

# **MECHANIK**

**WISSENSCHAFT ZWISCHEN THEORIE UND TECHNIK**

**K. Magnus**

**Lehrstuhl B für Mechanik  
Technische Universität München  
Juli 1980**

MECHANIK, WISSENSCHAFT ZWISCHEN  
THEORIE UND TECHNIK\*)

KURT MAGNUS

Meine Damen und Herren!

Die wissenschaftliche Gesellschaft, deren Jahrestagung hier durchgeführt wird, trägt in ihrem Namen - gewissermaßen als Programm - die "Angewandte Mathematik und Mechanik". Natürlich kann man annehmen, daß sich die Mitglieder der Gesellschaft darunter etwas einigermaßen klar Umrissenes vorstellen - aber darf man das auch von den mehr Außenstehenden sagen, von den wohlwollend Interessierten aber selbst nicht fachlich Engagierten? Vermutlich nicht - sonst wären wohl Vorstand und Tagungsleitung nicht auf die Idee gekommen, durch einen öffentlichen, für einen größeren Kreis von Zuhörern bestimmten Vortrag etwas Nachhilfeunterricht anzubieten, um auf diese Weise auch - wenn Sie das nicht als zu hoch gegriffen betrachten - etwas von der Bringschuld abzutragen, die die Wissenschaftler der Gesellschaft gegenüber zweifellos haben.

Nachdem bei der letzten Jahrestagung die Mathematik mit ihren Auswirkungen auf das tägliche Leben im Rahmen eines öffentlichen Vortrages behandelt wurde, soll jetzt der Schwerpunkt auf dem Gebiet der Mechanik liegen. Dem fachlich unverbildeten Zuhörer werden beide Themen sehr verschieden anmuten, aber ich hoffe doch, Ihnen verständlich zu machen, daß sie dennoch aufs engste zusammenhängen; wie anders wäre es sonst möglich, daß Mathematik und Mechanik unter dem gemeinsamen Dach einer wissenschaftlichen Gesellschaft vereinigt sind?

---

\*) Leicht abgeänderte Fassung eines öffentlichen Vortrages, der am 10. April 1980 auf der Jahrestagung der GAMM in Berlin gehalten wurde.

## Was ist Mechanik?

Was verstehen wir unter Mechanik? Was eigentlich tut ein Mechaniker? Ich könnte Ihnen zu beiden Fragen einen bunten Cocktail von Zitaten servieren und damit die vorgesehene Zeit ausfüllen. Kaum ein Dozent der Mechanik läßt es sich entgehen, seine Hörer mit Leonardo da Vinci zu beeindrucken, der die Mechanik als "das Paradies der mathematischen Wissenschaften" bezeichnet hat, "weil man mit ihr zur schönsten Frucht der mathematischen Erkenntnis gelangt". Das ist sicher schön gesagt und so recht geeignet für Festreden. Dennoch - nicht alle denken ähnlich erhaben; so kann man im ersten Wörterbuch der französischen Sprache aus dem 17. Jahrhundert unter dem Stichwort "méchanique" lesen: "Dieses Wort bedeutet das Gegenteil von dem was frei und ehrenwert ist; sein Sinn ist niedrig, häßlich und wenig würdig einer ehrenwerten Person". Und im Oxford English Dictionary kann man nachlesen, daß noch im 17. Jahrhundert, also zu Zeiten Newtons, der eines der tragenden Fundamente unserer Wissenschaft gelegt hat, unter einer mechanischen Tätigkeit verstanden wurde: "Eine Handlung oder Verrichtung ohne Willens- oder Verstandeskraft, eine maschinenartige Handlung". Ja - und gilt das nicht auch heute noch, wenn wir im Alltag davon sprechen, daß wir eine Tätigkeit "rein mechanisch" erledigen? Was denn erhielten wir als Antwort, wenn wir den Mann auf der Straße fragen würden, welche Aufgaben seiner Meinung nach ein Mechaniker zu erledigen hat? "Pannenhilfe für streikende Autos" wird dabei sicher weit vor etwa "Berechnung der nächsten Sonnenfinsternis" stehen. Daß in beiden Antworten eine Portion Wahrheit steckt, macht die Situation kompliziert. Ansätze für Fehldeutungen und Mißverständnisse gibt es jedenfalls genug und ich kann der Versuchung nicht widerstehen, hier eine Anekdote einzuflechten, die den Vorzug hat, daß sie einen der berühmtesten Wissenschaftler unseres Faches an der Berliner Technischen Hochschule betrifft:

Es geschah im ersten Jahrzehnt dieses Jahrhunderts, daß sich Seine Majestät Wilhelm II, Deutscher Kaiser und König von Preußen, über den Fortschritt der Wissenschaften in seinem Reich zu unterrichten gedachte. Als ihm bei

dieser Gelegenheit auch "der Mechaniker Georg Hamel" vorgestellt wurde, blickten Majestät leicht verstört auf das durchgeistigte Gelehrten Gesicht des vor ihm stehenden. Irgendetwas schien da nicht zu stimmen; doch plötzlich erhellten sich die kaiserlichen Mienen und die Welt schien wieder in Ordnung: "aha" - meinte er leutselig - "doch wohl Feinmechaniker".

Wie also sollen wir es nun mit den Mechanikern halten und mit ihrem Fachgebiet der Mechanik? Aus der Formulierung des Themas mögen Sie entnehmen, daß von einer Wissenschaft gesprochen werden soll, die zwischen Theorie und Technik angesiedelt ist. Natürlich nicht als trennende Wand, vielmehr als verbindendes Element, als Brücke. Ich hätte ebensogut sagen können, daß Mechanik eine der Verbindungen zwischen Denken und Tun in der technischen Welt bildet. Damit aber ist sie unverzichtbares Bindeglied zwischen einer Theorie, als einem oft schwer verständlichen, weil meist abstrakt formulierten Konzentrat von Erkenntnissen und der Technik, die von Dessauer /1/ als die "Kunst des Entbindens von Zweckideen in die sichtbare Welt" definiert wurde. Da nun aber beide Begriffe, Theorie und Technik, sehr auslegungsfähig sind, bleibt auch der Standort der Mechanik verschwommen. Nicht zu unrecht ist daher besonders von Wissenschaftshistorikern darauf hingewiesen worden, daß - wer von Mechanik redet - zuerst genauer sagen müsse, welche der möglichen Mechaniken er eigentlich meint: Die antike, meist mit den Namen Aristoteles und Archimedes verknüpfte oder die klassische, etwa aus den so fruchtbaren Jahrhunderten vor und nach Newton, oder die unter verschiedenen Namen wie Relativitätsmechanik, Wellenmechanik, Quantenmechanik oder Matrizenmechanik bekannt gewordenen Gebiete aus der ersten Hälfte dieses Jahrhunderts, oder schließlich Kontinuums-Mechanik und Computer-Mechanik, die sich in den letzten Jahrzehnten zu eigenwillig selbständigen Gebieten entwickelt haben. Die Spannweite der Mechanik ist jedenfalls so groß, daß leicht aneinander vorbeiredet, wer sich nicht die Mühe macht, präzise zu formulieren und genauer abzugrenzen.

## Geschichtliches

Leider hilft auch der Blick zurück auf die Anfänge der Mechanik nicht viel weiter. Wer die griechischen Quellen durchstöbert, muß bald feststellen, daß auch dort schon unterschiedliche, wenn nicht gar widersprüchliche Ansichten zur Mechanik zu finden sind. Schon das Wort selbst wird verschieden interpretiert: So fasste Aristoteles (4. Jahrh. v. Chr.) die Mechanik als eine Kunst (techné) auf, mit deren Hilfe der Mensch die Natur überlisten kann. Mechanik rückt damit in die Nähe einer List, ja des Betruges. Ist denn nicht - so fragt Aristoteles - der Mechaniker ein Betrüger, der Wasser durch Pumpwerke zwingt, sich entgegen dem natürlichen Verhalten bergaufwärts zu bewegen? Hier wird ein Unterschied zwischen natürlicher und künstlicher, durch Mechanik erzwungener Bewegung konstruiert. Und es ist interessant hier festzuhalten, daß Aristoteles die Mechanik gar nicht als zur Physik gehörend auffaßt. Diese nämlich soll sich als eine echte Naturwissenschaft nur mit natürlichen Bewegungen beschäftigen. Mechanik dagegen ist die meist mathematische Beschreibung von künstlichen Bewegungsvorgängen natürlicher Körper. Ihre Aufgabe ist es, die Ursache für die mit Maschinen gegen die Natur vollbrachten Wunder aufzuzeigen.

