

## **Josef Honerkamp, Fakultät für Physik, Universität Freiburg**

### **Über den Fortschritt in den Naturwissenschaften**

#### **Die neue Wissenschaft von Galileo Galilei**

Über den Fortschritt wird viel rasoniert und viel philosophiert, er wird beschworen, gepriesen und verteufelt. Als Grundbegriff in der Geschichtsphilosophie bedeutet er das in ständig kürzeren Abständen erfolgende Anwachsen des theoretischen Wissens und das Anwachsen der technischen Nutzung dieses Wissens. In der Aufklärung erwartete man mit der Steigerung des naturwissenschaftlichen Wissens noch die Humanisierung der Gesellschaft, eine Weiterentwicklung der Gattung Mensch und ihrer politisch moralischen Fähigkeiten. Fortschritt wurde nach Kant als "die Vollziehung eines verborgenen Plans der Natur" aufgefasst.

Heute ist man illusionsloser. Die Industriegesellschaft schaut auf die materiellen Resultate eines expandierenden technischen Wissens und auf die damit erreichte Steigerung des Lebensstandards. Aber auch die Kehrseiten eines solchen Fortschritts werden bewusst.

Ich möchte mich heute nicht auf die Hoffnungen bezüglich eines Fortschritts im Politisch-Moralischen einlassen -- das kann ich gar nicht -- noch möchte ich die ungeheure Expansion des technischen Könnens illustrieren -- das finde ich nicht so interessant, so sehr ich auch dankbar bin für die damit einhergehende Steigerung der Lebensmöglichkeiten -- ich möchte vielmehr über die treibende Kraft für diese immer schneller sich vollziehenden Steigerungen berichten -- nicht die Früchte anschauen und bestaunen, sondern den Mechanismus des Wachstums erörtern.

Will man verstehen, warum Naturwissenschaft und Technik eine so prägende Kraft für die Kultur der gesamten Menschheit werden konnte, so müssen wir ihre Methoden studieren, müssen gewissermaßen die Geburtsstunden dieser spezifischen Denkart nacherleben. Natürlich waren diese Methoden nicht plötzlich da, voll entwickelt. Entwicklungen verlaufen in vielen kleinen und wenigen großen Schritten und die Naturwissenschaft beginnt mit einem Sprung, den Galileo Galilei vollzieht.

*„Daher erlaube ich mir, das eine neue Wissenschaft zu nennen, die von ihren Grundlagen angefangen von mir entdeckt worden ist,“* das schreibt Galileo Galilei am 7. Mai 1610 an Vinta, dem toskanischen Staatssekretär. Diese Einschätzung seiner eigenen Leistung ist nicht Anmaßung, sondern klare Einsicht. In der Tat --- darin sind sich heute alle Wissenschaftshistoriker und -theoretiker einig -- Galilei steht am Anfang der exakten Naturwissenschaft, jener Wissenschaft, die ohne Unterschied des kulturellen Hintergrundes von allen Völkern übernommen worden ist und heute weltweit weiterentwickelt und ausgenutzt wird.

Galilei steht am Anfang. Zusammen mit Kopernikus, der gut zwei Generationen früher lebte, und seinem Zeitgenossen Kepler ist er der Vorläufer, der Wegbereiter von Issac Newton, der die Physik mit seinem 1687 veröffentlichten Werk "Principia" zu ihrem ersten Höhepunkt brachte. Die Newtonsche Mechanik wurde zum Inbegriff der Wissenschaft überhaupt. Der holländische Wissenschaftstheoretiker Dijksterhuis schreibt 1950 in der Einleitung zu seinem Buch "Die Mechanisierung des Weltbildes":

*Unter den vielen Veränderungen, die das wissenschaftliche Denken über die Natur im Laufe der Jahrhunderte erfahren hat, lässt sich kaum eine aufweisen, deren Wirkung in die Tiefe so stark und*

*in die Breite so mannigfaltig war wie die Entstehung und Entwicklung der Betrachtungsweise, die man die mechanische, die mechanistische oder die mechanizistische zu nennen pflegt.*

*Erstens hat sie zu den Untersuchungs- und Behandlungsmethoden geführt, welche die Physik - und darunter verstehen wir in Abweichung vom üblichen Sprachgebrauch die gesamte Wissenschaft der leblosen Natur, also außer Physik im engeren Sinne auch Chemie und Astronomie - später zu jener Hochblüte gebracht hat, deren Früchte wir heute ernten; es sind dies das Experiment als Erkenntnisquelle, die mathematische Formulierung als Beschreibungsmittel, die mathematische Deduktion als Wegweiser zu neuen, durch Experimente kontrollierbaren Erscheinungen. Zweitens waren es ihre Erfolge, welche die Entwicklung der Technik ermöglichten und welche dadurch die weitgehende Industrialisierung auslösten, die längst zu einer Existenzgrundlage der Menschheit geworden ist. Und schließlich fanden ihre Ideen Eingang in das philosophische Denken über den Menschen und seinen Platz in der Welt und in eine Reihe von Fachwissenschaften, die anfänglich außerhalb jeden Kontaktes mit dem Studium der Natur zu stehen schienen. Durch das alles ist die Mechanisierung der Physik viel mehr als eine interne methodische Angelegenheit der Naturwissenschaft geworden; sie geht die Kulturgeschichte als Ganzes an und verdient daher auch außerhalb des Kreises der Naturforscher Aufmerksamkeit.*

Was war das revolutionierende an Galileis Gedanken? Was ist es, was die sich daraus entwickelnde Naturwissenschaft so unerhört mächtig machte, dass sie heute alle Bereiche unseres Denkens und Handelns durchdringt? Wir haben den Eindruck, dass die Menschheit seit den Tagen Galileis auf einer neuen Stufe steht, dass ein Verfahren gefunden worden ist, mit dem man systematisch und, vor allem, aufeinander aufbauend immer mehr Kenntnis über die Welt erhält und immer stärker über sie verfügen kann.

Ich will versuchen, Ihnen diese Gedanken nahe zu bringen, auch, was daraus heute geworden ist und einige Spekulationen über den Fortgang dieser faszinierenden Entwicklung anstellen.

