

Forschung am ETH-Institut für Mechanik

Autor(en): **Sayir, Mahir**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **101 (1983)**

Heft 27/28

PDF erstellt am: **21.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-75173>

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.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

<http://www.e-periodica.ch>

Forschung am ETH-Institut für Mechanik

Von Mahir Sayir, Zürich

Am Institut für Mechanik werden sowohl anwendungsorientierte Probleme als auch Themen von physikalisch-wissenschaftlichem Interesse untersucht. Diese Studien sollen den Fortschritt in der angewandten Mechanik einerseits direkt und andererseits über die Ausbildung von Doktoranden und Vertiefungsstudenten fördern. Zur Illustration werden einige typische Beispiele aus der Forschungstätigkeit kurz diskutiert. Kriecherscheinungen beim Stranggiessen im Temperaturbereich von 800° bis 1300 °C (Ausbauchungsprobleme), das nichtlinear-viskoelastische Verhalten von gummiartigen Materialien, das dynamische Biegeverhalten von faserverstärkten Balken, Platten und Schalen mit relativ grossen Steifigkeitsunterschieden zwischen Fasern und Matrix, das unkonventionelle Verhalten von Sandwich-Strukturen mit weichem Kern, Energieübertragung bei elastischen und plastischen Stossphänomenen sowie dynamische Bruchmechanik sind einige der Themen, die wir in letzter Zeit untersucht haben. Nicht alle Erkenntnisse, die wir aus unserer Forschung gewinnen, sind technologisch oder wissenschaftlich direkt anwendbar. Manche sind nur kleine Beiträge zur Erweiterung des aktuellen Wissensstandes der Mechanik, andere dagegen erweisen sich als recht zukunfts-trächtig. Eine verstärkte Zusammenarbeit zwischen Industrie und Hochschule würde sicher den wirkungsvollen Einsatz verschiedener Forschungsergebnisse fördern und die zukünftigen «Trends» positiv beeinflussen.

Both application-oriented problems and subjects of physical or scientific interest are treated at our Institute of Mechanics. These studies should support the progress in applied mechanics directly or through the education of engineers studying for their doctoral degree and of students of engineering specializing in mechanics. Some typical, illustrative examples of research activities at the Institute of Mechanics are shortly discussed. Creep phenomena in continuous casting at temperature ranges 800° to 1300 °C (bulging problems), the nonlinear viscoelastic behaviour of rubber and rubber-like materials, the dynamic flexural response of fiber-reinforced beams, plates and shells with large stiffness ratios between the fibers and the matrix, the unconventional behaviour of sandwich structures with soft core, the transport of energy in elastic or plastic impact phenomena, dynamic fracture mechanics are some of subjects which are studied lately at our Institute. Of course, not all research results are directly applicable in technology or science. Most of them are only small contributions to the actual state of knowledge in mechanics, a few results may turn to be quite important for future progress. A closer collaboration between industry and university would certainly promote the effective application of research results and influence favorably future trends.

Allgemeines

Die Forschungstätigkeit am Institut für Mechanik wird im grossen ganzen durch drei Faktoren bestimmt:

Ein unmittelbar von der Industrie gestelltes Problem soll gelöst werden. In den meisten Fällen ist die Aufgabenstellung mit dringlichen Terminen verknüpft. Die verwendbaren Methoden werden dadurch wesentlich mitbeeinflusst. Für lange Grundlagenstudien stehen weder Zeit noch Mittel zur Verfügung, folglich soll das Problem vom bereits vorhandenen Wissensstand der Mechanik ausgehend gelöst werden.

Ein Themenkomplex soll wegen seiner direkten technischen Anwendbarkeit studiert werden. Die technische Anwendung steht im Vordergrund, der industrielle Einsatz braucht aber nicht in unmittelbarer Zukunft zu liegen. Die terminlichen Schranken sind weniger streng und gestatten eine längere Entwicklungsperiode, in welcher auch der aktuelle Wissensstand der technischen

Mechanik, zumindest in einzelnen Aspekten, verbessert werden kann. Die Initiative zu solchen Studien geht meistens von dem Institut aus. Es kommt aber auch vor, dass sich die Industrie in irgendeiner Form daran beteiligt.

Interessante Problemkreise von grundsätzlicher Bedeutung sollen untersucht werden. Hier steht die technische Anwendbarkeit zwar im Hintergrund, als motivierendes Element spielt sie jedoch nur eine geringe Rolle. Vielmehr sind die Neugier erweckenden Eigenschaften und die subjektive Attraktivität der Fragestellung massgebend.

Die oben beschriebenen drei Arten von Forschungsthemen können wir als

- industrielle Probleme,
- anwendungsorientierte Forschung und
- akademische Forschung

bezeichnen. Ihre auf gegenseitiger Befruchtung basierende Bedeutung für den wissenschaftlichen, technischen und industriellen Fortschritt ist uns al-

len wohl bekannt. Dennoch seien hier einige *elementare Gedanken* formuliert, die stets bewusst bleiben müssen.

Unsere Forschung soll *nach Möglichkeit folgende Aufgaben* erfüllen:

- Unterstützung der industriellen Entwicklungstätigkeit;
- Entwicklung von neuen Verfahren, Berechnungsmodellen, Messmethoden usw.;
- Erweiterung des Wissensstandes der Mechanik durch Beiträge zum besseren physikalischen Verständnis der Phänomene, Entdeckung neuer Aspekte und Eigenschaften;
- Die zuvor erwähnten Entwicklungsarbeiten setzen infrastrukturelle Möglichkeiten und ein hohes Niveau an Wissenskonzentration voraus. Sie müssen am Institut für Mechanik gepflegt und gefördert werden;
- Am Institut sollen ferner ideenreiche und fähige Diplomanden und Doktoranden ausgebildet werden, die später in der Praxis imstande sind, besondere Aufgaben zu übernehmen und entsprechende Entwicklungsarbeiten erfolgreich zu leiten;
- Schliesslich sollen sich die durch unsere Forschung erzielten neuen Erkenntnisse auf die Qualität unserer Lehrveranstaltungen auswirken und allen unseren Studenten zugute kommen.