In Überlegungen dieser Art wird eine Aufspaltung der Mechanik in einen theoretisch-mathematischen und in einen technischen, an Anwendungen orientierten Teil sichtbar; beide sind jedoch untrennbar verbunden. Ganz klar wird dies wenige Jahrhunderte nach Aristoteles durch Heron ausgesprochen: Er unterteilt die Mechanik in eine mathematisch beweisende, rationale Mechanik und in die Handwerkskünste. Zur ersteren werden Geometrie, Arithmetik, Astronomie und Physik gezählt, zu den zweiten die Kunst des Schmiedens, des Gießens, des Bauens, die Zimmerei und die Malerei.

Diese Einteilung zeigt deutlich, daß die häufig geäußerte Meinung, eine wissenschaftlich fundierte Mechanik beginne erst

mit Galilei, keinesfalls aufrechterhalten werden kann. Schon eine der klassischen Schriften des Archimedes mit dem Titel "Über schwimmende Körper" könnte gleichermaßen der Mechanik wie der Mathematik zugerechnet werden und mit vollem Recht hat Truesdell darauf hingewiesen, daß antike Mechanik keinesfalls mit einfacher Mechanik gleichgesetzt werden darf. Daß dies auch schon im Altertum so gesehen wurde, mögen Sie aus einem beherzigenswerten Zitat (Pappus, 3. Jahrh. n. Chr.) entnehmen: "Die Mechanik hilft uns bei der Lösung lebenswichtiger Fragen. Darum wird sie von den Philosophen hoch geschätzt und von den Mathematikern eifrig studiert".

Im Mittelalter nun kann man einen beachtlichen Bedeutungswandel feststellen. Hier wird der Schwerpunkt der Mechanik offenbar in den sieben mechanischen Künsten gesehen: Weberei, Schmiede- und Bautechnik, Schifffahrt, Ackerbau, Jagd, Heilkunde und Schauspielkunst! Diese beinahe Universal-Mechanik wird dann als eigenes Gebiet zu den vier großen Gebieten menschlichen Wissens, nämlich Theorik, Ethik, Mechanik und Logik gezählt, wobei ich einer 1130 durch Hugo von Sankt Viktor angegebenen Einteilung folge (nach /2/). Die vier Disziplinen sollen dem Menschen gegen die aus der Erbsünde herrührenden Gebrechen helfen: Die Theorik gegen die Unwissenheit, die Ethik gegen die Ungerechtigkeit des Willens, die Mechanik gegen die Mängel unseres Körpers und die Logik gegen unsere fehlerhafte Rede. Welch ein Unterschied zur Antike! Immerhin wird darauf verwiesen, daß der Mechanik auch wissenschaftliche Voraussetzungen zugrundeliegen; sie könne deshalb zwar zu den Wissenschaften gezählt werden, sei jedoch eine unreine, unechte, den anderen Wissenschaften nicht ebenbürtige Disziplin.

Der Wandel zu der im wesentlichen auch heute noch geltenden Auffassung vom Wesen und von den Aufgaben der Mechanik bahnt sich in jenen zwei Jahrhunderten, dem 16. und dem 17. an, die man als die "anni mirabiles", als eine der bewundernswerten Epochen der Naturwissenschaften bezeichnet hat. Hier lichtet sich der scholastische Nebel, und die Konturen eines wissenschaftlich

fundierten Weltbildes werden deutlicher. Dabei wird auch das theoretische Fundament für die Mechanik erweitert und gefestigt. Der entscheidende Stimulus für diesen Entwicklungssprung liegt wohl in der Tatsache, daß Astronomie und Mechanik als Teile ein und derselben Wissenschaft erkannt wurden und zueinander fanden. Himmlische und irdische Mechanik gehorchen den gleichen grundlegenden Gesetzmäßigkeiten. Man hat in aller Klarheit erkannt, daß bestimmte, in der Natur beobachtete Verhaltensformen als Gesetze mathematisch formuliert werden können und daß sie sich auf ähnlich strukturierte Nachbargebiete übertragen lassen. Ja, daß man sogar Voraussagen treffen kann, die sich experimentell überprüfen lassen. Im Verfolg dieser Erkenntnisse wurde eine Blüte vieler Fachwissenschaften eingeleitet, unter denen der Mechanik eine Art Schrittmacherrolle zugefallen ist. Die Mechanik wurde zum Experimentierfeld für die Erprobung von Methoden, die sich dann auch auf anderen Gebieten bewährten.

### Theorie und Praxis

Dennoch blieb die schon im Altertum sichtbar gewordene Zweiteilung der Mechanik in einen theoretischen und einen angewandten Teil erhalten. Sie ergibt sich einfach aus dem im Alltag so offenbaren Unterschied zwischen praktischen mechanischen Erfahrungen und der Theorie mechanischer Vorgänge. Hier liegen auch die Wurzeln für jene oft zitierte und angeblich so tiefe Kluft zwischen Theorie und Praxis. Der Praktiker schimpft über die graue Theorie, der Theoretiker aber möchte die ästhetische Geschlossenheit seiner abstrakten Kompositionen nicht durch das Berücksichtigen von zu vielen realen Nebenerscheinungen, die er gern als Schmutzeffekte bezeichnet, gefährden. Wie oft wird da nicht Goethe zitiert mit jenem "grau, teurer Freund, ist alle Theorie"? Aber vergessen wir nicht - der das sagt, ist der Teufel im Faust und er möchte damit den Studiosus vom rechten Wege abbringen. Grammel /3/ hat einmal das Verhältnis von Theorie und Empirie mit der Beziehung zwischen Hund und Katze verglichen,

und zugleich bemerkt, daß diese gern zitierte angebliche Erbfeindschaft offensichtlich weder dem Hund noch der Katze geschadet zu haben scheint. Sie hat eher eine stimulierende Wirkung. Und so steht es wohl auch mit Theorie und technischer Praxis:

Es gibt keine gesunde Theorie ohne den Rückhalt der Empirie -  
und keine gesunde Empirie ohne das ordnende Element einer Theorie.

Bei der lawinenartig anwachsenden Fülle empirischer Fakten wären wir hilflos ohne ein übergreifendes theoretisches Dach. Theorie befreit uns von der Tyrannei des Partikulären. Aber Theorie ohne das Spielmaterial mechanischer Erfahrungen kann zum unverbindlich leeren Formalismus ausarten. Genau diesen Sachverhalt meinte wohl auch Kant mit der Feststellung "Gedanken ohne anschaulichen Inhalt sind leer, Anschauung ohne Begriffe ist blind". Theorie und Praxis sind zwei Seiten ein und derselben Medaille. Einseitigkeit oder gar Einäugigkeit handelt ein, wer beides zu trennen sucht.

### Weltformeln, Prinzipie

Über die Jahrhunderte oder Jahrtausende ist der Strom der Erkenntnisse nicht versickert. Die Fülle des als nachprüfbar wahr Erkannten ist dabei fast unübersehbar geworden. Ist es da verwunderlich, daß unruhige, forschende Geister - mit dem Erreichten nicht zufrieden - immer und immer wieder versuchten, die vielerlei Gesetzmäßigkeiten selbst wieder in einer allgemeinen Zusammenschau, in einer Art Über-Theorie zu vereinen? Wie die Romantiker nach der blauen Blume, so haben Mechaniker vieler Jahrhunderte unablässig nach Weltformeln gesucht, aus denen mit denknottwendiger Folgerichtigkeit alle sonst schon gefundenen Gesetzmäßigkeiten abgeleitet und zugleich neue aufgedeckt werden können. Wie anders ist z.B. das rastlose Suchen des Johannes Kepler zu verstehen, den Bauplan des Weltenschöpfers zu erkennen? Wie der in ständig neuen Anläufen, durch bohrende Fragen begleitete Versuch von Newton, Euler, Lagrange und ihren Nachfolgern, möglichst allgemein gültige Formulierungen der

Naturgesetze zu finden? Man spürt hier unmittelbar etwas von der Besessenheit der Forscher, die ihre Erkenntnisse als Offenbarungen verkündeten. So schrieb Kepler nach dem Auffinden der Gesetzmäßigkeit zwischen den Umlaufzeiten der Planeten und ihrem Abstand von der Sonne, jener als drittes Keplersches Gesetz bekannt gewordenen Erkenntnis, um die sein Entdecker mehr als 20 Jahre gerungen hat: "Nachdem jetzt in voller Klarheit diese höchst wunderbare Schau enthüllt wurde, hält mich nichts mehr zurück. Ich überlasse mich heiliger Raserei - verzeiht mir, so freue ich mich".