Galilei ist dem Normalbürger bekannt durch sein Schicksal, das er in Auseinandersetzung mit der Inquisition der katholischen Kirche erlitt. Er musste der Meinung abschwören, dass die Erde nicht der Mittelpunkt der Welt ist, sich verpflichten, in Zukunft weder in Wort noch in Schrift etwas zu verkünden, das ihn in Verdacht bringen könnte, so etwas zu glauben, und sollte er Ketzer kennen, die dieser Meinung huldigen, so hatte er diese dem Inquisitor oder der kirchlichen Behörde seines Aufenthaltsortes anzugeben. Für den Rest seines Lebens, von 1633 bis 1642, stand er unter Hausarrest in Arcetri unweit von Florenz.

Womit hat Galilei sich wissenschaftlich auseinandergesetzt und wie hat er es getan? Die Forschungsthemen sind schnell aufgezählt, es sind dies: die Planeten und Sterne, vor allem ihre Bewegungen, die festen Körper und ihre Schwimmfähigkeit sowie die Bewegung fester Körper. Man sieht, letztlich ist es immer wieder die Bewegung, die er untersucht. *Nichts ist älter in der Natur als Bewegung, und über dieselbe gibt es weder wenig noch geringe Schriften der Philosophen. Dennoch habe ich deren Eigentümlichkeiten in großer Menge und darunter sehr wissenswerte in Erfahrung gebracht*, schreibt Galilei in seinem bedeutendsten Werk "Discorsi", das er im Hausarrest verfasst hat. Das waren damals Themen, die viel diskutiert wurden, auch im Kreis von Gebildeten an den Höfen. Das Entscheidende aber bei Galilei war, wie er es tat: statt bei der Diskussion solcher Fragen auf Autoritäten wie Aristoteles zu hören, schaute er hin, experimentierte als erster systematisch. Er entwickelte als erster die Methode exakter Forschung, bei der Begriffsbildung, Hypothesenbildung und experimentelle Überprüfung die wesentlichen Prozesse sind. Die Bedeutung dieser Methode kann gar nicht überschätzt werden, und ich will versuchen, einen Hauch von dieser Bedeutung zu übermitteln.

## Die Struktur einer Theorie -- oder: Euklid und die Mathematik

Galileo Galilei wurde 1564 in Pisa geboren, als Sohn des Komponisten und Musiktheoretikers Vincenzo Galilei. Die Galileis gehörten zu dem Patrizieradel von Florenz: Vincenzo Galilei lebte nur vorübergehend in Pisa und als Galileo zehn Jahre alt war, kehrte die Familie nach Florenz zurück. Galileo wurde in einem Benediktinerkloster auf das Studium vorbereitet, sein Vater hatte für ihn eine Arztkarriere auserkoren.

Im Jahre 1581 wird Galilei in Pisa Student. Zunächst musste er die Artistenfakultät durchlaufen, um auf das eigentliche Studium der Medizin vorbereitet zu werden. Hier wurde auch die Naturphilosophie gelehrt, die in der Interpretation antiker Autoritäten, vor allem der Schriften Aristoteles, bestand. Die Beschreibung der Welt sowie der Bewegung der materiellen Körper in der Welt gehörte damals noch zur Philosophie und Aristoteles galt als uneingeschränkte Autorität: Zu jeder Erfahrung hatte er eine plausible Erklärung geliefert. Galilei lernte alles dieses wohl aus dem 10bändigen Werk seines Lehrers Francesco Buonamici.

Die Erde ruht danach im Mittelpunkt der Welt; irdische Materie strebt dem Weltmittelpunkt als ihrem "natürlichen Ort" zu. Das erklärt die Kugelgestalt der Erde und die Fallbewegung, für die nach Aristoteles auch gilt, dass schwere Körper schneller fallen als leichte.

Die Erde ist der Bereich des Entstehens und Vergehens, streng getrennt von ihr sind die himmlischen Sphären. Denn Gestirne, vom Mond an aufwärts, waren von ganz anderer Materie, ätherisch, ewig, unzerstörbar. Planeten vollführen verschlungene Wege auf ihren Kristallsphären, die ganze Welt wird schließlich von der Sphäre der Fixsterne abgeschlossen, die von dem ersten Bewegter, Gott, oder den Engeln in Bewegung gehalten wird.

Galilei hat dieses alles vermutlich treu studiert und in sich aufgenommen, das alles muss auch keinen großen Eindruck auf ihn gemacht haben. Erlebnisse, die für sein späteres wissenschaftliches Arbeiten prägend waren, kamen nicht von diesem etablierten konservativen Lehrbetrieb, sondern von außerhalb. Galilei lernt 1583 von Ostilio Ricci, einem Ingenieur und Geometriker, der am Hofe die Pagen in Geometrie zu unterweisen hatte, die klassische Geometrie des Euklid<sup>1</sup> kennen. Er wird davon so beeindruckt, dass er bald nach einigen Kämpfen mit seinem Vater den Plan eines Medizinstudiums zugunsten der Mathematik aufgibt.

Galilei war nicht der einzige, auf den Euklid so einen bedeutenden Einfluss hatte. Euklids wichtigstes Werk, die "Elemente"<sup>2</sup>, von denen leider nur 13 Bücher erhalten sind, ist nach der Bibel das Werk, das in der westlichen Welt am meisten übersetzt, veröffentlicht und studiert wurde. Einstein tröstete sich mit seinen Schriften über öde Schuljahre hinweg. Bertrand Russell schreibt in seiner Autobiographie "Mein Leben": "Im Alter von 11 Jahren begann ich Euklid zu lesen. Dies war eines der größten Ereignisse meines Lebens, atemberaubend wie die erste Liebe."

Der Reiz der Geometrie von Euklid beruhte nicht auf dem ästhetischen Genuss, der einem durch die Betrachtung der geometrischen Figuren und Körper bereitet werden konnte. Was wichtiger war: Von Euklid kann man lernen, wie die Struktur einer Theorie sein sollte, ja wie überhaupt Ordnung

---

<sup>1</sup> Euklid: griech. Mathematiker, lebte um 300 v. Chr., erhielt seine Ausbildung vermutlich in Athen in der platonischen Akademie, lehrte und gründete eine Schule in Alexandria.