Kurz zusammengefasst soll die Forschung

- Anwendungen der Mechanik fördern,
- zum wissenschaftlichen Fortschritt beitragen und
- die Ausbildung unterstützen.

Um wirksam zu sein, müssen wir eine stabile Gleichgewichtslage zwischen diesen drei Polen finden. Vernachlässigung der anwendungsorientierten Aspekte, d. h. ausschliessliche Pflege von akademischen Themen führt mit der Zeit auf eine Forschungstätigkeit, die zwar zum wissenschaftlichen Fortschritt beiträgt und die Ausbildung unterstützt, jedoch selbst *langfristig* wenig wirksam zu bleiben droht. Eine zu starke Betonung der anwendungsorientierten Aktivität birgt andererseits die Gefahr in sich, das Institut zu einer reinen Dienstleistungsanstalt zu gestalten und die obenerwähnten Ziele in der Wissenschaft und in der Ausbildung zu verfehlen. Auch wenn einige der akademischen Untersuchungen vom Standpunkt der industriellen Anwendung zu nächst uninteressant zu sein scheinen, könnten sie indirekt, über den wissenschaftlichen Fortschritt und die Ausbildung junger Ingenieure und Doktoranden, eine viel tiefere und zukunfts-trächtigere Wirkung erzeugen, als dies beim ersten Blick erkennbar wäre.

Hier ergibt sich ein *Kommunikationsproblem*. Der Informationsaustausch zwischen dem Institut für Mechanik und der an Anwendungen der Mechanik interessierten Industrievertreter soll intensiviert werden. Einerseits könnte die Industrie nicht nur unsere anwendungsorientierte, sondern auch unsere akademische Forschungstätigkeit mit erhöhtem Interesse und Aufnahmebereitschaft verfolgen. Andererseits sollten wir bei der Auswahl unserer Forschungsthemen die Zukunftsbedürfnisse der Anwendung dank vermehrten Kontakten mit Industrievertretern besser berücksichtigen.

Illustrative Beispiele

Kollege *Schweitzer* hat in seinem Beitrag bereits einen Teil der anwendungsorientierten Forschungstätigkeit der letzten Jahre an unserem Institut beschrieben (vgl. diese Zeitschrift, Heft 9:275-278, 1983). Zur Förderung des Informationsaustausches werden im folgenden weitere, sowohl anwendungsorientierte als auch «akademische» Untersuchungen und Forschungsergebnisse kurz geschildert.

Kriechprobleme beim Stranggiessen

Wie im Beitrag *Fischer/Rammerstorfer* (vgl. diese Zeitschrift, Heft 18:478-484, 1983) schon erwähnt, wird bei Stranggiessen die Bramme zwischen Rollen geführt und gekühlt, so dass mit zunehmendem Abstand vom flüssigen Metallspiegel der flüssige Kern immer dünner und die feste Aussenschale immer dicker wird (Bild 1). Der im flüssigen Kern herrschende ferrostatische Druck bewirkt an der festen Aussenschale eine Ausbauchung, die gegebene Höchstwerte nicht überschreiten darf (Bild 2). Verschiedene konstruktive Parameter, unter ihnen die Geschwindigkeit und vor allem der Rollenabstand, beeinflussen die maximale Ausbauchung. Die rationale Konstruktion der Stranggiessanlage erfordert deshalb u. a. eine *möglichst präzise Vorausberechnung der grössten Ausbauchung in jedem Rollenabschnitt*. Die Oberflächentemperaturen der Aussenschale in den kritischen Abschnitten können 900 bis 1200 °C betragen. Folglich ist starkes lokales Kriechen, d. h. allgemein elastisch-viskoelastisches Stoffverhalten zu erwarten. Eine Literaturstudie, die wir mit einem Diplomanden gemeinsam durchgeführt haben, deckte auf, dass die in der Literatur erwähnten und in der Praxis verwendeten *Berechnungsverfahren verschiedene Mängel* aufweisen. Auch wenn einige z. B. mit

räumlichen finiten Elementen, geometrisch möglichst hohe Präzision anstreben, so bestehen doch teilweise unrealistische Randbedingungen und vor allem *unbefriedigende physikalische Voraussetzungen*. Die zur Verfügung stehenden und das Materialverhalten charakterisierenden Laborversuche hatten leider nur geringen Aussagewert, denn sie wurden am erwärmten Metall unter monoton zunehmender oder konstant bleibender Belastung durchgeführt, während das feste Metall in der Brammenschale aus dem flüssigen Zustand durch Kühlung entsteht und zeitlich variablen Wechselbelastungen ausgesetzt wird. Unsere Aufgabe bestand deshalb darin, ein leistungsfähiges, einfaches Berechnungsmodell zu entwickeln, das von soliden physikalischen Grundlagen ausgeht und auf die Ungenauigkeit einiger Materialkennwerte möglichst unanfällig ist. Das von uns erstellte Berechnungsmodell [1] stützte sich auf Messdaten an bestehenden Anlagen und wurde durch Messungen an anderen bestehenden Anlagen mit befriedigendem Erfolg überprüft. Die *experimentellen Grundlagen* auf diesem Gebiet sind dennoch bis heute *sehr mangelhaft* geblieben. Seriöse experimentelle Untersuchungen von wissenschaftlichem Wert wären hier nicht nur mit schwierigen technischen Problemen, sondern auch mit sehr hohen Kosten verknüpft.

