



## Meßwertaufnehmer richtig ausgewählt



Peter GRÜNBAUM, Dipl.-Ing. Dr. techn., Univ.-Doz., Abteilungsleiter für Meßtechnik am Institut für Allgemeine Maschinenlehre und Fördertechnik der Technischen Universität Graz, Geburtsjahrgang 1939. Studium des Maschinenbaus an der TU Graz, von 1967 bis 1972 Universitätsassistent, 1972 Promotion zum Dr. techn. 1972 bis 1978 Leiter der Forschungs- und Entwicklungsabteilung in der Firma Binder & Co. AG, Gleisdorf. 1984 Ernennung zum Univ.-Doz. für »Meßtechnik im Maschinenbau« nach Vorlage der Habilitationsschrift »Verformungskörper für den Selbstbau interferenzarmer, resistiver Kraftaufnehmer«. Veröffentlichungen und Vorträge auf den Gebieten: Aufbereitungstechnik, Glasfaserkunststoffe und Meßtechnik.

**Vor allem der Versuchsingenieur steht häufig vor der Aufgabe, Meßwerte an Maschinen oder Prozessen aufzunehmen, bei deren Entwurf keine Rücksicht auf die Meßwertaufnahme genommen wurde. In diesen Fällen kommt unter Beachtung ökonomischer Aspekte der richtigen Auswahl des Meßwertaufnehmers besondere Bedeutung zu. Im folgenden Artikel wird aufgezeigt, worauf man beim Selbstbau von Meßwertaufnehmern Rücksicht nehmen muß.**

### 1. Einleitung

Mit gebieterischer Strenge verlangte die Entwicklung der Zivilisation nach »Maß« und »Zahl«. Die Anzahl der meßbaren Größen und die Genauigkeit des Messens wuchs etwa im Takte der Zunahme wissenschaftlicher Erkenntnis. In unserer Zeit ist z.B. die Metrologie ein eigenständiger Zweig der Technik, zu dem alle technischen Grundwissenschaften beitragen. Die moderne Entwicklung in Technik und Naturwissenschaft ist ohne den Einsatz neuerer Meßverfahren, zusammengefaßt unter dem Begriff »Elektrisches Messen nichtelektrischer Größen« undenkbar.

### 2. Was ist Messen?

Welche Tätigkeiten sind nun auszuführen und welches Instrumentarium ist nötig, um mechanische Größen elektrisch zu messen? Die Frage richtet sich also einerseits auf das Wesen des Messens und auf die fundamentale Ausrüstung der zu erwartenden Meßkette (Abb. 1). Der Vorgang des Messens ist einerseits durch das Erfassen und Darstellen von physikalischen Größen, andererseits durch das Normen, das Zuordnen einer Maßzahl, gekennzeichnet.

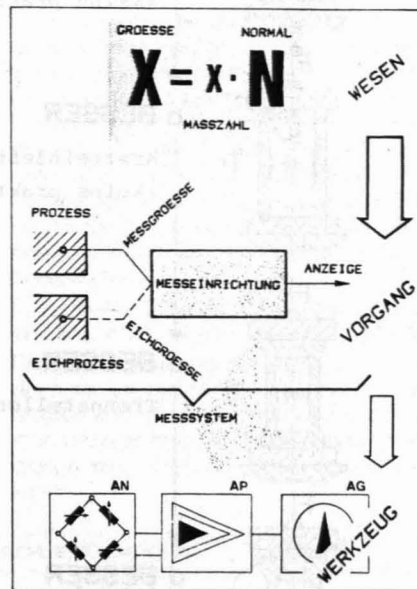
Der **Größe X** wird die **Maßzahl x** als Vielfaches der Vergleichsgröße N, dem sogenannten **Normal** zugeordnet:

$$X = x \cdot N$$

Um die genannte Operation durchführen zu können, müssen zwei Fundamentalvoraussetzungen erfüllt sein:

1. Die zu messende Größe muß eindeutig definiert sein.
2. Das Meßnormal muß durch eine Konvention festgelegt sein.

Beide Voraussetzungen sind nicht selbstverständlich. Während Größen, wie Länge, Gewicht und Zeit von jedermann aus der Erfahrung heraus als definiert akzeptiert



**Abb. 1:** Wesen, Vorgang und Werkzeug des elektrischen Messens nichtelektrischer Größen

werden, bedarf ein Wirkungsgrad bereits einer konkreten Definition. Größen wie etwa die »Behaglichkeit« aus dem Bereich der Klimatechnik oder die Größe »Intelligenz« sind bis heute nicht in allgemein anerkannter Weise definiert und damit nicht im oben erwähnten Sinne meßbar. Ähnliches gilt für die Konvention von Normalen. Diese stehen einerseits in enger Beziehung zum jeweiligen Stand der Technik, sind andererseits jedoch durch Überlegungen der zweckmäßigen Realisierung und Anwendung beeinflusst [1].

