

Die Rolle der Mechanik im technischen Fortschritt

Autor(en): **Speiser, Ambros P.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **100 (1982)**

Heft 51/52

PDF erstellt am: **23.04.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-74910>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Die Rolle der Mechanik im technischen Fortschritt

Von Ambros P. Speiser, Baden

Dass die Mechanik als Wissenschaft aus dem technischen Neuerungsprozess nicht wegzudenken ist, bedarf keines ausführlichen Nachweises. Die Statik ruht seit dem Altertum, die Dynamik seit Newton auf einem festen wissenschaftlichen Fundament; beide gehören zum Grundwissen des Ingenieurs. Trotz der jahrtausendealten Tradition ist die Mechanik heute eine lebendige Wissenschaft; zahlreich sind die Ergebnisse, die laufend in die Technik fließen und nutzbringend angewandt werden. Das wichtigste Ereignis der vergangenen Jahrzehnte war zweifellos die Einführung der Computermethoden. Heute profitieren nicht nur die klassischen Anwendungsgebiete von neuen wissenschaftlichen Ergebnissen; die Mechanik hat begonnen, sich auch in Domänen wie Elektronik und Nachrichtentechnik auszuwirken.

The fact that the science of mechanics is essential for technological progress does not need to be demonstrated. The scientific tradition of statics is ancient, and dynamics has rested on a solid foundation since Newton. Both constitute basic tools for every engineer. Despite its century-old tradition, mechanics to-day is a lively science; the results that continue to find useful applications in technology are numerous. The most important contribution to mechanics in the past decades undoubtedly has been the introduction of computer methods. To-day, not only the classical fields derive benefits from scientific progress, and mechanics is making itself strongly felt in domains such as electronics and communications.

Die Technik des 20. Jahrhunderts ist ein riesiger und überaus komplizierter Bau – ein Bau mit vielen Stockwerken, vielen Flügeln und vielen Räumen. Dringt man aber zu seinem Fundament vor, so findet man, dass er auf einigen wenigen, mächtigen Tragsäulen ruht, von denen die Mechanik gewiss eine der wichtigsten ist.

Dass die Mechanik eine klassische Wissenschaft mit einer langen Tradition ist, braucht in diesem Kreis nicht besonders erläutert und belegt zu werden. Die Statik ruht seit dem Altertum, die Dynamik seit Newton auf einem soliden wissenschaftlichen Fundament. Die Mechanik blickt also auf eine jahrhundert- oder sogar jahrtausendealte Tradition zurück. Sie unterscheidet sich damit von den meisten anderen der grossen Tragsäulen der Technik: Die wissenschaftliche Tradition der Chemie ist keine 200 Jahre alt, und Elektronik und Nachrichtentechnik stützen sich auf einen Unterbau, der grösstenteils in diesem Jahrhundert errichtet wurde.

Ein Merkmal einer klassischen Wissenschaft ist, dass die Erkenntnisse nicht in gleichmässiger Folge anfallen; sie kommen in Wellen, und dieses Phänomen können wir bei der Mechanik gut beobachten. Diese Wellen können durch verschiedene Ursachen ausgelöst werden. Eine der eindrucklichsten und schönsten ist das Wirken eines grossen Geistes wie Isaac Newton oder Albert Einstein: Das ist der «push from science». Solche Ereignisse sind nicht voraussehbar, nicht wiederholbar und

nicht erklärbar, sie sind ein eigentliches Wunder.

Eine weitere Ursache kann in der Notwendigkeit zur Lösung praktischer Aufgaben liegen, das ist der «pull from technology». Flugzeugbau und Welt- raumtechnik haben grundlegend neue Fragestellungen formuliert und unter dem Titel «Leichtbau» extreme Anforderungen gestellt; sie haben dadurch die Mechanik in reichem Masse befruchtet. Ähnliches lässt sich von der Nukleartechnik sagen, in welcher Spannungs- und Dehnungszustände und Alterungsvorgänge von Werkstoffen mit einer bisher nicht gekannten Genauigkeit analysiert werden müssen. Oft sind es militärische Erfordernisse gewesen, die der Mechanik Impulse verliehen haben: Archimedes konstruierte Maschinen für die Belagerung, und von Napoleon ist bekannt, dass er die Wissenschaftler, die sich mit Ballistik befassten, tatkräftig förderte. Die Medizin verwirklicht künstliche Gelenke und sogar ganze Glieder, die zahnärztliche Forschung verwendet heute die wissenschaftliche Methodik der Festigkeitslehre; sie stellen grundlegende Fragen an die Mechanik.

Und eine dritte auslösende Ursache kann vom Angebot neuer Hilfsmittel für Messung und Berechnung ausgehen. Diese dritte Kraft ist wohl ein Ergebnis des 20. Jahrhunderts, und es ist die Elektronik, die hier alles andere in den Schatten stellt und der Mechanik zahlreiche grundlegende Impulse zu verdanken hat.