Viskoelastisches Verhalten von Gummi

Als weiteres Beispiel anwendungsorientierter Forschung ist die Tätigkeit von Dr. *K. Häusler* zu erwähnen. Er interessiert sich für das zeitabhängige mechanische Materialverhalten von Gummi. In seiner Dissertation [2] untersuchte er das Problem des Einflusses einer grossen statischen Deformation einer Gummiprobe auf deren dynamische Steifigkeit und Dämpfung für kleine überlagerte Schwingungen. Das Problem ist

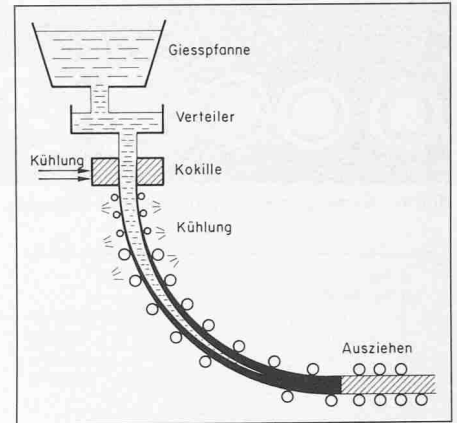


Bild 1. Stranggiessen

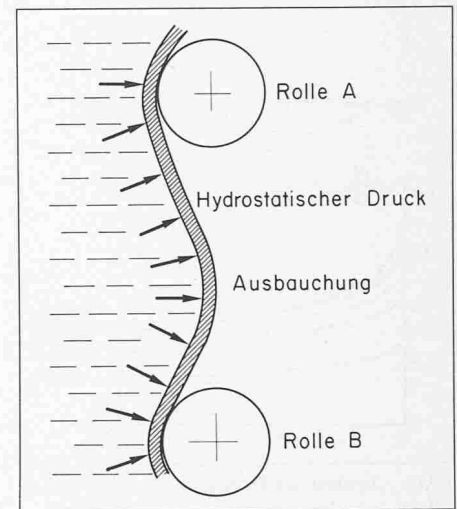
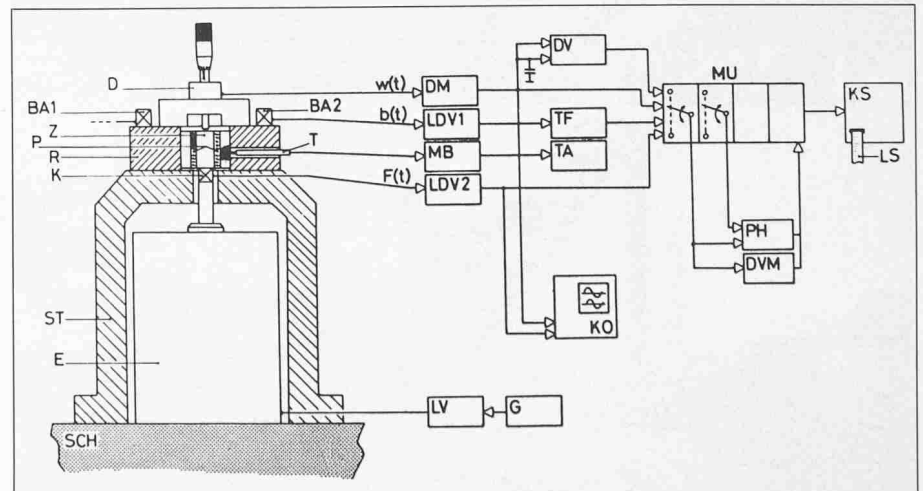


Bild 2. Ausbauchung bei Stranggiessen

beispielsweise auf dem Gebiet der *Stoss- und Schwingungsisolierung* von Interesse. In einem Schwingungsversuch wurden die dynamische Steifigkeit und die Dämpfung an Probekörpern verschiedener Geometrie gemessen. Anhand dieser Daten wurde eine Materialgleichung überprüft und die darin enthaltenen Materialfunktionen bestimmt (Bilder 3, 4, 5).

Bild 3 zeigt schematisch den Aufbau der Versuchsvorrichtung; die Probe

Bild 3. Versuchsvorrichtung Axialschubschwingungen



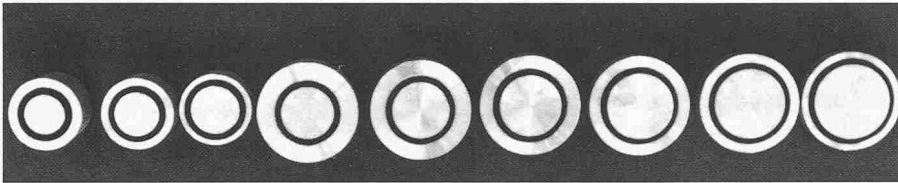


Bild 4. Gummiprüfproben für Axialschubschwingungen

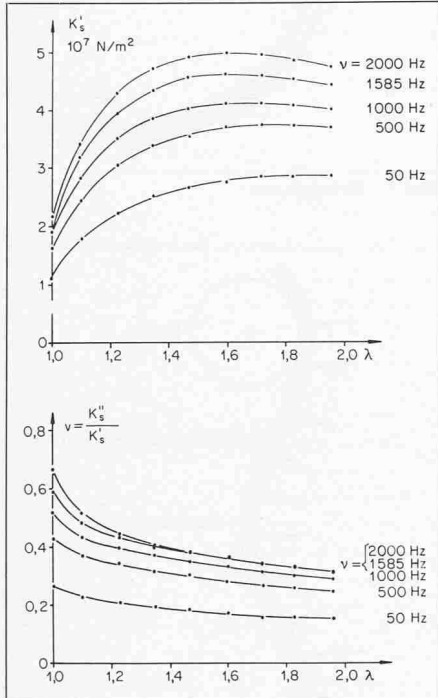


Bild 5. Realteil des Probenmoduls sowie Verlustfaktor

wird durch den Schwingungserreger einer Axialschubschwingung unterworfen. Gemessen werden die Randkraft sowie die Randverschiebungen (Amplituden und Phasen). Die im Experiment verwendeten Gummiprüfproben sind Hohlzylinder (Bild 4), die einer grossen azimutalen Dehnung unterworfen werden, der dann im Schwingversuch die kleinen axialen Schwingungen überla-

gert wurden. Das Bild zeigt Proben mit verschiedenen Werten $1 \leq \lambda \leq 2$ der azimutalen Vordehnung. Bild 5 zeigt den Realteil des «Probemoduls» K_s^* und den Verlustfaktor η in Funktion der statischen Vordehnung λ , mit der Frequenz der überlagerten Schwingung als Parameter. Die Grösse K_s enthält ausser dem Relaxationsmodul der klassischen Viskoelastizität drei weitere frequenzabhängige Materialfunktionen, die in der gewählten Materialgleichung enthalten sind. Das Bild zeigt, dass mit zunehmendem Wert der statischen Vordehnung λ einerseits die Probesteife, die proportional zu K_s ist, zunimmt, andererseits die Dämpfung, dargestellt durch den Verlustfaktor η , abnimmt.