Der Vorgang des Messens kann in einem Blockschaltbild unter den Aspekten des Erfassens und des Wieder-zur-Darstellung-Bringens von Größen gezeigt werden. Der das Messen wesentlich charakterisierende Vorgang des Normierens wird durch die in die Meßeinrichtung eingebrachte Informa-

tion bezüglich des Normals symbolisiert. Die als Meßeinrichtung bezeichnete Gesamtheit der zum Zwecke der Messung benutzten Elemente — und damit zur Frage nach dem Instrumentarium — setzt sich immer zusammen aus

- Aufnehmer (AN)
- Anpasser (AP)
- Ausgeber (AG)

### 3. Warum Aufnehmerselbstbau?

Im Rahmen der Labor-Meßtechnik zur Erforschung spezieller Phänomene werden

**Selbstbau-Aufnehmer können Kosten senken helfen.**

meist Versuchs- oder Meß-Einrichtungen konzipiert, deren Zentraleinheit die Meßwertaufnahme darstellt. Falls zur experimentellen Erfassung des Phänomens nicht neue Meßverfahren entwickelt werden müssen, kann von vorneherein Rücksicht auf die zur Verfügung stehenden Meßwertaufnehmer genommen werden.

Die industrielle Meßtechnik muß aber im Gegensatz zur Labormeßtechnik Meßwerte aufnehmen und verarbeiten, die von Maschinen- oder Maschinenengruppen, von Prozessen im großtechnischen Betrieb usw. abgenommen werden, wobei das Meßwertaufnehmen u. U. einen größeren Eingriff in das Meßobjekt erfordert.

Vor allem der Versuchsingenieur steht häufig vor der Aufgabe, Meßwerte an Maschinen oder Prozessen aufzunehmen, bei deren Entwurf keine Rücksicht auf die Meßwertaufnahme genommen wurde. In diesen Fällen kommt unter Beachtung ökonomischer Aspekte der richtigen Auswahl des Meßwertaufnehmers besondere Bedeutung zu.

In vielen Fällen werden für die Anbringung von Meßwertaufnehmern Umbauarbeiten am Meßobjekt erforderlich. Meßgrößen, wie beispielsweise Beschleunigung, Druck und Temperatur bereiten in dieser Hinsicht geringe Schwierigkeiten. Die Messung von Kräften und Drehmomenten an einer bestehenden Maschinenengruppe kann aber erhebliche Eingriffe in den Leistungsfluß erfor-



derlich machen, wenn es nicht gelingt, einzelne Maschinenteile in Aufnehmer umzufunktionieren.

Die Entscheidung über Durchführung und Umfang der Meßaufgabe wird zur Kostenfrage. Daher kann der Aufnehmerselbstbau für jene Anwendungsfälle von Bedeutung sein, in denen für das anstehende Meßproblem keine geeigneten industriell gefertigten Aufnehmer angeboten werden, oder der Einsatz geeigneter Aufnehmer durch notwendige Adaptierung des Meßobjektes unwirtschaftlich wird.

Für den Aufnehmerselbstbau wäre es praktisch, wenn es gelänge, ein Gedankenmodell und eine Aufnehmersystematik zu erstellen, die es erlaubt, daß jeder Teil des Systems »Kraftaufnehmer« für sich betrachtet werden darf.

Eine Möglichkeit dieses Gedankenmodells wird in der Folge skizziert.

### 3.1 Der Begriff Kraftaufnehmer

Zur Definition der Bezeichnung Meßwertaufnehmer, zur Gewichtung des Begriffes und zur Einschränkung des Wirkbereiches in der Wirkungskette des Meßsystems wird unter beispielhafter Anwendung des hier interessierenden Kraftmeßsystems die Darstellung nach Abb. 2 gewählt.

Das Kraftmeßelement K ist demnach jener Teil des Kraftmeßsystems KMS, der die mechanische Belastung F aufnimmt und in eine skalare (vorzugsweise elektrische) Größe umformt. Die drei Funktionen

- Kraftaufnahme
- Skalarwertbildung
- Umformung in elektrische Größe

zeichnen das Kraftmeßelement K als fundamentalen und zentralen Teil des Kraftmeßsystems KMS aus [2].

Es beginnt mit der Einleitungsstelle der mechanischen Belastung und endet — gesehen in Richtung des Informationsflusses — dort, wo erstmals ein einparametrischer elektrischer Informationsträger (z. B. Spannung U) als Äquivalent des mechanischen Belastungsvektors F auftritt. Alle übrigen Teile m+i gehören bereits der Meßwertverarbeitungseinrichtung V an.

**Im Aufnehmerselbstbau sollte das Einkörperprinzip realisiert werden.**

Die gewählte Darstellung erlaubt nun die Definition des Kraftaufnehmers. Er ist der **konstruktiv erste** Teil jedes Kraftmeßsystems. Der Kraftaufnehmer kann mit dem Kraftmeßelement identisch sein, oder aber weniger oder mehr Systemteile 1,2,... m aufweisen als jenes. Ein Kraftmeßsystem kann auch mehrere (zweckmäßig identische) Aufnehmer besitzen, immer jedoch nur ein Kraftmeßelement.