<sup>2</sup> Die "Elemente" verarbeiten auch viele frühere Werke, die damit überholt waren und in Vergessenheit gerieten, so das Werk von Hypocrites von Cos (15. Jh. v. Chr.) und das von Theudius, dessen Werk höchst wahrscheinlich von Aristoteles in der Akademie benutzt wurde.

und Zusammenhang in einem Wissensgebiet formuliert werden kann: er entwickelte das axiomatische deduktive Verfahren und er benutzte die Mathematik für seine Deduktionen.

Eine Theorie ist eine Menge von Aussagen mit einer hierarchischen Struktur: Es gibt eine Untermenge von Axiomen (Basisaussagen, Grundannahmen, Grundregeln, Grundgleichungen). Alle anderen Aussagen sind daraus ableitbar, und zwar mit logischen oder mathematischen Schlüssen. Die Menge der Axiome sollte in sich widerspruchsfrei sein. Man sollte aus einigen Axiomen nicht eine Aussage ableiten können, die einem anderen Axiom widerspricht.

Aus abgeleiteten Aussagen können weitere Aussagen abgeleitet werden. Es entsteht so eine Hierarchie von Aussagen. Abgeleitete Aussagen können somit durch Aussagen, die in dieser Hierarchie den Axiomen näher stehen, oder gar durch die Axiome selbst erklärt werden.

Beispiel: Aus den Maxwellschen Gesetzen für elektromagnetische Felder folgt, dass bei der Streuung von Licht an Atomen, Molekülen das blaue Licht stärker gestreut wird als z.B. das rote Licht. Daraus folgt wiederum, dass der Himmel uns blau erscheint und dass es zum Phänomen des Abendrots kommt. Das Phänomen Abendrot wird also durch die Streueigenschaften des Lichtes erklärt, diese wiederum durch die Maxwellschen Gleichungen.

Zuweilen stößt man auf Phänomene, von denen man mit großer Sicherheit weiß, dass sie sich durch bekannte Grundannahmen erklären lassen. Die Durchführung der Ableitung wäre aber außerordentlich kompliziert, und zwar so kompliziert, dass sie noch nicht durchgeführt ist oder dass sich sogar der Aufwand nicht zu lohnen scheint. Die Energieniveaus eines Atoms mit höherer Ordnungszahl oder eines Moleküls lassen sich im Prinzip alle aus der entsprechenden Schrödinger - Gleichung ableiten. Nur ist das äußerst aufwendig und das stellt somit noch einen Zweig der Forschung dar.

Hier können wir, wenn auch noch relativ vordergründig, eine Möglichkeit für einen Fortschritt erkennen. Fortschritt ist zunächst einfach eine Verlängerung der Liste der Aussagen, die sich im Rahmen einer etablierten Theorie erklären lassen. Das Wissen vermehrt sich, alle Aussagen über das neue Wissen lassen sich aber im Rahmen der etablierten Wissenschaften erklären.

Eine Theorie einer solchen Struktur ist also zum ersten Male mit der Geometrie von Euklid aufgestellt worden. Die Geometrie gilt seitdem als Muster einer jeden exakten Wissenschaft, und das Verfahren, wie in der Geometrie ("more geometrico") Aussagen aus Axiomen ableiten zu können, ist das Ideal einer jeden anderen Wissenschaft. Spinoza hat selbst eine Ethik "more geometrico" angestrebt. Kant hielt den kategorischen Imperativ "Handle so, dass die Maxime deines Willens jederzeit als Prinzip einer allgemeinen Gesetzgebung gelten könne" für das Grundaxiom einer jeden Ethik. Historisch wird eine Wissenschaft natürlich nie so entstehen, dass man zuerst die Axiome (Grundaussagen) findet und dann wirklich alle anderen Aussagen ableitet. Die Aussagen, auf die man alle anderen reduzieren kann, werden sich erst im Verlauf der Entwicklung herauschälen. Eine Wissenschaft braucht eine gewisse Reife, um dem Ideal 'more geometrico' nahe zu kommen.

Denkbar ist auch, dass man die Axiome durch Aussagen von Autoritäten ersetzt (Aristoteles, Bibel, Koran). Das Problem der Vermeidung von Widersprüchen ist dann besonders groß. Abelard (1079-1142) zeigte in seinem "Sic et Non" viele Widersprüche in dem Glauben auf, der von den Kirchenvätern als Offenbarung verkündet wurde. Insbesondere wird dann auch das Problem der Vollständigkeit interessant: ein System, auf Autoritätsaussagen aufgebaut, strebt erfahrungsgemäß danach, jedes auftretende Problem durch Rückbeziehung auf die Autoritätsaussagen lösen zu wollen. Man fürchtet sonst einen Autoritätsverlust.

Die Ableitung von Aussagen aus den Axiomen (oder aus schon abgeleiteten Aussagen) oder aber die Rückführung von Aussagen auf die Axiome (oder auf Aussagen, die aus den Axiomen folgen) ist die Arbeit eines normalen Theoretikers.

## **Der Erklärungswert einer Theorie -- oder: Die Vereinheitlichung der Physik**

Je kleiner die Menge der Axiome im Vergleich zu der Menge der abgeleiteten Aussagen ist, um so größer ist der Erklärungswert der Theorie. (Dabei ist unterstellt, dass man nur nichttriviale Aussagen unter den ableitbaren mitzählt, also keine Tautologien oder, auf der Basis der Axiome, unmittelbar evidente Aussagen berücksichtigt.) Aus abgeleiteten Aussagen können weitere Aussagen abgeleitet werden. Es entsteht so eine Hierarchie von Aussagen. Abgeleitete Aussagen können somit durch Aussagen, die zu dieser Hierarchie den Axiomen näher stehen, oder gar durch die Axiome selbst erklärt werden.

Alle elektromagnetischen Phänomene können z.B. letzten Endes auf die Maxwellschen Gleichungen zurückgeführt werden. Die Maxwellsche Theorie besitzt also einen sehr hohen Erklärungswert.

