Zeitschrift: Bulletin / Vereinigung Schweizerischer Hochschuldozenten = Association Suisse des Professeurs d'Université

Herausgeber: Vereinigung Schweizerischer Hochschuldozenten

Band: 32 (2006)

Heft: 4

Artikel: Die Theoretische Physik : ein Überblick

Autor: Fröhlich, Jürg

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-894073

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 15.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Die Theoretische Physik - ein Überblick

Jürg Fröhlich

Was ist Physik?

Die Physik macht sich zum Thema und Ziel, Abläufe, d.h. Folgen von Ereignissen und Korrelationen zwischen verschiedenen Ereignissen, in allen Bereichen der unbelebten Natur, von den kleinsten in der Welt der Elementarteilchen bis zu den grössten des Universums, experimentell zu erforschen, aus den in Experimenten gesammelten Daten mathematische Modelle von Ausschnitten der Natur zu gewinnen, aus solchen Modellen Voraussagen herzuleiten, die dann wieder experimentell getestet werden können, und Modelle für verschiedene Bereiche von Phänomenen zu grösseren Theorien zusammenzufügen. Auch die Anwendungen der gewonnenen Erkenntnisse gehören zum Geschäft der Physik, stehen aber nicht am Anfang. Der Lebensquell der angewandten Forschung ist die Grundlagenforschung.

Der Physiker [1] beschränkt sich nicht darauf, Prozesse in der Natur lediglich zu beobachten; wenn auch die experimentelle Seite der Physik mit der Astronomie ursprünglich so begann. Mit raffiniertesten Tricks und überaus komplexer Technologie entlockt er der Natur ihre Geheimnisse - bisweilen recht gewaltsam. Die meisten Abläufe in der Natur, auch ganz alltägliche wie die turbulente Strömung einer Flüssigkeit, ein Gewitter, oder eine Schlammlawine in den Bergen, sind viel zu kompliziert, als dass man sie mathematisch präzis erfassen und quantitativ beschreiben könnte. Viele Erscheinungen sind aber auch gar nicht interessant und aufschlussreich genug, um im Einzelnen erforscht und modelliert zu werden. Die Kunst in der Physik besteht darin, fundamentale Phänomene und Zusammenhänge isoliert und in ihrer einfachsten Form sichtbar zu machen. So werden sie quantitativ erfass- und modellierbar. In der Ausübung seiner Wissenschaft bedient sich der Physiker unglaublich raffinierter Methoden, um eine Art von "Kunstwelt" zu erschaffen, in der fundamentale Eigenschaften der Materie in Reinkultur in Erscheinung treten.

Ein Experimentalphysiker, der kollektive Phänomene in Quantengasen, etwa die Bose-Einstein Kondensation, untersuchen will, muss imstande sein, solche Gase auf äusserst tiefe Temperaturen in der Nähe des absoluten Nullpunktes der Temperaturskala zu kühlen. Derart tiefe Temperaturen kommen in der Natur nirgends vor! Der leere Raum weit von Sternen entfernt hat eine Temperatur von ca. 3 Kelvin, viel zu warm für moderne Experimente an Quantengasen.

Um hinreichend tiefe Temperaturen zu erzeugen, benützt der Physiker eine Form von Licht, die in der Natur nicht vorkommt, nämlich das kohärente Licht von Laserquellen [2]. Am anderen extremen Ende steht der Teilchenphysiker. Er erforscht Eigenschaften der Materie bei höchsten Energien, die Temperaturen entsprechen, die diejenigen im Inneren der Sterne um viele Grössenordnungen übertreffen. Dazu sind grosse Teilchenbeschleuniger, wie der LHC am CERN, nötig, die von Teams von tausenden von Physikern und Ingenieuren geplant und konstruiert werden, und deren Bau Geldsummen in Milliardenhöhe verschlingt.

Man muss sich eingestehen, dass das Zeitalter, da Küchentischexperimente fundamentale Ergebnisse in der Physik hervorgebracht haben, zuende ist. Wer je im Deutschen Museum zu München den experimentellen Aufbau gesehen hat, mit dem Hahn und Strassmann die Uranspaltung entdeckt haben, wird von den bescheidenen Ausmassen ihres Experiments beeindruckt gewesen sein - es hatte in der Tat auf einem Küchentisch Platz. Es wurde im Jahre 1938 zum ersten Mal erfolgreich durchgeführt, was ja gar noch nicht so lange her ist. Die daraus gewonnenen Einsichten haben die Welt verändert. Die Physik hat sich aber seit Mitte des 19. Jahrhunderts rasend schnell entwickelt und gewandelt. Sie ist seit dem zweiten Weltkrieg zum Inbegriff der "Big Science" geworden. Moderne Experimente sind selten für wenig Geld zu haben; wenn es auch noch relativ billige Experimente gibt - vorallem im Bereich emergenter Phänomene, wie der Flüssigkeitsdynamik oder auch der Festkörperphysik - die interessante Resultate hevorbringen.

Experimentelle Entdeckungen neuer fundamentaler Zusammenhänge, etwa im Bereich der Teilchenphysik, Astrophysik und Kosmologie, sind dagegen in aller Regel nur noch für sehr viel Geld zu haben.

