

Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 100 (1982)
Heft: 25

Artikel: Tendenzen moderner Physik
Autor: Queisser, Hans-Joachim
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-74824>

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: 08.02.2026

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

Tendenzen moderner Physik

Von Hans-Joachim Queisser, Stuttgart

An der Mitgliederversammlung des Stifterverbandes für die Deutsche Wissenschaft vom 6. Mai 1982 in Wiesbaden hat Prof. H. J. Queisser vom Max-Planck-Institut für Festkörperforschung in Stuttgart über «Tendenzen moderner Physik» gesprochen. Seine Ausführungen über die Trennung von Geistes- und Naturwissenschaften und der damit vor allem von Philosophen beklagte Verlust der Nichteinbeziehung dynamischer Lebensvorgänge und -formen in die statische, klassische Physik stellt er eine Annäherung entgegen, wie sie gerade von der aktuellen Physik, der Quanten- oder Mikrophysik, her kommt. Physik als Grundlage aller Naturwissenschaft und somit auch ihrer Anwendungen in der Technik ist ein Thema, das seit den Zeiten Galileis, Newtons und Keplers virulent ist. Dass sich dazu gerade ein Festkörperphysiker äussert, ist angesichts der Entwicklungen auf dem Feld der Mikroelektronik auch ein Grund, weshalb wir seine Ausführungen unseren Lesern nicht vorenthalten wollen.

Es scheint oft, als laufe durch unser Land ein trennender Graben zwischen denen, die Technik, Naturwissenschaften und Mathematik betreiben und jenen, die in solcherlei Tun nur Gefahr und Frevel wittern. Eine solche Spaltung ist verhängnisvoll für ein Land, das Industriestaat sein und bleiben muss. Verständigung und Zusammenleben in unserem Gemeinwesen werden belastet; diese Bürde wird in den nächsten Jahren kaum leichter werden.

Wahres Erleben – Mechanisches Erklären

Die aktuellen Anlässe für Konflikte um die Technik sind vielfältig, ich will sie nicht aufzählen. Die Wurzeln für das Auseinanderleben gehen tief. Die Spaltung einer über Jahrhunderte als einheitlich empfundenen Wissenschaft in zwei getrennte Kulturen, diese bewusst verschärfte Trennung der Naturwissenschaften von den Geisteswissenschaften ist sogar von einem Sohn unserer gastgebenden Stadt Wiesbaden vorangetrieben worden: Wilhelm Dilthey, der 1833 hier in Biebrich geboren wurde, versuchte, die Geisteswissenschaften systematisch zusammenzufassen. Als Mittel dazu diente ihm eine möglichst strenge Abgrenzung gegen die damals geradezu unantastbar, übermächtig und unbegrenzt erfolgreich scheinende klassische Physik. Für Dilthey konnten die Naturwissenschaften allenfalls beobachten und erklären, während die Gemeinsamkeit der Geisteswissenschaften

ten «aus der Opposition lebensvoller Geister gegen die exakte Naturwissenschaft . . . , aus der Stärke des Hasses . . . einen Protest einer lebendigeren und tieferen Anschauung erhob». Allein die Geisteswissenschaften sollten durch inniges Erleben zu wahrem Verstehen führen, über die «leere und öde Wiederholung mechanischen Naturlaufs» hinaus. Naturwissenschaft bezeichnete er als «dürftig und nieder», die allerdings «Herr der Analyse» sei.

Dieser prägnante Gegensatz wahren Erlebens gegen mechanisches Erklären ist von vielen noch verstärkt worden, er bestimmt auch heute – leider – vielerseits die Einschätzung der Naturwissenschaften, obwohl wir längst nicht mehr im Zeitalter der klassischen Physik leben. Die systematische Trennung verhindert das Gespräch und belastet mit Vorurteilen. Vorschnell verfällt der Naturforscher in den Hochmut, nur seinesgleichen habe Einfälle, die andere Seite nur Zweifel. Von dort tönt der Vorwurf, der Naturwissenschaftler betrachte in nachgerade einfältiger Weise nur das Eindeutige, Wiederholbare und verdränge darüber das Vieldeutige, Einmalige, Selbständige des Lebens.