Vorwort

Um den hohen Stand der Schweizer Maschinen- und Bauindustrie aufrechtzuerhalten, ist ein intensiver Ideen- und Informationsaustausch zwischen Hochschule und Industrie wünschenswert. Zur Förderung dieses Kontaktes wurde am 11./12. Nov. 1982 an der ETH Zürich ein Symposium über «Angewandte Mechanik in Industrie und Hochschule» abgehalten. Das Symposium zeigte an ausgewählten Beispielen ein Spektrum der Anforderungen und Lösungsmethoden, die bei aktuellen Problemen im Bereich der Mechanik auftreten. Ein Teil der dort gehaltenen Vorträge wird in den kommenden Heften dieser Zeitschrift abgedruckt werden.

Die «Angewandte Mechanik» tritt als Mittlerin zwischen Theorie und Anwendung auf und hat den Auftrag, sich für methodische und technische Neuerungen einzusetzen und die Grundlagen dafür bereitzustellen. Die Beiträge für das Symposium kennzeichnen Schwerpunkte im engeren Bereich der angewandten Mechanik und zeigen wichtige Verbindungen zu Nachbargebieten. So befassen sich die Beiträge mit Bruchmechanik, Thermomechanik und anisotropem Werkstoffverhalten, mit der Modellbildung von Schwingungssystemen durch Modalanalyse, mit der Rotordynamik, mit der sog. Mechatronic, d.h. mit der Steuerung mechanischer Bewegungen und ihrer Realisierung mit Hilfe der Elektrotechnik, mit Strukturschwingungen, mit nichtlinearen Finite-Element-Modellen und ihrer Berechnung mit den Methoden der Informatik.

Den Anstoss zu dem Symposium gab Dr. U. Stüssi, Veranstalter war das Institut für Mechanik der ETHZ unter Mitwirkung von E. Anderheggen, Institut für Informatik (ETH Zürich), M. Del Pedro, Institut des Métaux et des Machines (EPF Lausanne), P. Marti, Institut für Baustatik und Konstruktion (ETH Zürich), M. Sayir, Institut für Mechanik (ETH Zürich), G. Schweitzer, Institut für Mechanik (ETH Zürich), U. Stüssi, Tensor AG, Zürich, B. Thürlimann, Institut für Baustatik und Konstruktion (ETH Zürich).

G. Schweitzer

Computermethoden

Auf die Frage, welches in der Mechanik der wichtigste Fortschritt der vergangenen drei Jahrzehnte war, gibt es unter den Experten keinen Streit: Es sind die Computermethoden. Ich will mich damit etwas ausführlicher befassen, unter anderem auch darum, weil ich die ersten Anfänge dieser Entwicklung an

einer der weltweit angesehensten Stellen miterlebt habe, nämlich am *Institut für angewandte Mathematik* der *ETH Zürich* unter der Leitung von *Eduard Stiefel*. Der *Relais-Rechner Z4*, der im Juli 1950 installiert wurde, war der erste programmgesteuerte Computer auf dem europäischen Kontinent, und er wurde vorwiegend für Aufgaben eingesetzt, die aus der Mechanik stammten. Eine der ersten Aufgaben war die Bestimmung der *kritischen Drehzahlen einer komplizierten, 4fach gelagerten Welle*, genauer gesagt eines Turbogenerators. Man verwendete dazu ein neues Verfahren, das kurz vorher bekannt geworden war. Eine weitere Aufgabe war die Bestimmung der *Spannungen und Dehnungen in einem massiven Bauwerk*. Es handelte sich um die *Grande-Dixence-Staumauer*. Die biharmonische Gleichung $\Delta \Delta u = 0$ wurde gelöst, indem man das Problem auf eine ebene Aufgabenstellung zurückführte und 200 Gitterpunkte definierte, für die die Funktionswerte gesucht waren. Das war die *Methode der finiten Elemente* (FEM-Methode), aber dieser Name war damals noch nicht gebräuchlich. Dem Mathematiker stellte sich die Aufgabe der Lösung eines linearen Gleichungssystems mit 200 Unbekannten. Die Theorie der grossen Gleichungssysteme befand sich damals in den Anfängen. Der Grund wird sofort ersichtlich, wenn man sich vergegenwärtigt, welche Rechenleistung zur Verfügung stand: Die Z4 führte 1000 Operationen je Stunde aus. Aus betrieblichen Gründen konnte man Aufgaben von mehr als 100 Stunden Dauer nur ausnahmsweise in Angriff nehmen. Die Speicherkapazität betrug 64 Worte. Grössere Datenmengen konnten auf Lochstreifen zwischengespeichert, aber natürlich nicht mit random access, sondern nur sequentiell wieder gelesen werden. 100 000 Operationen und 64 Speicherplätze war also die Schranke, die für die Lösung dieses Gleichungssystems gesetzt war. Es war diese Beschränkung, die die schöpferische Kraft der Mathematiker beflügelte. Es war die dringende Notwendigkeit der Lösung dieses Gleichungssystems, die *Stiefel* zur Ausarbeitung der Methode der *konjugierten Gradienten* anregte, eine Entdeckung, die als eines der besten Ergebnisse in der numerischen Mathematik in diesen Jahren bezeichnet wurde. *Mechanik und Mathematik als Partner in der Forschung*: Ein Paar, dem wir immer wieder begegnen. Diese Partner durchschreiten die Wissenschaft der Jahrhunderte, sogar der Jahrtausende, und ihre Fussspuren sind weithin sichtbar. Diese Partnerschaft hat uns für den Betrieb der Z4 mit vielen und interessanten Aufgaben versorgt, und die Gesamtheit dieser Aufgaben bildet einen