Immerhin, vergleicht man die Summen, die man für physikalische Forschung ausgibt, mit der gesamten Mehrwerterzeugung der Wirtschaft, oder mit Militär- oder Agrarbudgets (auch von Ländern wie der Schweiz), so sind die Zahlen immer noch sehr bescheiden. Bedenkt man, wie radikal Entdeckungen der Physik unser Leben verändert haben, wie viel Mehrwert und wie viele Arbeitsplätze sie erzeugt haben, so darf man mit Fug und Recht behaupten, es hänge nicht die Physik am Tropf des Steuerzahlers, sondern unsere moderne Zivilisation sei weitgehend aus Entdeckungen der Physik hervorgegangen und verdiene an ihnen gewaltig. [3] Als ein Beispiel könnte man das Internet oder den "World Wide Web" anführen, die ihre Entstehung weitgehend der Arbeit von Teilchenphysikern verdanken. Man könnte argumentieren, dass sich die Teilchenphysik über solche "Spin Offs" mehr als amortisiert hat. Es gäbe da nämlich auch Beispiele von wichtigen Anwendungen teilchenphysikalischer Methoden

(Detektoren, Teilchenstrahlen) in der Medizin und anderen Gebieten zu nennen.

Nun ist die Begrifflichkeit, mit der die theoretische Physik ihre neueren Einsichten formuliert, äusserst abstrakt geworden. Bis in die Mitte des 19. Jahrhunderts gingen in die Formulierung der Naturgesetze relativ intuitive Begriffe, wie Position und Geschwindigkeit eines Himmelskörpers, Temperatur, Volumen und Druck eines Gases, u.a. ein. Das änderte sich zuerst in der Wärmelehre mit Begriffen wie Wärmemenge und Entropie, dann in der Elektrodynamik mit dem Feldbegriff. Doch auch diese Begriffe hatten noch eine gewisse Anschaulichkeit. Der Zustandsbegriff der Quantenmechanik ist dagegen derart unintuitiv, dass bis heute unter Fachleuten um eine wirklich befriedigende Interpretation dieser Theorie kontrovers gerungen wird. Auch der der allgemeinen Relativitätstheorie zu Grunde liegende Begriff Raumzeit ist ohne mathematische Anstrengung und Einübung kaum einsichtig oder gar anschaulich. Ohne ziemlich ausgedehnte und solide Kenntnisse der Mathematik bleibt die moderne Physik im Grunde unverständlich, und kann keine theoretische Entdeckung von Bedeutung mehr zustande gebracht werden. Diesen Umstand sollten sich diejenigen Kommunikationsspezialisten bewusst machen, die gerne fordern, die Erkenntnisse der Wissenschaft seien auch dem Mann in der Strasse zugänglich zu machen. Bis zu einem gewissen Grad ist dies möglich - es ist sogar eine spannende, wenn auch zeitraubende Aufgabe - aber ein beträchtlicher Teil der Substanz der physikalischen Erkenntnisse geht dabei notgedrungen verloren. Überall dort, wo die moderne physikalische Theorie krampfhaft an einfachen, anschaulichen Bildern festzuhalten versucht, ist grosse Skepsis angezeigt. [4] Die Zeit, da mit "back of the envelope"-Rechnungen wichtige theoretische Entdeckungen zu machen waren, scheint fürs Erste vorbei zu sein. Bleibt allerdings, dass die Theorie im Gegensatz zur Experimentalphysik eine billige Wissenschaft geblieben ist.

Man sieht: die Physik ist ein ziemlich elitäres Geschäft, eine harte Wissenschaft, in der nur nach angestrengtem Studium, mit viel Begabung, Hingabe und Schweiss Erfolge errungen werden können. Ihre Resultate aber verändern die Welt, und ohne Hilfe aus der Physik werden einige der brennendsten Probleme unserer Zivilisation überhaupt nicht zu lösen sein. Man denke etwa an die Erzeugung und Speicherung billiger, sauberer Energie, an die Informations- und Kommunikationstechnologie und die Medizintechnik.

Zum Weltbild der modernen theoretischen Physik

Es ist wohl zu rechtfertigen, dass an dieser Stelle ein paar Bemerkungen über das Weltbild der Physik, so wie es während des 20. Jahrhunderts entstanden ist, einfliessen mögen. Die Physik hat während des letzten Jahrhunderts radikale Umwälzungen durchgemacht, aus denen tiefgreifende Veränderungen - Segnungen und Bedrohungen - unserer Zivilisation hervorgegangen sind. Um sogleich ein gängiges Missverständnis zu beseitigen, betone ich, dass jene Umwälzungen die alte, "klassische" Physik weder unbrauchbar, noch unnützlich, noch "falsch" gemacht haben. Viktor Weisskopf hat dies wie folgt formuliert: *"We are all working for a common and well defined aim: to get more insight into the workings of Nature. It is a constructive endeavour, where we build upon the achievements of the past; we improve but never destroy the ideas of our predeces-sors."* [5]

Neue Theorien lehren uns etwas über die Beschränkungen, Gültigkeits-und Genauigkeitsgrenzen der alten Theorien, machen diese aber keineswegs überflüssig. Niemand würde die Bewegung der Planeten um die Sonne aus der Schrödingergleichung der Quantenmechanik bestimmen wollen, auch wenn die Quantenmechanik eine fundamentalere Theorie als die Newtonsche Mechanik ist. Die quantenmechanischen Korrekturen an der Newtonschen Theorie der Planetenbewegung sind derart gering, dass sie für alle praktischen Zwecke keine Rolle spielen.