Nicht minder heftig war die Besessenheit der im Kielwasser von Kepler suchenden Forscher. Sie bemühten sich, die Essenz alles bisherigen Wissens auf dem Gebiet der Mechanik möglichst in eine Formel zu verdichten und nannten diese "Prinzip". Derartigen Prinzipien gab man oft programmatische Namen wie: Prinzip der geringsten Aktion, Prinzip der größten Wirkung, Prinzip des kleinsten Zwanges, Prinzip des kürzesten Weges, Prinzip der geradesten Bahn. Irgendeine Zielstrebigkeit im Ablauf des Weltgeschehens sollte damit zum Ausdruck gebracht werden, und die augenscheinlichen Erfolge einer derartigen Betrachtungsweise führten dazu, daß man zuweilen weit über das Ziel hinausschoß. Man dehnte die mechanische, die mechanistische Darstellung auf die gesamte Natur aus. So wurden Mechanismus und Maschine zu Zauberworten einer aufgeklärten Zeit, und wenn das Geschehen der unbelebten Natur durch Mechanismen erklärt werden kann, weshalb nicht auch das Verhalten lebender Körper? Das 1748 von Julien Offray de Lamettrie veröffentlichte Buch "l'homme machine" war das Schlüsselwerk dieser mechanistischen Popularphilosophie, und es war typisch für einen aufgeklärten Franzosen jener Zeit, daß er von "mon mécanisme" sprach, wenn er über sein körperliches Befinden berichtete.

Überaus kontrovers war die kühne Folgerung, die der seinerzeit höchst angesehene Mechaniker Pierre Louis Moreau de Maupertuis zog: Er nämlich stilisierte sein "Prinzip der größten Wirkung" schlicht zu einem Gottesbeweis hoch. Eine Welt - so meinte er - in der alles so abläuft, daß bei geringstem Aufwand ein Höchst-

maß an Wirkung erreicht wird, könne doch nur das Werk eines weisen Schöpfers sein. Voltaire hat dem entgegengehalten, daß knauserige Sparsamkeit nicht gerade auf einen allmächtigen, aus der Überfülle seiner Möglichkeiten schöpfenden Gott schließen ließe. Tatsächlich war die von Maupertuis gegebene mathematische Fassung des Prinzips im hohen Grade unklar und selbst für rein mechanische Vorgänge schwer anzuwenden. Düring /4/ hat dazu bissig bemerkt, daß Maupertuis "allerlei Schein durch metaphysische Einkleidungen produziert hat, ohne hierdurch etwas anderes als Nebel zu verbreiten. Er hat damit die klarsten Dinge für eine unfruchtbare scholastische Kontroverse gerade hinreichend veräunkelt".

Erst Leonhard Euler hat dem Prinzip eine klare Formulierung gegeben - ein Vorgang der übrigens mit zu einer schweren Verstimmung beigetragen hat, die zwischen dem damaligen Präsidenten der Berliner Akademie der Wissenschaften Maupertuis und dem Direktor der math. Klasse dieser Akademie, Euler entstanden war. Dieser in der wissenschaftlichen Welt viel beachtete Streit - von außen noch kräftig durch Neid, Mißgunst und Gehässigkeit geschürt - hatte letztlich zur Folge, daß Euler Berlin enttäuscht den Rücken kehrte, um - einer Einladung von Katharina II. folgend - wieder an die Petersburger Akademie der Wissenschaften zurückzukehren. Dort war er zuvor schon 14 Jahre lang, bis zu seiner Berufung nach Berlin im Jahre 1741 tätig gewesen. Die Abwerbung Eulers durch die Große Katharina verstimmte den Großen Friedrich so, daß es diplomatische Verwicklungen gab: Heutzutage kann man dies etwa so ausdrücken, daß Friedrich auf die unfreundliche Gefährdung der Entspannungspolitik durch Katharina prompt mit wirtschaftlichen Sanktionen reagierte: Er erhöhte den preussischen Posttarif von 38 auf 44 Silber Groschen - woraus man wohl auf den damaligen Kurswert eines Mechanikers vom Format Eulers schließen darf. Freilich schloß die derart dokumentierte Wertschätzung der Wissenschaft nicht aus, daß sich der preussische König mit beißendem Spott über die "Eitelkeit der Mathematik" ausließ, als eine nach Eulers Berechnungen gebaute Springbrunnenanlage in Sanssouci nicht nach Wunsch arbeitete.

Doch zurück zu den Prinzipien: Die Suche nach immer allgemeiner gültigen Prinzipien, nach Weltformeln oder Weltmodellen hat zwar gelegentlich in Sackgassen geführt, aber insgesamt doch eine reiche Ernte gebracht. Vor allem wurden die wissenschaftlichen Methoden verfeinert und so präzisiert, daß sie weit in Nachbargebiete hineinwirkten. Die Prinzipien sind gleichsam Leuchttürme, die - auf dem Festland gesicherter Erkenntnisse errichtet - ihre Strahlen weit ins Dunkel des Unerforschten werfen. Erkauft wurden diese Fortschritte freilich durch einen solchen Grad von Abstraktion, daß nur geschulte Denker und Theoretiker diesen Schlüssel der Erkenntnis sinnvoll anzuwenden vermochten. Und auch heute noch bleibt die derart formalisierte und mathematisierte Mechanik selbst für manche Fachleute eine Art Geheimwissenschaft. Wer sie nutzen will, muß sich erst mühsam hineinarbeiten. Es gibt da keinen Schlepplift, keine Bergbahn, die den Interessierten mühelos auf die Gipfel der Erkenntnis bringt.

#### Denkweisen der Mechanik, dargestellt an drei Beispielen

Dies vorausgeschickt werden Sie sicher Verständnis dafür haben, daß ich gar nicht erst den Versuch unternehmen werde, Ihnen ein Panorama des derzeitigen Erkenntnisstandes auf dem Gebiet der Mechanik vorzuführen. Jedoch möchte ich die Einsicht in die Tatsache zu fördern versuchen, daß der Mechaniker dem Allerweltswerkzeug des gesunden Menschenverstandes gelegentlich mißtrauen muß. Zu oft sind schlimme Trugschlüsse gerade im Namen dieses doch anscheinend so naturwüchsigen, unverbildeten Verstandes des "Mannes auf der Straße" verkündet worden. Der Mechaniker kann solchen Schwierigkeiten nur entgehen, wenn er seine Probleme durch diszipliniertes logisches Denken, unter Abstützen auf bereits abgesicherte Ergebnisse - z.B. auf die erwähnten Prinzipien - zu lösen versucht. Beispiele für mechanische Vorgänge, bei deren Erklärung uns das alltägliche Vorstellungsvermögen einen Streich spielen kann, möchte ich an einigen einfachen Versuchen erläutern, die sich mit dem Projektionsschreiber gut zeigen lassen. Zugleich läßt sich an diesen Beispielen die für die Mechanik

typische Denkweise demonstrieren und vielleicht auch die Anwendung auf weiterführende Probleme wenigstens andeuten.

### 1. Stoßvorgänge

Anfangen möchte ich mit einfachen Stoßvorgängen. In Einrichtungs- oder Spielzeugläden findet man gelegentlich den in Bild 1 dargestellten, ebenso dekorativen wie lehrreichen Stoßapparat. Er wurde übrigens schon vor über 300 Jahren von Mariotte /5/ beschrieben und zu Demonstrationszwecken verwen-

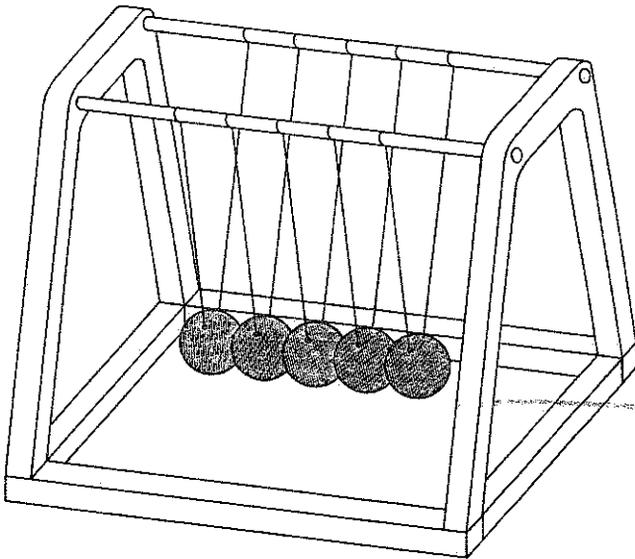
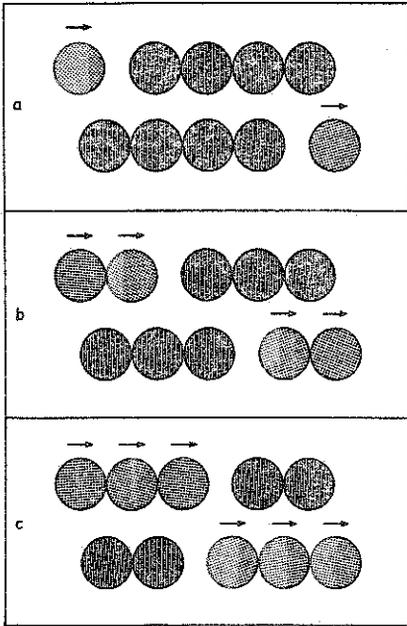