Gegenwärtig beschäftigt sich Häuser mit der Untersuchung des nichtlinearen viskoelastischen Verhaltens von Gummi für kleine endliche Deformationen. Dabei treten neben der geometrischen Nichtlinearität auch *nichtlineare* «Gedächtnis-Effekte» auf. Solche Effekte, die in laufenden Experimenten am Institut nachgewiesen werden konnten, sollen in nächster Zukunft durch eine *Materialgleichung* quantitativ dargestellt werden. Bild 6 zeigt den Torsionsprüfstand, in dem Gummizylinder auf einfache Torsion mit Schiebungen bis 1 beansprucht werden können. Gemessen wurden Verdrehungswinkel, Torsionsmoment und die Normalkraft. Bild 7 zeigt ein Beispiel einer Messung. Gemessen wurde der zeitliche Verlauf des Momentes und der Normalkraft als

Antwort auf eine Rampenverschiebungsfunktion. Der nichtlineare «Gedächtnis-Effekt» äussert sich darin, dass die Antworten auf aufeinander folgende Verschiebungsschritte voneinander verschieden sind, falls das Material sich vor dem ersten Schritt längere Zeit im Ruhezustand befand.

Verhalten von hochanisotropen faserverstärkten Strukturen

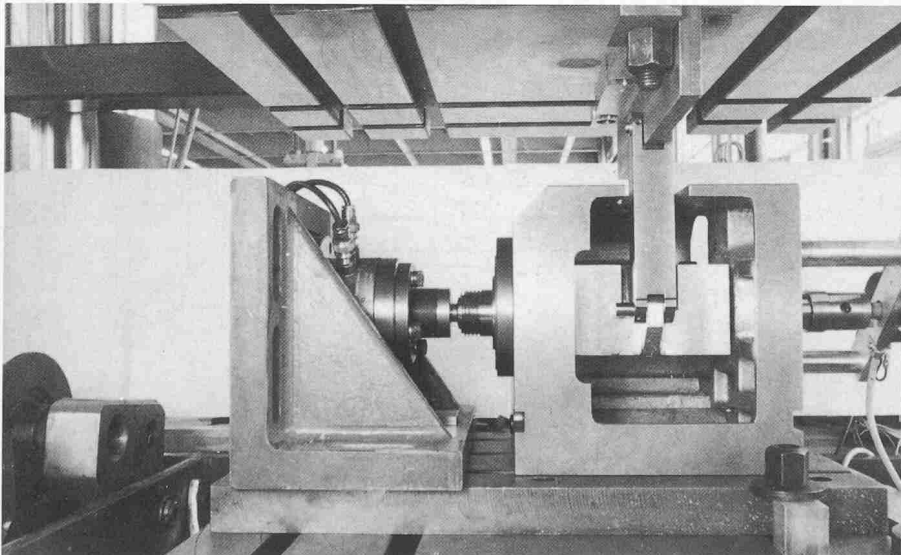
Vor einigen Jahren besprach ich für die ZAMP ein Buch von Professor Spencer aus Nottingham über faserverstärkte Materialien [3]. Hier wurden die Fasern als ideal inextensibel und das Material gesamthaft homogen und inkompressibel angenommen. Dies ergab einen homogenen anisotropen Stoff mit starkem kinematischen Zwang, der erlaubte, elegante analytische Lösungen für verschiedene, sonst nur numerisch lösbare Probleme aus der Elastizitäts- und Plastizitätstheorie zu konstruieren. Dadurch wurde u. a. klar, dass das *Saint-Venantsche Prinzip* für solche hochanisotrope und als homogen betrachtete Materialien nicht mehr gültig ist. Die kleinste Änderung in der Spannungsverteilung am Rande einer Struktur wird ja durch die Fasern, die wie Informationsleiter funktionieren, unmittelbar ins Materialinnere übertragen (Bild 8). Die schönen physikalischen Resultate in diesem Buch veranlassten mich, meinen damaligen Assistenten Dr. C. Mitropoulos zu beauftragen, das statische Verhalten von faserverstärkten Schalen für den realistischeren Fall von extensiblen Fasern zu studieren. Durch asymptotische Entwicklungen der Grundgleichungen zeigte Mitropoulos, dass für das physikalische Verhalten der Struktur die Grössenordnung eines Anisotropieparameters

$$p = 2\pi \frac{H}{\Lambda} \sqrt{E/G}$$

massgebend ist, wobei $2H$ die Dicke der Schale, Λ eine charakteristische Länge, E den globalen Elastizitätsmodul in Faserrichtung und G den Schubmodul quer dazu bezeichnen [4]. Drei Fälle sind zu unterscheiden. Der Fall $p \ll 1$ entspricht mit $H \ll \Lambda$ einer dünnen Struktur mit mässig steifen Fasern. Die anisotrope Struktur verhält sich wie im klassischen isotropen Fall mit in erster Näherung eben bleibenden Querschnitten und linear verteilten Biegespannungen.

Ist $p \gg 1$ trotz $H \ll \Lambda$, so liegt eine dünne Struktur mit sehr steifen Fasern vor. In diesem Fall tragen nur die Fasern in der Nähe der Oberfläche zum Biegemoment bei. Jene im Schalenkern sind entlastet und folglich überflüssig. Die weiche Matrix übernimmt die Schubkräfte

Bild 6. Torsionsprüfstand



te. Das Tragwerk verhält sich auf «natürliche» Art als *Sandwich-Struktur* mit sehr ausgeprägter Schubübertragung (Bild 9). Im Falle $p = O_s(1)$ liegt ein Übergangverhalten vor, und trotz $H \ll \Lambda$ bleiben die Querschnitte nicht eben, die Biegespannungen sind nichtlinear verteilt (Bild 9).