Am Anfang der Umwälzungen in der Physik, wie sie im 20. Jahrhundert stattgefunden haben, standen die experimentelle Bestätigung und theoretische Untermauerung eines alten, aber immer wieder bezweifelten Paradigmas und **drei Revolutionen**. Das Paradigma ist die atomistische Konstitution der Materie. Worin bestehen die drei Revolutionen? Ausgelöst wurde die erste, die **Quantenrevolution**, u.a. durch experimentelle Daten über die Hohlraumstrahlung (die Wärmestrahlung eines Ofens) und über Atomspektren, die sich im Rahmen der klassischen Physik nicht deuten liessen. An dieser Stelle hakten die Theoretiker ein. An vorderster Front Planck (seine Formel für die spektrale Energiedichte der Hohlraumstrahlung stammt aus dem Jahr 1900), Einstein (der Entdecker der Lichtquanten, 1905), Bohr, Pauli, Born, Heisenberg und Jordan, Schrödinger, und Dirac (sie haben den Aufbau und die Strahlung der Atome verstanden) schufen auf der Basis jener neuen Daten eine fundamental neue Theorie, die Quantenmechanik. Sie lag in ihren Grundzügen 1928 vor.

Die zweite Revolution erwuchs aus der Unvereinbarkeit der Symmetrien der Gesetze der klassischen Newtonschen Mechanik und der Elektrodynamik und der damit verbundenen Krise der Ätherhypothese. Experimentell manifestierte sich die Krise z.B. im Michelson-Morley Versuch, der zeigte, dass eine Bewegung der Erde gegenüber dem hypothetischen Äther nicht nachweisbar ist.

Die Revolution, die die Krise vollständig überwand, bestand in der **Speziellen Relativitätstheorie**, wie sie von Poincaré nach Vorarbeiten von Lorentz u.a., in klarster und vollständigster Form aber von Einstein im Jahre 1905 geschaffen wurde. Sie verursachte eine Umwälzung in unseren Auffassungen von Raum und Zeit. Wer hat noch nie vom Zwillingsparadox gehört? Die dritte Revolution erwuchs aus dem Versuch, das Newtonsche Gesetz der universellen Gravitation so zu modifizieren, dass es in den Rahmen einer relativistischen Nahewirkungstheorie passte. Sie kulminierte in Einsteins Entdeckung der **Allgemeinen Relativitätstheorie** Ende 1915. Diese Theorie erklärte sogleich ein die Bewegung des Planeten Merkur betreffendes Rätsel und ist seither durch die Beobachtung vieler von ihr vorhergesagter Effekte glänzend bestätigt worden. Einsteins fast mythischer Ruhm rechtfertigt sich daraus, dass er als einziger an der Bestätigung des Atomismus und an allen drei Revolutionen führend beteiligt war.

Über das Zustandekommen neuer Theorien sagt Wolfgang Pauli: *"Theorien kommen zustande durch ein vom empirischen Material inspiriertes Verstehen, welches am besten im Anschluss an Plato als Zurdeckungkommen von inneren Bildern mit äusseren Objekten und ihrem Verhalten zu deuten ist."*

Reduktionismus und Emergenz

"Natural Science develops along two fronts. The first may be called the internal front. It is the study of atomic interactions. The nature of these interactions is known in principleÖ The consequences, however, are so manifold and complex that their study was and continues to be the object of a widening frontier of researchÖ (The second front) may be called the external frontier. It deals with the higher rungs of the quantum ladder, with the exploration of realms of Nature that lie beyond currently understood princi-ples." [6]

Seit Abschluss der erwähnten drei grossen Revolutionen sind die Reduktionisten unter den Theoretikern damit beschäftigt, umfassendere Theorien, etwa eine, die Atomismus, Quantentheorie und Spezielle Relativitätstheorie miteinander vereinigt, nämlich die **relativistische Quantenfeldtheorie**, und unter den Quantenfeldtheorien solche, die die inneren Symmetrien der physikalischen Feldgesetze mit dem Prinzip der Nahewirkung vereinbar machen, nämlich die **Eichtheorien der Teilchenphysik**, zu entwickeln und zu untersuchen. Eine Vereinigung der Quantentheorie mit der Gravitationstheorie, die sog. **"Quantengravitation"**, ist bestenfalls in Konturen sichtbar, etwa in Form der Stringtheorie [7], steht aber weitgehend noch aus und dürfte nur aus einer weiteren Revolution in unseren Auffassungen über Raum, Zeit und Materie hervorgehen.

Daran wird zwar intensiv gearbeitet, jedoch liegt ein wirklich erfolgversprechender Weg wohl noch im Dunkeln. Reduktionisten schauen in die kleinsten und die grössten Bereiche der Natur, wo Neuland betreten werden kann, ins Reich der Elementarteilchen oder ins Reich des Kosmos und seiner Entwicklungsgeschichte, und versuchen, die dort beobachteten Phänomene entweder im Rahmen schon bestehender Theorien oder neu zu entwickelnder Theorien zu deuten, die sie dann in eine umfassendere Theorie einzubringen versuchen.

