

# Klassische Mechanik im Zeitalter der Raumfahrt?\*)

Von Professor K. Magnus, München

## 1. Die Mechanik als abgeschlossenes Teilgebiet der Physik

Vor kurzem hat C. F. von Weizsäcker an der Technischen Hochschule München einen sehr beachtlichen Vortrag<sup>1)</sup> gehalten. Darin findet sich ein Satz, der mir nicht hinreichend genug abgesichert zu sein schien und der damit zum Ausgangspunkt von Überlegungen wurde, deren Ergebnis vielleicht von allgemeinerem Interesse sein kann. Herr von Weizsäcker sagte bei einer Analyse der Situation der heutigen Physik u. a.: „So ist die klassische Mechanik etwa für die Anwendung auf Himmelsmechanik oder auf technische Mechanik abgeschlossen und bedarf keiner weiteren Verbesserung.“

Eine solche Aussage aus berufenem Munde legt die Frage nahe, ob wir auch weiterhin der klassischen Mechanik im Ausbildungsprogramm einen so breiten Raum geben sollten, wie es bisher im allgemeinen geschieht. Aus diesem Grunde wurde die Überschrift mit einem Fragezeichen versehen, und ich möchte diese Ausführungen als einen Beitrag zur Klärung der Frage auffassen, ob unser derzeit übliches Vorgehen sinnvoll ist — worüber nachzudenken jeder Hochschullehrer nicht nur berechtigt, sondern auch verpflichtet ist. Angeregt durch die zuvor zitierte Bemerkung habe ich das einschlägige Schrifttum zu Rate gezogen und möchte nun über einige dabei gefundene Ergebnisse berichten, auch wenn — oder vielleicht gerade weil — sie zum Teil im Widerspruch zu landläufigen Anschauungen stehen.

Zunächst muß ich Herrn von Weizsäcker Gerechtigkeit widerfahren lassen: Der zitierte Satz klingt, aus dem Zusammenhang gerissen, anders, als er vermutlich gemeint ist. Von Weizsäcker bezieht sich auf Heisenberg, der in einer seiner Veröffentlichungen<sup>2)</sup> von den sogenannten „abgeschlossenen Theorien“ spricht. Als markantestes Beispiel führt er die klassische Mechanik an. Aber das Wort „abgeschlossen“ ist hier im Sinne von „vollständig“ gebraucht, so wie man in der Mathematik von einem vollständigen Axiomensystem dann spricht, wenn die eingeführten Axiome ausreichen, das Gebäude des betrachteten Wissensgebietes in allen wesentlichen Teilen aufzurichten.

Widerspruch muß jedoch angemeldet werden, wenn behauptet wird, daß eine Theorie keiner weiteren Verbesserung bedürfe oder nicht mehr verbesserungsfähig sei. Man kann demgegenüber heute feststellen, daß gerade das Gebiet der klassischen Mechanik auch in den letzten Jahren erheblich verbessert werden konnte, und zwar nicht nur in den Methoden, sondern gerade auch in den Grundlagen. Das hat freilich zur Folge, daß wir heute die Begriffe „klassische Mechanik“ und „Newtonsche Mechanik“ kaum noch als Synonyma betrachten dürfen. Gerade dies aber tun die meisten

\*) Gekürzte Fassung der am 15. Februar gehaltenen Antrittsrede anlässlich der Übernahme des Lehrstuhls und Instituts B für Mechanik der Maschinenbau-Fakultät der TH München.

1) C. F. v. Weizsäcker, in Jahrbuch 1965 der TH München

2) W. Heisenberg, Physik und Philosophie, Ullstein-Taschenbuch Nr. 149

Forscher, die sich im Laufe der letzten Zeit zu diesen Fragen geäußert haben. Darauf wird noch zurückzukommen sein.