Diesen so überspitzten Vergleich, zwischen Erleben und Beobachten, zwischen Verstehen und Erklären, zwischen Eindeutigem und Mehrdeutigem, beschreibt Max Frisch im «Don Juan – oder die Liebe zur Geometrie». Sein Don Juan desertiert zur Mathematik und schwärmt dem verblüfften Freund: «Hast du es nie erlebt, das nüchterne Staunen vor einem Wissen, das stimmt?

. . . , was ein Kreis ist, das Lautere eines geometrischen Orts? Ich sehne mich nach dem Genauen; mir graust vor dem Sumpf unserer Stimmungen. Weissst Du, was ein Dreieck ist? Unentrinnbar wie ein Schicksal; die Hoffnung . . . unabsehbarer Möglichkeiten . . . zerfällt». Aber dieser Don Juan muss scheitern in seiner einseitigen Wahl. Ein Dreieck ist schliesslich zu simpel; schon eine Schneeflocke fordert so breite Vielseitigkeit!

Der alternde Brecht bedauert: «Mit Zwanzig hätte ich gern Mathematik studiert . . . », denn «in den Zahlen waschen wir das Unreine». «Utopie der Exaktheit», wie Robert Musil sagt, zwingt den exakten Menschen zur Opferung seiner Empfindungen. Solche «exakte Menschen» sind aber – so Musil – heute vorhanden. «Er lebt nicht nur im Forscher, sondern im Kaufmann, im Organisator, im Sportsmann, im Techniker, wenn auch vorläufig nur während jener Haupttageszeiten, die wir nicht unser Leben, sondern unseren Beruf nennen.» Also stehe nicht nur ich, der Physiker, in diesem Spannungsfeld zwischen Exaktheit und Leben, sondern wir alle.

Zu diesem Gegensatz der Anschauungen erziehen unsere Schulen in krasser Weise. Bedenken Sie den Kontrast zwischen mathematischer Aufgabe und Deutschsaufsatz! Die übliche mathematische Aufgabenstellung enthält bereits mit Unerbittlichkeit ihre eindeutige Lösung. Jedes Abweichen vom methodischen Lösungsweg führt in einen unendlich grossen Raum falscher Aussagen. Den schmalen Grat zum Lösungsziel zu finden, gibt manchem das Gefühl Don Juans, zum Kreis der Eingeweihten zu gehören – die meisten jedoch erschrecken vor der strengen Einengung. Erscheint nicht die Vielfalt der Meinungen, die farbige Freizügigkeit des Stils in selbst einem kleinen literarischen Werk – wie es der Schulaufsatz einübt – lebendiger und reicher?

Auseinanderklaffende Kulturen

Dieses Auseinanderklaffen in zwei Kulturen wird sich vermutlich in Zukunft verstärken. Bevölkerungszunahme und internationaler wirtschaftlicher

Wettbewerb werden die Einführung neuer Technologien beschleunigen; diese werden immer stärker wissenschaftlichen Charakter tragen und sich von früheren, empirischen Techniken unterscheiden. Die *Mikroelektronik – ohne Festkörperphysik undenkbar* – und die *Pflanzenzüchtung – ohne Mikrobiologie undenkbar* – sind beispielhaft. Diese neuen Techniken werden einerseits jeden Einzelnen immer intensiver unmittelbar im täglichen Leben beeinflussen, andererseits fordern sie grösseres Verständnis für die grundlegende Wissenschaft, was aber – bei wachsender Spezialisierung – immer schwieriger zu erreichen ist. Eine Spaltung in wenige handelnde Wissende und viele unwissende Betroffene könnte zu ernststen kulturellen, sozialen und wirtschaftlichen Spannungen führen. Selbst bei einem Verzicht auf neue Techniken blieben wir betroffen, denn die weitaus weniger mit Skrupeln belastet scheinenden *ostasiatischen Konkurrenten* werden sie ohnehin einführen. Darum erscheint mir unter anderem eine Prüfung wichtig, ob die so grundlegenden Vorbehalte und Abgrenzungen, die *Dilthey* und alle seine Nachfolger vor allem gegen die Physik als die zentrale Naturwissenschaft und die mathematische Strenge ihrer Methodik erhoben, auch heute berechtigt sind und ob sich künftige Annäherung ermöglicht oder gar noch weitere Entfremdung andeutet.