Die Relativitätstheorien haben uns gezeigt, dass ein endlich ausgedehnter Beobachter endlichen Alters prinzipiell nicht in der Lage ist, aus der ihm zugänglichen Kenntnis der Vergangenheit die Zukunft vorherzusagen. Dazu fehlt ihm Information über das, was in Gebieten des Universums abläuft, die mit ihm in seiner Vergangenheit und Gegenwart nicht über Lichtstrahlen verbunden sind, was aber trotzdem seine Zukunft zu beeinflussen vermag. Die Quantenrevolution will uns wahrscheinlich sagen, dass die physikalische Theorie, d.h. die Quantentheorie, prinzipiell nur Wahrscheinlichkeiten zukünftiger Ereignisse vorauszusagen imstande ist. Vorauszusagen, welche Ereignisse dann tatsächlich eintreffen werden, liegt ausserhalb der Möglichkeiten der gegenwärtig bekannten Theorie. (Ein zentrales Problem der Quantentheorie ist allerdings, dass sie nicht präzisiert, was unter einem Ereignis zu verstehen ist, und wie Ereignisse zustandekommen.) Diese zwei Folgen der Revolutionen im physikalischen Weltbild haben natürlich auch die Philosophen sehr beschäftigt - aber dies sollte vielleicht nicht in der Vergangenheitsform geschrieben werden.

Aus den geschilderten Revolutionen und den Anstrengungen der Reduktionisten unter den Physikern sind im 20. Jahrhundert viele weitere Modelle und Theorien entstanden, die das Gesicht der Physik und ihrer praktischen Anwendungen bleibend verändert haben. Nicht jedermann hat das Glück, an einer Revolution beteiligt zu sein. Aber die Entdeckung von Konsequenzen der neuen Theorien "emergente Phänomene" betreffend kann fast ebenso spannend sein. [8] Die Untersuchung der inneren, mathematischen Struktur und Konsistenz neuer Theorien und der Art und Weise, wie sie ihre Vorgängertheorien in gewissen Grenzbereichen reproduzieren, ist wichtig und faszinierend und befruchtet die Mathematik. Technische Anwendungen neuer physikalischer Entdeckungen zu konzipieren ist ein aufregendes und gelegentlich höchst lukratives Geschäft. Die Methoden der Physik auf andere Gebiete zu übertragen und sinnvoll anzuwenden kann zu grossartigen Erfolgen führen, wie uns Leute wie George de Hevesy (radioaktive Elemente als "Tracers"), Crick und Watson (Entdeckung der Doppelhelix), Delbrück (Genetik) und viele andere vorgemacht haben.

Die Anwendungen der neuen, im ersten Viertel des 20. Jahrhunderts entstandenen physikalischen Theorien und experimentellen Methoden haben das Gesicht der Welt verändert. Man denke nicht nur an die Kernenergie oder die Kernwaffen, sondern ebenso sehr an die Halbleitertechnologie (auch ein Geschenk der Quantentheorie), ohne die der moderne Computer, das allgegenwärtige "Handy", die Solarzellen undenkbar wären, den Laser, dessen Anwendungen von der Medizin über den CD Player bis zur Kriegstechnologie reichen, die optische Kommunikation über Glasfaserkabel, die MRI Methode, die auf der Kernspinresonanz beruht, etc. Man könnte die Liste solcher Anwendungen seitenweise fortsetzen. Daraus ist sehr viel Mehrwert, sind sehr viele Arbeitsplätze entstanden. Dies wird auch in Zukunft so bleiben! Obschon die Physik ein etwas barockes Stadium erreicht hat, ist sie keineswegs an ein Ende gelangt. Sie verspricht noch immer fundamentale Entdeckungen, die Begeisterung auslösen werden, und wichtige Anwendungen hervorzubringen. Sie bleibt die "Leitwissenschaft" unter den Naturwissenschaften, was ihre Präzision, insbesondere ihre "Mathematisierbarkeit", ihre intellektuellen Standards und ihr Anwendungspotential anbetrifft.

Theoretische Physik versus Experimentalphysik

Das gegenseitige Abhängigkeitsverhältnis von dem Experimentalphysik und Theorie [9] ist in etwa demjenigen zwischen einem Blinden und einem Gelähmten zu vergleichen: Nur mit gegenseitiger Unterstützung vermögen sie fortzukommen, und zwar auf dem richtigen Weg. Ob der Experimentalphysiker der Blinde und der Theoretiker der Gelähmte sei, oder umgekehrt, das hängt ganz von der konkreten Situation ab; die Rollen sind austauschbar. Noch vor 150 Jahren machten alle Physiker sowohl Naturbeobachtungen (z.B. astronomischer Vorgänge, oder von Phänomenen wie der Wasserwellen oder des Regenbogens) oder gezielte Experimente, als auch Theorie. Ein Beispiel eines hervorragenden Physikers, der gegen Ende des 19. Jahrhunderts sowohl geniale Experimente als auch tiefe theoretische Entdeckungen machte, ist der grosse Heinrich Hertz. Ihm gelang als erstem die künstliche Erzeugung elektromagnetischer Strahlung im Radiowellenbereich, ein experimenteller Durchbruch, der an der Wurzel der drahtlosen Kommunikation steht, wie auch deren theoretische Beschreibung im Rahmen der Maxwellschen Elektrodynamik. Er experimentierte mit dem photoelektrischen Effekt, der in der Entstehung der Quantentheorie des Lichts eine wichtige Rolle spielen sollte, stellte aber auch tiefliegende Untersuchungen zur Mechanik und zum Versagen der klassischen Physik in der Untersuchung des Atombaus an. Er übte Kritik an der Äthervorstellung der damaligen Elektrodynamik.

