hauptvertreter des logischen Empirismus. Für Carnap bestand die Aufgabe der Philosophie in der logischen Analyse der (Wissenschafts-)Sprache, wobei er als einer der ersten Theoretiker versuchte, die bahnbrechenden logischen Arbeiten von Gottlob Frege, Bertrand Russell und Alfred North Whitehead für erkenntnis- und wissenschaftstheoretische Fragestellungen nutzbar zu machen.

Empirische Gesetze und theoretische Gesetze

Beide Terme sind nicht allgemein akzeptiert. Zum einen ist die Abgrenzung der beiden Terme untereinander schwierig, zum anderen werden von anderen Philosophen andere Terme benutzt.

Was sind empirische Gesetze? Die empirischen Gesetze können direkt aus empirischen Beobachtungen gewonnen werden. Es handelt sich um Gesetze über Observablen. Bei dem Begriff Observable ergibt sich bereits die erste Schwierigkeit. Philosophen sehen Observablen als von den Sinnen erfahrbar an. Physiker erweitern den Begriff der Observablen auf alle quantitativen Größen, die direkt gemessen werden können. Dazu ein Beispiel: Die elektrische Spannung würde noch als Observable gelten, weil sie sehr einfach gemessen werden kann.

Es gibt aber einen fließenden Übergang zwischen von den Sinnen erfahrbaren Größen hin zu Größen, die immer kompliziertere und indirektere Methoden der Beobachtung notwendig machen. Es ist unmöglich eine scharfe Grenze zu ziehen. Das lässt sich anhand der verschiedenen Möglichkeiten einen Gegenstand zu betrachten verdeutlichen.

- 1) Direkte Betrachtung eines Gegenstandes mit dem bloßen Auge.

- 2) Die Betrachtung mit einer Lupe.
- 3) Die Benutzung eines optischen Mikroskops.
- 4) Die Benutzung eines Elektronen-Mikroskops.
- 5) Und schließlich die Benutzung eines Raster-Tunnel-Mikroskops.

Die Festlegung der Grenze ist in jedem Fall willkürlich. Der Autor Rudolph Carnap betrachtet direkt oder mit relativ einfacher Technik messbare Größen als Observablen. Was relativ einfache Technik bedeutet, ist natürlich wieder im gewissen Maße willkürlich. Da die Carnapsche Definition der Observablen dem physikalischen Sinn recht nahe kommt, wollen wir diesen Begriff verwenden. Als Alternative würde sich noch beobachtbare Entität anbieten. Eine Entität ist entweder ein Objekt oder eine Eigenschaft.

Die empirischen Gesetze werden manchmal auch empirische Verallgemeinerungen genannt. Das geschieht in Anlehnung daran, dass sie als Verallgemeinerung von Beobachtungs- und Messergebnissen gewonnen wurden. Empirische Gesetze sind nicht nur qualitativ, wie zum Beispiel „Alle Raben sind schwarz.“. Sie können auch quantitativ sein wie zum Beispiel das Gesetz über das ideale Gas und das Ohmsche Gesetz.

Wie entstehen empirische Gesetze typischerweise? Der Wissenschaftler misst wiederholt, er findet bestimmte Regelmäßigkeiten und formuliert diese in einem Gesetz. Er verallgemeinert also induktiv die empirisch gefundenen Regelmäßigkeiten.

Wozu dienen die empirischen Gesetze? Zu zweierlei: Sie werden zum einen zur Erklärung beobachteter Ereignisse benutzt. Wenn wir also fragen, warum sich Luft, die wir erwärmt haben, ausdehnt, können wir dies mit dem idealen Gas-Gesetz beantworten. Zum anderen dienen die empirischen Gesetze zur Vorhersage zukünftiger Ereignisse. Wir können also vorhersehen, dass sich die Luft abermals ausdehnen wird, wenn wir sie ein weiteres Mal erwärmen.