### Fassen wir kurz zusammen:

Unter der Meßkraft wird ein rein mechanisch wirkender Körper verformt. Die dadurch entstehenden Dehnungen und Verformungen nimmt das wandelnde Organ

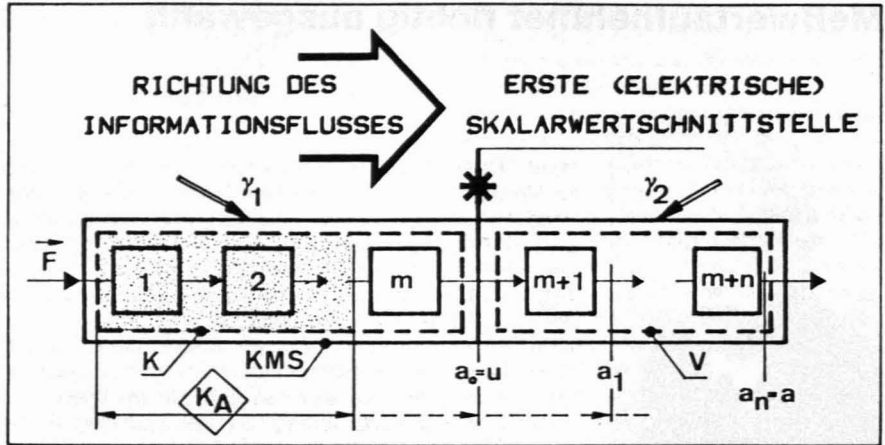


Abb. 2: Gedankenmodell des Kraftmeßsystems

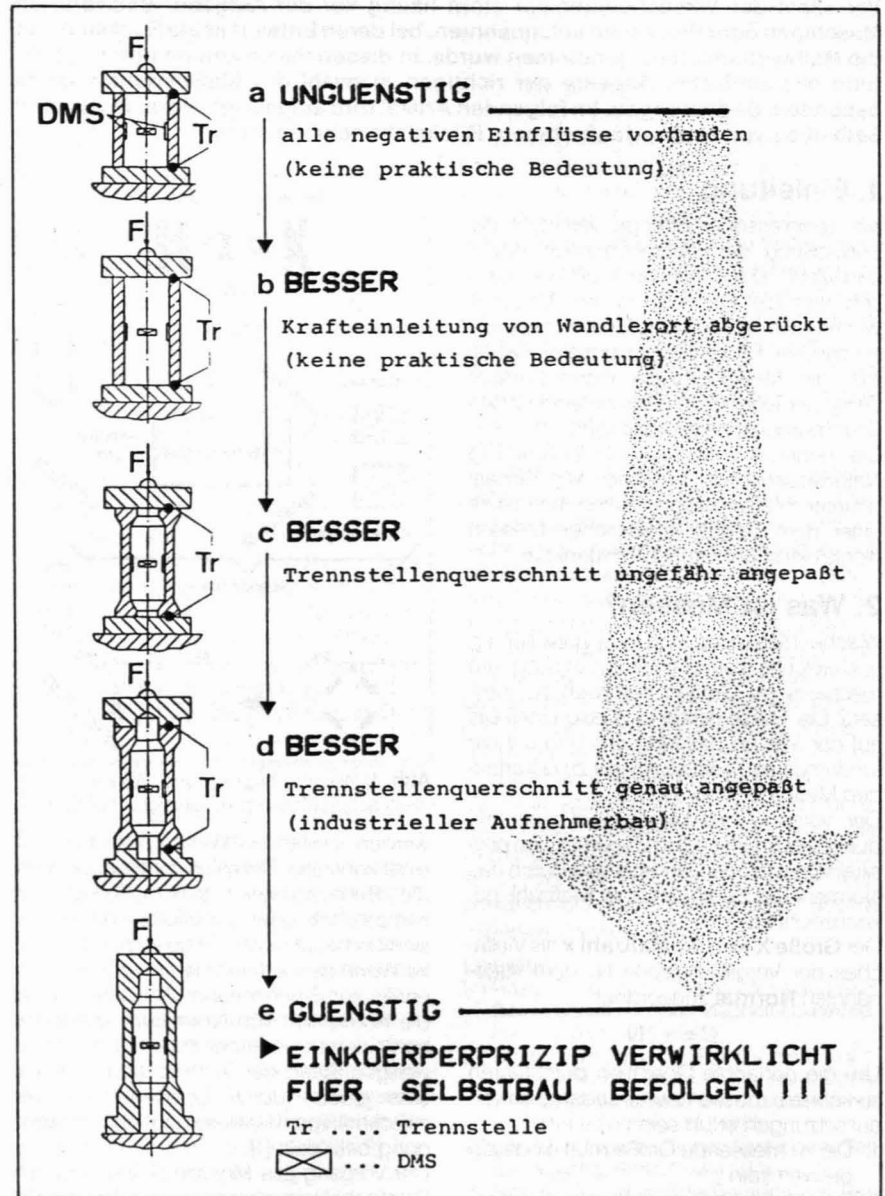


Abb. 3: Schritte zur Verwirklichung des Einkörperprinzipes

auf und formt sie in die skalare Ausgangsgröße um. Charakteristisch und für weitere Betrachtungen praktisch ist die totale Entkoppelung dieser beiden Umformungen.