wichtigen Beitrag zum Thema der Rolle der Mechanik im technischen Fortschritt. Ich verzichte auf eine Aufzählung, weil solche Themen in überzeugender Art in den Vorträgen dieser Tagung zum Ausdruck kommen werden, und ich beschränke mich auf die Bemerkung, dass die Fragestellungen nicht nur aus dem *Bauingenieurwesen* kamen, sondern auch aus dem *Flugzeugbau* und ausgiebig aus dem *Maschinenbau*. Es handelte sich sowohl um *Festigkeits- als auch um Schwingungsaufgaben*.

Unter den Computerverfahren in der Mechanik ist zweifellos die FE-Methode die wichtigste, und es war uns schon in der Z4-Zeit ganz klar, dass ein weiterer Ausbau nur auf Grund einer starken Erhöhung der Rechengeschwindigkeit und einer grossen Vermehrung des Speicherplatzes möglich sein werde. Beides ist uns in reichem Masse besichert worden – in einem Masse, das damals ganz unmöglich vorausgesehen werden konnte.

Es hat sich noch etwas weiteres zugetragen, das nicht vorausgesehen wurde und auf das ich mit Nachdruck hinweisen will. Die Erhöhung der Rechengeschwindigkeit ist etwas rein Quantitatives. Der Schritt erwies sich aber bald als so gross, dass er zu grundlegenden Änderungen der Arbeitsweise geführt, also einen *qualitativen* Aspekt erhalten hat. Es sind Dinge möglich geworden, an die man vorher prinzipiell nicht denken konnte. Zu diesen Dingen gehört die *iterative Wechselwirkung zwischen der mathematischen, routinemässigen Rechnung und dem schöpferischen Akt des Konstruierens*. Die Möglichkeit, in schneller Folge – eben iterativ – neue Ideen zu konzipieren und sofort durchzurechnen, gehört zu den schönsten Bereicherungen in den Anwendungen der Mechanik in der Technik. Es ist die Erhöhung der Computerleistung, der wir dieses Geschenk verdanken. Dieser Vorgang bestätigt eine alte Regel, die in der Technik immer und überall gilt: Quantitative Änderungen von einem Faktor 10 oder mehr erhalten einen qualitativen Aspekt. «Differences in size, if large enough, become differences in kind.»

Im Prozess des interaktiven Rechnens ist der *Bildschirm* zu einem unentbehrlichen Glied geworden. Als Beispiel einer Anwendung aus der jüngsten Zeit erwähne ich die *Schwingungsmechanik*. Es ist heute möglich, die Schwingungsformen komplizierter Teile – etwa einer Turbinenschaufel – zu berechnen und auf dem Bildschirm darzustellen: Der Betrachter sieht die Schwingung im Zeitlupenmassstab ablaufen. Um das zu ermöglichen, bedurfte es eines hohen Standes von Hardware und Software.

Solche Verfahren sind eine wichtige Hilfe in der Maschinenkonstruktion.

Ich habe darauf hingewiesen, dass man die grossen Fortschritte in der Computertechnik in der Frühzeit nicht voraussehen konnte. Ich erinnere mich aber noch sehr gut, dass wir am Institut schon 1951 folgende Erwägung angestellt haben: Die FE-Methode wird von zwei auf drei Dimensionen ausgedehnt werden müssen, und für zeitabhängige Aufgaben kommt als vierte Dimension die *Zeit* hinzu. Die *Vierdimensionalität* führt zu einer grossen Zahl von Gitterpunkten und wird bewirken, dass an die Computerleistung rapide steigende Ansprüche gestellt werden. Mit vier Dimensionen bedeutet eine Verzehnfachung von Rechengeschwindigkeit und Speicherkapazität eine sehr bescheidene Verbesserung: Die Maschendichte kann nicht einmal verdoppelt werden. Daher wird jeder Fortschritt in der Computertechnik mit dem Wunsch nach «noch mehr» beantwortet werden. Diese Prognose hat sich bewahrheitet. In den letzten Jahren sind für Rechenaufgaben, denen eine geometrische Struktur zugrunde liegt, die also auf partielle Differentialgleichungen zurückgehen, die *Vektor-Prozessoren* und die *Array-Prozessoren* geschaffen worden, riesige Anlagen mit Dutzenden oder sogar Hunderten von parallelen Prozessoren und Speichern, deren Rechenleistung sich nach Dutzenden von Millionen Operationen je Sekunde bemisst, kurzzeitig sogar weit über 100 Millionen. Aber die Anwender sind auch damit nicht zufrieden; es sind, nebst anderem, die *partiellen Differentialgleichungen der Mechanik*, die diese Unersättlichkeit begründen. Für die nächsten fünf Jahre sieht man Rechenwerke mit tausenden von Prozessoren voraus; ihre Architektur ist auf einen einzigen Algorithmus ausgerichtet, und sie werden mehrere Milliarden Operationen je Sekunde bewältigen – gemeint sind, nota bene, Operationen mit Gleitkomma!