Was sind theoretische Gesetze? Sie beinhalten theoretische Terme. Das sind Terme, die theoretische Entitäten beschreiben. Die theoretischen Gesetze machen Aussagen über Moleküle, Atome, Elektronen, Nukleonen, E-M-Felder usw. Das sind alles theoretische Entitäten; Größen, die nicht direkt gemessen werden können.

Teilweise nehmen Physiker aber noch eine Differenzierung der Felder vor. Statische Felder oder Felder, die sich in hinreichend großen räumlichen Distanzen oder in

hinreichend großen Zeitabständen verändern, werden als Observablen betrachtet. Es handelt sich in diesem Falle um einen Makroevent. Wenn die Änderungen allerdings in so kleinen Zeit- und Raumintervallen stattfinden, dass eine Messung nicht mehr möglich ist, wird von einem Mikroevent gesprochen. Dann ist das Feld keine Observable mehr wie zum Beispiel im Falle einer elektromagnetischen Welle hinreichend großer Frequenz. Die Technologie macht aber Fortschritte, so dass sich die Grenzfrequenz, ab der nicht mehr gemessen werden kann, verschiebt.

Es sieht also so aus, als ob wir eine Äquivalenz zwischen dem Verhältnis von Makroevent Mikroevent einerseits und dem Verhältnis zwischen den Observablen und den „Nichtobservablen“ auf der anderen Seite haben. Das ist nicht ganz der Fall, weil sich die theoretischen Gesetze auf alle Nichtobservablen beziehen und nicht nur auf solche, die ein Mikroevent beschreiben.

In der Regel ist die Unterscheidung zwischen Observablen und Nichtobservablen unproblematisch.

Wir kommen nun zu einigen direkten Vergleichen zwischen beiden Gesetzestypen. Theoretische Gesetze sind allgemeiner als empirische Gesetze, da sich erstere auf mehr Fälle anwenden lassen als letztere. Sie sind aber keine Verallgemeinerung der empirischen Gesetze, da ein empirisches Gesetz nicht durch Verallgemeinerung automatisch zum theoretischen Gesetz wird. Diese abstrakte Beschreibung muss noch verdeutlicht werden: Eisen dehnt sich beim Erhitzen aus. Das ist ein Empirisches Gesetz. Wir können dieses Gesetz nun verallgemeinern: Alle Festkörper dehnen sich beim Erhitzen aus. Das ist immer noch ein empirisches Gesetz. Erst wenn wir das molekulare Verhalten als Ursache für das Ausdehnen heranziehen, sind wir bei einem theoretischen Gesetz angelangt.

Um einen weiteren Vergleich ziehen zu können, müssen wir an dieser Stelle den Begriff „Faktum“ definieren. Viele Physiker benutzen „Faktum“ statt des Ausdrucks „Empirisches Gesetz“ nach der Definition des Autors. Es wird zum Beispiel die spezifische Wärme eines bestimmten Stoffes als Faktum bezeichnet, manchmal sogar das Ohmsche Gesetz. Wir werden hier der Definition von Rudolph Carnap folgen, der Faktum für besondere, konkrete Fakten benutzt, die raum-zeitlich spezifiziert werden können. Ein Faktum wäre also der Messwert bei einer Messung des ohmschen Widerstandes eines bestimmten Kabels oder der spezifischen Wärme

eines bestimmten Kupferstücks am Physikalischen Institut der Uni Münster im Raum 50 heute Vormittag um 10.47 Uhr.

Jetzt können wir uns an einen weiteren Vergleich wagen. Die Theoretischen Gesetze stehen in dem gleichen Verhältnis zu den Empirischen Gesetzen wie die Empirischen Gesetze zu den Fakten. Empirische Gesetze werden durch die Überprüfung entsprechender Fakten bestätigt, theoretische Gesetze werden durch untergeordnete empirische Gesetze bestätigt.

Das führt uns direkt zur Antwort auf die Frage nach dem Nutzen Theoretischer Gesetze: Theoretische Gesetze können zum einen Empirische Gesetze erklären und zum anderem helfen, neue Empirische Gesetze zu finden. Wie bereits erwähnt ist der Nutzen von Empirischen Gesetzen Fakten zu erklären und vorherzusehen. Um präzise zu sein, muss hier noch angemerkt werden, dass theoretische und empirische Gesetze allgemeine Sätze, Fakten dagegen singuläre Sätze sind.