Es läßt sich wohl kaum mit Sicherheit feststellen, wer zuerst die These von der Abgeschlossenheit der klassischen Mechanik aufgestellt hat. Aber man gewinnt den Eindruck, daß diese These, nachdem sie einmal aus berufem Munde geäußert wurde, von den nicht weniger berufenen Nachfolgern unverändert übernommen wurde. Wir finden Bemerkungen dieser Art bereits bei Planck, bei von Laue und bei Born. Man kann sogar auch weiter in das ausgehende 19. Jahrhundert zurückgehen. Der berühmte Kirchhoff soll die Ansicht vertreten haben, es seien im weiten Feld der physikalischen Forschung keine wesentlichen, entscheidenden neuen Entdeckungen mehr zu erwarten. Weiter wird berichtet, daß Philipp von Jolly auf eine Anfrage des jungen Max Planck die Antwort gegeben haben soll, die Physik sei eine im wesentlichen abgeschlossene Wissenschaft, deren Studium nicht mehr recht lohne. Heute wagt niemand mehr, von einer Abgeschlossenheit der Physik zu sprechen; der Mechanik aber, diesem Teilgebiet der Physik, wird die Abgeschlossenheit dauernd von neuem attestiert.

## *2. Was ist klassische Mechanik?*

Um weiterhin Mißverständnisse auszuräumen, soll zunächst genauer definiert werden, was hier unter klassischer Mechanik verstanden werden soll. In Übereinstimmung mit den meisten Physikern soll darunter eine Mechanik verstanden werden, die durch drei Bedingungen gekennzeichnet ist: sie ist 1. nicht-relativistisch, 2. ungequantelt und 3. deterministisch.

Die erste Bedingung bedeutet eine Einschränkung hinsichtlich der zu betrachtenden Geschwindigkeiten. Die zweite schließt gar zu kleine Energie- oder Impulsbeträge aus und bedeutet damit praktisch ein Abspalten der Teilchenphysik. Die dritte Bedingung hängt eng mit der zweiten zusammen, kann aber — worüber später noch etwas zu sagen sein wird — auch völlig unabhängig davon betrachtet werden. Bedeutende Physiker wie z. B. Born sind zwar der Ansicht, daß die Relativitätstheorie noch zur klassischen Mechanik zu zählen sei, da sie gewissermaßen als deren Krönung und zugleich Abschluß angesehen werden könne. Gegen diese Auffassung spricht jedoch die radikale Korrektur, die Einstein an zwei tragenden Säulen der Newtonschen Mechanik, an den Begriffen Raum und Zeit, vorgenommen hat. Absoluter Raum und absolute Zeit erwiesen sich — um eine Formulierung von Hermann Weyl zu gebrauchen — als die leeren Mietskasernen, in die wir unsere Erfahrung eingebettet haben. Für das vierdimensionale Raumzeitkontinuum der Relativitätstheorie ist aber in der klassischen Mechanik kein geeigneter Platz.

Abgesehen von den drei genannten Bedingungen könnte man die klassische Mechanik auch dadurch charakterisieren, daß man sie als jene Mechanik auffaßt, deren Grundlagen von den Klassikern — vor allem von Newton, Euler, Bernoulli, Laplace, Hamilton und Jacobi — gelegt wurden. Man hat das sogenannte Ende dieser Mechanik ziemlich genau auf die Jahrhundertwende datiert. Tatsächlich erschienen um 1900 drei grundlegende Arbeiten: Einsteins Veröffentlichungen zur Relativitätstheorie (1905), Plancks Mittei-

lungen über das Wirkungsquantum (1900) und schließlich das fundamentale Werk von Willard Gibbs über statistische Mechanik (1902).

Das letztgenannte Werk enthält eine Darstellung der kinetischen Wärmetheorie, durch die letztlich der zuvor als qualitativ betrachtete Unterschied zwischen der Wärmelehre und der Mechanik beseitigt wurde. Damit hatte die klassische Mechanik zwar einen großen Erfolg zu verzeichnen, sie mußte aber wegen der hoffnungslosen Kompliziertheit der betrachteten Viel-Teilchen-Systeme zu völlig neuen Methoden greifen. Vor Planck und Born wurde so der Wahrscheinlichkeitsbegriff in die Mechanik eingeführt und damit ein Einbruch in die bis dahin deterministische Physik vollzogen. Denn seit Laplace die Hypothese vom streng determinierten Ablauf des physikalischen Geschehens mit aller Klarheit formuliert hatte, galt es als selbstverständlich, daß Vergangenheit und Zukunft als durch die Gegenwart exakt bestimmbar angesehen werden können. Die Wahrscheinlichkeit wird dabei zu einer Art Krücke, deren man sich bedienen muß, solange die Kenntnis der Gegenwart unzureichend ist.