Einstein, der geniale Theoretiker und in gewissem Sinn ein "spiritueller Sohn" Hertzens, hegte zwar als jüngerer Wissenschaftler auch ein intensives Interesse an Experimenten und technischen Anwendungen der Physik, führte solche aber nur in Zusammenarbeit mit Experimentalphysikern und Ingenieuren durch. Ich erwähne nur den Einstein-de Haas Effekt im Bereich des Magnetismus und Einsteins Erfindungen eines neuen Kühlschrankprinzips oder eines elektromagnetisch aufgehängten Kreisels, der im zweiten Weltkrieg offenbar von allen führenden Militärmächten als Navigationsinstrument verwendet wurde. Dass seine abstrakteste Entdeckung, die allgemeine Relativitätstheorie, eine äusserst nützliche Anwendung haben würde, nämlich das sog. "Global Positioning System", das war weder von ihm noch von seinen Zeitgenossen vorauszusehen; (zunächst nicht einmal von den amerikanischen Wissenschaftlern, die dieses System entwickelten).

In jüngerer Vergangenheit versuchte Felix Bloch[10]- der Entdecker der Spin-Resonanz, die die Grundlage für das MRI und für die Forschungen darstellt, für die Richard Ernst und Kurt Wüthrich ihre Nobelpreise erhielten, und der Entdecker der Quantentheorie der Metalle - nebst seiner theoretischen Untersuchungen auch noch Experimente anzustellen.

Neuere Beispiele grosser Wissenschaftler, die sowohl als Theoretiker wie auch als Experimentatoren erfolgreich waren, etwa mein Lehrer und Kollege Klaus Hepp, teilten ihre theoretischen und ihre experimentellen Tätigkeiten auf verschiedenene Lebensabschnitte auf.

In der Tat, die moderne Physik ist eine derart hochkompliziert, dass es kaum möglich erscheint, dass ein Theoretiker selbst ein wichtiges Experiment durchführt, oder dass ein Experimentalphysiker einen entscheidenden Beitrag zur Theorie hervorbringt. Sogar innerhalb der Experimentalphysik und der Theorie ist die Spezialisierung derart weit fortgeschritten, dass die meisten Physiker sich nur noch in einem oder ein paar wenigen Spezialgebieten kompetent forschend betätigen können. Generalisten (wie der Schreibende einer zu sein versucht hat) gelten heutzutage i.d.R.l als "unprofessionell". Wer sich erfolgreich durchsetzen will, benötigt Anschluss an und Unterstützung durch die wissenschaftliche Familie (um nicht von einer "Mafia" zu reden) eines Spezialgebiets und bleibt dann oft lebenslänglich darin hängen. [11] Es wird so ungeheuer viel publiziert wird, dass Resultate - auch wichtige -, für die man eigentlich einen gewissen Kredit beanspruchen zu dürfen meint, ohne die Verstärkung durch eine wissenschaftliche Familie kaum noch wahrgenommen werden, um dann nicht selten von anderen Gruppen wiederentdeckt zu werden.

Der Punkt dürfte allmählich klar geworden sein: Die Physik ist ein überaus grosses, kostspieliges, kompliziertes Unternehmen geworden; jedenfalls wenn man ihre Kosten nicht gerade mit denjenigen der "Life Sciences" vergleicht, die noch ungleich höher sind, sondern etwa mit denjenigen der Geisteswissenschaften. Es tummeln sich in unserer Wissenschaft sehr viele Leute, bessere und weniger gute, redliche und weniger anständige. Der Verteilungskampf um Personal und Mittel ist hart, der Lärm ist gross, und die Moden haben einen gewaltigen Einfluss auf die Tätigkeit insbesondere jüngerer Wissenschaftler - übrigens auch darauf, was die (Wissenschafts-)Politiker für wichtig halten. Diese verpassen es natürlich in der Regel, die originellsten Entwicklungen aufzuspüren und gezielt zu fördern. Deshalb sollten sie auch weniger konkrete Inhalte und Programme, sondern vielmehr wirklich gute Leute und Forschungsgruppen fördern.

Das Verhältnis zwischen Aufwand und den zu erwartenden Resultaten ist in der Physik lange nicht mehr so günstig wie vor fünfzig oder hundert Jahren. Mit all diesen zum Teil wenig angenehmen Begleiterscheinungen des modernen Wissenschaftsbetriebs muss man leben lernen, will man als Physiker dem Fortschritt in dieser wundervollen Wissenschaft dienen.