Ein großes Problem ist die Überprüfbarkeit von Theoretischen Gesetzen. Wir werden später sehen, dass eine vollständige Bestätigung unmöglich ist.

Wie entstehen theoretische Gesetze typischerweise? Ein theoretisches Gesetz wird als Hypothese formuliert und – zur Erinnerung – nicht als Verallgemeinerung von Tatsachen. Danach können Empirische Gesetze abgeleitet werden, die überprüft werden müssen. Es ist auch möglich, dass bereits bekannte und überprüfte Empirische Gesetze, die von dem Theoretischen Gesetz abgeleitet werden können, die Formulierung eben dieses Gesetzes motiviert haben.

Nun kommen wir zu dem Problem der Überprüfbarkeit der theoretischen Gesetze zurück. Unabhängig von der Anzahl der abgeleiteten empirische Gesetze und der Genauigkeit der Bestätigung dieser kann es eine absolute Bestätigung der Theoretischen Gesetze nicht geben. Jede Bestätigung – auch der Empirischen Gesetze – ist nur partiell.

Was kennzeichnet herausragende theoretische Gesetze? Je mehr empirische Gesetze erklärt werden können und je unterschiedlicher diese sind, desto stärker ist die erklärende theoretische Gesetz. Wichtiger als die Erklärung bestehender ist die Vorhersage neuer Empirischer Gesetze. Ein gutes Beispiel ist die Relativitätstheorie, die eine Fülle von Vorhersagen ermöglichte. Außerdem war die Relativitätstheorie elegant und hatte einen einenden Effekt auf bekannte Gesetze.

1. Zwischenbilanz

Theoretische Gesetze machen Aussagen über nichtbeobachtbare Größen und ermöglichen die Erklärung und die Vorhersage von Empirischen Gesetzen. Von einer umfassenden Theorie, können viele und unterschiedliche Gesetze abgeleitet werden. Eine Überprüfung ist nur indirekt über die Empirischen Gesetze möglich. Diese machen Aussagen über Observablen und dienen ihrerseits der Erklärung und zur Vorhersage von einzelnen Ereignissen. Die experimentelle Überprüfung der Empirischen Gesetze und damit auch der Theoretischen Gesetze ist immer nur partiell.

Korrespondenzregeln

Wir haben in dem vorhergehenden Abschnitt gesehen, dass empirische Gesetze aus theoretischen Gesetzen gewonnen werden können. Es stellt sich jetzt aber die Frage, wie das geschehen soll. Es gibt nämlich folgende Schwierigkeit: Die Theoretischen Gesetze enthalten theoretische Terme, dagegen enthalten die Empirischen Gesetze nur empirische Terme. Die Verbindung muss über Korrespondenzregeln hergestellt werden.

Um die Problematik zu verdeutlichen versetzen wir uns gedanklich ins 19. Jh.: Zum ersten Mal sollen theoretische Gesetze über Moleküle im Gas gemacht werden. Die Gesetze sollen Aussagen über die Molekülzahldichte, die Molekülgeschwindigkeit usw. machen. Sind die Gesetze formuliert, möchten wir Gesetze über beobachtbare Größen wie die Temperatur, den Druck, oder Eigenschaften von Schallwellen, die sich im Gas ausbreiten, machen. Das gelingt nur wenn es eine Regel zur Verbindung der theoretischen mit den empirischen Termen gibt. Hierzu zwei einfache Beispiele:

- 1) Eine elektromagnetische Welle der Frequenz $4,3 \cdot 10^{14}$ ergibt rotes Licht.
- 2) Die Temperatur ist proportional zur mittleren kinetischen Energie der Teilchen.