Gemeinsamkeiten

Ich bin zuversichtlich, dass heute weit mehr Gemeinsamkeiten bestehen als zur Blüte der klassischen Physik vor hundert Jahren. Ich will diese Zuversicht belegen mit der Schilderung einiger typischer Tendenzen heutiger Methoden, Fragestellungen und Interpretationen der Physik. Einzelheiten physikalischer Forschung kann ich hier nicht ausbreiten, ich umreise nur in grossen Zügen die heute interessanten und lösbaren Problemstellungen.

Die Kritiker bezichtigen die *mathematischen Wissenschaften* einer Zerteilung und übermässigen Vereinfachung, einer *Starrheit* und *Statik*, die zu stark vom Grundsatz konstanter, invarianter Grössen beeinflusst wird und damit die Vielfalt und vor allem den Wandel unterdrückt, der gerade das Lebendige so entscheidend bestimmt. Die klassische Mechanik mit ihren unerbittlich vorhergesagten Abläufen lässt für das Unerwartete, das Beeinflussbare und Schöpferische scheinbar so kargen Raum. *Wo bleibt der Zufall*, unsere ständige Quelle der Hoffnung, gleich

nebenan in der Spielbank hier in Wiesbaden oder in Bad Homburg (immerhin «Mutter von Monte Carlo» genannt)? Lassen Sie uns dazu einige Beispiele prüfend betrachten.

Verlust der Determiniertheit

Die strenge Determiniertheit der *klassischen Physik* zeigt sich am besten in *Keplers Gesetzen der Planetenbewegung* mit ihrer auf Jahrhunderte möglichen Vorausberechnung. Diese *Determiniertheit hat im mikroskopischen Bereich durch die Quantentheorie ihre Gültigkeit eingebüsst*. Sie wissen, dass beispielsweise ein Elektron sowohl die Eigenschaften eines Teilchens als auch einer Welle aufweist. Die quantenmechanische Wellenfunktion beschreibt das Elektron und gibt nur noch eine Wahrscheinlichkeit an, das Teilchen an einem bestimmten Ort zu finden. *Werner Heisenbergs Unschärferelation* besagt, dass man niemals gleichzeitig sowohl den Ort als auch die Geschwindigkeit des Teilchens bestimmen kann. Die strikte klassische Vorhersage ist damit unwiederbringlich verloren gegangen. Für die Väter der Quantentheorie, vor allem *Planck* und *Einstein*, wog dieser Verlust so schwer, dass sie nach Wegen suchten, eine Determiniertheit wieder herzustellen. *Einstein* wollte nicht glauben, dass «der liebe Gott würfele». Er vermutete, dass es in der Quantentheorie noch verborgene Parameter gäbe, die eindeutige Zusammenhänge herstellen und damit die Zufälligkeit wieder abschaffen könnten.

Heute haben sich die Studenten schon so an die *Wellenfunktionen*, ihre *statistische Deutung* und ihre *Berechenbarkeit* gewöhnt, dass ihnen die lebhafteste Debatte der zwanziger Jahre um die Deutung der Quantentheorie wie ferne Historie erscheint. Die *Kopenhagener Interpretation* und die *Unschärferelation* sind wie selbstverständlich akzeptiert. Dennoch ist eine neue Debatte aufgelebt um ein altes Einsteinsches Gedankenexperiment. Präzise Beobachtungen sind heute mit modernen Methoden möglich, zum Beispiel mit Atomstrahlen, die mit Laserlicht zum Leuchten angeregt werden. Jedes angeregte Atom sendet zwei Lichtteilchen aus, deren Energie und korrelierte Polarisationszustände bekannt sind. An getrennten Orten werden sie aufgefangen und gezählt, die Zählraten und ihre Korrelation ermöglichen eine ausserordentlich genaue Überprüfung der Quantentheorie.

Einsteins Gegenargument kann heute in der sogenannten *Bellschen Ungleichung* quantitativ formuliert, damit also zahlenmässig nachgeprüft werden. Die Bellsche Ungleichung beruht auf

ganz einfachen, scheinbar unbestreitbaren Annahmen: einmal, dass die Natur aus realen Objekten besteht, die von der Theorie beschrieben werden; zweitens, dass diese Objekte nur miteinander wechselwirken über lokale Ereignisse, also ohne Fernwirkung, sondern durch Zusenden von Teilchen oder Wellen, die nie schneller als das Licht laufen. Schliesslich muss noch der sehr allgemeine Grundsatz der *Induktion* gelten, dass aus widerspruchsfreien Beobachtungen verallgemeinernde Schlussfolgerungen gezogen werden dürfen.