Natürlich war auch den Klassikern klar, daß man die Anfangsbedingungen nie so genau bestimmen kann, um im Sinne der deterministischen Physik die Zukunft genau berechnen zu können. Aber das Konzept einer deterministischen Welt war wohl so berauschend, daß man es als Idealmodell nicht aufzugeben gedachte. Erst Born und später vor allem Wiener haben mit der „pseudodeterministischen Unredlichkeit“ der Klassiker gebrochen. Bei der weiteren Entwicklung der statistischen Physik wurden dann freilich die Zusammenhänge so kompliziert und die Darstellungen so subtil, daß es oft nur sehr schwer möglich ist, zwischen physikalischen Begriffen und den formalen Mitteln zu ihrer mathematischen Erfassung zu unterscheiden. Die Frequenzdarstellungen der klassischen Akustik für zeitlich begrenzte Töne oder die wellenmechanische Auffassung der Elementarteilchen mögen hier als Beispiele genannt werden.

### 3. Die uninteressante Mechanik

Kehren wir zur klassischen Mechanik zurück. Was nach Ausscheiden relativistischer, quanten- und wahrscheinlichkeitstheoretischer Überlegungen noch übrig bleibt, ist beachtlich genug, so daß selbst Born, dieser Bahnbrecher der modernen Physik, zugeben muß, daß die klassische Mechanik das zuverlässigste Instrument der gesamten exakten Naturwissenschaften ist. Und von Laue<sup>3)</sup> bezeichnet die klassische Mechanik als einen „Tempel von majestätischer Architektonik und überwältigender Schönheit“. Das ist nett gesagt und sicher auch richtig. Aber ist es nicht verständlich, daß die Physiker auf die Dauer keinen Gefallen daran finden, nur Tempeldiener zu sein? So ist es wohl verständlich, daß viele Physiker der Mechanik den Rücken kehrten, zumal moderne Theorien einen geradezu faszinierenden Sog ausübten. Die Jagd auf Elementarteilchen und die — Fantasie und strenge geistige Zucht zugleich fordernden — Deutungen ihres Verhaltens nahmen die Physiker so in Anspruch, daß sie die Mechanik aus den Augen verloren. Mechanik, obwohl der Schoß, aus dem die anderen Bereiche der

3) M. v. Laue, Geschichte der Physik, Ullstein-Taschenbuch Nr. 222

Physik entsprossen waren, war uninteressant geworden, sie wurde als nicht mehr verbesserungsfähig postuliert.

Man sehe sich einmal auch moderne Lehrbücher der theoretischen Physik an. Sie alle enthalten einleitende Kapitel über Mechanik, aber ausnahmslos in konventioneller Darstellung, die meist von guten Vorgängern übernommen wurde. Man gewinnt den Eindruck, daß hier Mechanik als notwendige Vorübung, gewissermaßen als lästiges Muß zwar noch behandelt wird, daß die Autoren aber froh sind, wenn die Mechanik überstanden ist und interessantere — fast könnte man sagen lebendigere — Bereiche der Physik dargestellt werden können. Ich denke hier nicht nur an bewährte Standardwerke der theoretischen Physik, etwa an das von Joos, sondern auch an so inkonventionelle Bücher wie das Werk von Weizel oder das zweifellos beachtenswerte Buch von Landau und Lifschitz.

Weil nun aber die heutigen Physiker, vollauf beschäftigt mit kernphysikalischen Problemen, einseitig orientiert sind, muß ihnen das Recht, allgemeine Urteile über Mechanik zu fällen, abgesprochen werden. Moderne Physiker denken bei dem Wort Mechanik doch nur an die einleitenden Kapitel ihrer Lehrbücher, d. h. aber an das, was vor etwa 70 Jahren schon bewährte Mechanik war. Von wenigen Ausnahmen abgesehen nehmen sie Entwicklungen, die sich in den letzten Jahrzehnten vollzogen haben, anscheinend nicht zur Kenntnis. Das ist gewiß ihr gutes Recht, jedoch verpflichtet es sie, sich dann allgemeiner Urteile über Mechanik zu enthalten.