Auch zum Ausdruck „Korrespondenzregeln“ gibt es Konkurrenz: Campbell spricht von einem Wörterbuch. Der Begriff des Wörterbuches ist zumindest suggestiv, wenn auch wegen folgender Überlegung vielleicht nicht ganz treffend. Theoretische Terme können nie exakt durch beobachtbare Terme beschrieben werden. Es gibt zum Beispiel keine exakte normalsprachliche Antwort auf die Fragen: Was ist ein E-Feld, ein B-Feld, der elektrische Strom. Dies ist prinzipiell nicht möglich!

Einem kleinen Kind können wir beispielsweise die Frage nach einem Elefanten ohne weiteres beantworten. Er ist groß und grau, er hat große Ohren und einen langen Rüssel. Wir können auch noch ein Bild malen. Wir werden Schwierigkeiten bekommen, wenn wir eine ähnliche Erklärung für ein Elektron suchen.

Die Umkehrung, also beobachtbare Terme durch theoretische Terme zu beschreiben, ist manchmal möglich. Zum Beispiel können wir Eisen als Substanz aus kleinen kristallinen Teilen beschreiben, die eine bestimmte Anordnung von Atomen haben, wobei die Atome auch noch näher spezifiziert werden können.

Fassen wir zusammen: Theoretische Terme können nie durch empirische Terme definiert werden, empirische Terme können dagegen manchmal durch theoretisch Terme definiert werden.

Bridgeman verwendet an Stelle von „Korrespondenzregeln“ die Bezeichnung „Operationsregeln“. Er vertritt den Standpunkt, dass es mehrere Konzepte für einen physikalischen Sachverhalt gibt; jedes ist durch verschiedene Operationsregeln zur Messung definiert. Üblich ist allerdings nur ein Konzept, zum Beispiel im Fall des elektrischen Stroms. Das Konzept gehört fest zu dem theoretischen Gesetz. Dagegen gibt es nach Brightman „operationelle Definitionen“ für die theoretischen Gesetze, weil kein generelles Konzept, sondern nur Teilkonzepte vorhanden sind.

Wenden wir uns nun Reichenbach zu, der von Zuordnungsdefinitionen spricht. Die Geometrie veranschaulicht diesen Begriff: Die Grundkonzepte Punkt, Linie, Ebene sind zunächst undefiniert im Axiomen-System. Sie könnten genauso gut Klasse a, Klasse β und Klasse ? heißen. Die theoretischen Konzepte müssen erst über Regeln – nach Reichenbach Zuordnungsdefinitionen, nach Carnap Korrespondenzregeln – mit beobachtbaren physikalischen Phänomenen verbunden werden.

Streng genommen gibt es keine operationelle Definition von allen theoretischen Physikkonzepten.

Die reine Mathematik reicht für die theoretische Physik nicht aus. Ein Elektron oder die Temperatur können nicht nur durch Mathematik beschrieben werden. Es werden nichtlogische Konstanten benötigt. Die mathematischen Axiomen-Systeme, manchmal auch Theorie genannt, können durch Logik definiert werden. Hier bedeutet Theorie ein deduktives System in der Mathematik ohne Referenz zur aktuellen Welt. In der Physik darf die Referenz zur aktuellen Welt natürlich nicht fehlen. Es haben zum Beispiel die Relativitätstheorie, aber auch die Psychoanalyse

und die Wirtschaftstheorie von Keynes selbstverständlich Bezug zur Welt. Und wir sind wieder bei den Korrespondenzregeln, die eine Verbindung herstellen müssen, also eine Interpretation der theoretischen Terme durch Korrespondenzregeln. Die Interpretation ist notwendigerweise unvollständig, da neue Korrespondenzregeln hinzugefügt werden können. Es besteht natürlich die Gefahr inkompatibler Korrespondenzregeln untereinander oder solcher bezüglich Theoretischer Gesetze. In der Mathematik ist es einfacher. Die logische Interpretation eines axiomatischen Terms anders als in der Physik vollständig ist.