Im vorigen Jahr führten *Alain Aspect* und seine Kollegen in *Orsay* exakte Experimente mit laserbestrahlten Kalziumatomen durch. Ihre Resultate bestätigten mit hoher Genauigkeit die Vorhersagen der Quantenmechanik. Auf den ersten Blick erscheint diese Bestätigung nicht sonderlich aufregend. Dennoch rüttelt das Experiment auf, denn es widerspricht entweder den scheinbar so trivialen, selbstverständlichen Grundsätzen einer realistischen, lokalen Naturbeschreibung oder gar der grundlegenden logischen Methode induktiven Schliessens. *Die Debatte um die Naturerkenntnis in der Quantenmechanik ist wieder in Gang gekommen*. Welche der drei Voraussetzungen der Bellschen Ungleichung sind falsch? Zu dieser Frage gibt es Lösungsvorschläge, die Physik eng mit den Grundfragen menschlicher Erkenntnis, mit dem menschlichen Bewusstsein, zu verknüpfen, damit die objektive Realität physikalischer Theorien zu bezweifeln. Die Theorie erklärt nicht die Objekte, lediglich beschreibt sie menschliches Erkennen der Objekte. Sie sehen, wieviel stärker als zur Zeit der klassischen Physik die Naturwissenschaften mit den Geisteswissenschaften, vor allem der *Erkenntnistheorie*, vielleicht sogar der *Psychologie* verbunden sind: Die Physiker jedenfalls lesen wieder *Kant* und hoffen gleichzeitig auf Interesse an ihren modernen physikalischen Experimenten.

Linearität contra Nichtlinearität

Die strenge Vorausbestimmung, die Determiniertheit der klassischen Physik, beruht auf einer wesentlichen Vereinfachung, nämlich der Annahme linearer Zusammenhänge. Das *Ohmsche Gesetz* ist hierfür einfaches Beispiel: doppelte Spannung ergibt doppelten Strom. Genügend kleine Abweichungen vom Gleichgewicht lassen solche Linearisierung als Näherung fast immer zu. Lineare Wechselwirkungen sind mit relativ einfacher Mathematik zu beschreiben; sie gestatten geschlossene Lösungen; die Differentialgleichungen enthalten also auch keine unerwar-

teten Überraschungen. *Diltheys* Protest gegen die mechanische Naturerklärung betrifft also gerade diese Vereinfachung einer gradlinigen Fortsetzung, denn *Leben ist durch Nichtlinearität gekennzeichnet*: Komplexe Organismen ertragen oft Änderungen äusserer Einflüsse ungestört bis zu einer gewissen kritischen Grenze, an der sie schlagartig mit einer meist fundamentalen Umstellung auf die äusseren Bedingungen antworten. Solches schlagartige, nichtlineare Verhalten ist typisch auch für menschliches Zusammenleben; wir kennen es zum Beispiel bei wirtschaftlichen, bei historischen Abläufen. Eine andere Folge nichtlinearer Beziehung ist es, dass kleine Anlässe oft weit überproportionale Einflüsse ausüben.

Die Physiker haben diese Simplifizierung der Linearisierung in ihren Theorien natürlich früh gemerkt, nur liess sich die eigentlich nötige komplizierte Mathematik in keiner Weise bewältigen. Generelle Aussagen fehlen uns für die Theorie nichtlinearer Gleichungen. Man kennt diese Problematik schon seit langem aus der *Theorie turbulenter Strömungen*. Eine gleichmässige Umströmung, beispielsweise eines Bootes, lässt sich gut berechnen. Jetzt verringern wir in Gedanken die Zähigkeit der umströmenden Flüssigkeit – lange passiert nichts Wesentliches. Jenseits einer kritischen Zähigkeit aber verändert sich die Situation dramatisch: Wirbel und Turbulenzen treten auf. Wegen dieser exemplarischen Bedeutung ist die Theorie der Turbulenzen zurzeit wieder zu einem ungewöhnlich lebendigen Forschungsthema geworden. Neue Verfahren stehen heute zur Verfügung. Die *grossen elektronischen Rechner* können in kurzer Zeit viele der möglichen Lösungen Schritt für Schritt verfolgen und für eine grosse Breite äusserer Bedingungen durchspielen. Wir sind nicht mehr auf die mathematisch geschlossene Form der Lösung allein angewiesen, wie es unsere Vorgänger waren.