#### *4. Fortschritte in Himmelsmechanik und technischer Mechanik*

Wenigstens in Umrissen soll hier angedeutet werden, daß die klassische Mechanik, im Sinne der zuvor gebrachten Abgrenzung, sowohl bezüglich der Ergebnisse als auch in den Grundlagen erweitert und verändert worden ist. Diese Veränderungen betreffen gerade auch jene beiden Gebiete, die von Weizsäcker in dem anfangs gebrachten Zitat als Musterbeispiele abgeschlossener Teilgebiete erwähnt hat, Himmelsmechanik und technische Mechanik.

Die Himmelsmechanik galt seit jeher als eine Art Paradies der klassischen Mechanik. Hier hat sie ihre größten Erfolge zu verzeichnen, weil dabei die notwendigen Voraussetzungen im allgemeinen sehr gut erfüllt sind. Man denke nur an die geradezu sprichwörtliche Genauigkeit astronomischer Voraussagen, z. B. von Sonnen- und Mondfinsternissen. Dennoch ist auch auf diesem Gebiet eine völlig neue Situation entstanden, die die traditionellen Astronomen zum Teil bestürzt hat. Die erhabene Ruhe der Bahnen naturgegebener Himmelskörper wurde durch künstliche Himmelskörper gestört. Damit wurde aus einer kontemplativen Astronomie eine aktive, sogar experimentelle Himmelsmechanik. Sie ist gekennzeichnet durch die Schaffung künstlicher Satelliten, Planeten und Raumsonden, deren Bahnen weitgehend nach Belieben ausgelegt werden können. Darüberhinaus sind Himmelskörper geschaffen worden, die während ihres Fluges im All durch Ausüben zusätzlicher Kräfte Bahnänderungen vornehmen können, die also gesteuert zu fliegen in der Lage sind.

Es ist verständlich, daß diese völlig neue Situation auch neue Aufgabenstellungen entstehen ließ, zu deren Lösungen wiederum neuartige Metho-

den entwickelt werden mußten. Die in der klassischen Astronomie weitgehend verwendete Hamiltonsche Theorie reicht zur Berechnung der Bahnen künstlicher Himmelskörper vielfach nicht mehr aus.

Bei der Aufgabe, günstige Bahnen für gelenkte Raumschiffe auszurechnen, sind nämlich Steuerfunktionen notwendig, die nicht mehr stetig sind, sondern aus konstruktiven Gründen meist stückweise stetig gemacht werden. Diese Tatsache schließt aber ein Bestimmen optimaler Bahnen mit klassischen Methoden aus.

Es wurden Verfahren entwickelt, um trotzdem Lösungen zu finden: die dynamische Programmierung des Amerikaners Bellmann und das Maximumprinzip des sowjetischen Mathematikers Pontrjagin sollen hier erwähnt werden. Das letztgenannte Verfahren kann als eine unmittelbare Verallgemeinerung der bekannten klassischen Variationsmethoden aufgefaßt werden. Es läuft darauf hinaus, einen Integralausdruck möglichst groß zu machen. Die in das Integral eingehenden Steuergrößen müssen dabei — unter Berücksichtigung von einschränkenden Bedingungen — so variiert werden, daß die resultierenden Zustandsfunktionen optimal verlaufen. Als charakteristisches Beispiel, das der Himmelsmechanik und der technischen Mechanik zugleich angehört, sei hier die Aufstiegsbahn einer Rakete oder das Bahnprogramm einer Mondsonde genannt.

Aber nicht nur die Bahnbewegungen der künstlichen Himmelskörper haben Überraschungen gebracht. Auch die Drehbewegungen von Satelliten um ihren Massenmittelpunkt gaben Anlaß zu vertieften Untersuchungen. Seit Euler ist bekannt, daß ein frei drehbar gelagerter starrer Körper stabile Drehbewegungen nur um solche Achsen ausführen kann, die dem größten oder dem kleinsten Trägheitsmoment entsprechen. Drehungen um die „mittlere Hauptachse“ sind instabil. Voraussetzung hierzu ist freilich, daß der Körper „kräftefrei“ gelagert ist, wozu üblicherweise eine Unterstützung im „Schwerpunkt“ vorgeschlagen wird. Diese Voraussetzung ist aber in einem zentralsymmetrischen Schwerfeld der Erde grundsätzlich nicht streng erfüllbar. Es gibt nämlich keinen körperfesten Punkt, durch den bei beliebiger räumlicher Orientierung des Körpers stets die Wirkungslinie der resultierenden Massenanziehungskraft — also der Schwerkraft — hindurchgeht.