Daher dürfen Vorgänge am Verformungskörper unabhängig von den Vorgängen am wandelnden Organ betrachtet werden, was ja schließlich das Ziel der Systematik und



des Gedankenmodells war.

### 3.2 Konstruktionsprinzipien

Die konstruktive Durchbildung eines Kraftaufnehmers wird immer bestimmt von:

- Wandlerprinzip
- Technologischen Gegebenheiten
- Ökonomischen Randbedingungen

Der verbleibende Freiraum — verantwortlich für die große bekannte Ausführungsvielfalt — ist aber weiter eingeeengt, wenn die Forderung nach optimalen **Meßeigenschaften** erhoben wird. Diese Einschränkungen lassen sich durch allgemeingültige Konstruktionsprinzipien beschreiben, deren Wichtigstes in der Folge gezeigt wird (Abb. 3).

Materialtrennstellen im Kraftfluß eines Aufnehmers sind Entstehungsorte Coulombscher Reibung. Die damit verbundenen Fehler können bei ungünstiger Gestaltung der Trennstelle große Werte annehmen. Daraus resultiert die Formulierung des Einkörperprinzipes:

- Das von der Meßkraft durchsetzte feste Medium in einem Kraftaufnehmer muß aus einem Stück bestehen.

Sind Trennstellen aus fertigungstechnischen Gründen nicht zu vermeiden, ist ihre Auswirkung gering, wenn

- ihre Entfernung vom wandelnden Bezirk groß ist (Prinzip von Saintvenant).
- sie in Bereichen kleiner Dehnungen liegen,
- in ihrem Bereich keine Unstetigkeiten der elastischen Konstanten auftreten.

Die kompromißlose Befolgung des Einkörperprinzipes ist oft aus ökonomischen und technologischen Gründen nicht möglich. Sind Trennstellen unvermeidlich, so gewinnt die makroskopische Arretierung der Trennstelle große Bedeutung. Sie ist jedenfalls so auszuführen, daß ein makroskopisches Verschieben der Trennstellenpartner gegeneinander vollkommen unterbunden wird.

schen Spannung [2]. Dabei haben die in Abb. 4 stark umrahmten Biegekörper besondere technische Bedeutung erlangt, weil sie aufgrund ihrer Variationsbreite den größten Bereich der Meßgröße überstreichen.

Die Verformungskörper dienen zur Umformung der äußeren Kraft  $F$  in äquivalente Verformungszustände. Diese sind eindeutig beschreibbar durch:

- **Dehnungen** innerhalb des Volumens oder an der Oberfläche sowie
- **Längenänderungen** zwischen definierten Flächen der Meßfeder.

Die Zusammenhänge zwischen der Meßkraft und den genannten Dehnungen und Längenänderungen sollen möglichst eindeutig und einfach, beispielsweise linear sein.

**Schubverformungskörper erschließen neue Möglichkeiten für die Kraftmessung.**

Dieses gewünschte Verhalten weisen die Hookeschen Materialien auf. Reale Werkstoffe weichen zum Teil erheblich von den idealen ab und beeinträchtigen dadurch die Qualität des Aufnehmers.

Die Bestimmung der Elastizitätsgrenze ist in der Praxis schwierig. Man ersetzt im Aufnehmerbau daher die Elastizitätsgrenze durch einen höheren Spannungswert, der nach Entlastung auf einen bleibenden Dehnungswert führt. Ein in der Technik weit verbreitetes Beispiel ist  $\sigma_{0,2}$ .

In der Meßtechnik übliche Meßdehnungen sind  $\sigma_A = 0,001; 0,005; 0,01$  und  $0,02\%$  [2].

Die Dimensionierung der Meßfeder erfolgt dann so, daß das Verhältnis zwischen der größten auftretenden Spannung im Verformungskörper  $\sigma_{max}$  und der Auslegungsgrenze  $\sigma_A$  folgende Werte annehmen kann:

$$0,6 < \sigma_A / \sigma_{max} < 0,9$$

Diese Größe stellt einen befriedigenden Erfahrungswert dar und führt zu ausreichend hohen Überlastsicherheiten bei ausreichend guter Werkstoffausnutzung.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß im Aufnehmerselbstbau dann ausreichende Reproduzierbarkeit der Meßergebnisse erzielt wird, wenn die höchste im Verformungskörper auftretende Spannung unter der zur Zeit konventionell angenommenen Elastizitätsgrenze  $\sigma_{0,01}$  ( $\epsilon_{plastisch} = 0,01\%$ ) bleibt.