Chaos, Katastrophen, Stabilität

Nichtlineare Bewegungsgleichungen zeigen ein typisches Verhalten, das man *Bifurkation*, *Aufgabelung* nennt. Wie an einem Scheidewege trennen sich plötzlich die Pfade bei einem bestimmten kritischen Wert. Aus der eintönig vorherbestimmten Bahn linearer Bewegungen sind durch die Berücksichtigung der schwierigen nichtlinearen Zusammenhänge wieder Vielfalt und Wandel in das physikalische Geschehen gekommen; Begriffe wie *Chaos*, *Katastrophe* und *Stabilität* tauchen in

der physikalischen Sprache auf, aber nicht als schwammige Bezeichnungen, sondern mit *strenger Definition*, die Systematik und Aussagekraft begründen kann. Nichtlineare Phänomene also werden heute nicht mehr verdrängt, sondern sind wesentlicher Teil moderner physikalisch-mathematischer Arbeit geworden.

Der grosse Computer gestattet uns heute viele andere Untersuchungen, die in früherer Zeit kaum denkbar waren, allenfalls durch eine sklavische Hingabe an lange, stumpfsinnige Rechnungen. Das *Element des Zufalls* kann jetzt viel ernster genommen werden als früher, wo nur einfache Mittelwertberechnungen möglich waren, sie beschrieben immerhin das Verhalten eines Gases aus der Überlagerung und Mittelung der Bewegungen der vielen einzelnen Atome.

Monte-Carlo-Verfahren

Eine neue Methode heisst: «Monte-Carlo-Verfahren». So wie das Roulette eine Folge zufälliger Zahlen erzeugt, lässt sich auch der Computer nutzen. Damit kann man statistisch bestimmte Vorgänge mit grossen Zahlen von Ereignissen auf dem Rechner simulieren. Nehmen wir das Beispiel des *elektrischen Stromflusses durch einen Halbleiter*. Je nach Flugrichtung und Energie können die Elektronen verschiedenartige Zusammenstösse erleiden, aufeinander prallen, Gitteratome zu Schwingungen anregen oder mit Verunreinigungen kollidieren. Jeder Vorgang besitzt seine *modellmässige Beschreibung*. Auf dem Rechner werden viele solche Vorgänge einzeln simuliert und dann zusammengezählt, um den Gesamtstrom zu erhalten. Danach vergleicht man, ob die Simulation ähnliche Ergebnisse liefert wie sie im Experiment beobachtet werden. Daraus ergeben sich wiederum Rückschlüsse auf die verwendeten modellmässigen Erklärungen. Solche Simulationen werden in zunehmendem Masse für *Vielteilchensysteme*, besonders mit komplizierten – z. B. nichtlinearen – Wechselwirkungen durchgeführt. Unsere Methodik der Naturbeschreibung ist damit um ein neues Verfahren bereichert, das zwischen dem klassischen Experiment und der mathematischen Theorie steht. Obwohl solche Monte-Carlo-Rechnungen eigentlich nur Plausibilitäten statt Beweise liefern, sind sie doch für sonst nicht theoretisch geschlossen beherrschbare Systeme sehr wertvoll und springen ein für Theorien alten Stils. Das Element des Zufalls, diese gloriose Unsicherheit, ist also als legitimer Bestandteil physikalischer Forschung etabliert. *Dilthey*, der über die *«leere und öde Wiederholung von Naturlauf»*

klagte, hätte sicher an Monte-Carlo-Rechnungen seine Freude. Die äussere Eleganz der Spielbanken allerdings fehlt, manchmal sind solche Rechnungen recht brutale Gewaltakte: Neulich erfuhr man von einer Untersuchung moderner Symmetrieprinzipien der Elementarteilchen, die auf einem der heute allergrössten Rechner nicht weniger als 80 Stunden ununterbrochen «spielte».