Bild 1: Stoßapparat nach Mariotte

det. Eine Anzahl von gleichgroßen Stahlkugeln hängt an je zwei Fäden so, daß sie in der Ruhelage sich gerade berührend, eine Reihe bilden. Ein derartiges Gerät sehen wir uns nun in der Projektion von unten an. Im Schattenriß erscheinen jetzt die Kugeln als kreisrunde Scheiben. Lenkt man nun eine der außen hängenden Kugeln aus, und läßt sie danach gegen die ruhenden anderen stoßen, dann wird nur die letzte Kugel am anderen Ende fortgeschleudert, die inneren Kugeln der Reihe bleiben - ebenso

wie die zuerst stoßende - in Ruhe (Bild 2a). Der Stoßvorgang



wiederholt sich periodisch, weil die jeweils abgestoßene Kugel infolge der Aufhängung als Pendel umkehrt und erneut gegen die Reihe der ruhenden Kugeln stößt. Dieser Grundversuch kann vielfältig variiert werden: Man kann zwei oder drei Kugeln auf einer Seite abheben und gegen die ruhenden stoßen lassen; dann werden auf der anderen Seite entsprechend zwei oder drei Kugeln abgestoßen (Bilder 2b und 2c). Warum ist das eigentlich so? Woher wissen denn die Kugeln am anderen Ende, daß sie und nur sie wegfliegen sollen? Haben sie etwa eine Information über das, was sich am

Bild 2: Stoß von einer (a), zwei (b) und drei (c) Kugeln gegen eine Reihe ruhender Kugeln. Oben: vor dem Stoß, unten: nach dem Stoß.

Anfang der Reihe tut? Und welche Rolle spielen die anscheinend so unbeteiligten Kugeln in der Mitte bei diesen Versuchen? Man kann be-

liebig viele Fragen stellen und den Stoßapparat um Antworten bitten. Er sagt uns lapidar: so ist's - aber er sagt nicht warum und wieso. Hier nun setzen Theorien an. Sie sind auf verschiedenen Ebenen angesiedelt und liefern damit gewisse Regeln, denen die Stoßvorgänge gehorchen. Schon sehr früh erkannte man, daß zwei physikalische Größen - Energie und Impuls - eine entscheidende Rolle spielen. Im hier vorgeführten Fall elastischer Stöße bleiben beide Größen insgesamt erhalten; also kann man diese Erkenntnisse zu Stoßprinzipien erklären. Dann aber lassen sich mit Hilfe dieser Erhaltungsprinzipie für Energie und Impuls die Versuchsergebnisse deuten und neue Ergebnisse voraussagen. In der Kugelreihe wird bei dem zuerst vorgeführten Versuch einfach Energie

und Impuls zwischen der ersten und der letzten Kugel wechselseitig ausgetauscht.

Aber warum werden eigentlich Energie und Impuls der stoßenden Kugel nicht irgendwie auf alle anderen gestoßenen Kugeln verteilt? Auch das wäre nämlich nach den Erhaltungssätzen durchaus möglich. Um zwischen den verschiedenen Möglichkeiten eine Auswahl treffen zu können, muß noch ein weiteres Prinzip bemüht werden. Es besagt, daß der Stoßvorgang in einem Mehrkörpersystem - wie z.B. in der Kugelreihe - durch Auflösen in eine Folge von Einzelstößen zwischen den Nachbarkörpern erklärt und berechnet werden kann. Damit nun lassen sich fast alle Spielereien mit dem Stoßapparat deuten. Letztlich aber haben wir auf diese Weise unverstandene Einzelvorgänge auf ebenso unverstandene aber vielleicht höherwertige Prinzipie zurückgeführt.

Mag sich nun im Lichte dieser Erkenntnis sonnen, wem das genügt; den Neugierigen aber treibt es weiter: Wie - so fragt er - geht denn der Austausch von Impuls und Energie vor sich? Und mit dieser Frage sind wir plötzlich an einem Punkt angelangt, an dem wir freimütig bekennen müssen, daß auch 300 Jahre nach Mariotte noch keine allgemein gültige Antwort gegeben werden kann. Wir wissen zwar, daß an der Stoßstelle Kräfte übertragen werden, daß dadurch elastische Wellen ausgelöst werden, daß diese Wellen Information, Impuls und Energie transportieren, wir sind aber gleichwohl noch nicht in der Lage, diese Vorgänge für alle möglichen Fälle vorauszuberechnen.

Durch weitere Versuche soll noch gezeigt werden, daß zusätzlich Fragen offen bleiben. Wir verwenden den Stoßapparat mit nur zwei Kugeln, lenken diese aus und lassen sie mit etwa gleicher Wucht gegeneinander stoßen (Bild 3a). Sie prallen nach dem Stoß zurück wie Bälle, die gegen eine feste Wand geworfen werden. Entsprechendes geschieht, wenn zwischen die stoßenden Kugeln eine oder mehrere gleichgroße Kugeln gehängt werden (Bilder 3b und 3c). Die inneren Kugeln übernehmen prak-

tisch die Funktion einer festen Wand. Das aber könnte doch - so sollte man meinen - jede Kugel von beliebiger anderer Größe auch tun. Der Versuch zeigt uns, daß diese Überlegung falsch ist (Bild 4a)! Hier also läßt uns der gesunde Menschenverstand im Stich. Versuchen wir deshalb das Problem von einer anderen Seite her anzugreifen: Wenn zwischen die stoßenden äußeren Kugeln zwei weitere Kugeln derselben Größe gehängt werden, so bleiben diese inneren Kugeln bei dem Stoßversuch praktisch

in Ruhe (Bild 3c). Sie müßten also auch als ein einziger Stoßkörper mit

doppelter Masse aufgefaßt und durch einen solchen ersetzt werden können. Warum aber mißlingt dann der Versuch mit einer doppelt so schweren Kugel in der Mitte (Bild 4a)? Versuchen wir es noch einmal, indem wir die beiden mittleren Kugeln durch etwas Klebstoff fest miteinander verbinden. Obwohl hierdurch die unmittelbare Kraftübertragung nicht behindert wird, erhält man bei dem Versuch mit dem zweiseitigen Stoß ein anderes Ergebnis (Bild 4b). Auch der zuvor gezeigte Versuch mit einseitigem Stoß verläuft völlig anders. Warum? Wir haben doch die beiden mittleren Kugeln durch das Zusammenkleben nur zu genau demselben Verhalten gezwungen, das sie auch zuvor schon freiwillig zeigten. Ja, aber wir haben Zwang ausgeübt - und genau das nimmt uns die Kugelfamilie übel. Es handelt sich hier um ein auch an zahlreichen anderen mechanischen Systemen

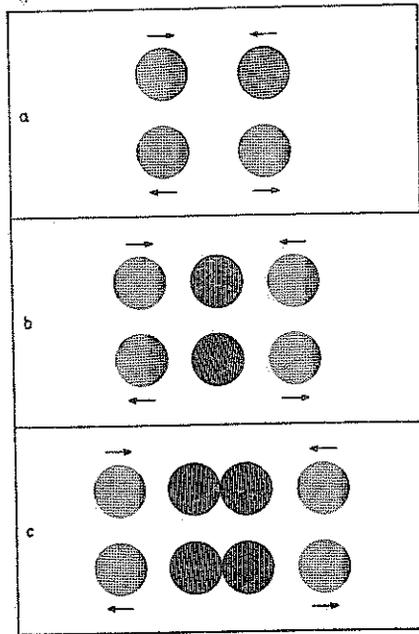


Bild 3: Stoß zweier Kugeln gegeneinander, ohne (a), mit einer (b) und mit zwei (c) gleichgroßen Kugeln dazwischen.