Für genauere Betrachtungen muß daher der in der allgemeinen Physik, vor allem aber in der technischen Mechanik so vertraute und zweifellos nützliche Begriff des Schwerpunktes aufgegeben werden. Im zentralsymmetrischen Gravitationsfeld gibt es keinen Schwerpunkt! Man hat statt dessen mit dem Massenmittelpunkt zu rechnen. Für diesen Massenmittelpunkt gelten auch die Bahnen, die in der Himmelsmechanik ausgerechnet werden. Aber ein frei seine Bahnen im Schwerfeld durchlaufender Körper — ein Satellit oder ein Raumschiff beispielsweise — ist bezüglich des Massenmittelpunktes nicht „kräftefrei“. Vielmehr sind Momente vorhanden, die aus der Tatsache resultieren, daß die näher zum Anziehungszentrum gelegenen Teile des Körpers stärker angezogen werden als die weiter entfernten. Das Restmoment sucht stets die Achse des kleinsten Hauptträgheitsmomentes, die „lange Achse“ eines Körpers, in die Richtung zum Anziehungszentrum zu ziehen. Ein stabförmiger Körper, der so als Satellit die Erde umkreist, daß die Stabachse dabei stets zum Anziehungszentrum, also

zum Erdmittelpunkt zeigt, befindet sich deshalb in einem stabilen statischen Gleichgewicht. Dynamisch stabil ist diese Bewegung jedoch nur, wenn die zur Aufrechterhaltung der erdfesten Ausrichtung notwendige Absolutdrehung um die Achse senkrecht zur Bahnebene mit der Achse des größten Hauptträgheitsmomentes, also mit der „kurzen Achse“ des Körpers, zusammenfällt. Drehungen um die mittlere Achse sind — entsprechend dem Eulerschen Fall — instabil.

Diese Überlegungen gelten nun nicht nur für stabförmige, sondern für beliebig gestaltete Körper. Auch der natürliche Satellit unserer Erde, der Mond, gehorcht den hier erwähnten Gesetzmäßigkeiten. Er ist erdorientiert, denn er zeigt uns stets das gleiche Gesicht. Im Kräftespiel zwischen Erdanziehung und Zentrifugalkraft wird er ellipsenförmig deformiert, so daß die lange Achse zum Erdmittelpunkt zeigt. Da er außerdem eine Absolutdrehung von der Periode des Umlaufs besitzt, erleidet er eine Abplattung, die die senkrecht zur Bahnebene stehende Hauptachse zur kurzen Achse werden läßt.

Nun liegt der Einwand nahe, daß doch der Einfluß der Schwerfeldgradienten um so geringer ist, je kleiner die betrachteten Körper sind. Wenn nur die betrachteten Körper hinreichend klein seien, könne man das Schwerfeld sicher als homogen betrachten. So einleuchtend diese Überlegung ist, sie beruht dennoch auf einem Trugschluß. Denn nicht die Größe des Körpers (relativ zur Erde), sondern die Art des Problems, das betrachtet wird, entscheidet darüber, ob der Schweregradient vernachlässigt werden darf oder nicht. Starre Satelliten können beim Umkreisen der Erde Pendelbewegungen infolge des vom Schweregradienten herrührenden Restmomentes ausführen, deren Schwingungszeiten in der Größenordnung von einer Stunde liegt. Diese Zeit hängt nur von der Körperform — genauer vom Verhältnis der Trägheitsmomente — ab, nicht aber von der absoluten Größe des Satelliten. Auch die nur stecknadelgroßen Kupfernadeln, die man bei einem Weltraumversuch als Mikrosatelliten auf eine Umlaufbahn um die Erde geschickt hat, waren dem Einfluß des Gradientenfeldes ausgesetzt und stellten sich deshalb im Verlaufe einiger Tage in die Lage ein, die ein stabiles Umlaufen garantiert und bei der die langen Achsen zum Erdmittelpunkt zeigen.