Die Theoretischen Gesetze könnten dann eindeutig durch Korrespondenzregeln festgelegt werden, wenn die Welt in Strukturen und Gesetzen begrenzt ist. In diesem Fall würden die Theoretischen Gesetze zu Empirischen Gesetzen. Ein Blick auf die Geschichte zeigt, dass es bisher immer Wandel der Theoretischen Gesetze gegeben hat. Es ist allerdings nicht klar, ob dies so bleiben wird.

Die meisten Physiker wenden sich gegen Korrespondenzregeln, die so stark sind, dass sie Theoretische Terme explizit definieren. Das brächte keinen Vorteil, vielmehr würde es Modifikationsmöglichkeiten im Falle neuer Beobachtungen blockieren.

2. Zwischenbilanz

Wir benötigen Korrespondenzregeln zur Verbindung der theoretischen mit den beobachtbaren Termen. Die Mathematik besteht aus mehreren deduktiven Systemen ohne Referenz zur aktuellen Welt. In der Physik dagegen benötigen wir die Korrespondenzregeln. In der Mathematik ist die logische Interpretation eines axiomatischen Terms vollständig. In der Physik können immer neue Korrespondenzregeln hinzugefügt und damit der Grad der Interpretierung Theoretischer Terme erhöht werden.

Wie neue Empirische Gesetze aus Theoretischen Gesetzen abgeleitet werden

Wir beginnen mit dem Beispiel der kinetischen Gastheorie. Viele Größen, wie zum Beispiel die Molekülmasse oder die Teilchenzahldichte bei bestimmter Temperatur, bei bestimmtem Druck und Volumen, waren zunächst unbekannt. Die Korrespondenzregeln sagen uns:

- 1) Die Temperatur entspricht der mittleren kinetischen Energie.

- 2) Der Druck entspricht dem kontinuierlichen Auftreffen der Moleküle auf die Gefäßwand.

Mit Hilfe der Korrespondenzregeln können empirische Tests an Gesetzen, die von der kinetischen Gastheorie abgeleitet werden, gemacht werden. Es kann zum Beispiel untersucht werden, wie sich der Druck verhält, wenn das Volumen konstant gehalten wird und die Temperatur steigt. Damit können dann indirekt auch Aussagen über die zunächst (numerisch) unbekannten theoretischen Größen gemacht werden. Viele Empirische Gesetze waren vor der kinetischen Gastheorie bekannt. Die kinetische Gastheorie lieferte dafür eine Erklärung und konnte die unbekannten empirischen Gesetze herleiten.

Welches Beispiel für die Vorhersagekraft von Theoretischen Gesetzen können wir geben? Die 1860 von Faraday und Maxwell entwickelte Elektrodynamik lieferte nicht nur die Erklärung vieler elektrischer und magnetischer Gesetze. Es wurde zum Beispiel auch festgestellt, dass sich elektromagnetische Wellen mit etwa $3 \cdot 10^8$ m/s ausbreiten. Das entspricht etwa der Lichtgeschwindigkeit. Der Schluss, dass Licht eine elektromagnetische Welle ist, lag nah. Damit erklärte Maxwell's Theorie auch die Optik und war deswegen ein großer Schritt zur Vereinheitlichung der Physik. Ebenso sind Radiowellen, die von Hertz zuerst experimentell nachgewiesen worden sind, und Röntgenstrahlen elektromagnetische Wellen.

Die Theorie führte zusammen mit den entsprechenden Korrespondenzregeln zu einer großen Vielfalt neuer Empirischer Gesetze.

Um den Vereinheitlichung der Physik im Laufe der Zeit zu betrachten, fragen wir uns zunächst wie die unterschiedlichen Bereiche der Physik früher eingeteilt eingeteilt wurden? Durch die Sinnesorgane! Bei der Optik, Akustik und Wärmelehre sind die Sinne offensichtlich. Die Mechanik ist nach Carnaps Meinung den Bewegungen des Körpers nachempfunden. Elektrizität und Magnetismus können nicht direkt beobachtet werden. Es gibt nun den Fortschritt durch Vereinheitlichung. Das heißt, dass ein Bereich durch einen anderen erklärt werden kann. Wir haben gerade schon gesehen, dass die Optik ein Teil der elektromagnetischen Theorie ist. Die Akustik und auch die Wärmelehre werden heute als Teil der Mechanik betrachtet. Das Ziel ist eine einzige große Theorie. Zur Zeit gibt es aber noch eine Unvereinbarkeit zwischen