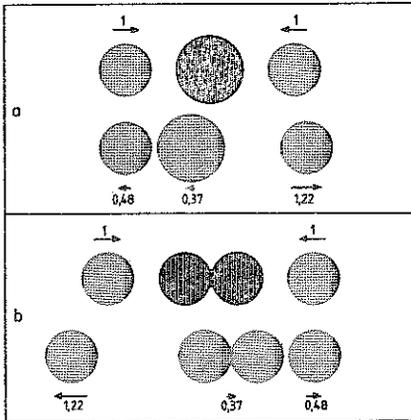


Bild 4: Stoß zweier Kugeln gegeneinander, mit einer doppelt so schweren Kugel dazwischen (a), mit zwei gleichgroßen, aber miteinander verklebten Kugeln dazwischen (b).

bestätigtes Prinzip:

Die Einschränkung der Bewegungsfreiheit führt zu einem meist unerwarteten Verhalten: Gutartige stabile Systeme können instabil werden - und umgekehrt.

Aber ist das im menschlichen Zusammenleben etwa anders? Jeder weiß, daß Handlungen, die wir freiwillig gern tun, als lästige Pflicht empfunden werden, sobald sie befohlen sind; eine vielleicht auch für Pädagogen und Reformen beherzigenswerte Erkenntnis!

Weshalb beschäftigen wir uns mit Stoßvorgängen? Stöße treten

in Natur und Technik in vielerlei Gestalt auf, so daß es leicht ist, aktuelle Bezüge herzustellen. Es sei hier nur an das Verhalten von Insassen bei einem Autozusammenstoß erinnert. Abgesehen von den sehr aufwendigen Versuchen der Autoindustrie, ist diese Frage in letzter Zeit mehrfach auch theoretisch untersucht worden. Dabei wird der Fahrgast Mensch auf ein Mehrkörpersystem (MKS) abgebildet, das freilich die zuvor betrachtete Kugelreihe des Stoßapparates an Kompliziertheit bei weitem übertrifft. Mit Hilfe von Computern kann man das Bewegungsverhalten nach dem Stoß ausrechnen und damit das reale Unfallgeschehen in wesentlichen Zügen nachvollziehen. Daraus aber lassen sich wertvolle Entscheidungshilfen für Schutzmaßnahmen ableiten. Drei Beispiele für die in derartigen Theorien verwendeten MKS-Menschen zeigt Bild 5. Die Ersatzmodelle unterscheiden sich nach der Zahl der Teilkörper und der Zahl, der Art und dem Ort der Gelenke zwischen den Körpern. Bei dem rechts skizzierten Modell sind außerdem noch Ersatz-Muskeln als aktive elastische Bänder eingezeichnet. Je nach der Art der Fragestellungen muß das Ersatz-

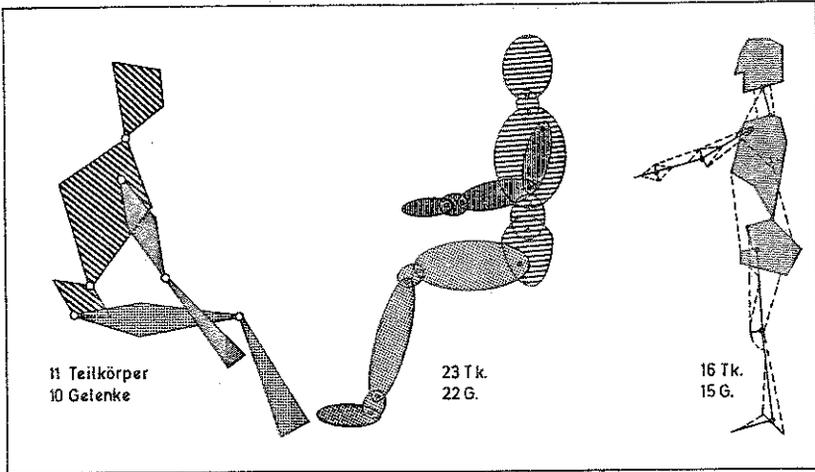


Bild 5: Drei Mehrkörper-Ersatzmodelle für den Menschen.

Modell modifiziert und angepaßt werden. Und in eben diesem Aufeinander-Abstimmen von Problem, Theorie und Modell ist die Geschicklichkeit - ja die Kunst des Mechanikers gefordert.

## 2. Stabilität drehender Körper

Nun ein anderes Beispiel: Wenige mechanische Spielzeuge üben eine solche Faszination aus, wie der Kreisel. Der nichtdrehende Spielkreisel fällt um, weil er kopflastig, also statisch instabil ist. Dreht man ihn aber hinreichend schnell an, so kann

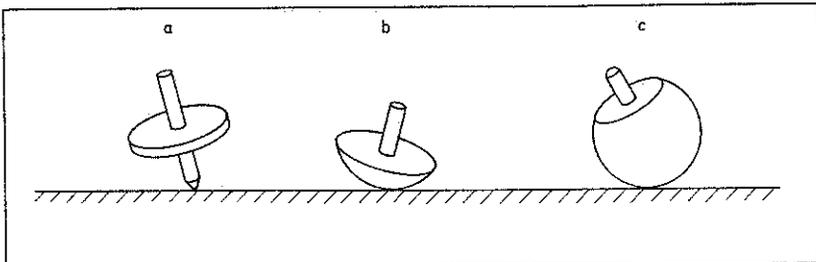


Bild 6: Drei Formen von Spielkreiseln.

er stabil aufrecht tanzen, obwohl sich an der Kopflastigkeit nichts geändert hat (Bild 6a). Die stabilisierenden Kreiselkräfte dominieren dann gegenüber den umwerfenden Kräften der Kopflastigkeit. Die Stabilisierung ist vom Drehsinn unabhängig, wenn nur die Drehgeschwindigkeit hinreichend groß ist. Ein zu langsam drehender Kreisel taumelt und fällt um.

Nun eine Frage: Ist es möglich einen Kreisel so zu bauen, daß er auch ohne Drehung nicht umfällt - ähnlich etwa dem bekannten Stehaufmännchen? Sehr einfach: Anstatt ihn auf einem Stift mit Spitze tanzen zu lassen, stelle man ihn auf eine kugelige Schale. Ihr Radius muß nur größer als die Höhe des Schwerpunktes sein (Bild 6b). Dann wird die Kopflastigkeit vermieden und statische Stabilität erreicht. Als Preis dafür muß freilich nun - was wiederum der unbedarfte gesunde Menschenverstand nicht wahrhaben möchte - mit dem Verlust der dynamischen Stabilität gerechnet werden: Der drehende Kreisel will plötzlich nicht mehr tanzen, er stellt sich auf die Kante und kann sogar ganz umkippen.

Die beiden hier gezeigten Effekte lassen sich bei dem Stehauf-Kreisel, einem besonders sinnreichen Spielzeug, das meist unter der englischen Bezeichnung "Tippe-top" bekannt ist, in einem einzigen Versuch vorführen. Dieser Kreisel besteht aus einem kugelförmigen Körper mit einem Stift zum Andrehen (Bild 6c). Zeigt der Stift nach oben, dann ist der nichtdrehende Kreisel statisch stabil wie ein Stehaufmännchen. Er ist in dieser Lage jedoch dynamisch instabil; nach dem Andrehen legt er sich zunächst schräg, überschlägt sich vollkommen und dreht dann auf dem Stift stehend, weiter. Die anfängliche Lage ist zwar statisch, aber nicht dynamisch stabil; die Endlage hingegen ist dynamisch, aber nicht statisch stabil (im Vortrag wurde dies mit einem Flexiglas-Kreisel in Projektion gezeigt). Die Kompliziertheit des Vorganges bildet eine Herausforderung für theoretische Mechaniker; ein vielseitiges Schrifttum legt Zeugnis davon ab. Es gab hier teilweise heftige Kontroversen, aber inzwischen ist auch der Tippe-top-Effekt physikalisch geklärt und damit berechenbar geworden (s. z.B. /6/).