Numerische Fluidmechanik

Mit dem Hinweis auf dreidimensionale und zeitabhängige Aufgaben haben wir den Bereich der Statik und der Festigkeitslehre bereits verlassen. Ich möchte auf ein anderes Gebiet überschwenken, auf dem die Computertechnik der Mechanik und damit die Mechanik der Technik einen enormen Auftrieb gegeben haben: die Fluidmechanik.

Im Gegensatz zur Festigkeitslehre konnten in der Z4-Zeit, also in den frühen 50er Jahren, strömungsmechanische Aufgaben nicht angegangen werden – die Rechenleistung war einfach

zu schwach, und daher fehlte auch der Anreiz zur Entwicklung mathematischer Modelle und numerischer Methoden. Erst im vergangenen Jahrzehnt konnte man solche Dinge in Angriff nehmen. Es entwickelte sich – immer unter Zuhilfenahme der modernsten Computertechnik – das neue Gebiet der *Computational Fluid Mechanics*, der numerischen Fluidmechanik. Eine der tieferen Ursachen für die grosse Bedeutung und die grossen Erfolge dieser neuen Disziplin dürfte in der Sonderstellung des *Phänomens der Turbulenz* liegen, das fast alle Strömungsvorgänge dominiert: Die Turbulenz ist eines der grossen ungelösten Probleme der klassischen Physik. Turbulente Vorgänge können auch heute noch, nach mehr als einem Jahrhundert systematischer wissenschaftlicher Forschung, nicht aus den Grundgleichungen vorausberechnet werden. Es bleibt vorläufig kein anderer Ausweg als eine grosse Anzahl von beispielhaften Strömungstypen einzeln zu untersuchen und zu dokumentieren und so die Unterlagen bereitzustellen, um neue Geometrien auf bekannte zurückzuführen.

In der heutigen Forschung ist die numerische Fluidmechanik nicht einfach ein Instrument, um numerische Lösungen für analytische Ausdrücke zu finden. Sie gehört nicht zur traditionellen Domäne des Experiments, weil keine Strömungsvorgänge im Laboratorium beteiligt sind. Sie gehört auch nicht zur analytischen Theorie, weil ihr Tätigkeitsgebiet nicht das Aufstellen von Formeln, sondern das Durchrechnen von numerischen Lösungen ist. Sie hat Merkmale der experimentellen Arbeit, weil viele Fälle mit verschiedenen Parametern erprobt werden können. Die numerische Fluidmechanik stellt neben den zwei klassischen Polen *analytische Theorie* und *Experiment* etwas grundsätzlich Neues, eine *echte dritte Kraft* dar; sie ist im Begriff, sowohl den Vorgang der wissenschaftlichen Forschung als auch die Entwicklung von Strömungsmaschinen zu erneuern und zu bereichern.

Bringt man die zwei Domänen Strömungsforschung und Schwingungsmechanik zusammen, so entsteht das Gebiet der *strömungsinduzierten Schwingungen*. Die Fahne, die im Wind flattert, ist ein alltägliches, in der Analyse aber sehr kompliziertes Beispiel. Das Gebiet ist für die industrielle Praxis wichtig – weniger wegen der Fälle, in denen man, wie in Musikinstrumenten, strömungsinduzierte Schwingungen erzeugen möchte, sondern weil sie verhindert werden müssen. Ventile, Flugzeugflügel, ganze Brücken können zu Schwingungen angeregt und sogar zerstört werden. Der Ingenieur hat hier an

die Mechanik ganz wesentliche Fragen zu stellen.

Über die Identität der Mechanik

Bevor ich im Katalog der Neuerungsimpulse der Mechanik weiterfahre, möchte ich einige Bemerkungen über die Identität des Forschungs- und Lehrgebietes Mechanik einflechten.

Die Mechanik ist eine der Tragsäulen der Technik des 20. Jahrhunderts, und sie gehört zum *Grundwissen eines jeden Ingenieurs*. Sie ist so stark verzweigt und greift in so grossem Umfang in Nachbardisziplinen ein, dass es für ihre Gliederung und ihre Abgrenzung keine übereinstimmenden Normen gibt: Erkundigt man sich, wie die Mechanik gegliedert sei und was genau dazu gehöre, so erhält man von verschiedenen Quellen verschiedene Antworten. Die Mechanik weist unter den Grundwissenschaften der Technik noch eine weitere Besonderheit auf: Sie ist *nicht Gegenstand eines anerkannten Hochschulabschlusses*, zumindest in unserer herkömmlichen Struktur der technischen Hochschulen. Es gibt den diplomierten Mathematiker, den Physiker, den Chemiker, aber nicht den Mechaniker. Die Mechanik muss jeder beherrschen, am ausgeprägtesten natürlich der Bauingenieur und der Maschineningenieur. Es kommt hinzu, dass im allgemeinen Sprachgebrauch der Name «Mechanik» nicht einen Hochschulabsolventen bezeichnet, sondern einen Berufsmann, der Autos und andere Maschinen und Anlagen instand hält.