Ähnliche Aussagen können auch für das dynamische Biegeverhalten von faserverstärkten Stäben gemacht werden. Um eine entsprechende, dynamische Theorie zu überprüfen, die ich in einer Arbeit darlegte, die im Ingenieur-Archiv anlässlich des 70. Geburtstages von Professor Ziegler erschien [5], untersuchten wir experimentell mit Dr. J. Goodbread die Übertragung von Biege-Wellen. Zur Herstellung der Stäbe verwendete Goodbread eine Araldit-Matrix und verstärkte sie einachsig durch Kevlar-Fasern. Durch Variation der Temperatur veränderten wir das Verhältnis E/G (siehe oben erwähnten Parameter p), denn mit höherer Temperatur erweichte die Matrix, und damit wurde bei konstantem E der G -Modul kleiner. Bei 70° erreichten wir E/G -Verhältnisse von 72, während bei 20° dieses Verhältnis 36 war. Die Grösse Λ im Parameter p bezeichnet hier die Wellenlänge. Die in einem Fourier-Analysator direkt durchgeführte Fourieranalyse der laser-interferometrisch gemessenen Biege-Wellen ergab Phasengeschwindigkeiten für ein breites Spektrum von Wellenlängen [6]. Der Vergleich der theoretisch vorausgesagten Phasengeschwindigkeiten mit den experimentell gemessenen Werten zeigte eine ausserordentlich genaue quantitative

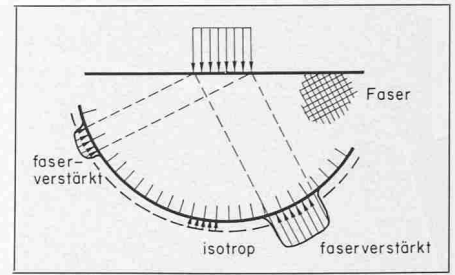
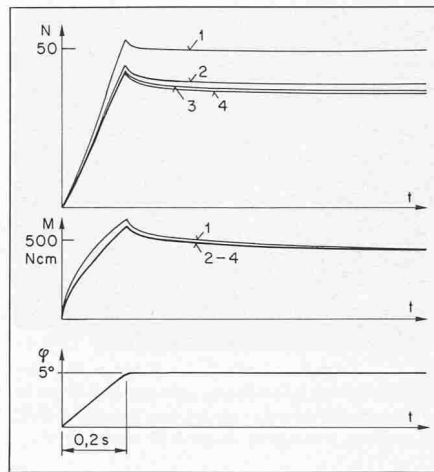


Bild 8. Spannungsübertragung in hochanisotropen Medien

Bild 7 (links). Zeitlicher Verlauf von Torsionsmoment und Normalkraft

Übereinstimmung (Bild 10). Insbesondere liess sich die theoretisch festgestellte physikalische Eigentümlichkeit bestätigen, dass bei diesen hochanisotropen Stäben schon für relativ grosse Wellenlängen die Biege-Wellen hauptsächlich als Schub-Wellen (mit ausgeprägter Schubverformung) übertragen wird. Die später von Prof. Kolsky und Mitarbeitern an der Brown University in den USA durchgeführten Experimente an Stäben mit Gummi-Matrix und Stahlfasern lieferten weitere Bestätigungen der Theorie. Zur Zeit studiert A. Kreis, dipl. Bauingenieur, experimentell und theoretisch die Übertragung von Biege-Wellen in hochanisotropen faserverstärkten Platten. Die von uns in letzter Zeit entwickelte Theorie scheint mit den bisher vorliegenden experimentellen Ergebnissen in sehr gutem Einklang zu stehen. Hier sind gemessene Wellengeschwindigkeiten, zweidimensionale

Phasenkurvengestalten und das Abklingverhalten der von einer «Punktquelle» ausgestrahlten Biege-Wellen Vergleichsbasis für Theorie und Experiment. B. Gasser, dipl. Maschineningenieur, arbeitet in letzter Zeit am Problem der Wellenausbreitung in hochanisotropen kreiszylindrischen Röhren. Auch hier besteht die Absicht, die gemeinsam entwickelten theoretischen Ansätze experimentell zu überprüfen.

Energietransport bei Stosswellen in festen Körpern

Anlässlich eines einjährigen Gastaufenthaltes von Prof. Kolsky von der Brown University bekam M. Koller, dipl. Bauingenieur, die Aufgabe, den Energietransport bei einer elastischen Stoss-Wellen in einer Platte zu studieren. Um plastische Verformungen auszuschalten, kann für die Platte Glas und glasähnliches Material verwendet wer-

Bild 9. Spannungsverteilung im starkanisotropen faserverstärkten Tragwerk und im Übergangsfall.

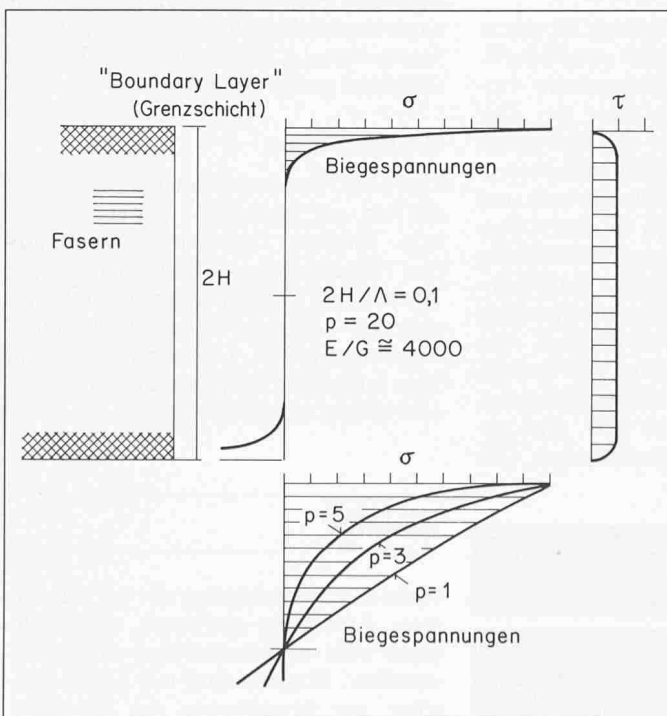
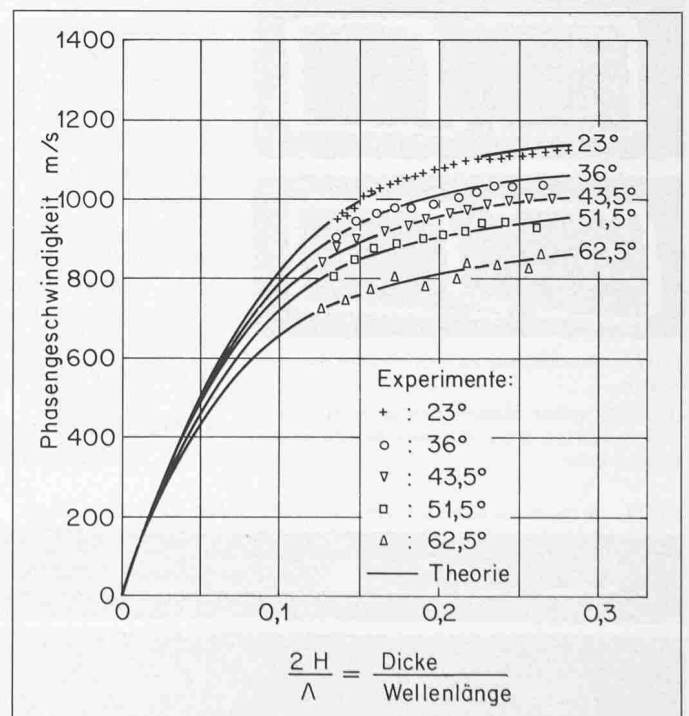