Stirb und Werde

Am 31. Juli 1814 kam *Goethe* hierher nach Wiesbaden, dem von ihm geliebten «heilsamen Bade». Das Wetter war prächtig, er war guter Stimmung, schrieb sein Gedicht «Selige Sehnsucht»: «*Sagt es niemand, nur den Weisen*» mit dem Schluss: «*Und solange Du das nicht hast, dieses Stirb und Werde – bist Du nur ein trüber Gast auf der dunklen Erde*». Das Stirb und Werde vermissten er und viele andere Kritiker am stärksten im Bilde der Physik. Entstehung, Wandel und Vergehen bieten schwierige Probleme. Schon eine vollständige Beschreibung des Übergangs von Eis zu Wasser, ein so alltäglicher wie lebensbestimmender Vorgang, überfordert selbst die heutige Physik.

Prinzip der Physik ist es, vorrangig nach *Konstantem*, nach *Unveränderlichem*, nach *Invarianten* zu suchen. Die berühmten *Erhaltungssätze* für Energie, für Impuls oder Ladung sind hierfür Beispiele. Der Erfolg der Naturforschung liegt ja gerade darin, in einer sich ständig wandelnden Welt so zu abstrahieren, dass das Wesentliche und Bleibende erkannt wird. Folgerichtig muss so das *Dynamische*, das *Wandelbare untergeordnet* werden. Tatsächlich wird oft in physikalischen Theorien jede zeitliche Änderung bewusst unterdrückt, so wird gleichermassen ein *zeitlich eingefrorener Gleichgewichtszustand* betrachtet. Das Stirb und Werde war zu schwierig, zunächst musste das ungestörte Gleichgewicht behandelt werden. Darum erklang der Vorwurf gegen das Tote in den Naturwissenschaften.

Phasenübergänge

Unsere heutigen Methoden gestatten aber, schon weitaus besser den Wandel zu betrachten und ihn zu beschreiben. Der Physiker spricht von Phasenübergang. Besonders in den komplizierten Systemen sehr vieler Teilchen, also etwa einem *Metallkristall*, wird die Änderung des *magnetischen Verhaltens*

oder der schlagartige Einsatz der *Supraleitung*, des plötzlichen *Verschwindens jeglichen elektrischen Widerstands*, heute intensiv studiert. Sorgsame Messungen werden in der Nähe der Übergangstemperatur vorgenommen, um die Gesetzmässigkeit der *Temperaturabhängigkeit* zu ergründen. *Am Phasenübergang ändert sich die Ordnung des Systems, seine Symmetrie, in ganz charakteristischer Weise.* Im Eise sitzen die Wassermoleküle in räumlich strenger Ordnung, im Wasser ist diese Ordnung aufgehoben, die Symmetrie des regelmässigen Gitters des Eiskristalls verändert.

Diese Anschauung lässt sich so weit verallgemeinern, dass sie in sämtliche Bereiche der modernen Physik Eingang gefunden hat: *Symmetriebrechung* und *Änderung eines Ordnungsparameters* sind Konzepte, die sowohl in der ganz aktuellen Physik der *Quark-Elementarteilchen* wie beim Verständnis eines *Magneten* genutzt werden. Ohne die Idee der Symmetriebrechung wäre es unmöglich gewesen, zwei der vier elementaren Kräfte der Natur – elektrische und schwache Wechselwirkung – trotz ihrer Unterschiede in einer Theorie zu vereinigen. Wir suchen nicht mehr nur Symmetrien der Natur, sondern erforschen mit dem Aufbrechen der Symmetrie durch äussere Einflüsse den *Wandel der Strukturen*, das *Stirb und Werde*. Es ist eine schwierige und vielfältige Aufgabe, ihrer Lösung werden die Physiker noch viel Zeit widmen.