Man begegnet im Alltag öfters dem Versuch der Erklärung eines Phänomens durch eine Annahme, aus der sonst keine weiteren gültigen Aussagen folgen. Das ist noch keine Theorie, Die Aussage, die das Phänomen betrifft, wird ja nur ersetzt durch die Annahme. Der Erklärungswert dieser Möchte-Gern-Theorie ist Null.

Die überzeugendste Erhöhung des Erklärungswertes ist die Verschmelzung zweier Theorien zu einer einzigen neuen Theorie. Man findet dabei ein neues, noch ursprünglicheres Axiomensystem, aus der man die Axiomensysteme der beiden alten Theorien ableiten kann. In der Tat hat sich dieses in der Geschichte der Physik einige Male ereignet und solch eine Vereinheitlichung von Theorien ist zum Leitgedanken geworden.

Die erste vereinheitlichte Theorie war die Newtonsche Theorie der Bewegung (*Philosophiae naturalis principia mathematica*, 1687). Für Aristoteles waren die Bewegungen der Sonne und der Planeten am Himmel noch etwas ganz anderes als die Bewegung eines fallenden Steins. Bewegungen der Sonne und der Planeten gehorchten einer einzigen Ordnung, diese Himmelskörper bewegen sich auf vollkommenen Bahnen und sind deshalb selbst göttliche Wesen, von höherer Ordnung als die Menschen. Bei irdischen Bewegungen unterscheidet Aristoteles nun drei verschiedene Kategorien:

1. natürliche Bewegungen oder die Wiederherstellung einer gestörten Ordnung: Schwere Körper fallen nach unten, leichte bewegen sich nach oben.
2. Bewegungen der Lebewesen;
3. erzwungene Bewegungen; solchen liegt eine wirkende Ursache, eine Kraft zugrunde. Die Bewegung ist nach Aristoteles ein Prozess, noch kein Zustand.

Für alle diese Bewegungen gelten nach Aristoteles verschiedene Gesetze, verschiedene Theorien. Die Newtonsche Mechanik erklärt alle diese Bewegungen durch eine Theorie, sie kann somit als eine vereinheitlichte Theorie der Bewegungen materieller Körper angesehen werden.

Den ersten Schritt für eine solche Theorie der Bewegung tat Galilei, der nicht nur das kopernikanische Planetensystem propagierte. Er studierte vornehmlich immer wieder die Bewegung materieller Objekte auch auf der Erde und erkannte in seinen Experimenten zum freien Fall, dass es nicht die Geschwindigkeit ist, die erklärt werden muss, sondern die Beschleunigung.

Das war ein wesentlicher Schritt, der den Weg frei machte für die Einsicht, dass die Bewegung eben ein Zustand ist, der nur durch äußere Kräfte verändert werden kann. Wie dieser Zustand durch Kräfte verändert wird, das formulierte dann Newton und er erkannte die Universalität dieses Ansatzes.

Die Newtonsche Mechanik steht heute noch am Anfang eines jeden Studiums der Physik; ihre Begriffe sind Raum, Zeit, Masse, Geschwindigkeit, Beschleunigung, Impuls usw. und sie formuliert Gesetze für Bewegungen materieller Körper, ob sich diese nun im Weltraum oder auf der Erde befinden. Auch hier zeigt sich schon die Kraft der Wissenschaft, unabhängig scheinende Phänomene auf eine gleiche Ursache zurückführen zu können.

Die Newtonsche Mechanik war fast 200 Jahre lang das Vorbild, ja die Naturwissenschaft schlechthin. Man glaubte alles, die gesamten Naturphänomene nach diesem Vorbild auf die Dauer erklären zu können.

Der Einfluss dieses ersten großen Erfolges auf die Geistesgeschichte lässt sich auch aus dem berühmten Satz von Laplace ablesen, der auf die Frage Napoleons, warum Laplace in seiner Himmelsmechanik (*Mécanique céleste*, 5 Bände, 1799-1825) auf vielen hundert Seiten den Himmel beschrieben habe, jedoch Gott nirgends vorkomme, geantwortet haben soll: "Majestät, ich bedurfte dieser Hypothese nicht".

Es ließe sich noch viel sagen dazu, welchen bedeutenden Wandel die Weltanschauung durch die Newtonsche Mechanik erfahren hat. Die Planeten und die Sterne wurden ihrer Göttlichkeit beraubt, die Erde wurde ein unbedeutender Himmelskörper unter vielen anderen, usw.

Wir wollen uns hier aber nur auf den Aspekt der Vereinheitlichung konzentrieren, denn dieser zeigt deutlich eine der ganz wichtigen Eigenschaften von Wissenschaft überhaupt. Verschiedene Phänomene, die zunächst nichts miteinander zu tun zu haben scheinen, werden auf eine gemeinsame Wurzel zurückgeführt. Statt mehrerer Theorien, die die verschiedenen Phänomene erklären sollten, gibt es nur noch eine Theorie, aus der alle diese Phänomene zwanglos ableitbar sind.

Diese Vereinheitlichung von Theorien war fortan der Leitgedanke der wissenschaftlichen Bemühungen in der Physik, und immer stellte eine erfolgreiche Vereinheitlichung einen bedeutenden, epochemachenden Fortschritt dar.

Die nächste Vereinheitlichung erfolgte durch Maxwell. Er führte die Theorie der Erklärung der elektrischen Phänomene mit der Theorie des Magnetismus zusammen und formulierte in seinen berühmten Gleichungen die Theorie des Elektromagnetismus. Unsere Alltagswelt ist voll von Geräten, in denen man sich diese Gesetze zunutze macht.

Nachdem Einstein seine Allgemeine Relativitätstheorie formuliert hatte, versuchte er diese in den folgenden Jahren mit der Theorie des Elektromagnetismus zu vereinheitlichen. Viele haben das auch nach ihm versucht, wie er bisher ohne Erfolg.