Wem der Stehaufkreisel als Denksportaufgabe noch nicht genügt, dem kann freilich noch Kniffligeres geboten werden: die sog. keltischen Wackelsteine. Sieht man einmal von der oft diskutierten Frage nach der Herkunft dieser Bezeichnung ab, dann kann man festhalten, daß es sich hier um unregelmäßig geformte Körper mit zumindest teilweise konvexer Oberfläche handelt, wie man sie z.B. als Kieselsteine im Geröll von Gebirgsbächen finden kann. Legt man sie auf eine horizontale Ebene und dreht sie - wie den Stehaufkreisel - um die Vertikalachse an, dann beobachtet man, daß manche Steine rechtsherum drehend ruhig, also stabil weiter drehen, jedoch linksherum zu wackeln anfangen - und umgekehrt. Die Stabilität der Drehung hängt also jetzt auch vom Drehsinn ab - ein Effekt, der bei den in Bild 6 gezeigten symmetrischen Kreiseln nicht vorkommt. Man kann feststellen, daß jedem Wackelstein ein gewisser Eigensinn - ein Eigendreh Sinn eingeprägt ist. Dreht man ihn in der verkehrten Richtung an, dann sträubt er sich sichtlich weiterzudrehen, fängt an zu taumeln, um schließlich in die bevorzugte Drehrichtung zu wechseln. Danach dreht er ruhig weiter, ganz so als habe er jetzt seine natürliche Bewegungsform gefunden.

Mehrere Umstände müssen zusammenkommen, damit der Wackelstein effekt auftritt: da ist einmal die Form der Oberfläche des Steins an der Auflagestelle; sie darf nicht kugelförmig, sondern muß ellipsoidähnlich gekrümmt sein. Es müssen also zwei geometrisch definierte Hauptrichtungen vorhanden sein. Aber auch die Massenverteilung des Körpers darf nicht gleichförmig sein. Vielmehr müssen - abgesehen von der Vertikalachse - zwei genau definierte sog. Hauptträgheitsachsen auszumachen sein. Man könnte diese als Symmetrieachsen bezüglich der Massenverteilung bezeichnen - und ich hoffe auf Ihr Verständnis, wenn ich an dieser Stelle nicht auf die genauere Definition dieser Achsen eingehe. Nur soviel: bei gleichförmigen symmetrischen Körpern - z.B. bei einem homogenen Ellipsoid - haben Hauptträgheitsachsen und geometrische Achsen die gleiche Richtung.

Aber gerade das darf bei Wackelsteinen nicht der Fall sein. Außerdem müssen zwischen Unterlage und Wackelstein nicht nur Druckkräfte, sondern auch Reibungskräfte übertragen werden. Erst wenn alle diese Bedingungen zusammentreffen, kann der hier gezeigte Effekt beobachtet werden. Wen wundert es da, daß auch Fachleute Schwierigkeiten haben, solch anormales Verhalten in Formeln einzufangen und zu deuten? Jedenfalls ließ die kürzlich in einem Wissenschaftsmagazin gegebene Erklärung für das Verhalten der Wackelsteine (dort "Kelte" genannt) die notwendige Sorgfalt vermissen.

Doch was nützt uns die Beschäftigung mit derartigen Spielereien - abgesehen vielleicht von einem intellektuellen Erfolgserlebnis, wie es jede gelöste Denksportaufgabe vermittelt? Hier muß nun eindeutig festgestellt werden, daß dem Stabilitätsverhalten drehender Körper in der Technik eine große praktische Bedeutung zukommt. Das Gebiet der Rotordynamik hat sich zu einer eigenen wissenschaftlichen Disziplin entwickelt. Das Kreisverhalten drehender Körper spielt aber vor allem auch in der noch jungen Technik künstlicher Satelliten eine wichtige Rolle. Auch auf diesem interessanten Gebiet darf man sich nicht wundern, wenn plötzlich unerwartete Effekte, vergleichbar denen bei Wackelstein oder Tippe-top, auftreten, Effekte, die der gesunde Menschenverstand sicher nicht vorausdenkend erkennen würde.

Noch zwei einfache Versuche hierzu: Ein Knopf, durch dessen Befestigungslöcher eine Schlaufe aus Zwirn gezogen wird (Bild 7a), läßt sich nach Andrehen leicht durch periodisches Spannen und Nachlassen der Fadenschlaufe in rasche, und im Umlaufsinn periodisch wechselnde Drehung versetzen. Dabei stellt sich die Ebene des Knopfes senkrecht zur Fadenrichtung (Bild 7b). Die Drehung ist stabil. Nun aber führen wir denselben Versuch mit einem langgestreckten zylindrischen Körper aus, der aus einem durchsichtigen Plexiglasröhrchen hergestellt wurde. Auch dieser Zylinder läßt sich mit einer durch die beiden Endflächen gezogenen Fadenschlaufe um seine Symmetrieachse in Drehung versetzen. Man stellt jedoch fest, daß der Zylinder insbesondere bei Ände-

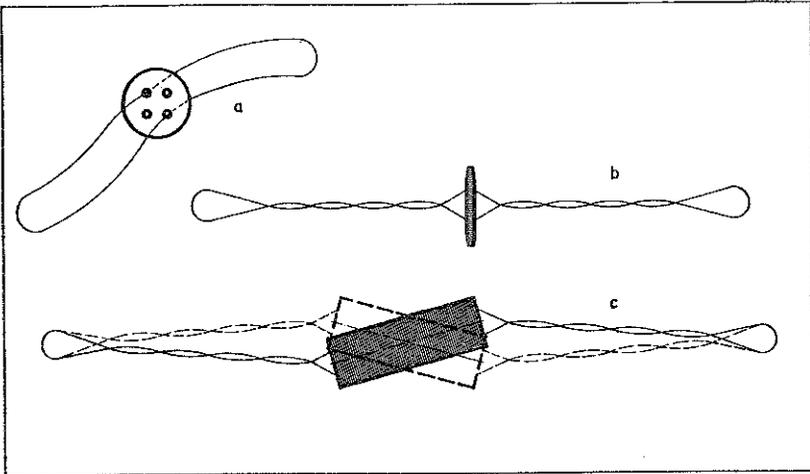


Bild 7: Ein abgeplatteter und ein gestreckter Drehkörper, durch Fadenschleifen in Drehung versetzt.

runger des Drehsinns aus der durch den Faden vorgegebenen Richtung auszubrechen versucht (Bild 7c). Die Drehbewegung wird dann instabil. Genau diese Tendenz kann aber bei technischen Rotoren zu unruhigem Lauf bei bestimmten Betriebszuständen führen.

### 3. Katastrophentheorie

Noch aus einem dritten Gebiet möchte ich ein Beispiel bringen. Ich meine die noch wenig bekannte und wohl auch noch im status nascendi befindliche Katastrophentheorie. Dabei handelt es sich um das Studium des unstetigen Verhaltens von Systemen in Natur, Technik und Gesellschaft. Gerade in der Mechanik findet man hierzu zahlreiche, teilweise längst bekannte Beispiele. Neu an der von dem französischen Mathematiker Thom propagierten Theorie ist das gemeinsame theoretische Dach, das hier für ähnlich strukturierte Systeme und deren katastrophale Verhaltensweisen entworfen wurde. Dieser theoretische Überbau läßt gewisse Analogien erkennen zwischen so verschiedenen Dingen wie Knicken von Stäben, Flattern von Flugzeugtragflügeln, Schmelzen oder

Verdampfen von Stoffen, Entstehung von Himmelsobjekten, Sonneneruptionen und Erdbeben, Herzschlag oder morphologische Probleme in der Biologie, ja sogar psychische und physiologische Instabilitäten oder kriegerische Verwicklungen bei Streitigkeiten zwischen Staaten.

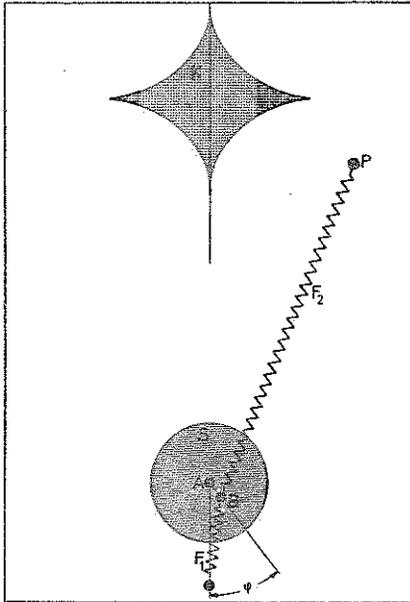


Bild 8: Katastrophenmaschine nach Zeeman.

Natürlich möchte ich mich hier nicht auf spekulatives Glatteis begeben und werde mich deshalb auf ein mechanisches Beispiel beschränken. Hierzu kann ich Ihnen eine von Zeeman [7] angegebene Katastrophenmaschine (Bild 8) vorführen. Sie gestattet das plötzliche "katastrophale" Umspringen der Gleichgewichtslagen eines mechanischen Schwingers zu demonstrieren.