Aber die *Vielfalt* des Begriffes «Mechanik» ist nicht neu. Es ist amüsant und zugleich aufschlussreich, was in einem griechischen (einem altgriechischen) Wörterbuch unter «mechane» zu finden ist. Man liest dort «Vorrichtung, Werkzeug, Maschine; Kriegsmaschine; Hilfsmittel, Wirkungsweise; kluge Anordnung, Erfindung; Kunstgriff, List, Kriegslist». Das Adjektiv «mechanetikos» heisst erfinderisch, kunstreich, geschickt, schlau. Die Sprache ist ein Spiegelbild psychologischer Realitäten. Die Tatsache, das ein- und dasselbe Wort so viele verschiedene Dinge bedeuten kann, ist nicht einfach ein Mangel unserer Sprache. Sie zeigt, dass alle diese Begriffe in der Vorstellungswelt der Menschen irgendwie nahe beieinander liegen, im besonderen, dass Wissenschaft und Praxis auf dem Gebiet der Mechanik besonders eng verbunden sind. Ich sehe darin einen Beitrag zur Erklärung für die grosse Faszination und die emotionale Befriedigung, welche die Forscher empfinden, wenn sie tief in die Mechanik eindringen und zur Front des Wissens vorstossen.

Plastizität

Die Computermethoden sind unbestritten der wichtigste Impuls, den die mechanische Forschung und die Anwendung der Mechanik in der Technik in den vergangenen Jahrzehnten erhalten haben, aber bei weitem nicht der einzige. Die Mechanik hat sich auch durch den Einbezug neuer Fragestellungen ausgiebig bereichert. Ein Beispiel dieser Art ist die Plastizität.

Dass Spannungen und Dehnungen nicht nur durch das Hookesche Gesetz miteinander verknüpft sind, ist natürlich nicht erst eine Erkenntnis dieses Jahrhunderts; die Existenz von *Nichtlinearitäten* und von *Irreversibilitäten* wird schon aus einfachen Beobachtungen manifest. Aber der Einbezug der Plastizität in die *quantitative Analyse* und die Erarbeitung von *Verfahren für die rechnerische Voraussage des Verhaltens von Bauteilen* bedurfte der Bereitstellung eines umfangreichen wissenschaftlichen Instrumentariums.

Aus der Sicht der technischen Anwendungen hat dieser Vorgang reiche Früchte getragen. Unter den vielen Ergebnissen, die die Plastizitätstheorie der Technik beschert hat, will ich jene herausgreifen, die sich auf die *Warmumformung von Metallen* beziehen. Metalle lassen sich unter Druck leichter umformen, wenn man durch Erwärmen auf eine Temperatur, die irgendwo zwischen Zimmertemperatur und Schmelzpunkt liegt, ihre Plastizität erhöht – dieses Verfahren trägt den Namen «*Schmieden*» und wird seit dem Altertum praktiziert. In der Technik des Schmiedens dominierte bis vor kurzem der empirische Gehalt gegenüber dem wissenschaftlich erarbeiteten Verständnis bei weitem. Das ist nun im Begriff, sich zu ändern, aus einem Grund, der für solche Fälle typisch ist: Es kommen von mehreren, weit voneinander entfernt liegenden Ecken der Wissenschaft und der Technik im richtigen Moment Ergebnisse auf uns zu, die zusammengefügt werden können. Im Verständnis der *metallischen Bindung* zwischen den Atomen und dem Verhalten der *Versetzungen* sind wichtige Fortschritte erzielt worden. Neue Messmethoden erlauben es, den Schmiedevorgang exakt zu erfassen, was die Voraussetzung für die Aufstellung und die Verifizierung von Rechenmodellen ist. Die Plastizitätstheorie vermittelt die Grundlage für die Erstellung von solchen Modellen, und die computergestützte FE-Methodik liefert das Instrument für die numerische Berechnung. Das Ganze ist eine enge Verflechtung

von Mechanik und Werkstoffwissenschaften.

Die wissenschaftliche Durchdringung des Vorganges, den man Warmumformung oder eben Schmieden nennt, ist übrigens ein schönes Beispiel für den Wandel, der sich in der *akademischen Rangordnung der Forschungsgebiete* einstellen kann. Vor 20 Jahren war das Schmieden kaum ein Thema für anspruchsvolle Forscher. Es existierten zwar viele offene Fragen, aber die Instrumente und Methoden für die wissenschaftliche Durchdringung fehlten. Forscher, die sich auf der internationalen Ebene profilieren wollten, fühlten sich nicht zu diesem Gebiet hingezogen. Heute hat sich die Lage gründlich gewandelt, ein Vorgang, von dem sowohl Wissenschaft als auch Technik ausgiebig profitieren.