### 4. Interferenz parasitärer Lasten

Wir sehen in Abb. 4 eine Fülle von an sich einfachen Gebilden, die als Verformungskörper eingesetzt werden können. Beschränkt man sich im Selbstbau von Aufnehmern auf das resistive Wandlerprinzip als ein einfach zu realisierendes, so besteht nun das Problem, Dehnungsmeßstreifen so auf der Oberfläche des Verformungskörpers zu verteilen, daß die Meßaufgabe erfüllt werden kann und dabei stößt man bei allen Betrachtungen auf ein Phänomen, das ein beträchtliches Maß an Meßunsicherheiten mit sich bringen kann:

Die Interferenz parasitärer Lasten auf die zu messende Kraft, gleichgültig ob es sich um Ein- oder Mehrkomponentenaufnehmer handelt.

Die theoretische Auswertung praktischer Beispiele zeigt immer wieder, daß unkontrollierbare, parasitäre Kraftwirkungen auf die Meßrichtung erhebliche Meßfehler verursachen. Sie können vermieden werden:

- Durch Ausschaltung der parasitären Kraftwirkungen (mechanisch aufwendig, oft unwirtschaftlich)
- Durch Messung und rechnergestützte Kompensation der parasitären Kraftwirkungen (nur möglich, wenn ausreichend genaue Meßeinrichtung und Rechenanlage vorhanden)
- Durch Auffinden von interferenzarmen Verformungskörperformen.

Der Weg zu einer dieser im letzten Punkt genannten geometrischen Formen soll nun kurz umrissen werden.

### 5. Schubverformungskörper

Verfolgt man die Literatur der letzten Jahre, so findet man immer wieder Hinweise auf sogenannte Schubverformungskörper. Darunter versteht man Verformungskörper, an denen Schubspannungsfelder, genauer, die ihnen zugeordneten Hauptnormalspannungen zur Messung verwendet werden. Eine viel benutzte Anwendung — als Beispiel angeführt — ist die Drehmomentmessung an einer zylindrischen Welle mit unter  $45^\circ$  zur Wellenachse angeordneten DMS.

Für die Kraftmessung bieten sich offensichtlich einseitig eingespannte Biegebalken an. Ihre Spannungsverteilung läßt sich über Länge und Querschnitt gut darstellen (Abb. 5). Die Verteilung der Hauptdehnungen über die Körperhöhe zeigt den bekannten Verlauf mit der charakteristischen Absolutwertgleiche in der neutralen Achse.

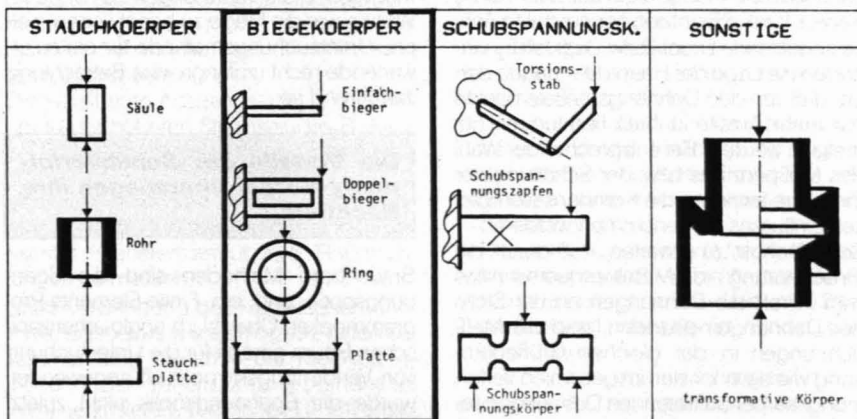


Abb. 4: Systematische Einordnung der Verformungskörper

### 3.3 Eigenschaften des Verformungskörpers

In letzter Zeit hat sich eine bestimmte Einordnung von Meßfederformen durchgesetzt. Diese übergeordnete Systematik wertet die Verformungskörper nach der in ihnen vorherrschenden Art der mechanischen