Es dürfte den Leser nun nicht mehr überraschen, dass die Unterscheidung in theoretische Physik und Experimentalphysik nur die augenfälligste und gröbste ist, die anzustellen ist. Dass aber das Verhältnis zwischen theoretischer Physik und Experimentalphysik stets dasjenige einer fruchtbaren, wechselwirkungsintensiven Symbiose zu sein hat, dies dürfte schon klar geworden sein. Eine Theorie, die sich weder um experimentelle Daten, noch um ihre eigene experimentelle Nachweisbarkeit, resp. Falsifizierbarkeit kümmert, läuft Gefahr steril zu werden. Es interessieren sich dann am Ende weder die Physiker, noch die Mathematiker dafür. Im fundamentalen Bereich, wo versucht wird, die Quantentheorie mit der Gravitationstheorie zu vereinigen, lauert diese Gefahr stets, da sich in diesem Gebiet theoretische Ideen kaum je experimentell testen lassen, sodass als Test ihrer Qualität in der Regel nur ihre logische Konsistenz, ihr ästhetischer Reiz und ihre Kraft, bekannte Theorien zu reproduzieren, bleibt. Dieses Gebiet mag überdies ein Beispiel dafür sein, dass klassische Konzepte und intuitive Vorstellungen (etwa diejenige von Punktteilchen, oder die von einer global definierbaren Zeit) für die Zwecke fundamentaler Theorie mit grosser Wahrscheinlichkeit versagen werden. (Die gegenwärtige Lage erinnert ein wenig an diejenige am Ende des 19. Jahrhunderts, resp. vor der Entdeckung der Quantenmechanik und der Relativitätstheorie, als die Begriffe und Konzepte der klassischen Physik zur Überwindung der damaligen Paradoxien versagten.)

Genauso wandert eine Experimentalphysik, die sich weder um die Verfikation oder Falsifikation neuerer theoretischer Konzepte und Ansätze, noch um die theoretische Interpretation der von ihr zutage geförderten Daten, noch um neue Anwendungen der Physik auf die Technik kümmert in eine Wüste des Beliebigen. Die Kommunikation zwischen Theoretikern, Experimentalphysikern und Ingenieuren ist für alle Beteiligten lebenswichtig!

Das Spektrum der Physik

"Ein vielgestaltiger Bau ist er, der Tempel der Wissenschaft. Gar verschieden sind die darin wandelnden Menschen und die seelischen Kräfte, welche sie dem Tempel zugeführt haben." [12)]

Sowohl die Experimentalphysik als auch die theoretische Physik weisen ein erstaunlich breites und feines Spektrum von Spezialgebieten auf. Der Begabungen, aus denen Fortschritte in der Physik erwachsen, sind viele, und die Motive, aus denen Menschen sich dazu entschliessen, Physiker oder Physikerin zu werden, sind vielfältig. Allen Physikern und Physikerinnen gemeinsam ist die Neugierde, herauszufinden wie die Natur funktioniert. Der Theoretiker Richard Feynman hat von sich gesagt: *"I am an explorer, okay? I like to find out."* Um Erfolg zu haben, sind nebst der intellektuellen Neugierde die Fähigkeit, logisch und analytisch zu denken, die Lust, sich mit Gegenständen auseinander zu setzen, die dem Verständnis Widerstand entgegensetzen, eine gute Intuition für physikalische und, für Theoretiker, mathematische Zusammenhänge und, zumindest für Experimentalphysiker, praktisches Geschick nötig. An Physiker und Physikerinnen sind nach den Erfahrungen des 20. Jahrhunderts die Forderungen nach intellektueller Aufrichtigkeit und nach ethischem Verantwortungsgefühl zu stellen. Physik zu treiben ist also ein anspruchsvolles Geschäft, das erfahrungsgemäss nur relativ Wenigen gut bekommt.

Die Physik kann grob in die folgenden Teilgebiete gegliedert werden:

- Astronomie, Astrophysik und Kosmologie [13)]
- Kern- und Teilchenphysik, Physik der fundamentalen Wechselwirkungen
- die Physik der kondensierten Materie und der Wechselwirkungen von elektromagnetischer Strahlung und Teilchenstrahlen (z. B. Neutronenstrahlen) mit kondensierter Materie, mesoskopische Physik, Untersuchung neuer Phänomene im atomaren (oder "Nano"-) Bereich, Quantenoptik
- die Physik "klassischer" dynamischer Systeme, etwa des Planetensystems, die Flüssigkeitsdynamik, die Plasmaphysik, etc

- die angewandte oder technische Physik - Anwendungen der Physik, resp. physikalischer Methoden, in anderen Gebieten, wie den Materialwissenschaften, der Geologie und Metereologie, der Biologie, der Neurologie, der Medizin, der Informatik, der Ökonomie.

Alle diese Teilgebiete werden sowohl experimentell als auch theoretisch und/oder numerisch erforscht.

Die theoretische Physik kennt darüber hinaus noch die "spekulative Theorie", z.B. die Stringtheorie, die Exploration der Struktur physikalischer Modelle und Theorien, die Erforschung von für die Physik wichtigen mathematischen und numerischen Methoden, und die Untersuchung von Anwendungen physikalischer Ideen auf Probleme der Könign der Wissenschaften, der Mathematik.

Alle diese Tätigkeiten sind für den Fortschritt unserer Wissenschaft wichtig. Man hüte sich davor, sie gegeneinander auszuspielen. Jeder und jede mache das, wofür er oder sie am meisten Talent hat und/oder worauf er oder sie am meisten Lust hat, vorausgesetzt, er oder sie kann damit ein angenehmes Leben fristen. Dieser etwas hedonistische Standpunkt wird nur durch die Forderung nach der ethischen Verantwortbarkeit seines oder ihres Tuns begrenzt.