Effekte der beschriebenen Art sind in der terrestrischen Mechanik, vor allem natürlich in der technischen Mechanik, bisher stets vernachlässigt worden. Es war daher sehr überraschend, daß in den letzten Jahren nun auch technische Probleme bekannt geworden sind, bei denen der Gradient des Schwerfeldes berücksichtigt werden muß. Bemerkenswerterweise gilt dies sogar auch dann, wenn die betrachteten Geräte nur etwa die Größe eines Apfels haben. Es handelt sich hier um die in der Technik der Trägheitsnavigation als Sensoren verwendeten Kreisel- oder Pendel-Geräte, die nach einem bekannten Satz von Schuler im allgemeinen auf Eigenschwingungszeiten von 84 Minuten abgestimmt werden müssen. Das ist gerade die Schwingungszeit eines Punktpendels von der Länge des Erdradius in einem hypothetischen konstanten Schwerfeld. Die enormen technischen Fortschritte, die im Laufe der letzten Jahrzehnte bei der Realisierung von derartigen Pendeln langer Schwingungsdauer gemacht wurden, machten es nun zugleich auch notwendig, die Gradienteneffekte zu berücksichtigen.

Übrigens gibt die bewundernswerte Erhöhung der technisch erreichbaren Genauigkeiten nun eine durchaus ernst zu nehmende Möglichkeit, mit Hilfe eines hochgezuchteten Kreisels in einem Satelliten relativistische Effekte zu messen, also mit technischen Mitteln bis an die Grenze der Klassischen Mechanik vorzustoßen. Vorbereitungen zur praktischen Durchführung eines solchen Experimentes werden seit einiger Zeit von einer Forschergruppe in den USA<sup>4)</sup> getroffen.

### 5. Reform der Grundlagen durch die Kontinuumsmechanik

Die bisher erwähnten Beispiele gehören zum Bereich der Stereomechanik, also zu einem Teilgebiet der Mechanik, dem die Methoden der klassischen Mechanik besonders angemessen sind. Erhebliche Schwierigkeiten haben sich seit jeher beim Übergang zur Mechanik kontinuierlich ausgedehnter Medien ergeben. Hier muß zunächst festgestellt werden, daß in Newton's „Prinzipia“, diesem fundamentalen und bewundernswerten Werk, weder eine Theorie der allgemeinen dynamischen Systeme, noch der starren Körper, noch der Spannungen in einem Kontinuum zu finden ist. Dennoch wird die Kontinuumsmechanik in den meisten Lehrbüchern der theoretischen Physik auf der Grundlage der Newtonschen Gesetze abgehandelt. Wer sich hierbei auf Newton bezieht, erliegt aber einem historischen Irrtum.

Man darf vermuten, daß sich Newton der Unvollkommenheit seines Systems durchaus bewußt war und daß er deshalb darauf verzichtet hat, es auf Kontinua anzuwenden. Dennoch wird auch heute immer noch, z. B. in den zuvor genannten Physikbüchern, der Drallsatz für Systeme aus dem Impulssatz unter Berücksichtigung des Gegenwirkungsgesetzes „*actio = reactio*“ abgeleitet. Daraus wieder wird dann die Symmetrie des Spannungstensors „bewiesen“. Im Buche von Joos findet sich hierzu übrigens eine Bemerkung in Kleindruck, die deutlich das Unbehagen widerspiegelt, das der Verfasser bei der Verwendung des Newtonschen Gegenwirkungsgesetzes in seiner Beweisführung empfunden haben mag.

Untersuchungen, die vor allem Truesdell, Toupin, Noll und ihren Mitarbeitern<sup>5)</sup> zu verdanken sind, haben die Schwächen eines derartigen Vorgehens deutlich gemacht. Es konnte dabei überzeugend gezeigt werden, daß nicht das Newtonsche Gegenwirkungsgesetz, sondern der Drallsatz selbst als Grundgesetz verwendet werden muß und daß folglich als Grundlagen einer klassischen Mechanik die Bilanzgleichungen für Masse, Impuls, Drall und Energie verwendet werden müssen. Fügt man noch den Entropiesatz hinzu, dann läßt sich damit auch noch die Thermodynamik erfassen. Auf diese Weise wird eine Grundlage für die klassische Mechanik gewonnen, deren Anfänge nicht bei Newton, sondern in den Werken von Euler stehen. Leonhard Euler scheint als erster den Drallsatz als allgemeines Grundgesetz klar erkannt und verwendet zu haben.