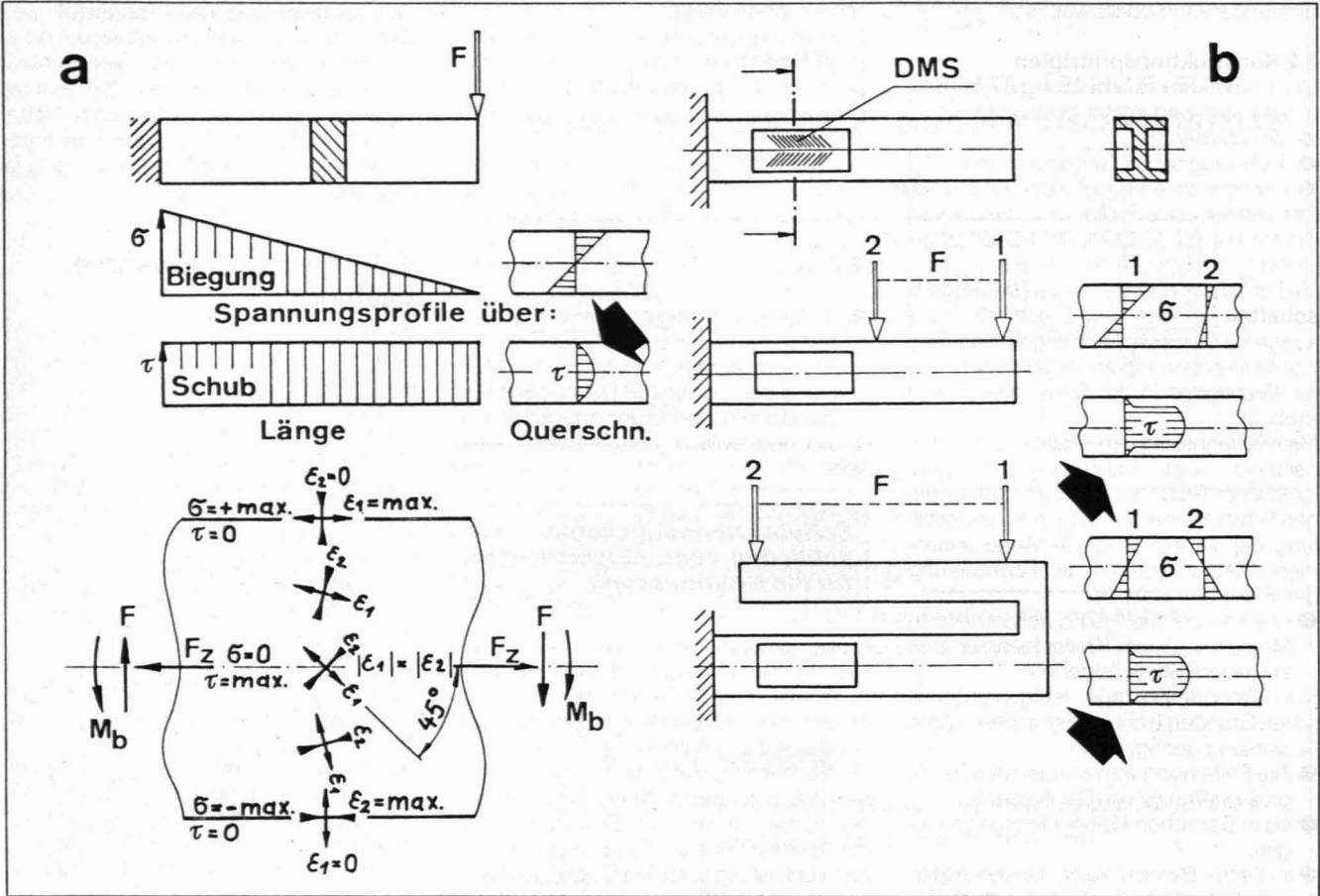


Abb. 5: Spannungsprofile des Schubverformungskörpers

Infolge der gegenseitigen Überlagerung von Schub- und Biegespannungen ändert sich die Winkellage des Hauptspannungs- oder Hauptdehnungskreuzes in Abhängigkeit vom Verhältnis Schubspannung zu Biegespannung und damit auch vom Abstand zur neutralen Achse. Die Hauptdehnungen werden dennoch nur dann richtig erfaßt, wenn die unter  $\pm 45^\circ$  applizierten DMS unmittelbar an der neutralen Achse sitzen. Infolge der flächenhaften Ausdehnung der DMS gelingt das nur näherungsweise. Eine Verbesserung läßt sich erzielen, wenn man bei vorgegebener Schubspannung die Biegespannung möglichst klein macht, das heißt, man muß den für eine gewisse Schubspannung vorgegebenen Querschnitt so verteilen, daß der Balken ein möglichst großes Biege-Widerstandsmoment bekommt, beispielsweise durch den I-Querschnitt. Dadurch werden die Biegespannungen im Verhältnis zu den Schubspannungen so klein, daß ihr Einfluß auf die Gesamtdehnung im Bereich der DMS vernachlässigbar wird.

**Stäbe mit I-Querschnitt besitzen gut getrennte Zonen der Hauptnormalspannungen aus Biegung und Schub.**

Ein besonderer Vorteil solcher Verformungskörper liegt darin, daß der Kraftan-

griffpunkt beliebig an der Längsachse des Balkens entlangwandern kann, ohne das Meßergebnis zu beeinflussen. Weiters kann vorweg qualitativ geschlossen werden, daß eine normal zur Zeichenebene angreifende Kraft wegen des geringen Abstandes der Meßflächen zur neutralen Achse nur geringen Einfluß auf die dort herrschenden Dehnungsfelder aus der Kraft  $F_y$  haben. Eine in Richtung der neutralen Achse angreifende Druck- bzw. Zugkraft  $F_z$  verändert die Lage der Hauptdehnungen derart, daß von den Dehnungsmeßelementen nur mehr Anteile in ihren Richtungen gemessen werden. Bei entsprechender Wahl des Meßprinzips bzw. der Schaltung der Einzelstreifen kann die Kompensation dieses Einflusses vorgenommen werden. Schließlich ist zu erwarten, daß durch die Einschnürung des Balkenquerschnittes zum I-Profil die Dehnungen an der Stelle der Dehnungsmeßstreifen, also die Meßdehnungen in der gleichen Größenordnung wie die höchsten im gesamten Verformungskörper auftretenden Dehnungen liegen. Konstruktions- und Meßprinzip sind bereits bekannt [3], werden aber im Aufnehmerselbstbau selten benutzt, weil ihre Auslegung einfachen Rechenmethoden nicht zugänglich ist [4] (Abb. 6). Die beschriebene Einschnürung zum I-Profil-Querschnitt ist durch zylindrische Senkungen erzielt.

