

Entwicklungstendenzen der experimentellen Mechanik

Joachim Heymann, Adolf Lingener, Dieter Petrak

1. Anforderungen an die experimentelle Arbeit und ihr Verhältnis zur Theorie

Mit der raschen Entwicklung der Computertechnik und der numerischen Verfahren wie Finite-Element- und Differenzenmethoden, die zu sehr vielen neuen Varianten der theoretischen Spannungsermittlung führten, ist die Bedeutung der experimentellen Arbeit in der Mechanik keineswegs zurückgegangen, sondern ihr Anwendungsgebiet ist noch größer geworden. Dies resultiert nicht nur aus den Anforderungen der Industrie bezüglich der Lösung schwieriger Probleme sowohl auf konstruktivem als auch technologischem Gebiet, sondern auch dort, wo selbst hochentwickelte numerische Verfahren nicht zu verlässlichen Ergebnissen führen, wie z. B. bei großen Verformungen, bei Stoßbelastungen, in der Bruchmechanik, bei Wellenfortpflanzungen in Festkörpern und Fluiden und bei Ein- und Mehrphasenströmungen. Es wird auch immer wichtiger, nichtlinearelastisches, plastisches, viskoelastisches und viskoplastisches wie auch inhomogenes und anisotropes Verhalten von Werkstoffen und Fluiden zu untersuchen. Aber ohne Experiment kann das reale Stoffverhalten weder bestimmt noch beschrieben werden. Gleiches trifft auf die Überprüfung der Zuverlässigkeit von komplexen EDV-Programmen zu.

Die experimentellen Verfahren zur Untersuchung statischer und dynamischer Vorgänge haben sowohl durch den Einsatz neuer Wandlereffekte, vor allem aber durch die Einführung der digitalen Verfahren in die Signalverarbeitung eine stürmische Entwicklung erfahren. Durch die konsequente Anwendung moderner Rechentechnik haben die digitalen Verfahren heute auf vielen Gebieten ihre Überlegenheit eindeutig nachgewiesen. Mit Hilfe der digitalen Meßdatenverarbeitung lassen sich sehr große Informationsmengen, die sowohl von vielen Meßstellen gleichzeitig (Vielstellenmeßtechnik) als auch von wenigen Meßstellen über einen längeren Zeitraum (stochastischer Signalverlauf) anfallen können, in kurzer Zeit zu aussagefähigen Resultaten verarbeiten.

Bedingt durch die vielfältigen theoretischen Möglichkeiten mit entsprechenden Forderungen an den experimentellen Nachweis müssen immer kompliziertere Zusammenhänge auch experimentell erschlossen werden. Dies geschieht in enger Wechselwirkung und gerade dadurch erfahren die experimentellen Verfahren eine starke Verbreiterung und Auffächerung, die bis zur Weiterentwicklung bestehender und Anwendung neuer experimenteller Methoden geführt hat. In gleicher Weise trifft dies auf die Einbeziehung der Mikroelektronik und der Optik zu, wie z. B. durch neue Bauelemente und sogar ganze Verfahren, wie dies noch bei der Fasertechnik gezeigt wird.

Besonders typisch für die Dialektik von Theorie und Experiment ist die Herausbildung solcher hybrider Verfahren, die durch die gleichzeitige Anwendung theoretischer und experimenteller Methoden gekennzeichnet sind und wo die Untersuchungsergebnisse nur auf Grund beider erhalten werden können.

2. Gemeinsamkeiten und Wechselwirkungen zwischen Festkörpermechanik und Strömungsmechanik

2.1. Gemeinsamkeiten

Bei der Betrachtung der Entwicklungstendenzen der experimentellen Verfahren sind vor allem folgende Gemeinsamkeiten erkennbar:

— Einsatz der EDV bei der Meßwerterfassung, -verarbeitung und -auswertung, vorwiegend auf der Basis von Klein- und Mikrorechnern [1]. Dazu gehören Automatisierung bzw. zumindest Teilautomatisierung der Punkt- und Feldmeßverfahren, Vielstellenmeßtechnik, Signalanalyse, experimentelle Systemanalyse unter Nutzung von Ergebnissen der Systemtheorie, experimentelle Systemanalyse unter Einbeziehung rechenaufwendiger Algorithmen und hybride Verfahren auf der Basis von Computermodellen.

— Herausbildung neuer optischer Verfahren auf der Basis des Lasers und der Fasertechnik sowohl zur Feldgrößen- als auch zur Integralbestimmung [2] bis [7]. Hier sind besonders folgende Verfahren zu nennen:

Holografische Interferometrie

Auf einer Hologrammplatte interferieren die informationstragende Objektwelle und eine kohärente strukturlose Referenzwelle. Das dadurch nach Amplitude und Phase gespeicherte Licht erzeugt nach Entwicklung der Hologrammplatte durch Rekonstruktion, d. h. Bestrahlen der Hologrammplatte mit einem Referenzstrahl, ein virtuelles und ein reelles räumliches Bild des aufgenommenen Objekts. Je nach der Belichtung der Hologrammplatte haben sich 3 Verfahren, und zwar Doppelbelichtungstechnik, Echtzeittechnik und Zeitmittelungstechnik herausgebildet. Sie sind vorwiegend zur Messung der Verschiebungen in Beobachtungsrichtung geeignet, wobei das Objekt sowohl transparent (Durchlichtholografie) als auch undurchsichtig (Auflichtholografie) sein kann.