Parallel dazu entstanden in diesem Jahrhundert die Quantentheorien, die den Aufbau der Materie beschreiben und die fundamentalen Wechselwirkungen der kleinsten Bausteine der Welt. Zwei große Theorien erklären dabei verschiedene Phänomenbereiche. Die Theorie der schwachen Wechselwirkung beschreibt die radioaktiven Zerfälle wie den Zerfall des Neutrons, die Theorie der starken Wechselwirkung beschreibt die Eigenschaften und den Zusammenhalt der Atomkerne.

In den sechziger Jahren sprach man so von vier fundamentalen Wechselwirkungen: der Gravitationstheorie, der Theorie der elektromagnetischen, der schwachen sowie der der starken Wechselwirkung. Das Ziel der Vereinheitlichung hatten die Physiker nicht aus den Augen verloren und der nach Maxwell nächste große Erfolg auf dieses Ziel hin gelang Ende der 60er Jahre. Glashow, Salam und Weinberg formulierten eine Theorie der elektromagnetischen und schwachen Wechselwirkung, die bis heute alle experimentellen Prüfungen bestehen konnte und damit anderen, konkurrierenden Theorien überlegen war. Das war ein entscheidender Schritt und eine deutliche Ermutigung nach dem Misserfolg von Einstein. Es schien so, als ob man es eher verstehen konnte, die Quantentheorien und die Theorie des Elektromagnetismus unter ein gemeinsames Dach zu bringen, als ob die mikrophysikalischen Phänomene sich eher durch eine vereinheitlichte Theorie beschreiben lassen konnten.

So arbeitete man bald heftig an der "großen Vereinheitlichung", der Vereinheitlichung der elektromagnetischen, der schwachen und der starken Wechselwirkung und in der Tat kennt man heute eine solche Theorie. Die heutigen Experimente an den großen Beschleunigern wie CERN oder DESY prüfen diese vereinheitlichten Theorien.

Die Theoretiker sind aber schon in Gedanken einen Schritt weiter. Nun soll auch noch die letzte Stufe erreicht werden, eine "Theorie von Allem" (Theory of Anything) soll die Gravitation und die drei anderen Wechselwirkungen erklären und beschreiben. Hier gibt es allerdings noch viele Ansätze, viele konkurrierende Theorien und noch keine Experimente, die diese Theorien prüfen könnten. Das Programm ist aber vorgeschrieben und es herrscht wenig Zweifel, dass es nur eine Frage der Zeit ist, wann dieses Ziel erreicht ist.

Wäre damit die Physik am Ende? Würde das bedeuten, dass physikalische Forschung dann nur noch hieße, Folgerungen aus dieser Theorie abzuleiten, die wiederum geprüft werden könnten, um so den Bewährungsgrad der Theorie zu erhöhen. Wäre es vorbei mit der Notwendigkeit, große kühne Theorien zu entwerfen, würden sich so die kreativsten und brilliantesten Geister gar nicht erst der Physik zuwenden? Zwei, sehr unterschiedliche Argumente warnen einen, diesen Schluss zu ziehen.

Das erste Argument beruht auf historischer Erfahrung. Bekannt sind mehrere Fälle, in denen berühmte Physiker jungen Studenten geraten haben, nicht Physik zu studieren. Es sei schon alles bekannt, diese Wissenschaft sei am Ende. Die jungen Studenten befolgten den Rat nicht: und wurden große Physiker, entdeckten ganz neue Phänomenbereiche. Nun, die Geschichte wiederholt sich vielleicht zweimal, aber nicht dreimal, und es sind wirklich heutzutage keine neuen Phänomenbereiche zu erkennen.

Weniger spekulativ ist das zweite Argument. Physik hat man bisher gleichgesetzt -- und auch wir haben das hier stillschweigend getan -- mit der Erforschung der fundamentalen Wechselwirkungen. Phänomene im Mikrokosmos wie im kosmologischen Maßstab konnten auf diese Weise erklärt und verstanden werden. Die Evolution hat uns aber auch sehr komplexe Systeme beschert und die Erforschung der komplexen Systeme steht erst am Anfang.

## **Die Prüfbarkeit einer Theorie -- oder: Über die "Wahrheit" einer Theorie**

*Sonne, stehe still zu Gibeon, und Mond im Tale Avalon, da stand die Sonne still und der Mond blieb stehen, bis das Volk Rache genommen hatte an seinen Feinden (Josua, Kap.10, Verse 12,13).* Das war die Stelle in der Bibel, aus der man herauslas, dass Sonne und Mond um die Erde kreisen müssen, so wie es auch aufgrund der unmittelbaren Anschauung folgt und es nach dem

ptolemäischem Weltbild galt. Galilei aber beobachtete immer mehr Erscheinungen am Himmel, die ihn zu einem entschiedenen Verfechter des kopernikanischen Weltbildes machten. Der offene Konflikt mit der Kirche entbrannte am 4. Adventssonntag 1614. Ein Dominikanermönch aus dem Kloster von San Marco, Tommaso Caccini, hielt in der Basilika Santa Maria Novella in Florenz eine flammende Predigt gegen Galilei, die kopernikanische Lehre widerspreche der Religion und die, die solcher Lehre anhängen, sollten als Ketzer aus allen christlich gesinnten Staaten vertrieben werden. Die Nachricht von dieser Attacke verbreitete sich schnell, man wurde auch in Rom aufmerksam. Die Mönche zeigten schließlich Galilei mit einem Brief vom 7. Februar 1615 offiziell bei einem der Generalinquisitoren der Kongregation des heiligen Offiziums an. Vorgeschichte und Fortgang dieses Konflikts wird sorgfältig in der Biographie von Albrecht Fölsing "Galileo Galilei: Prozess ohne Ende" (Serie Piper, SP 537) geschildert. Hier können nur einige Aspekte behandelt werden, die im Hinblick auf die naturwissenschaftliche Methode interessant sind.

Die Frage, um die es hier ging, war: Wer oder was entscheidet über die Wahrheit einer Aussage?