Um für den Aufnehmerselbstbau ausreichende Unterlagen anbieten zu können, war es in [4] notwendig, die Parameter  $h/H$ ,  $b/B$  und  $L/H$  zu variieren. Das Ziel der Untersuchungen war, das zu erwartende Ausgangssignal der gedacht angebrachten Wandler in Abhängigkeit der genannten Parameter und der Meßkraft möglichst exakt voraussagen zu können. Weiters war die Frage zu beantworten, welche Untersuchungsmethode für die zu erwartende recht umfangreiche Betrachtung zielführend sei.

**Die Vorteile der Schubverformungskörper überwiegen ihre Nachteile.**

Brauchbare Methoden sind die Spannungsoptik und ein Finite-Elemente-Programmpaket. Obwohl im anglo-amerikanischen Raum gerade für die Untersuchung von Verformungskörpern oft angewendet, wurde die Spannungsoptik nicht zuletzt deshalb ausgeschieden, weil die Antwort der Wandler nicht direkt — wie gewünscht — erhalten werden konnte und für jede Kombination ein eigenes Modell hätte gebaut werden müssen. Hingegen erlaubte das bereits in der UNIVAC des Rechenzentrums der Universität installierte Programmpaket FEKOM bei entsprechender, aufgabenspezifischer Adap-

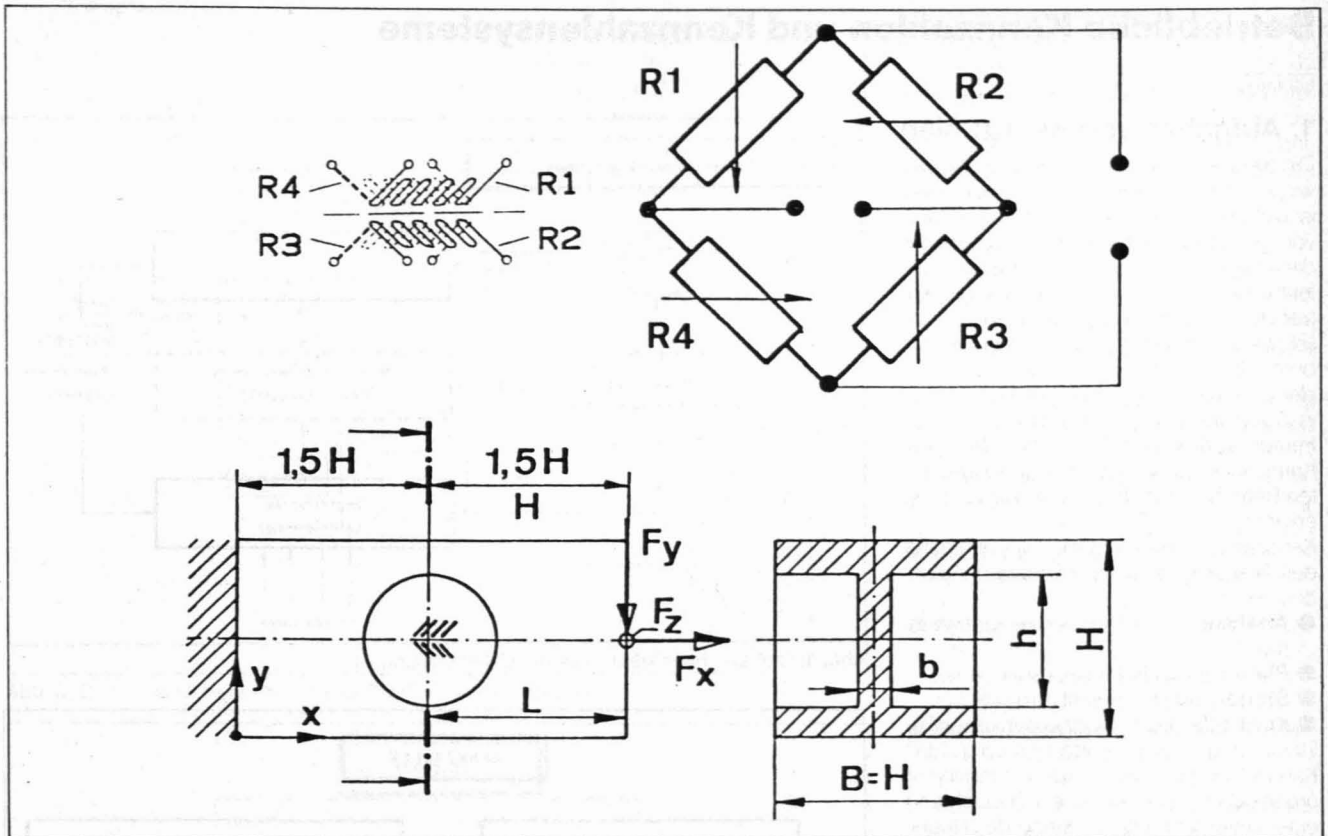


Abb. 6: Meß-Prinzip und Ersatz-System für die Berechnung

tion die Berechnung von Spannungen, Dehnungen und Dehnungssummen bis zur Erstellung von Plott-Files in einem Arbeitsgang.