Eine auf vertikalem Stift A drehbar gelagerte Scheibe S wird durch eine exzentrisch bei B angelenkte Spiralfeder  $F_1$  zu einem Schwinger, dessen jeweilige Position durch den Drehwinkel  $\varphi$  der Scheibe be-

schrieben werden kann. Es gibt normalerweise eine stabile und eine instabile Gleichgewichtslage für die Scheibe. Über eine zweite Spiralfeder  $F_2$  können nun Kräfte ausgeübt werden, durch die die Gleichgewichtslagen der Scheibe verschoben werden. Bei stetigem Verlagern des Endpunktes P der zweiten Feder in der Ebene erfolgt diese Verschiebung der Gleichgewichtslagen im allgemeinen stetig. Jedoch treten bei ganz bestimmten Bahnen von P unstetige Sprünge der stabilen Gleichgewichtslage auf, die zum plötzlichen Umschlagen der Scheibe führen. Es existiert ein kritischer Bereich K, dadurch gekennzeichnet, daß jede Bahn von P, die die Mittellinie im kritischen Bereich ein-

mal schneidet und danach diesen Bereich verläßt, bei Überschreiten der Grenze zu einem Springen der Gleichgewichtslage - also zu einer Katastrophe - führt. Dagegen bleibt ein Eindringen und Wiederverlassen des kritischen Bereiches ohne Überschreiten der Mittellinie katastrophenfrei.

Wie läßt sich nun ein derartiges Verhalten deuten und vielleicht auf andere Arten von Katastrophen übertragen? Einen Ansatzpunkt hierzu liefert die sog. Potentialtheorie. In den beiden gespannten Federn wird potentielle Energie gespeichert, die mathematisch durch eine Potentialfunktion ausgedrückt werden kann. Man stellt sich solche Funktionen oft als Flächen im Raum vor, aus deren Gestalt meist anschaulich auf die möglichen Verhaltensweisen des betrachteten Systems geschlossen werden kann. So kennzeichnet der tiefste Punkt einer Potentialmulde eine stabile, der höchste Punkt eines Potentialhügels eine instabile Gleichgewichtslage - eine Kugel bleibt ja im tiefsten Punkt einer Schale stabil liegen, während sie von einem Hügel herunterrollt.

Im Fall der Katastrophenmaschine muß man sich nun vorstellen, daß die Potentialfläche bei Verschieben des Federendes verformt wird. Berge und Täler verändern sich, und die Gleichgewichtslagen der Scheibe werden verschoben. Trägt man sich nun über dem jeweiligen Federendpunkt  $P$  eine Strecke entsprechend dem zugehörigen Winkel  $\varphi$  für die Gleichgewichtslagen auf, dann liegen die Endpunkte aller dieser Strecken auf einer Fläche, wie sie im Bild 9 zum Teil skizziert ist. Sie hat im kritischen Bereich eine Falte; deshalb gehören hier zu einer Position des Federendpunktes mehrere Gleichgewichtslagen - zwei stabile, die der oberen bzw. unteren Fläche im Faltenbereich entsprechen, und eine instabile, die zur Mittelfläche gehört. Die Ränder des Faltenbereiches entsprechen den Grenzen des kritischen Bereiches. Bei Bewegungen des Federendpunktes  $P$  von  $a$  über  $b$  und  $c$  nach  $d$  wandert der zugehörige Bildpunkt auf der darüberliegenden Raumfläche von  $A$  über  $B$



## Wesen und Wandel der Mechanik

Die hier behandelten Beispiele zeigen, daß man sich bei der Beschreibung und Erklärung von realen Vorgängen bestimmter Modell-Vorstellungen bedient. Modelle werden durch Abstraktion und durch idealisierende Vereinfachungen gewonnen. Im extremen Fall kann das Modell aus einem Satz von mathematischen Beziehungen bestehen, die es unter gegebenen Voraussetzungen zu lösen gilt. Von dieser Art sind z.B. die in den letzten Jahren viel diskutierten Weltmodelle. Ihren offensichtlichen Nutzen wird nur der nicht einsehen - oder einsehen wollen - , der prophetische Aussagen von ihnen erwartet. Respektiert man jedoch die Grenzen derartiger Modelle, dann lassen sich aus ihren verlässlichen "Wenn-Dann-Aussagen" wichtige Tendenzen erkennen und analysieren. Bei der Beurteilung solcher Vorgehensweisen muß jedoch stets ein sehr allgemeiner Zusammenhang beachtet werden, der als "intellektuelle Unschärferelation" bezeichnet wurde. Er besagt, daß man die Welt nicht zugleich exakt und verstehbar beschreiben kann. Was man an Exaktheit durch Verfeinerung eines Modells hinzufügt, geht an Verständlichkeit verloren - womit übrigens auch gewisse Grenzen jeder Popularisierung von Wissenschaft deutlich werden. Modelle sind stets im gewissen Sinne einäugig, insofern sie immer nur bestimmte Aspekte aus dem gesamten Spektrum der Wirklichkeit wiedergeben können. Die Art eines Modells hängt nämlich nicht nur von dem dadurch nachgebildeten Objekt, sondern entscheidend auch von der Fragestellung ab, die es zu beantworten gilt. Wenn man z.B. von einem Flugzeug nur den momentanen Ort oder die Bahn im Raum wissen will, dann genügt als Ersatzmodell einfach ein geometrischer Punkt; sollen dagegen Flattererscheinungen untersucht werden, dann muß ein sorgfältig ausgewähltes, meist hybrides Mehrkörpersystem als Flugzeug-Ersatzmodell konstruiert werden.

Wenn man die allgemeine Tendenz kennzeichnen sollte, die sich im Laufe der letzten Jahrzehnte bei Forschungsarbeiten auf den verschiedensten Gebieten der Mechanik abzeichnet, dann

kann man Grammel /8/ zustimmen, der schon vor etwa 20 Jahren feststellte, daß wir auf dem Wege sind, die in den letzten Jahrhunderten so erfolgreich aufgebaute und bewährte Ideal-Mechanik zu einer Real-Mechanik weiterzuentwickeln. Bei ihr werden die zuvor üblichen, weitgehenden physikalischen oder mathematischen Idealisierungen und Vereinfachungen schrittweise abgebaut. Wir können uns heute nicht mehr damit begnügen, die ehrwürdigen Grundgesetze der sogenannten Klassischen Mechanik als Fähnlein vor uns herzutragen und damit in die Schlacht um neue Erkenntnisse zu ziehen. Zu vieles an gesichert erscheinenden Erkenntnissen mußte in den letzten Jahrzehnten auf seine Tragfähigkeit untersucht und neu abgesichert werden. Das gilt vor allem für das Gebiet der Kontinuumsmechanik, die dem mechanischen Verhalten von Stoffen gewidmet ist. Man muß deshalb auch die wohl zuerst von dem Physiker und Philosophen Ernst Mach ausgesprochene, und von seinen Nachbetern auch heute noch häufig zitierte These, daß die Mechanik seit Newton abgeschlossen sei, als überholt abtun. Gerade die Mechanik ist jedenfalls kein geeignetes Beispiel für einen Beweis der von Finalisierungstheoretikern in der letzten Zeit propagierten Vorstellung von der Existenz abgeschlossener Wissenschaften. Ist nicht letztlich eine derartige Aussage sogar in sich widersprüchlich? Jede Erkenntnis - also auch die wissenschaftliche - steht schließlich unter dem Vorzeichen der Überholbarkeit.

Wenn es hierzu noch eines Beispiels bedarf, so denke man nur an den so vertrauten, weil auch im Alltag verankerten Begriff "Kraft". Dabei soll gar nicht erst von den übertragenen Bezeichnungen wie Überzeugungskraft, Kraft der Gewohnheit, typenbildende Kraft einer Idee, oder gar von Kraftbrühe gesprochen werden. Nein, auch in Physik und Mechanik hat sich die Vorstellung von dem, was unter Kraft eigentlich verstanden werden soll, vielfach gewandelt. Aristoteles und Archimedes unterschieden z.B. nicht zwischen den physikalischen Größen, die wir heute als Kraft, Arbeit und Leistung bezeichnen. Deshalb ist es keinesfalls zulässig, das griechische "dynamis"

als "Kraft" zu übersetzen und dann etwa den Newton'schen Kraftbegriff zugrunde zu legen. Und selbst die klar definierten Newton'schen Kräfte, von d'Alembert bissig als obscure metaphysische Wesen verspottet, wurden noch vor etwa 100 Jahren keinesfalls von allen Physikern akzeptiert. Der Streit um die Kraft tobte einige Jahrhunderte lang fast mit der gleichen Hartnäckigkeit wie der klassische Streit der Philosophen über die Willensfreiheit. Was da über tote und lebendige, über sterbende und wieder zum Leben erweckte Kräfte diskutiert und spekuliert wurde, ist wahrhaft erstaunlich. Sogar Immanuel Kant, der bekanntlich auch ein Buch über die Mechanik des Himmels schrieb, beteiligte sich an diesem Streit der Profi- und Hobby-Wissenschaftler - mit wenig Erfolg anscheinend, wenn man einem Vierzeiler von Lessing glauben darf:

"Kant unternimmt ein schwer Geschäfte,  
der Welt zum Unterricht:  
er schätztet die lebend'gen Kräfte,  
nur seine schätzt er nicht."