Die Beweisregeln der Scholastik waren das einzige wissenschaftliche methodische Instrument, was zu Zeiten Galileis akzeptiert wurde. Die Grundannahmen, aus denen die Schlüsse gezogen werden konnten, wurden durch die Autoritäten bestimmt: Aristoteles und die Bibel. Thomas von Aquin hatte ein System von Basisaussagen, die "Articulae fidei" formuliert und damit eine Synthese zwischen Aristotelismus und christlichem Glauben gefunden. Die Grundwahrheiten waren danach also schon für alle Zeiten bekannt. Jede neue Einsicht musste, wollte sie wahr sein, eigentlich schon in diesen Grundwahrheiten enthalten sein und aus ihnen zwingend ableitbar sein.

Nun trat Galilei auf und wollte eine andere, unabhängige Quelle der Wahrheit proklamieren, eben eine neue Wissenschaft, wie er es selbst nannte: die experimentell - induktive<sup>3</sup> Methode. Er hatte erfahren, dass man das Verhalten der Natur nicht ergründet, indem man in Büchern von Aristoteles studiert, sondern in dem man im Buche der Natur selbst liest. Und dieses Lesen im Buche der Natur geschieht mit Hilfe der Mathematik. Bei seinen Experimenten mit der schiefen Ebene hatte er so die Fallgesetze erschlossen, und das Experiment hatte ihm zu zweierlei gedient: Zur Formulierung einer Hypothese über das Verhältnis der zurückgelegten Wege zu den beobachteten Zeiten und der Bestätigung der Hypothese in immer und immer wiederholten Versuchen.

Das Experiment hilft so bei der Induktion, bei der Aufstellung einer Regel oder Hypothese, und es dient zur Prüfung der Regel. Diese Prüfung ist allerdings kein Beweis im deduktiven Sinne, wie ihn die Scholastiker nur kannten. Sie führt aber entweder zu einer Bewährung oder zu einer Ablehnung der Hypothese.

Die katholische Kirche, auch die Aristoteliker waren über diese Konkurrenz alarmiert. Kardinal Bellarmin, der auch der obersten Inquisitionsbehörde angehörte, legte Galilei nahe, das kopernikanische Planetensystem solange nur als Hypothese zu betrachten, bis zwingende Beweise - - eben im scholastischen, deduktiven Sinne -- vorlägen. Als eine vorläufige Hypothese war das System ja auch im Vorwort des Werkes von Kopernikus beschrieben worden, allerdings nicht von Kopernikus selbst.

Galilei entgegnete Bellarmin, er habe "tausend Beweise", die Phasen der Venus, die Monde des Jupiters, usw. Aber das waren eben keine zwingenden Beweise, wie Bellarmin sie forderte. Die Kirche erkannte nicht die neue Methode, sie war fixiert darauf, ihre Autorität zu verteidigen. Wir wollen diesen Aspekt nicht weiter vertiefen, sondern eher nachzeichnen, wie sich die experimentell-induktive Methode im Verlaufe der Entwicklung der großen Theorien der Naturwissenschaften darstellte.

---

<sup>3</sup> Ein induktiver Schluss ist einer vom speziellen Fall auf den allgemeinen



Hier kommt die dritte wichtige Eigenschaft einer Theorie in unser Blickfeld:

Eine Theorie muss überhaupt nachprüfbar sein, wenn nicht direkt in ihren Axiomen, dann zumindest über die Aussagen, die aus diesen folgen.

Es werden oft -- mit großer Kraft und kühnem Mut -- Theorien formuliert, die zu keinen prüfbar Aussagen führen. Solche Theorien sind somit unangreifbar, nicht widerlegbar durch Vergleich mit der Wirklichkeit, und somit als wissenschaftliche Theorien wertlos. Das Fehlen der Prüfbarkeit deutet meistens auf einen Mangel der Axiome hin. Diese sind dann meistens sehr unscharf formuliert, so dass aus ihnen auch keine scharfen Aussagen abgeleitet werden können. Zur Aufstellung einer prüfbar Theorie bedarf es also mindestens geeigneter, genügend präzise definierter Begriffe. Nicht umsonst ist der Weg zur Aufstellung einer Theorie begleitet vom Ringen um die geeigneten Begriffe.

Gute Begriffe sind mächtige Denkwerkzeuge und für eine klare Gedankenführung unerlässlich. Nur mit solchen lassen sich auch Axiome und Ableitungen klar auseinander halten. Schlechte Begriffsbildungen lassen eine Erkenntnis über die Grundannahmen einer Theorie nicht zu.

Die experimentell-induktive Methode, von Galilei eingeführt, hat in der Folgezeit zu den großen Erfolgen der Naturwissenschaft geführt, wie wir sie kennen. Das war für viele Wissenschaftler, insbesondere Logiker und Philosophen äußerst befremdlich, denn diese induktive Methode war eigentlich unter strengen logischen Gesichtspunkten nicht zu rechtfertigen. Ein induktiver Schluss ist logisch nicht einwandfrei, nicht zwingend. Wenn etwas häufig geschieht, muss es nicht immer geschehen. Ein Schluss aus einigen wenigen experimentellen Ergebnissen kann vielleicht diese Experimente erklären, aber ein nächstes schon nicht mehr. Es könnte auch ganz anders sein.

Man kann das Induktionsproblem verschärfen, um es auf den Punkt zu bringen. Popper (geb. 1902) formuliert das traditionelle Induktionsproblem in seinem Buch "Die Logik der Forschung" folgendermaßen:

Was ist die Rechtfertigung für den Glauben, die Zukunft werde der Vergangenheit (weitgehend) gleichen? Warum glaube ich z.B., dass morgen die Sonne wieder aufgeht, und zwar so fest, dass ich mich darauf verlasse.

Natürlich weiß ich, dass im Prinzip die Sonne explodieren kann oder die Erde in Stücke bersten kann. Der Alltagsverstand wird das aber als höchst unwahrscheinlich halten und fest davon ausgehen, dass am nächsten Tag die Sonne wieder aufgeht. Er wird sagen: "Das war schon immer so und es wird auch weiterhin so sein". Wir empfinden das auch als vernünftig, aber die Frage, wie man diesen induktiven Schluss rechtfertigt, hat viele Logiker und Philosophen beschäftigt.