Die Physik, inklusive die theoretische Physik, bleibt auch im 21. Jahrhundert ein spannendes Geschäft mit einem grossen Potential für Innovation und für wesentliche Beiträge zur Lösung brennender Gegenwartsprobleme!

Physik und Gesellschaft

Aus unseren Ausführungen ergeben sich einige Konsequenzen für das Verhältnis zwischen Physik und Gesellschaft, die ich zum Abschluss skizzieren möchte.

Die Physik ist ein komplexes, breitgefächertes, kostspieliges Unternehmen geworden.

Das Verhältnis zwischen Aufwand und Resultat ist nicht mehr so günstig wie im Goldenen Zeitalter der Physik, zwischen 1900 und ca. 1975. Um später Erfolg zu haben, müssen Physikerinnen und Physiker zunächst eine solide, breite Ausbildung (auch in Mathematik) erhalten und sich alsdann spezialisieren. Sie müssen teamfähig sein und über die Grenzen ihrer Disziplin kommunizieren können. All dies spricht dafür, dass es zu einem Konzentrationprozess in den Ausbildungs- und Forschungsstätten für Physik kommen muss und wird. [14] Dieser Prozess ist von öffentlich-politischer Seite her vorausschauend und weise zu planen und zu steuern, ohne dass dabei Verluste an Qualität und Vielfalt und an Vertrauen in unser Bildungssystem und die Sicherheit akademischer Arbeitsplätze entstehen.

Die Physik bleibt für die technisch-industrielle Innovation und für die Lösung brennender Probleme unserer Zivilisation, sei es das Energieproblem, Probleme einer nachhaltigen Entwicklung, der Bildgebungs-, Navigations-, Informations- und Kommunikationstechnologien, der Rüstungskontrolle, der Biologie- und Medizintechnik, etc. auch im 21. Jahrhundert zentral wichtig. Damit ihr ein hinreichend starker und exzellenter Nachwuchs erhalten bleibe, muss sie aus intrinsischen Gründen attraktiv und faszinierend sein; (die Physik des Universums, der schwarzen Löcher, der dunklen Materie, der Teilchen und Felder, etc. fasziniert junge Menschen wahrscheinlich mehr als die Physik des "Handys" und wird sie vielleicht sogar überzeugen, Physik zu studieren).

Eine Physik, die sich nur auf Anwendung und Mehrwerterzeugung konzentriert, wird früher oder später an Sauerstoffmangel leiden; erstens weil sie ihrer Inspirations- und Innovationsquellen verlustig geht, und zweitens weil sie die besten jungen Leute nicht mehr anzuziehen vermag. Im Übrigen werden mit der Anwendbarkeit gewisser Resultate physikalischer Forschung oft ganz unrealistische und unredliche Erwartungen geweckt, und es gibt dabei viel Hypokrisie.

Deshalb bleibt auch im 21. Jahrhundert die physikalische Grundlagenforschung zentral wichtig, selbst in Bereichen wie der Astrophysik, die sehr anwendungsfern scheinen!

Die öffentliche Hand sei dazu ermutigt, vorallem individuelleTalente und erfolgreiche Forschungsgruppen, statt Programme zu fördern. Denn Bildungspolitiker und Förderungsagenturen sind selten in der Lage, die vielversprechendsten und originellsten Programme aufzuspüren. Aus welcher Ecke in zwanzig Jahren die stärksten Impulse für Fortschritt, Innovation und Wachstum kommen werden, weiss niemand.

Talent und Erfolg von Wissenschaftlern sind nicht in erster Linie an der Anzahl und Zitationszahl ihrer Publikationen zu messen (wiewohl diese auch etwas sagen), sondern an Anhaltspunkten wie der Zahl eingeladener Vorträge an internationalen Konferenzen, Wissenschaftspreisen und Berufungen an andere Institutionen, in einem kleinen Land wie der Schweiz aber vorallem am Urteil von Kollegen und an ihrer unschwer eruierbaren Reputation.

Der Druck, viel zu publizieren, in modischen "Mainstreams" mitzuschwimmen, anwendbare Forschung zu machen, ist heutzutage zu gross. Das schadet der Qualität, Originalität und Redlichkeit der Forschung und stört das Vertrauensverhältnis zwischen den Fakultäten und den Leitungen der Universitäten und Forschungsförderungsagenturen. Man schenke den Forschern wieder ein wenig mehr Vertrauen und gebe ihnen Zeit, sich in Ruhe und mit der nötigen Ernsthaftigkeit, Konzentration und Kreativität mit ihren Problemen zu beschäftigen, ohne dass man sie dauernd nach ihrem Leistungsausweis fragt.

Ich möchte diesen kurzen Beitrag mit dem Geständnis schliessen, dass ich trotz einiger negativer Tendenzen im modernen Wissenschaftsbetrieb, gerade auch in der Schweiz, meinen Beruf als Physiker noch immer mit keinem anderen vertauschen möchte. Ich kann nur hoffen und erwarte mit vorsichtigem Optimismus, dass die Physik auch in Zukunft einige der besten jungen Leute in ihren Bann ziehen wird!