Wen wundert es bei der semantischen Unschärfe des Wortes Kraft, daß - aller vermeintlichen Abgeschlossenheit zum Trotz - auch heute die Dinge noch im Fluß sind. Gerade in den letzten Jahren sind bemerkenswerte Entwicklungen zu verzeichnen, als deren Folge der Kraftbegriff durch ein System von Axiomen formalisiert und damit für theoretische Analysen präzisiert worden ist - zugegeben freilich, auf Kosten der Verstehbarkeit.

#### Mechanik als mathematische Wissenschaft

Durch das Gesagte ist - so hoffe ich - der Ort der Mechanik im Kosmos der Wissenschaften, insbesondere im Dreieck zwischen Mathematik, Physik und Technik etwas deutlicher geworden. Die schon eingangs erwähnte große Spannweite kann dadurch freilich nicht weggeredet werden: Ich meine den weiten Bereich von der theoretischen Mechanik als einer mathematischen Disziplin bis zu konkreten technischen Anwendungen. Das aber ist nun einmal das Schicksal der Mechaniker, daß sie sich nicht selbstgenüg-

sam bei einigen Pfeilern dieser weitgespannten Brücke zwischen Theorie und Technik häuslich einrichten können. Es darf da keine Aufteilung in Macher und Denker, in Mechaniker und Mechanologen oder gar Mechanosophen geben, wenn die Brücke tragfähig bleiben soll. Die analoge Arbeitsteilung in der Politik zwischen Politologen und Politikern würde ich jedenfalls nicht als Vorbild empfehlen. Und vielleicht wäre es gut, wenn es neben dem Berufsstand der Soziologen auch noch Soziotiker gäbe. Das könnte sich möglicherweise positiv auf die "Übertragung von Gedankengebilden in die sichtbare Wirklichkeit" auswirken.

Die große Spannweite der technischen Wissenschaften bringt es zugleich mit sich, daß landauf landab über die Aufspaltung in zahlreiche, sich eifersüchtig gegeneinander abkapselnde Spezialgebiete geklagt wird. Den Arbeitsbienen gleich schließen sich die Spezialisten - wohlwollend auch als Fachidioten bezeichnet - in ihre wächsernen Prismen ein, ohne sich viel um die Bienen von nebenan zu kümmern. Dieses oft beschworene Bild - obwohl wirkungsvoll und plausibel - ist nicht nur überzeichnet, sondern falsch. Nicht in dem fortgesetzten Aufsplittern der Wissenschaften in immer neue Teildisziplinen, nicht in der drohenden Herrschaft der Spezialisten sehe ich das kennzeichnende Merkmal der heutigen Situation, sondern gerade in einem entgegengesetzt wirkenden Aspekt: Mit der Ausweitung und Vertiefung der Erkenntnisse auf Teilgebieten werden zugleich auch übergeordnete Begriffe und Zusammenhänge sichtbar. Sie können uns helfen, die Orientierung zu behalten und, wichtiger noch, neue Einsichten zu gewinnen. Die vielseitige Vernetzung der Wissenschaften wird deutlicher, seit es fachübergreifende Disziplinen gibt. Beispiele dafür sind die Stabilitäts- und Optimierungs-Theorien, Regeltechnik und Kybernetik - und vielleicht kann auch die zuvor erwähnte Katastrophentheorie einmal eine ähnliche Funktion übernehmen.

Lassen Sie mich noch ein spezielles Beispiel anführen, um das hier Gesagte verständlicher zu machen. Ich meine den Schlüsselbegriff "Grenzschicht". Ursprünglich von dem Strömungsmechaniker

Ludwig Prandtl ausschließlich zur Deutung von Strömungsercheinungen eingeführt, erweist sich dieser Begriff jetzt auch in der Festigkeitslehre und allgemein in der Mechanik der Kontinua als überaus nützlich. Ja, er hat sogar beim Entstehen einer neuen mathematischen Disziplin der "Singulären Störungsrechnung" Pate gestanden. Und diese wiederum erweist sich rückwirkend als ein wertvolles Handwerkszeug bei der Lösung mechanischer Probleme.

Man könnte leicht weitere Beispiele für die gegenseitige Befruchtung von Mathematik und Mechanik bringen. Ich möchte mich darauf beschränken hier einfach je einen berufenen Vertreter beider Disziplinen zu zitieren: Der Mechaniker Prandtl sagte 1905 aus Anlaß der Gründung eines Instituts für Angewandte Mathematik und Mechanik an der Universität in Göttingen: "Die technischen Wissenschaften sind reich an Kapiteln, deren volles Verständnis eine tiefe mathematische Bildung erfordert", eine Aussage, die bis heute nichts von ihrer universellen Gültigkeit verloren hat. Und der Mathematiker Courant meinte: "Lebendige Mathematik beruht auf dem Wechselspiel zwischen der Individualität erdgebundener Probleme und der durchsichtigen Allgemeinheit umfassender Abstraktionen".

Wen wundert es da, daß die Vernunfttehe zwischen Mathematik und Mechanik eine beachtliche Nachkommenschaft zeugte? Dem ersten Göttinger Institut folgte fast 20 Jahre später die Gründung der Gesellschaft für Angewandte Mathematik und Mechanik (GAMM). Etwa gleichzeitig wurde die Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik (ZAMM) ins Leben gerufen, es wurden Lehrstühle und Dozenturen für diese übergreifende Fächerkombination geschaffen und 1947 wurde auch an der New York University ein Institute for Mathematics and Mechanics gegründet. Auch eine "Leitfaden"-Reihe (LAMM) hat sich inzwischen ihren Platz auf dem Büchermarkt erobert. Bedarf es da noch weiterer Beweise, daß eine solche Mischung nützlich, ja notwendig ist?

Und wer es noch immer nicht recht glauben will, dem empfehle ich, einmal am großen Hörsaal der Technischen Universität

München vorbeizugehen. Dort findet er in einem Schaukasten eine sehr instruktive, fast 4 Meter breite tabellarische Übersicht über "Große Mathematiker" der letzten Jahrhunderte. Wenn man hier die Überschrift in "Große Mechaniker" ändern würde, dann hätte man tatsächlich nur wenige Köpfe dieser Ahnengalerie auszuwechseln.

Die enge Verklammerung mit der Mathematik hilft der Mechanik ihre spannungsreiche Position zwischen Theorie und Technik durchzuhalten. Diese Spannung aber ist eine der Voraussetzungen für die Fruchtbarkeit und den Nutzen der Mechanik. Und eben dies wollte ich an Beispielen und durch einen Blick auf die geschichtliche Entwicklung klarmachen. Sie dürfen das Gesagte auch - wenn Sie wollen - auch als ein Plädoyer für unsere Wissenschaft auffassen.

Schrifttum

- /1/ F. Dessauer: Der Streit um die Technik.  
Herder-Verlag, Freiburg i. Br. 1959.
  
- /2/ F. Klemm: Zur Kulturgeschichte der Technik.  
Deutsches Museum München 1979.
  
- /3/ R. Grammel: Theorie und Empirie im Schaffen des  
Ingenieurs. Baumeister-Zeitung, Stuttgart 1958.
  
- /4/ E. Dühning: Kritische Geschichte der allgemeinen  
Prinzipien der Mechanik. Preisschrift, Univer-  
sität Göttingen, 1873.
  
- /5/ E. Mariotte: Traité de la percussion ou choc des  
corps. Paris 1676.
  
- /6/ K. Magnus: Kreisel. Springer-Verlag-Berlin, 1971.
  
- /7/ E.C. Zeeman: Catastrophe Theory. Scientific American,  
April 1976, pp. 65 - 83.
  
- /8/ R. Grammel: Antrittsrede, Heidelberger Akademie der  
Wissenschaften, 1958.