Einer der ersten, die sich intensiv mit diesem Problem beschäftigt haben, war der schottische Philosoph David Hume (*An Enquiry Concerning Human Understanding*, 1758). Er sieht hier grundsätzlich keine Möglichkeit einer logischen Schlussfolgerung und führt die Tatsache, dass alle Menschen diesen Induktionsschluss ausführen, auf Gewohnheit zurück. Damit erscheint unser Verhalten als unlogisch, die Wiederholung in der Vergangenheit hat nicht die geringste logische Kraft, beherrscht aber unser Verhalten und unser Verständnis. Das ist keine befriedigende Rechtfertigung.

Popper formuliert letzten Endes so: Ich habe eine Theorie, nach der am jeweils nächsten Tag die Sonne morgens aufgeht. Diese Theorie ist geprüft und hat bisher alle Prüfungen bestanden. Also ist

es gerechtfertigt, diese Theorie so lange zu akzeptieren, bis sie irgendeine Probe nicht besteht. Hier wird nicht vom logischen Schluss geredet, nicht von überwältigender Wahrscheinlichkeit (denn welchen Ansatz sollte man für die Wahrscheinlichkeit formulieren), nicht verschwommen von irgendeinem Pragmatismus und unser Verhalten erscheint auch nicht irrational. Es ist vernünftig und sogar im psychologischen Sinne logisch: wir verhalten uns gemäß der sehr bewährten Theorie.

Die experimentell-induktive Methode stellt im strengen Sinne also keinen Beweis dar; keine logische Schlussfolgerung. Sie ist aber das Vehikel, um vernünftige, prüfbare Hypothesen zu formulieren, die sich bei der experimentellen Überprüfung dann auch mit großer Wahrscheinlichkeit bewähren werden. Neben der alten Kunst der Wissenschaftler, streng und einwandfrei zu deduzieren, gibt es nun seit Galilei ein zweite Kunst, die noch sehr viel mehr eine Kunst ist und viel mehr Intuition und Genie erfordert: das Finden von Hypothesen, das induktive Schließen. Und diese Kunst ist umso besser gelungen, je besser sich die Hypothese prüfen lässt und sich bei allen möglichen experimentellen Prüfungen wirklich bewährt.

Im Sinne von Popper zeigte Galilei mit seinen Beobachtungen, wie gut sich das Kopernikanische Planetensystem bei Überprüfung bewährt, während das ptolemäische System mit den Beobachtungen nicht im Einklang steht. Wie erklärten sich z.B. die Phasen der Venus, wenn die Venus wie die Sonne um die Erde kreisen und selbst leuchten würde?

Popper geht aber noch einen wesentlichen Schritt weiter: Er erkennt, dass wir von der Wahrheit einer Theorie im strengen Sinne nicht reden können. Eine Theorie ist so wahr, wie ihre Grundannahmen, ihre Axiome. Alle abgeleiteten Aussagen haben den gleichen Wahrheitsgehalt. Es gibt aber unendlich viele abgeleitete Aussagen, diese können wir nicht alle prüfen. Unsere "wahren" Theorien sind genau solche, die sich bisher in allen Prüfungen bewährt haben. Aber wir wissen nicht, ob irgendwann die Theorie einer ganz bestimmten Prüfung nicht standhält. Wir werden nie entscheiden können, ob unsere Theorie wirklich wahr ist. Wir können also im Prinzip wahre Theorien kennen, ohne je die Wahrheit über die Wahrheit der Theorie zu kennen.

Der Fortschritt der Wissenschaft ähnelt also der Evolution. Theorien werden geboren und müssen sich bewähren. Irgendwann kann unser Wissen über Phänomene so groß werden, dass alle diese Phänomene nicht mehr im Rahmen der Theorie erklärt werden können. Neue Theorien entstehen, hervorgehend aus der alten durch Mutation, durch kleine, aber vielleicht sehr wichtige Änderungen in den Axiomen. Eine davon erweist sich vielleicht als lebensfähiger, d.h. bewährt sich besser im Angesicht aller Phänomene.

Ein besonders klares Beispiel für diesen Mechanismus stellt die Geschichte der Gravitationstheorie dar.

Die erste große Theorie in der Geschichte der Naturwissenschaft war, wie erwähnt, die Newtonsche Mechanik, die Gravitationstheorie. Sie ist groß zu nennen wegen ihres großen Erklärungswertes; sie ist eine Theorie für Bewegungen auf der Erde und am Himmel und sie löste alle Theorien der Bewegungen von Aristoteles ab.

Im Verlauf von 200 Jahren wurde diese Theorie unzählige Male geprüft und bestätigt, sie strahlte aus in die Technik, die Technische Mechanik entstand. Sie überstand unbeschadet das Entstehen einer neuen großen Theorie, der Elektrodynamik, die alle elektrischen und magnetischen Phänomene erklärte.

Gegen Ende des 19. Jahrhunderts aber geriet die Newtonsche Mechanik in die Krise, und zwar von zwei Seiten. Was dann geschah, ist so exemplarisch, dass man das viel weiter ausführen müsste.

Man stellte fest, es gab Bewegungen, die mit den Berechnungen aufgrund der Newtonschen Mechanik nicht übereinstimmen wollten, so z.B. die Periheldrehung<sup>4</sup> des Merkurs. Auf der anderen Seite würde eine eigentlich nie ganz verstummte Kritik an den Grundlagen der Newtonschen Mechanik unüberhörbar, und zwar an der Annahme eines absoluten Raumes.

Albert Einstein war es, der das Newtonsche Axiom der Existenz eines absolut ruhenden Raumes aufgab, in der speziellen Relativitätstheorie dagegen der Geschwindigkeit, der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum nämlich, einen absoluten Charakter zuerkannte und darauf aufbauend mit der allgemeinen Relativitätstheorie eine Theorie vorstellte, die die Periheldrehung quantitativ richtig beschrieb.