Bild 10. Vergleich Theorie-Experiment bei Biege-Wellen in faserverstärkten Stäben



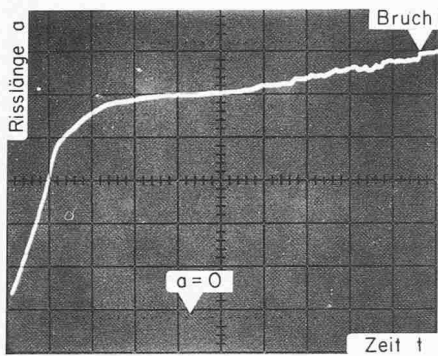


Bild 11. Zeitlicher Rissverlauf (Polyesterharz VP 1530, $l = 65$ cm, $h = 2,8$ cm, $50 \mu\text{s}/\text{div.}$)

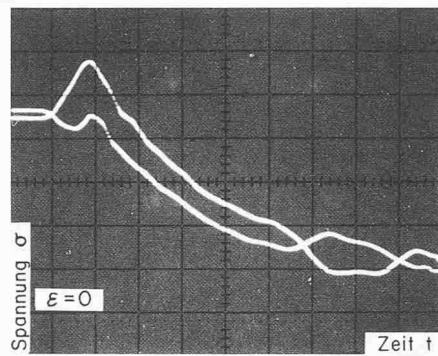


Bild 12. Zeitlicher Verlauf der Randspannungen (beide positiv aufgezeichnet), gemessen im Abstand 8,4 cm (entspricht 3 h) von der Bruchstelle (Araldit B, $l = 65$ cm, $h = 2,8$ cm, $50 \mu\text{s}/6 \text{ N}/\text{mm}^2 \text{ p. div.}$)

den. Der Stoss wird durch eine Stahlkugel erzeugt. Ist die Platte sehr dick (bezüglich dem Kugeldurchmesser), so überträgt der Stoss nur sehr wenig kinetische Energie aus dem Stossgebiet heraus, und die in der Platte gespeicherte Potentialenergie in der Nähe der Kugel «fließt» wieder zu ihr zurück. Die Kugel erreicht beim Rückprall 98 bis 99 Prozent ihrer ursprünglichen Aufprallhöhe. Bei dünnen Platten pflanzt sich die Stosswelle als Biegewelle mit grossem Anteil an kinetischer Energie fort, und die Kugel «verliert» ihre Energie weitgehend, so dass ihre Rückprallhöhe nur ein Bruchteil der Aufprallhöhe ist. Schon in den vierziger Jahren stellte Zener in groben Zügen eine Theorie zur Abklärung dieser beiden Extremfälle

[7] auf. Koller verfeinerte diese Theorie und studierte den Energietransport in Platten mittlerer Dicke, bei denen die Stosswelle nur ein- bis zweimal an der unteren bzw. oberen Oberfläche der Platte reflektiert wird, ehe die Kugel sie verlässt. Er deckte theoretisch und experimentell interessante physikalische Mechanismen des Energietransportes auf, bei denen Schubeffekte eine wichtige Rolle spielen. Um solche Schubeffekte noch stärker in den Vordergrund zu stellen, konstruierte er eine Sandwich-Platte mit sehr weichem Kern (Gummi) und mit steifen Flanschen (Aluminium). Das dynamische und statische Verhalten von solchen Sandwich-Strukturen mit extremen Steifigkeitsverhältnissen haben wir in zwei Arbeiten [8, 9] sowohl theoretisch als auch experimentell beschrieben. Zur Zeit untersucht ein weiterer Mitarbeiter an unserem Institut, P. Oberhuber, dipl. Bauingenieur, den *Energietransport bei plastischen Wellen*.

Dynamische Rissausbreitung

Die schnelle Rissausbreitung in einem Körper ist mit einer Reihe von komplexen physikalischen Phänomenen verknüpft, die bis heute, trotz der Leistungsfähigkeit der uns zur Verfügung stehenden experimentellen und theoretischen Mittel, nur sehr beschränkt und in wenigen Spezialfällen abgeklärt worden sind. Selbst bei einem Material wie Glas, das als idealelastisch angenommen werden darf, setzt das mechanisch-phenomenologische Verständnis der schnellen Rissausbreitung und der damit verknüpften Energieaustausche, Stabilitäterscheinungen usw. eine genaue Kenntnis des dynamischen Ge-

schehens um die Risspitze voraus. Auch eine exakte Analyse der Ausbreitung und Reflexion der elastischen Wellen, welche durch den fortschreitenden Riss erzeugt werden, ist unabdingbar.