«Nicht-Tendenzen»

Wer heute eine physikalische Zeitschrift aufschlägt, wundert sich über die vielen Begriffe, die mit der negierenden Vorsilbe nicht- beginnen. Wir hörten schon von der Nichtlinearität, dem nicht mehr Symmetrischen oder von der Unschärferelation, die auf der Nichtvertauschbarkeit zweier Messungen beruht. Tatsächlich findet sich diese «Nicht-Tendenz» überall. Die Elementarteilchen werden durch die Mathematik der *Nicht-Abelschen Gruppen* beschrieben, bei denen es um nichtvertauschbare Operationen geht. Die so gefundenen *Quarks*, Bestandteile der Kernteilchen und der Mesonen, tragen *nichtganzzahlige Ladungen*. *Nichtgleichgewichte* werden mit der *Thermodynamik nichtumkehrbarer Reaktionen* behandelt. Die *Mathematiker* untersuchen komplizierte Funktionen, die *nicht mehr stetig* und auch *nicht mehr differenzierbar* sind, also nicht mehr glatte Kurvenverläufe beschreiben. Solche Kurven und Figuren ähneln nicht

mehr den Dreiecken aus Euklids Geometrie, für die sich *Frischs* Don Juan begeisterte – sie sind sogar in ihren Dimensionen nicht mehr wie früher festgelegt, sondern haben *nichtganzzahlige Dimension*. Eine mit ständigen Sprüngen und Krümmungen sich windende, ein Flächenstück ausfüllende Kurve liegt in ihrer Dimension zwischen der zweidimensionalen Ebene und der eindimensionalen Linie. Diese Geometrie nichtganzzahliger Dimension zeigt nicht nur eine vielfältige Schönheit wie Schneeflocken, auch physikalischen Problemen, zum Beispiel Phasenübergängen, ist sie überraschend gut angemessen – ähnlich wie die nichteuklidische Geometrie der Relativitätstheorie so gut passt.

Verzicht auf einschränkende Tabus

Diese *unübersehbare Häufung der «Nichts»* beweist überall ein *Brechen alter Tabus*, die in früherer Forschung noch strikt galten. Die *interessante Physik von heute ist also revolutionär*. Eine Revolution in der Physik aber muss *behutsam* und *bewahrend* vorgehen. Keineswegs wird nämlich alles Bisherige abgelehnt oder ins Gegenteil verkehrt. Jede gute neue Theorie muss vielmehr das Bewährte und Erwiesene als Spezialfall weiterhin enthalten. Nur die Allgemeinheit der Gültigkeit wird eingeschränkt und einem neuen Überbau anvertraut. Relativitätstheorie und Quantenmechanik erklären ja auch die Newtonsche Mechanik nicht für falsch, sondern beschränken sie lediglich auf makroskopische Systeme im Bereich von Geschwindigkeiten, die weit unter der des Lichts liegen. Ein Physiker kann also nur *konservative* Revolutionen betreiben! Der heute in allen Teilbereichen der Physik beobachtete Verzicht auf die einschränkende Tabus bedeutet eine wesentliche Erweiterung – allerdings auf Kosten der klassischen Einfachheit und Geschlossenheit der Darstellung.

Selbstorganisation der Materie

Die neuen Methoden stimulieren physikalisch-mathematische Forschung auf einem Gebiet, dem die kalte Pracht der klassischen Mechanik mit ihren anonymen Massepunkten steril gegenüberstand: der Selbstorganisation, der Ausbildung von scheinbar ganz unerwarteten und unwahrscheinlichen Formen und Rhythmen. Das Komplizierte, das System aus vielen einzelnen Individuen, wird nicht mehr verteilt oder bis zur Unkenntlichkeit vereinfacht. Komplizierte Systeme mit inneren Wechselwirkungen sind heute legitime Objekte der Forschung, die mit nichtlinearen Einflüssen in Vielteilchensystemen das Zusammenwirken beschreibt. *Hermann*

Haken fasst diese Bemühungen in der neuen Lehre der «*Synergetik*» zusammen. Viele Beispiele der *spontanen* Ausbildung von Gestalten oder Bewegungsabläufen bei Wolken, Lasern, chemischen Reaktionen, der Dynamik biologischer Populationen werden bereits erfolgreich behandelt.

Zwei wesentliche Aspekte, von *Dilthey* und seinen Nachfolgern besonders in den Naturwissenschaften vermisst, sind *nicht mehr verdrängt*: einmal *Individuelles* und *Singuläres*, zweitens die gleichzeitige, gemeinsame Wirkung, das *Simultane*. Von dieser neuen Tendenz der modernen Physik werden wir in den nächsten Jahren viel Spannendes hören – vermutlich nicht in der eleganten Geschlossenheit klassischer Methodik, sondern zunächst mehr exemplarisch, im schrittweisen Verstehen einzelner Modellfälle, durch Berechnungen und Simulationen – zu immer komplizierteren und allgemeineren Fällen hin. Ich hoffe, Sie erahnen, dass die alten Einwände, Vorbehalte und Urteile gegen die Naturwissenschaften und ihre vermeintlich tötenden Vereinfachungen auf neue, starke Gegenkräfte stossen.