Die Newtonsche Theorie war also in bestimmten Punkten als falsch erkannt worden. Aber sie war nicht völlig zu ersetzen durch die allgemeine Relativitätstheorie so wie damals die Aristotelische Bewegungslehre restlos aufzugeben war zugunsten der Newtonschen Theorie. Die allgemeine Relativitätstheorie ist allgemeiner, beschreibt eine größere Klasse von Phänomenen richtig, eben auch solche, bei denen große Geschwindigkeiten auftreten, solche nämlich, die nicht mehr sehr klein gegenüber der Lichtgeschwindigkeit sind, und auch solche, bei denen sehr starke Gravitationskräfte herrschen. Und wenn diese extremen Bedingungen nicht vorliegen, wenn also Geschwindigkeiten und Gravitationskräfte genügend klein sind, so geht die allgemeine Relativitätstheorie, auch in mathematischer Form, in die Newtonsche Mechanik über.

Man hat also Bedingungen kennen gelernt, unter denen die Newtonsche Mechanik nicht der experimentellen Prüfung standhält. Damit ist die Mechanik zwar als allgemeine Theorie als falsch erkannt, man kann aber einen Gültigkeitsbereich abgrenzen, in dem die Newtonsche Mechanik sich immer bewährt hat und wohl auch immer bewähren wird, wobei wir letzteres nicht beweisen, nur vermuten können.

Das also ist das Geheimnis des Fortschritts in der Wissenschaft. Theorien werden ständig geprüft, auch unter extremen Bedingungen. Irgendwann wird vermutlich jede Theorie die Prüfung nicht bestehen, eine neue umfassendere Theorie wird gefunden. Die alte Theorie wird in der Regel aber nicht wertlos, sie ist in der neuen als Grenzfall enthalten.

## **Wissenschaft und die Wissenschaftler**

Wie sieht nun der Alltag in der Wissenschaft aus? Was lernen wir aus der fast 400-jährigen Wissenschaftsgeschichte?

Natürlich geht nicht jeder Wissenschaftler jeden Morgen an seinen Schreibtisch oder in sein Labor und sagt sich: "Jetzt gehen wir eine Theorie falsifizieren". Im Gegenteil: Er ist darauf aus, Theorien zu bestätigen, Experimente auszuführen, die neue Aspekte der zeitgenössischen Theorie aufdecken. Er möchte experimentelle Sachverhalte mit bestimmten Theorien erklären. Die tägliche Arbeit eines Wissenschaftlers ist also das Rätsellösen: Sachverhalte überprüfen und in den Rahmen einer bekannten Theorie stellen, d.h. zeigen, dass der Sachverhalt zu verstehen ist auf der Basis einer bekannten Theorie oder der daraus abgeleiteten Aussagen.

---

<sup>4</sup> In guter Näherung ist die Bahn des Merkur um die Sonne eine Ellipse, mit der Sonne in einem der Brennpunkte. Der sonnennächste Punkt auf der Ellipse heißt Perihel. Bei genauerer Beobachtung aber wandert dieser Punkt auf einem Kreis um die Sonne, der Merkur durchläuft somit nicht genau eine geschlossene Ellipse, sondern mehr eine Rosettenbahn. Diese Periheldrehung ist aber sehr klein.

Unsere Wissenschaften sind schon so reif, unsere Theorien haben sich schon so gut bewährt, dass immer mehr fruchtbare und interessante Aussagen aus ihnen abgeleitet werden können und dass es immer schwieriger wird, zu den Gültigkeitsgrenzen vorzustoßen.

Man hat also zu unterscheiden zwischen dem persönlichen Streben eines Wissenschaftlers, seinen vielleicht auch manchmal irrationalen Motiven, seinen Intuitionen, sowie der logischen Struktur und dem Fortschritt der Wissenschaft an sich.

Noch eine zweite Unterscheidung ist wichtig, die zwischen der Theorie selbst und den Sachverhalten, die die Theorie erklären soll. Wir haben von der Prüfung der Theorien gesprochen, dem geistigen Band, das die Sachverhalte verknüpft und sie verständlich, erklärbar macht. Etwas anderes ist die Prüfung von Sachverhalten; die ist einfacher und meistens schneller abgeschlossen: die Erde ist in guter Näherung eine Kugel, die Masse des Neutrons ist größer als die des Protons, das wird sich niemals ändern.

Unsere Kenntnisse von den Beziehungen zwischen den Sachverhalten sind es also, die einer Evolution unterliegen, die Sicht der Dinge ist es, die Weltanschauung. Das Entstehen einer neuen Sicht lässt sich an vielen Beispielen der Wissenschaftsgeschichte zeigen, z.B. an der Ablösung der Newtonschen Gravitationstheorie durch die Einsteinsche, wie wir sie im vorangehenden Abschnitt geschildert haben. In ihrem Gültigkeitsbereich ist die Newtonsche Mechanik in der Praxis noch die selbe, bezüglich unseres Weltbildes nimmt sie aber nach Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie eine ganz andere Stellung ein.

Es ist interessant, dass diese Aspekte der Evolution und des nie Abgeschlossenen schon in einigen Versen des griechischen Dichters und Philosophen Xenophanes<sup>5</sup> zu finden ist:

*Nicht von Beginn an enthüllten die Götter den Sterblichen alles;  
aber im Laufe der Zeit fanden sie suchend das Bessere.  
Sichere Wahrheit erkannte kein Mensch und wird keiner erkennen  
über die Götter und alle die Dinge, von denen ich spreche.  
Sollte einer auch einst die vollkommenste Wahrheit verkünden,  
wissen könnt' er das nicht: Es ist alles durchweht von Vermutung.*

So ist es, absolut sicher ist nichts, wobei allerdings der Begriff „Vermutung“ uns heute zu schwach erscheint angesichts der Kohärenz der wissenschaftlichen Theoriengebäude und der Sicherheit, mit der man technologische Prozesse aus den Erkenntnissen der Naturwissenschaften folgern konnte. Aber die Wissenschaft ist das Beste, was wir haben, um der Wahrheit immer näher zu kommen, und sie ist aller Mühen wert.

---

<sup>5</sup> 565 v.Chr. - ca. 470 v.Chr., in der Übersetzung von Karl Popper, siehe "Logik der Forschung", 9.Auflage, 1989, Vorwort zur dritten deutschen Auflage