H. J. Schindler, dipl. Bauingenieur, untersuchte sowohl experimentell als auch theoretisch die schnelle Rissausbreitung in einem Balken aus Kunststoff (Araldit, Polyesterharz oder Plexiglas), den er auf reine Biegung beanspruchte [10]. Das Bruchmoment konnte er durch Schärfe und Länge einer Kerbe in der Mitte des Balkens verändern. Der Riss breitete sich zunächst mit grosser und näherungsweise konstanter Schnelligkeit (Höchstwert etwa 0,3 bis 0,4 der Schubwellengeschwindigkeit) aus, bis er in 40 bis 90 μs ungefähr zwei Drittel der Balkendicke erreichte (Bild 11). Dann trat eine starke Verlangsamung auf, bis die an den Balkenenden reflektierte Zugwelle den Bruchvorgang wieder beschleunigte und den Balken nach etwa 500 μs vollständig durchtrennte. Die Entlastung an der Rissfläche während des Bruchvorgangs erzeugt Druck- und Biegewellen (Bild 12). Schindler zeigte mit einer Reihe eindrucklicher Experimente u. a., dass, je nach Verhältnis dieser dynamisch erzeugten Druckkraft zum Biegemoment, der Riss in der langsamen Phase instabil werden kann. Dieser dreht sich dann um 90° und verläuft parallel zur Balkenoberfläche (Bild 13). Ausserdem kann die Kombination der Biegewelle und der am Balkenende als Zugwelle reflektierten Welle zu mehrfachen Brüchen an verschiedenen Orten des Balkens führen (Bild 14). Die entsprechenden Bruchstellen hat Schindler theoretisch vorausgesagt und experimentell nachgewiesen. Auch die Instabilität des Risses konnte er theoretisch sehr genau abklären.

Weitere Themen

Die oben besprochenen fünf Beispiele dürften zur Illustration genügen. Weitere Themen, insbesondere jene aus den Forschungsbereichen der Kollegen Wehrli und Brauchli, tragen zur Bereicherung unserer Forschungstätigkeit entscheidend bei. Um die Darstellung kurz zu halten, verzichte ich jedoch auf eine vollständige Aufzählung.

Ausblick

Nicht alle Erkenntnisse, die wir aus unserer Forschung gewinnen, sind technisch oder wissenschaftlich direkt anwendbar. Manche sind nur kleine Beiträge zur Erweiterung des aktuellen

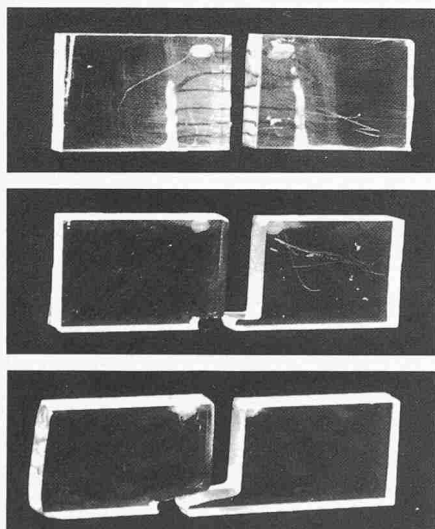
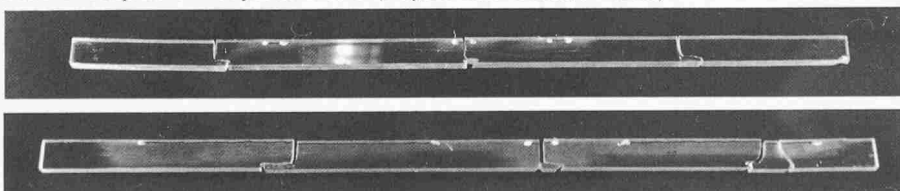


Bild 13. Bruchflächen bei verschiedenen Bruchmomenten
Oben: Bei relativ kleinem Bruchmoment (infolge starkem Vorriss), Mitte und unten: Bei gesteigertem Bruchmoment

Bild 14. Beispiele von mehrfachen Brüchen (Polyesterharz VP 1530, $l = 65$ cm)



Wissensstandes der Mechanik, andere dagegen erweisen sich als recht zukunftsträchtig. Eine verstärkte Zusammenarbeit zwischen Industrie und Hochschule würde sicher die wirkungsvolle Verwendung verschiedener Forschungsergebnisse fördern und die künftigen «Trends» positiv beeinflussen.

Eine der wichtigsten Aufgaben der Mechanik ist die *mathematische Modellbildung*, d. h. die Übersetzung von physikalischen Gegebenheiten in quantitativ verwertbare mathematische Formeln. Kann eine physikalische Fragestellung auf ein Differentialgleichungssystem zurückgeführt werden, so vermögen die modernen numerischen Lösungsverfahren ein wirkungsvolles Instrument zum modellmässigen Verständnis der physikalischen Wirklichkeit zu liefern. Die durch die Möglichkeiten von Verfahren wie jene der *Modalanalyse* oder der *finiten Elemente* inspirierte Euphorie ist sicher berechtigt. Die Weiterentwicklung der numerischen Berechnungsmethoden wird deshalb auch in Zukunft gefördert und gepflegt. Man darf jedoch die Mechanik ihren Berechnungsverfahren und -rezepten nicht gleichsetzen. Berechnung ist nur eines der Mittel, derer sich die Mechanik bedient, um das Ziel, nämlich das Verständnis der Grundphänomene, Bestandteile eines komplexen Gesche-

Literatur

- [1] Sayir, M., und Karlsen, E.: «Modell zur Berechnung der Ausbauchung beim Stranggiessen». Berichte an die Firma Concast
- [2] Häusler, K.: (1979): «Viskoelastische Eigenschaften von Gummielementen». Dissertation Nr. 6365, ETH Zürich 1979
- [3] Spencer, A.J.M.: (1972): «Deformation of fibre reinforced materials». Oxford
- [4] Mitropoulos, C.S. (1978): «Zur Theorie der schwach- und starkanisotropen faserverstärkten Rotationsschalen». Dissertation Nr. 6317, ETH Zürich
- [5] Sayir, M. (1980): «Flexural Vibrations of Strongly Anisotropic Beams». Ing. Arch. 49: 309-323
- [6] Goodbread, J., and Sayir, M.: «Experimental Verification of a Theory on Flexural Vibrations of Strongly Anisotropic Beams», (noch nicht publiziert)
- [7] Zener, C. (1941): «The Intrinsic Inelasticity of Large Plates». Physical Review, Serie 2, 59: 669-673
- [8] Sayir, M. (1983): «Biegewellen in Sandwich-Strukturen». Schweiz. Ingenieur und Architekt, Heft 7:215
- [9] Koller, M., Sayir, M., und Goodbread, J.: «Experiments and Corresponding Theory on Flexural Waves in Sandwich-Structures» (noch nicht publiziert)
- [10] Schindler, H.J. (1982): «Dynamischer Bruch eines Balkens unter Biegung». Dissertation Nr. 7079, ETH Zürich