Die Grundgleichungen reichen auch in ihrer allgemeinsten Form, etwa den von Cauchy formulierten Feldgleichungen, nicht aus, um die Spannun-

4) R. H. Cannon Jr., in „Gyrodynamics“, Berlin - Göttingen - Heidelberg 146 (1963)

5) C. Truesdell, R. A. Toupin, W. Noll, Handbuch der Physik, Berlin - Göttingen - Heidelberg 1960, Bd. III/1 und Bd. III/3. S. auch Z. Angew. Math. Mech., 44, 149 (1964)



gen im Inneren eines Kontinuums zu berechnen. Man benötigt hierzu bekanntlich noch die Stoffgesetze. Auf diesem Gebiet hat freilich die bisherige technische Mechanik des Material- und Stoff-Verhaltens zu einer solchen Verwirrung der Begriffe und Bezeichnungen geführt, daß ein generelles theoretisches Konzept als Orientierungshilfe dringend gebraucht wurde. Truesdell kennzeichnete vor kurzem die gegenwärtige Lage auf diesem Gebiet durch einen treffenden Vergleich mit der Situation der Geometrie: In der klassischen Geometrie beschäftigte man sich mit den Eigenschaften von Dreiecken und Vierecken, von Kreisen und speziellen Kurven. Die moderne Geometrie hält sich hingegen nicht mehr mit Einzelgebilden auf, sondern erfaßt ganze Familien von geometrischen Gebilden, von Körpern oder Kurven und sucht deren allgemeine Eigenschaften zu ergründen. So gelingen wertvolle allgemeine Aussagen über geometrische Strukturen. Ähnlich hat sich die Kontinuumsmechanik bisher mit Einzelkontinua abgegeben, z. B. mit der idealen Flüssigkeit, mit der Newtonschen Flüssigkeit, mit dem Hookeschen Körper oder dem Bingham-Körper. Wir würden vermutlich noch Generationen von fleißigen Forschern benötigen, um auf diesem Wege fortfahrend zu einem einigermaßen umfassenden Überblick über alle möglichen Verhaltensformen kontinuierlicher Körper zu kommen.

In der modernen Kontinuumsmechanik wird nun, losgelöst von speziellen Erfahrungstatsachen, der Versuch gemacht, die allgemeinsten möglichen Stoffgesetze zu ermitteln. Eine derartige Theorie kann auf drei Prinzipien aufgebaut werden: 1. dem Prinzip des Determinismus, 2. dem Prinzip der lokalen Wirkung und 3. dem Prinzip der stofflichen Indifferenz. Das Prinzip des Determinismus besagt, daß der Spannungszustand in einem bestimmten Punkt des betrachteten Kontinuums zu einer bestimmten Zeit eindeutig durch die Vorgeschichte der Bewegung des Kontinuums bestimmt ist. Das Prinzip der lokalen Wirkung postuliert die eindeutige Abhängigkeit des Spannungstensors für einen Punkt von dessen unmittelbarer Umgebung. Fernwirkungen innerhalb des Kontinuums werden damit ausgeschlossen. Schließlich drückt das drittgenannte Prinzip die Unabhängigkeit der Stoffeigenschaften vom jeweiligen Bezugspunkt oder Bezugssystem aus.

Mit diesen drei Prinzipien läßt sich eine sehr allgemeine phänomenologische Feldtheorie aufbauen, die bereits jetzt eine Reihe bemerkenswerter Erfolge verzeichnen kann. So konnte z. B. gezeigt werden, daß die aus der völlig anders konzipierten Festkörpertheorie stammende Lehre der Versetzungen erfaßt und befriedigend beschrieben werden kann.