Symmetriebrechung in der Festkörperphysik

Artenreichtum und *Individualität* sind – im Gegensatz etwa zur Biologie oder den Geisteswissenschaften – in der Physik zunächst bewusst unterdrückt worden, weil sie der zerlegenden Methodik und dem Anspruch auf Universalität entgegenstanden. Darunter hat beispielsweise die *Festkörperphysik*, mein eigenes Gebiet, noch bis weit in unser Jahrhundert gelitten. Die Allgemeinheit und Wiederholbarkeit ihrer Ergebnisse genügte den üblichen physikalischen Ansprüchen nicht. Wichtige Eigenschaften von Festkörpern, so etwa die *elektrische Leitfähigkeit* oder die *plastische Verformbarkeit*, schwankten in scheinbar zufälliger Weise von Kristall zu Kristall. Diese unreine, diese «*Dreckeffektphysik*» wäre am liebsten von vielen verbannt worden und zu einer beschreibenden, katalogisierenden Disziplin relegiert worden; gleichzeitig zeigt sich aber auch ihr Charakter einer Vermittlerin zu den «*lebendigvielfältigen*» Wissenschaften.

Der fast unglaubliche Siegeszug der Festkörperphysik, ihre Ausweitung und ihr Einfluss auf die *moderne Technik* beruhen aber genau auf dem Verständnis jener Dreckeffekte, ihrer Beherrschung und systematischen Nutzung. Winzigste Abweichungen von der Symmetrie eines *Silizium-Kristalls*,

Symmetriebrechungen also durch Zugabe weniger fremder Atome oder durch fehlende oder überschüssige Atome, durch Baufehler und Oberflächen bewirken trotz ihrer nahezu verschwindend geringen Zahl die Variationen im Gesamtkristall. Heute werden die elektronischen Funktionen eines integrieren Schaltkreises, zum Beispiel eines Mikroprozessors, erzeugt durch die gezielte und bis auf atomare Dimensionen kontrollierte Zugabe solcher geringster Abweichungen im Aufbau des Festkörpers. Damit ist uns eine schier unerschöpfliche Fülle von Möglichkeiten eröffnet. Wir können Festkörper nach individuellen Wünschen masschneidern; die Amerikaner benutzen sogar das antropomorphe Wort der «Personalisierung» von Schaltkreisen. Einige bedauern, dass heute so viele Forscher in der Festkörperphysik nicht

mehr dem Prinzipiellen dienen, sondern Mosaiksteine sammeln. Dieser Trend sollte nicht nur bedauert werden, stellt er doch eine Methodik zur Hinwendung und Bewältigung der Vielfalt dar – die Festkörperphysik dient tatsächlich vor allem der *Biologie* und *Medizin* als ungemein wichtige Vorreiterin in experimentellen Methoden und der Interpretation komplizierter vielatomiger Systeme.

Neue und schwierige Aufgaben

Die moderne Physik steht in allen ihren Teildisziplinen vor vielen neuen und schwierigen Aufgaben, sie besitzt aber auch Mittel und Wege, die Aufgaben zu lösen. *Physik ist nicht nur Grundlage der Technik, sondern wesentlicher Teil unse-*

res kulturellen Lebens. Gerade die neuen Wege, die ich zu schildern versucht habe, lassen auf Annäherung an andere Wissenschaft hoffen. Verkennten dürfen wir aber nicht die Schwierigkeiten im Verständnis, die bestimmt noch grösser werden als für das abgeschlossene, sicherlich leichter überschaubare Gebäude der klassischen Physik. Wir brauchen *Vermittler* zum besseren gegenseitigen Verständnis.

Adresse des Verfassers: Prof. Dr. H. J. Queisser, Direktor des Max-Planck-Instituts für Festkörperforschung, Heisenbergstr. 1, D-7000 Stuttgart 80.

Der Vortrag wurde leicht gekürzt. Zeichnungen im Text und Zwischentitel durch die Redaktion.