Kunststoffe

Die metallischen Werkstoffe, zu denen ich wieder zurückkehren werde, verlasse ich für einen Augenblick, um mich den Kunststoffen zuzuwenden. Die Festigkeitslehre der Kunststoffe ist vielleicht nicht komplizierter, aber jedenfalls weniger weit ausgearbeitet als jene der Metalle. Den Kunststoffen kommt im Maschinenbau eine steigende Bedeutung zu, und die Mechanik als Wissenschaft ist in diesem Fortschritt ein unentbehrliches Instrument. Besonders interessant und vielgestaltig ist die Lehre von der Umformung. Es gibt zahllose verschiedene Kunststoffe, und ihr Plastizitätsverhalten bei verschiedenen Temperaturen kann in weiten Grenzen variieren. Wir kommen hier in den *Grenzbereich zwischen Festkörpermechanik und Strömungsmechanik*: Die beiden Betrachtungsweisen gehen kontinuierlich ineinander über. Je nachdem, ob Viskositätskräfte oder Massenkraft dominieren, gilt die eine oder die andere Bezeichnung. Hier liegt ein weites Feld für wissenschaftlich fruchtbare und technisch nützliche Forschungsthemen.

Bruchmechanik

Ein besonders interessantes und besonders fruchtbares Forschungsgebiet hat sich in Gestalt der Bruchmechanik aufgetan. Die Bruchmechanik ist die Lehre von der Entstehung und Ausbreitung von Rissen in Werkstoffen unter dem Einfluss mechanischer Spannungen. Sie ist deshalb so bedeutend, weil die Rissbildung den eigentlichen begrenzenden Faktor für die Beanspruchung in Bauwerken und Maschinen darstellt

und in allen Konstruktionen ein zentrales Element ist.

Die Bruchmechanik ist etwas *Interdisziplinäres*. Es kommen in ihr, neben der Mechanik, die Chemie und die Metallurgie vor, und der Fortschritt in der Bruchmechanik kann nur aus einem engen Zusammenwirken zwischen diesen Disziplinen heraus erwachsen. Aus dem interdisziplinären Denken entstehen Fragestellungen, die in die einzelnen Disziplinen hineingetragen und beantwortet werden. Diese Teilantworten werden in die interdisziplinäre Domäne zurückgebracht und bilden die Steine zu einem Mosaik, dessen Zusammensetzung sowohl gründliche Sachkenntnis als auch schöpferische Kraft erfordert. Der Beitrag der Mechanik liegt in erster Linie in der Spannungs-Dehnungs-Analyse von Körpern, die Risse enthalten und deren Verhalten durch elastische, elastisch-plastische oder auch zeitabhängige Werkstoffgesetze beschrieben wird. Es ist klar, dass solche Analysen in vielen Fällen nur mit den neuen Computermethoden möglich sind.

Im übrigen ist zu sagen, dass die Mechanik der *Kristallgitter* und der *Gitterfehler* wesentlich zum Stand der Werkstoffwissenschaft beigetragen hat. Die Bemerkungen über dieses Thema mögen abgeschlossen werden mit einem Hinweis darauf, dass die Erforschung der Rissausbreitung in Kunststoffen und in keramischen Werkstoffen heute aktuell und wichtig ist. Während sich die Bruchmechanik der Metalle nicht nur auf ein reiches empirisches Wissen, sondern heute auch auf eine seriöse wissenschaftliche Grundlage stützt, sehen wir in der Bruchmechanik der *nichtmetallischen Stoffe* noch wesentlich mehr unbeantwortete Fragen.

Messmethoden

Unter den grossen Impulsen, die die Mechanik in den letzten Jahrzehnten erhalten hat, möchte ich schliesslich die *Gesamtheit der neuen Messmethoden* erwähnen. Die Erfindung des Lasers und die mannigfaltigen Erscheinungsformen der Elektronik haben bewirkt, dass viele Vorgänge mit wesentlich grösserer Genauigkeit gemessen werden können, und dass Phänomene erfasst werden können, die früher einer quantitativen Erfassung überhaupt nicht zugänglich waren. Der Hinweis auf die neue Messtechnik betrifft allerdings weniger die Frage «Welche Rolle spielt die Mechanik im technischen Fortschritt?», sondern «In welcher Weise profitiert die Mechanik vom technischen Fortschritt?».

Die neue Messtechnik ist so vielgestaltig, dass ich darauf verzichten muss, sie systematisch zu ordnen oder eine Aufzählung zu präsentieren, die auch nur annähernd vollständig wäre. Ich muss mich auf einzelne Themen beschränken und sie als Beispiele vorstellen.

Der erste Einbruch der elektrischen Messtechnik in die Mechanik erfolgte in Gestalt der *Dehnungsmessstreifen*, die auf Bauteile aufgeklebt werden und die es erlauben, Dehnungen zu messen, die vorher nicht erfassbar waren. *Mikrophone* und *Beschleunigungsmesser*, deren Dimensionen von Jahr zu Jahr kleiner wurden, unter gleichzeitiger Erhöhung der Empfindlichkeit, gaben der Schwingungsmechanik neue Auftriebe und sind heute aus dem Laboratorium nicht mehr wegzudenken. *Ultraschallwellen* erlauben das Eindringen in Werkstücke und geben Aufschluss über Inhomogenitäten.