Natürlich liegt die Frage nahe, ob eine solche Feldtheorie nicht letztlich einen Rückschritt bedeutet. Sie macht ja keinerlei Gebrauch von den bewundernswerten Ergebnissen einer Physik der Elementarteilchen. Sollte man nicht versuchen, ausgehend vom Verhalten der Elementarteilchen, eine Mechanik der Körper und Kontinua aufzubauen? So verlockend dieser Weg erscheint, er ist aus mehreren Gründen nicht gangbar, denn erstens sind die Eigenschaften der Elementarteilchen keineswegs mit hinreichender Sicherheit bekannt. Zweitens aber sind die mathematischen Schwierigkeiten bei der Durchführung einer solchen Theorie so enorm, daß man in jedem Fall froh sein muß, mit Näherungslösungen zu konkreten Ergebnissen zu gelangen. Wenn nun aber Theorie und Erfahrung nicht übereinstimmen, dann ist es praktisch aussichtslos, den Fehler zu lokalisieren. Man weiß



dann meist nicht, ob die den Elementarteilchen zugeschriebenen Eigenschaften oder das Näherungsverfahren abgeändert werden müssen.

Auf jeden Fall ist sicher, daß ein bisher oft beschrittener Weg völlig abwegig ist: Der Weg nämlich, die Elementarteilchen als „Massenpunkte“ im Sinne der klassischen Mechanik aufzufassen, für sie die Gültigkeit der Newton-Gesetze zu postulieren und daraus dann unter Zuhilfenahme von recht unsicheren Hypothesen die Eigenschaften des Kontinuums zu berechnen. Gerade für solche „Massenpunkte“ gelten ja die Newton-Gesetze nicht oder nur mit Einschränkungen. Da erscheint das Modell eines kontinuierlichen Feldes, das man sich beliebig teilbar vorzustellen hat, ehrlicher und auch erfolgversprechender. Schon 1930 hat von Mises darauf hingewiesen, daß die Kontinuumsmechanik von der Theorie der Elementarteilchen und einer statistischen Mechanik keinerlei Hilfe erwarten kann. Bereits bei den Kolloiden habe die statistische Mechanik versagt, während phänomenologische Feldansätze zu brauchbaren Ergebnissen geführt haben. Man hat daher bei den weiteren Arbeiten eine Feldtheorie vorgezogen, hat sie ausgebaut und zum Teil sehr sorgfältig axiomatisch fundiert.

## 6. Ausblick

Einzelheiten zu den hier nur angedeuteten, hochinteressanten Entwicklungen findet man z. B. in den ersten Bänden des neuen Handbuches der Physik.<sup>5)</sup> Dort kann der aufmerksame Leser mit Erstaunen feststellen, wie weit die neuen Theorien auch in die Grundlagen der klassischen Mechanik verändernd und festigend eingreifen.

Natürlich kann nicht die Rede davon sein, daß man nun etwa auf Newton verzichten könnte. Newtons Werk gehört weiterhin zu den ganz großen Leistungen der exakten Naturwissenschaften. Nur scheint es, daß der Gigant Newton den Blick auf die neben und hinter ihm stehenden Giganten jahrhundertlang verstellt hat. Jetzt ist man darangegangen, die Proportionen ein wenig zurechtzurücken. Forscher der ganzen Welt sind dabei, allzu starr fixierte Vorstellungen aufzuweichen und dabei ein tragfähiges Fundament für eine verbesserte klassische Mechanik im zuvor definierten Sinne zu schaffen.

Gleichzeitig bahnt sich eine Entwicklung an, die man als Annäherung von technischer und klassischer Mechanik kennzeichnen könnte. Ähnlich wie etwa vor 60 Jahren durch die Arbeiten Prandtls eine überaus fruchtbare Synthese von klassischer theoretischer Hydrodynamik und der technisch orientierten Hydraulik zustande gekommen ist, so scheint jetzt eine großartige und sicher nicht weniger fruchtbare Synthese von axiomatisch orientierter theoretischer Mechanik und der der Praxis zugewandten technischen Mechanik bevorzustehen.

Auf jeden Fall aber wird heute kaum ein Eingeweihter behaupten können, daß die klassische Mechanik nicht entwicklungs- oder verbesserungsfähig sei. Alles spricht hingegen dafür, daß die jetzt eingeleiteten Entwicklungen weiter vorangetrieben werden und daß man von ihnen noch weitere wichtige Ergebnisse erwarten kann.