Bei erreichbaren Ausgangssignalen mit Standard-DMS von

$$1,2 < U_a/U_e < 5 \text{ [mV/V]}$$

beträgt die größte auftretende Interferenz bei  $F_x = F_y$  0,06%

Dieser geringe Wert läßt die Vermutung zu, daß die gezeigte Verformungskörpergeometrie geeignet sein müßte, die bis jetzt als Störkraft behandelte Kraft in x-Richtung auch zu messen.

Die erzielbaren Ausgangssignale sind aufgrund der höheren Steifigkeit des Balkens in Längsrichtung geringer und betragen

$$0,5 < U_a/U_e < 1,0 \text{ [mV/V]}$$

Man ist also in der Lage, mit bisher kaum erreichter Interferenzarmut zwei Raumrichtungen zu messen.

Unter Verwendung des Hookeschen Ähnlichkeitsgesetzes war es möglich, einen Zusammenhang zwischen der Meßkraft  $F_y$  [N] und der Verformungskörperhöhe  $H$  [mm] herzustellen. Die Höhe  $H$  [mm] ergibt sich daraus zu

$$H = 0,250 \sqrt{\frac{210\,000}{E_1} \cdot F_y}$$

wenn unter  $E_1$  [N/mm<sup>2</sup>] der E-Modul des Werkstoffes eines zu berechnenden Verformungskörpers verstanden wird. Es war dann aufgrund des praktisch verschwindenden Einflusses des Kraftangriffs-

punktes auf die Meßsignale der Richtung X und Y naheliegend, das System für drei Raumrichtungen auszubilden.

Eine der möglichen Ausführungsformen kann durch Anbringung eines um 90° verdrehten Senkungspaares gestaltet werden. Dabei wird im zweiten Senkungspaar das gleiche Meßprinzip angewendet.

## 6. Zusammenfassung

Vergleicht man das Verhalten des Schubverformungskörpers mit den Eigenschaften von scheibenförmigen, aus Balken zusammengesetzten Meßfedern, werden drei Hauptvorteile der Schubverformungsmessung offensichtlich.

1. Die von den Dehnungsmeßelementen aufgenommene Meßdehnung liegt in der gleichen Größenordnung wie die größte im Verformungskörper auftretende Dehnung.
2. Die größte zu erwartende Interferenz der für die betrachtete Meßgröße parasitären Kräfte übersteigt nie den Wert von 0,2%.
3. Meßstellenabdeckung ist wirkungsvoll auszuführen.

Als Nachteil dagegen muß angeführt werden, daß Verformungskörper nach dem Schubfeldprinzip nur einen gewissen Meßbereich überstreichen können. Nach unten wird dieser Bereich begrenzt durch den Durchmesser des Senkungspaares, weil es bei zu kleinem Durchmesser unmöglich wird, mit nicht-industriellen Methoden die Dehnungsmeßstreifen am Grund der Senkungen zu applizieren und zu verdrahten. Nach oben wird der Meßbereich begrenzt

durch das Volumen des Verformungskörpers, weil es ab einer werkstoffbedingten Größe der Höhe  $H$  des Balkens nicht mehr möglich ist, über den Querschnitt gleichmäßige Werkstoffeigenschaften durch Vergüten zu erzielen.

Aus den genannten Gründen ist die Anwendung des beschriebenen Verformungskörpers für die Grenzen  $4 < F_y$  [kN]  $< 700$  zu erwarten.

Um eventuell aufgekommene Mißverständnisse auszuräumen, sei folgendes klar ausgesprochen:

Der Aufnehmerselbstbau soll und kann die industrielle Aufnehmerfertigung nicht konkurrenzieren. Er ist ausschließlich dann sinnvoll, wenn die Messung an Prozessen oder Maschinenteilen unter Verwendung käuflicher Aufnehmer, die nebenbei immer genauer sind als selbstgebaute, unwirtschaftlich wird oder es für den geplanten Meßbereich keine industriell gefertigten Aufnehmer gibt.

### Literatur:

- [1] PROFOS, P.: Handbuch der industriellen Meßtechnik, Vulkan, Essen, 1978
- [2] BAUMANN, E.: Elektrische Kraftmeßtechnik. VEB-Verlag Technik, Berlin, 1976.
- [3] N. N.: HBM-Datenblatt D 21.23.1, Hottinger Baldwin Meßtechnik, D-61 Darmstadt, Im Tiefen See 45
- [4] GRÜNBAUM, P.: Verformungskörper für den Selbstbau interferenzarmer, resistiver Kraftaufnehmer. Habilitationsschrift, TU Graz, 1984.