Der *Laser* hat – wie auf vielen anderen Gebieten – auch in der Mechanik neue und grosse messtechnische Möglichkeiten eröffnet. Mittels *Holographie* lassen sich Dehnungen an grossen und beliebig geformten Maschinenteilen messen, und zwar mit einer Auflösung, die bis auf einen Bruchteil der Wellenlänge von sichtbarem Licht hinuntergeht. Vielleicht noch eindrücklicher ist die *Doppler-Anemometrie*, die die Messung von Strömungsvorgängen mit einem Laserstrahl erlaubt, ohne dass die Strömung durch eine materielle Sonde gestört wird, und erst noch unter Auflösung in die Vektorkomponenten.

Meine Aufzählung ist, wie erwähnt, bei weitem nicht vollständig, aber es wäre unverzeihlich, wenn ich die Zusammenschaltung von Messtechnik und Computer nicht wenigstens andeuten würde. Die *computergestützte Messdatenerfassung* und die *online-Verarbeitung* gehört heute zur Normalausrüstung eines Laboratoriums und ist auf manchen Gebieten für die Erarbeitung von wissenschaftlichen Ergebnissen unerlässlich.

Die Mechanik in der Elektronik und der Nachrichtentechnik

Die Elektronik hat also, hauptsächlich in Form der Computer- und Messtechnik, der Mechanik vitale Impulse vermittelt. Hat sie, gewissermassen als Entschädigung, auch *Gegenleistungen* empfangen? Die Antwort kann nur ein überzeugtes Ja sein. Welches sind die Impulse, die in dieser Richtung geflossen sind? Auch hier muss ich mich auf Beispiele beschränken.

Dass der piezoelektrische Effekt nutzbringend eingesetzt werden kann, ent-

deckten die Elektroniker schon sehr früh, und der Quarz erwies sich bald als ein Kristall, der die erwünschten mechanischen und piezoelektrischen Eigenschaften in wunderbarer Weise in sich vereinigte: Er eignete sich für den Bau von *Oszillatoren hoher Konstanz*. Vor einem halben Jahrhundert machte man sich an die Arbeit, um mit der wissenschaftlichen Methodik bis an die Grenzen der physikalisch möglichen Genauigkeit vorzustossen, und es sind die Grundgleichungen der Kontinuumsmechanik, die hier – wohl zum ersten Mal in der Elektronik – zur Anwendung kamen. Heute trägt fast jeder Mann einen Schwingquarz am Arm, und die Zahl der hergestellten Quarze dürfte im Begriff sein, die Milliarde zu erreichen.

Für die Speicherung von Daten machten die ersten Computer von *Schallwellen in Quecksilber* Gebrauch. Es musste also die Ausbreitung von Ultraschall in einer Flüssigkeit und die Ankopplung dieses akustischen Feldes an Piezoquarze studiert werden. Man wollte bis an die physikalischen Grenzen dieses Verfahrens vorstossen; die Verwendung der wissenschaftlichen Methodik war daher unerlässlich.

Akustische Wellen kommen in der Elektronik in immer neuen Varianten vor. Eine aktuelle Entwicklung beruht auf den *Oberflächenwellen*. Worum handelt es sich dabei? Oberflächenwellen in Flüssigkeiten sind ein beliebtes Objekt für Vorlesungsexperimente. Es gibt sie aber auch in Festkörpern. Sie lassen sich weniger gut demonstrieren, aber ihre Theorie ist bekannt, sie geht auf *Lord Rayleigh* zurück. In der *Geophysik* spielen sie eine Schlüsselrolle, weil sie zur Hauptsache für die Ausbreitung von Erdbeben verantwortlich sind.

Neu ist die Entdeckung, dass man in piezoelektrischen Kristallen Oberflächenwellen erzeugen kann. Diese Erkenntnis kam in einem Moment, da die Theorie der *Delay-Line-Filter* abgeschlossen war und die *Photolithographie* und die *mikroelektronische Herstellungstechnik* einen unerhört hohen Stand erreicht hatten. Somit war alles wie auf dem Servierbrett bereit, um *mikroelektronische akustische Filter* zu bauen. Sie liegen in dem wichtigen und aktuellen Gebiet zwischen 100 und 1000 MHz und haben neue und bedeutende Eigenschaften.

Die grossartigste Erscheinungsform der Nachrichtentechnik sind ohne jeden Zweifel die *Nachrichtensatelliten*. Unter allen technischen Errungenschaften der Menschen gehört die Weltraumtechnik zu den eindrucklichsten, vielleicht ist sie die bedeutendste über-

haupt. Für die Erreichung dieses grossen Ziels haben praktisch alle Gebiete der Technik und der Naturwissenschaften, auf die sie sich gründet, neue und schwierige Problemlösungen erarbeiten müssen.