dem elektromagnetischem Feld und dem Gravitationsfeld. Keine geringeren als Einstein und Heisenberg haben bisher erfolglos versucht, diese Lücke zu schließen. Die Physik begann als beschreibende Makrophysik mit vielen nichtzusammenhängenden Gesetzen. Für die Suche nach zugrundeliegenden Prinzipien gibt es Befürworter und Gegner. Die Befürworter sagen, dass die Physik ohne die zugrundeliegenden Prinzipien nur beschreibt, aber nicht erklärt. Die Gegner halten die zugrunde liegenden Prinzipien für Metaphysik. Ihnen ist das „Wie“ und nicht das „Warum“ wichtig. Carnap fällt ein salomonisches Urteil, indem er eigentlich keinen Gegensatz zwischen Beschreibung und Erklärung sieht und beides für wichtig hält.

Häufig ist eine Theorie erst eine Vision und wird später, teilweise erst viel später, durch entsprechende Korrespondenzregeln ausgestattet, die eine Überprüfung ermöglichen. Ein Beispiel für diese Entwicklung kann anhand Demokrits Atomtheorie nachvollzogen werden.

Eine Theorie sollte, falls sie wenigstens in der Zukunft überprüfbar sein wird, nicht verworfen werden. Allerdings ist keine Hypothese wissenschaftlich ohne die Möglichkeit der Überprüfung. Das entspricht dem Prinzip der Verifikation, das u.a. von Moritz Schlick vertreten wurde.

Schon Aristoteles machte Experimente und wusste um deren Bedeutung. Er war auch in gewisser Weise Apriorist. Trotzdem war das – aus Sicht eines logischen Empiristen – der Beginn der Wissenschaft.

Erst um 1600 wurde mit Galileo Galilei die experimentelle Methode gegenüber apriorischen Argumenten in bezug auf die Natur bevorzugt. Er stellte die theoretische Physik auf ein solides empirisches Fundament.

Newton schuf eine der ersten systematischen, verständlichem Theorien. Die Gravitationstheorie ist sehr generell. Wir wissen, dass die Gravitationskraft zwischen zwei beliebigen Teilchen wirkt. Die Gravitation auf der Erde und die Planetenbewegung werden auf eine gemeinsame Ursache zurückgeführt. Newtons Theorie ist also ein weiteres Beispiel für die vereinheitlichende Kraft großer Theorien. Zum Schluss gibt es noch ein prominentes Beispiel für die Macht einer Theorie ein neues Phänomen vorherzusehen: Die Neutrinos wurden theoretisch vorhergesagt und später mit großem experimentellen Aufwand nachgewiesen.

Zusammenfassung

Zuerst haben wir gesehen, dass theoretische Gesetze nicht beobachtbare Terme enthalten, während Empirische Gesetze Terme für Observablen enthalten. Die Entscheidung, ab wann eine Größe nicht mehr als Observable gilt, ist allerdings arbiträr. Um eine Verbindung zwischen den Theoretischen und den Empirischen Gesetzen herzustellen, benötigen wir Korrespondenzregeln.

Theoretische Gesetze erklären Empirische Gesetze und führen zu neuen Empirischen Gesetzen. Die Empirischen Gesetze können experimentell überprüft werden und liefern eine indirekte Überprüfung der Theoretischen Gesetze. Eine wissenschaftliche Theorie muss auf jeden Fall einer Überprüfung unterzogen werden.

Eine große Theorie ist gekennzeichnet durch die Vorhersage vieler verschiedener Gesetze und ihre vereinheitlichende Kraft. Schließlich ist das Ziel eine allumfassende Theorie.

Quelle:

Rudolf Carnap, An Introduction to the Philosophy of Sciences, New York, 1966, Dover Publications, Inc.