Anmerkungen

1) Ich möchte in diesem Beitrag darauf verzichten, stets sowohl die männliche als auch die weibliche Form solcher Substantive zu gebrauchen, da dies den Text schwerfällig machen würde. Es sind damit aber keinerlei Vorurteile oder Absichten verbunden.
2) Es gibt im Universum allerdings Regionen, wie Umgebungen schwarzer Löcher, die Quellen von räumlich und zeitlich relativ kohärenter elektromagnetischer Strahlung sind ("Maser"). Sie spielen in der Astrophysik eine interessante Rolle. Ich verdanke diesen Hinweis Norbert Straumann
3) Der bedeutende Teilchenphysiker Valentin Telegdi (1922 - 2006), Professor an der ETH Zürich von 1976 bis 1987, sagt in seiner Abschiedsvorlesung, die Gesellschaft sei *"die Nährmutter und zugleich Säugling der Hochschule"*
4) Telegdi in seiner Abschiedsvorlesung: *"Pauli wirkte als mahnender Gegenpol (zu Scherrer): in seinen Vorlesungen lernten wir, der Einfachheit nicht die Logik zu opfern!"*
5) V. Weisskopf, "The Privilege of Being a Physicist", New York: Freeman 1989
6) V. Weisskopf, loc. cit.
7) "the handwriting is on the wall" (Edward Witten)
8) Man denke an die Entdeckung der Bose-Einstein Kondensation von Quantengasen, der Supraleitung oder des quantisierten Hall Effekts. Man vergegenwärtige sich die Entwicklung der Theorie "kritischer Phänomene" in der Nähe kontinuierlicher Phasenumwandlungen, oder die Entdeckung der spontanen Symmetriebrechung und der Folgen spontan gebrochener Symmetrien, etwa für Eigenschaften wie die spezifische Wärme eines Festkörpers. Man führe sich die Szenarien für die Entstehung von Turbulenz, oder den Beweis der "Stabilität der Materie", etc. zu Gemüt.
9) Von nun an soll aber wieder das gelten, was in Fussnote 1 steht
10) Bloch wurde 1905 in Zürich geboren. Er erhielt den Nobelpreis für Physik des Jahres 1952, zusammen mit E. M. Purcell, für die Erforschung der Kernspinresonanz, war Professor an der Stanford University, und starb 1983 während eines Sommeraufenthaltes in seiner Vaterstadt
11) Ich persönlich bereue diese Entwicklung so sehr, dass ich mit einer gewissen Genugtuung meiner Emeritierung Im Jahr 2011 entgegensehe
12) A. Einstein, "Motive des Forschens", in "Ansprachen zu Max Plancks sechzigstem Geburtstag"
13) Darüber kann der Leser viel Interessantes im Beitrag von Norbert Straumann finden
14) Valentin Telegdi sagt dazu: *"Gibt es gegenwärtig grosse Physiker wie Pauli, Fermi, Heisenberg, Bloch oder Landau? Meine Antwort auf diese Frage ist ein uneingeschränktes Ja. Vielleicht gibt es heute sogar mehr solche Leute als je zuvor, denn es gibt ja viel mehr Physiker überhaupt. Was fast allen heutigen Koryphäen abgeht, ist die Universalität der früheren. Feynman ... war vielleicht der letzte, der auf den verschiedenen Gebieten der Physik Grosses leisten konnte. Gerade weil solche olympischen Vorbilder fehlen, müssen wir Sterbliche versuchen, kollektiv unseren Studenten ein zusammenhängendes Bild der Physik zu vermitteln."* Das ist freilich nur an grösseren Fakultäten möglich!

Vom Ursprung der Masse

Uwe-Jens Wiese

Zusammenfassung: Die Masse ist eine wichtige Eigenschaft der Materie, deren Verständnis von zentraler Bedeutung für die moderne Physik ist. Sie ist ein Mass für Trägheit und Schwere der Materie. Der Grossteil der Masse der uns umgebenden Materie resultiert aus der starken Wechselwirkungsenergie von Quarks und Gluonen im Atomkern. Der Ursprung der Masse elementarer Teilchen wie Quarks oder Elektronen ist hingegen noch weitgehend unverstanden. Der Grossteil der Masse im Universum stammt ohnehin von sogenannter dunkler Materie, deren Natur ebenfalls noch weitgehend unbekannt ist. Der Large Hadron Collider (LHC) am CERN verspricht tiefe Einsichten in diese grossen offenen Fragen der Physik.

1. Einleitung

Die Masse ist eine zentrale physikalische Grösse, deren Betrachtung uns von den Anfängen der klassischen Mechanik über die moderne Physik bis zu einigen grossen ungelösten Fragen der aktuellen Forschung führt. Der Autor hat sich bewusst entschieden, in diesem Aufsatz nicht auf mathematische Formeln zu verzichten. Physik ist eine quantitative Wissenschaft, in der wir die Sachverhalte mathematisch formulieren können. In der Tat ist die Mathematik die Sprache, in der die Naturgesetze geschrieben sind. Die Alltagssprache hingegen ist oft unzulänglich, um physikalische Zusammenhänge angemessen zu erklären. Zum Verständnis dieses Aufsatzes sollen aber keine besonderen mathematischen Kenntnisse erforderlich sein. Die verwendeten Formeln lediglich die Beherrschung der Grundrechenarten voraus, und man sollte sich von ihnen keineswegs abschrecken lassen.