Die Mechanik taucht überall und in den verschiedensten Formen auf, und die Nachrichtensatelliten sind sicher das schönste Geschenk der Mechanik an die Elektronik. Unter den zahlreichen Anwendungsfällen der Mechanik will ich ein Beispiel herausgreifen, nämlich die *Bahnrechnungen*. Die Himmelsmechanik hat durch die Weltraumtechnik bedeutende Impulse erhalten. Mit den numerischen Methoden des Jahres 1950 wäre nämlich die heutige Satellitentechnik ganz undenkbar. Es bedurfte eines grundlegend neuen, tiefen Einblicks in den Vorgang der *numerischen Integration von Differentialgleichungen*, bevor die Bahnrechnungen möglich wurden, die heute eine Weltraummission begleiten. Ein weiteres Mal begegnet uns die Partnerschaft von Mechanik und Mathematik in der Erforschung der wissenschaftlichen Grundlagen der Technik.

Angesichts der heutigen Weltraumtechnik werden die älteren Jahrgänge unter uns mit einer gewissen Nostalgie an die Science-Fiction-Literatur vergangener Jahrzehnte zurückdenken. Autoren wie *Jules Verne* und *Kurd Lasswitz* haben in ihren Schilderungen von Reisen zu den Sternen ihre schöpferische Phantasie mit einem realistischen Sinn für das technisch Mögliche verbunden. Was wir damals als Gymnasiasten lasen, war spannend, aber irgendwie glaubte man doch nicht ernsthaft daran, dass diese Dinge einmal zur Realität würden. Diese Zweifel waren, wie wir jetzt wissen, unbegründet. Rückblickend muss man den Realitätssinn bewundern, mit dem diese Autoren technische Probleme richtig erkannt und Lösungen ersonnen haben. In einem Punkt aber haben sich alle grundlegend geirrt: Nämlich in den Anforderungen an die numerischen Berechnungen. Die Astronauten dieser Verfasser führten ihre Bahnrechnungen mittels Formeln aus, und sie benötigten dazu nur Bleistift und Papier. Erst unter dem Druck der realen Verwirklichung erkannte man, welche ungeheure Computerleistung eine Weltraummission erfordert.

Zukunft

Zum Schluss noch ein Blick in die Zukunft: Was wird sie uns bringen? Die Zukunft kann man nicht voraussagen, weil es in der Hand der Menschen liegt, sie zu gestalten. Aber man kann Ten-

denzen erkennen und daraus Wahrscheinlichkeiten herleiten.

Der «Pull from Technology» wird unvermindert anhalten. Er wird von den fortschrittshungrigen Gebieten wie Hoch- und Tiefbau, Maschinenbau, Energietechnik, Schiffs- und Fahrzeugbau, Medizin, Flugzeug- und Weltraumtechnik herkommen. Die Anforderungen an Forschungsgebiete wie Bruchmechanik, Schwingungsmechanik und Plastizität werden anhalten – jedes Ergebnis wird den Wunsch nach «noch mehr» hervorrufen. Die elektronischen Hilfsmittel, in erster Linie die Computer, werden weiter stürmisch voranschreiten. Das interaktive, mit Berechnungen kombinierte Konstruieren wird verbessert und verfeinert, das mathematische Instrumentarium für die FE-Methode wird weiter ausgebaut. Interdisziplinäre Arbeit – also der Bezug von Ergebnissen aus entfernten Ecken der Naturwissenschaft – wird vielleicht das schwierige Gebiet «*Reibung und Abnutzung*» der wissenschaftlichen Analyse näherbringen. Die verbesserte Computerleistung wird der numerischen Fluidmechanik weitere, schwierigere Fragestellungen erschliessen.

Und wie steht es mit dem «push from science» – was ist davon zu erwarten? Grosse Entdeckungen sind etwas Unerwartetes; man kann sie nicht voraussagen, darin liegt ja gerade das Wesen des Unerwarteten. Man kann sie auch nicht bestellen oder herbeiorganisieren; sie sind ein Geschenk der Natur. Aber man kann ein *Klima* schaffen, das sie begünstigt. Ein solches Klima entsteht durch *Forschungsprogramme*, in denen qualifizierte Wissenschaftler jene Gebiete beackern, die zur Bearbeitung reif sind und die an der Front des Wissens liegen. Es entwickelt sich dort, wo originelle Ideen, die aus echter schöpferischer Kraft entstanden sind, sich zusammenfinden mit einem kritischen Geist und einer sorgfältigen, systematischen Arbeitsweise.

Auf diese Art werden die Voraussetzungen geschaffen, die für das Entstehen grosser Ideen günstig sind, und es bildet sich der Nährboden, den sie brauchen, um zu gedeihen. An der Wurzel grosser technischer Neuerungen liegt die wissenschaftliche Forschung.

Dieser Arbeit sind Aussprachen mit einer Reihe von Wissenschaftlern und Ingenieuren vorausgegangen. Wertvolle Anregungen verdanke ich besonders den Herren *Janne Carlsson*, *Gernot Gessinger*, *Walter Hossli*, *Günther Schröder* und *Christian Wüthrich*.

Adresse des Verfassers: Prof. Dr. A. P. Speiser, Chef der Konzernforschung, BBC Aktiengesellschaft Brown, Boveri & Cie., CH-5401 Baden.