hens, zu fördern. Bevor die Berechnung bei der Konstruktion eines Bauwerkes, einer Maschinenanlage oder beim Konzipieren eines industriellen Prozesses einsetzen kann, müssen u. a. eine Reihe von *technischen Entscheidungen* getroffen werden, die auf einem tiefgreifenden Verständnis der mechanischen Wechselwirkungen beruhen. Ausserdem erfordern die Aufstellung der mathematischen Modelle und die Interpretation der Resultate *sorgfältige physikalische Analysen von Grundphänomenen*, deren vollständige Abklärung noch lange nicht abgeschlossen ist. Deshalb behalten auch in Zukunft klassische Forschungsgebiete wie Wellenaus-

breitung, Mechanik und Thermodynamik des Materialverhaltens, Elastizität, Plastizität, Viscoelastizität, Bruchmechanik, Stabilität, Schwingungen und anderes mehr ihre unverminderte Bedeutung, auch wenn die unmittelbare technische Verwertbarkeit mancher neuen Untersuchungen nicht explizit und sofort in Erscheinung zu treten mag. Die Brücken zwischen Forschung und Anwendung können wir wirkungsvoll ausbauen, wenn wir uns nicht nur von unseren eigenen Leistungen begeistern lassen, sondern auch von jenen der anderen.

Adresse des Verfassers: Prof. Dr. M. Sayir, Institut für Mechanik, ETH Zentrum, 8092 Zürich

Zusammenfassung der Podiumsdiskussion

Von Ulrich Stüssi, Zürich

In der abschliessenden Podiumsdiskussion wurden Fragen nach der Bedeutung der Mechanik in der Industrie und nach Möglichkeiten der Zusammenarbeit zwischen Industrie und Hochschule diskutiert. Teilnehmer des Podiumsgesprächs waren

- Dr. K. Basler, Basler & Hofmann, Zürich
- Prof. Dr. J. Carlsson, Royal Institute of Technology, Stockholm
- Dr. W. Endres, BBC, Baden
- Dr. J. Häny, Gebr. Sulzer AG, Winterthur
- Prof. Dr. B. Thürlimann, ETHZ, Zürich

Voten aus dem Publikum waren grundsätzlich erwünscht. Die Podiumsdiskussion wurde durch Dr. U. Stüssi, Tensor AG, Zürich, geleitet.

Bedeutung des Symposiums

Die angewandte Mechanik als Grundlagen- und Spezialwissenschaft erlaubt als gemeinsamer Nenner vieler Anwendungsgebiete ein Gespräch über die *Spezialistengrenzen* hinweg. Durch Ausnützen dieser Querverbindungen kann die angewandte Mechanik einen wertvollen Beitrag zum *Erneuerungsprozess der Schweizer Industrie* beitragen (Stüssi).

Allerdings war die Zusammenarbeit Industrie/Hochschule auf dem Gebiet der reinen Mechanik nicht sehr ausgeprägt. Als Möglichkeit wird vorgeschlagen, dass die *Konstruktionstechnik wieder ins Zentrum der Abteilung III A* gerückt und aus den Instituten für Mechanik und Konstruktionstechnik ein *Institut für «Mechanical Engineering»* gebildet wird (Häny).

Die Bedeutung des Symposiums ist am besten aus den Vorträgen ersichtlich, die einen Überblick über die angewandte Mechanik geboten haben (Carlsson).

Künftige Anwendungsgebiete

An sich muss jeder konstruktiv tätige Ingenieur die Grundlagen der Mechanik beherrschen (Endres, Basler). Zu starke Spezialisierung, die durch vertiefte Ausbildung während des normalen Studienganges an der Hochschule gefördert würde, blockiert die Innovationsfähigkeit in der Industrie. Der *Generalist* mit breitem Grundlagenwissen ist beruflich mobiler. Aus diesem Grunde steigt die Bedeutung der angewandten Mechanik, die ja unter anderem *breites Grundlagenwissen* darstellt, zunehmend (Basler).

Im Zentrum künftiger Anwendungsgebiete steht die *Bruchmechanik* unter Einbezug der

Mitte November 1982 hat an der ETH Zürich das Symposium «Angewandte Mechanik in Industrie und Hochschule» stattgefunden. In sieben Folgen haben wir in dieser Zeitschrift alle damals gehaltenen Vorträge abgedruckt. Wir beenden jetzt die Reihe mit einer Zusammenfassung des die Tagung abschliessenden Podiumsgesprächs. Alle Referate werden gesammelt in einem Sonderdruck, der Anfang August erscheinen soll.

klassischen Bruchhypothesen, der Ermüdung, des Kriechens und entsprechender nichtlinearer Methoden (Endres, Häny, Carlsson). Die Sicherheit gegen Bruch komplexer, grosser Strukturen wird mittels umfassender Untersuchungen, die *Materialwissenschaften, Mechanik und Statistik* einschliessen, nachgewiesen. Das Ziel dieser Untersuchungen besteht in der Angabe einer Zahl für das Versagensrisiko. Diese Vorgehensweise wird vor allem bei *Leichtbauweisen*, z. B. *Verbundkonstruktionen*, angewandt. Grundlegende Probleme harren ihrer Lösung vor allem dort, wo *Gewichtseinsparung und Vibrationsdämpfung gleichzeitig* erzielt werden müssen. Neue Materialien werden entwickelt, deren Versagensmechanismen vorerst theoretisch untersucht werden müssen (Carlsson).

Daneben sind *Schwingungstechnik* (Modale Analysen und nichtlineare transiente Berechnungen), *Anisotropie* und *nichtlineares Materialverhalten* wie *Plastizität* und *Viskoelastizität*, mit und ohne Temperatureinfluss, wichtige Anwendungsgebiete der Mechanik (Endres, Häny). Das Institut für Mechanik sollte sich auch dem neuen For-