In der Festkörpermechanik hat sich die Zeitmittelungstechnik bei Schwingungsuntersuchungen durchgesetzt, während die Doppelbelichtungstechnik vor allem bei der Konturanalyse, bei der Deformationsanalyse in Beobachtungsrichtung (Plattenbiegung) und in der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung (Verbundkonstruktionen wie Reifen und Sandwich-Bauteile) zum Einsatz kommt.

In der Strömungsmechanik ist die Anwendung der Echtzeittechnik zur Untersuchung von schnellen Vorgängen in Verbindung mit der Hochgeschwindigkeitskinematografie hervorzuheben.

Specklemeßtechnik

Beim Bestrahlen eines diffus streuenden Reflexions- bzw. Transmissionsobjekts mit kohärentem Licht wird auf dessen Oberfläche eine feinkörnige, kontrastreiche Struktur, bestehend aus hell-dunkel-alternierenden Fleckchen (engl.: Speckle), sichtbar. Die Aufzeichnung dieses Specklemusters erfolgt mittels Linsensystem auf ein Registraturmedium. Dabei werden die aus der holografischen Interferometrie bekannten Techniken der Doppelbelichtung, Zeitmittelung und Echtzeit genutzt. Die auf dem Medium gespeicherte optische Information heißt Specklegramm. Ihre Auswertung ermöglicht verfahrensabhängig die Bestimmung von Oberflächenverschiebungen im Bereich von 0,5 mm bis 1 mm, -dehnungen, -neigungen und Schwingungszuständen senkrecht zur Beobachtungsrichtung. Verformungen und Schwingungen in Beobachtungsrichtung sind durch modifizierte Verfahren meßbar. Die künftige Kopplung mit digitalen Bildverarbeitungsanlagen wird eine schnelle und effektive Verarbeitung der umfangreichen Meßdaten gestatten. Gegenwärtig untergliedert sich die Specklemeßtechnik in fünf Verfahren, und zwar Speckleinterferometrie, visuelle Speckleinterferometrie, elektronische Specklemusterinterferometrie, elektronische Specklemusterinterferometrie, Speckleshearografie und Specklefotografie.

Laser-Doppler-Verfahren

Beim Laser-Doppler-Anemometer dient die Dopplerverschiebung von Laserlicht, das durch sich im Fluid mitbewegende sehr kleine Teilchen gestreut wird, zur Bestimmung der Fluidgeschwindigkeit. Die Laser-Doppler-Anemometrie ermöglicht die Messung von 3 unabhängigen Geschwindigkeitskomponenten, der Reynoldsschen Spannungen und anderer Korrelationen, die für die theoretische Behandlung turbulenter Strömungen notwendig sind. Das jeweils von einem Teilchen verursachte Signal (Burst) wird mit Hilfe von Frequenznachlaufdemodulatoren, elektronischen Zählern oder in direkter Kopplung von einem Rechner analysiert. Eine optische Frequenzanalyse ist mittels eines Fabry-Perot-Interferometers möglich. Es sind insgesamt Messungen der Strömungsgeschwindigkeit im Bereich 10^{-3} m/s bis 10^3 m/s möglich.

Die Laser-Doppler-Anemometrie wird ferner bereits zur Messung der Geschwindigkeit, der Teilchenkonzentration und der Teilchengröße der dispersen Phase einer feststoffbeladenen Strömung eingesetzt.

Dual-Focus-Laser-Verfahren

Das Verfahren beruht auf dem Prinzip der Laufzeit-Messung und gestattet Messungen in schwer zugänglichen Räumen und von hohen Geschwindigkeiten. Das Verfahren ist rechnergekoppelt. Die Anwendbarkeit für Fluid-Feststoff-Strömungen ist bereits erprobt.

Laser-Beugungsverfahren zur Teilchengrößenbestimmung

Das Verfahren wird zur Teilchengrößenbestimmung von Laborproben und direkt von Fluid-Feststoff-Strömungen eingesetzt. Ein grundlegendes Problem ist, daß kleine

Intensitätsschwankungen große Änderungen in der Anzahlverteilung der Teilchengrößenklassen hervorrufen. Einen Ausweg bietet gegenwärtig die Vorgabe bekannter Funktionen für die Anzahlverteilung oder die Glättung der Meßwerte mit Hilfe der linearen Optimierung.

Faseroptische Sensoren

Das bisherige Einsatzgebiet der Lichtleiter wurde hauptsächlich von der Nachrichten- und Datenübertragung bestimmt, wobei die Entwicklung von Lichtwellenleitern mit geringer Dämpfung und hoher Übertragungsbreite im Vordergrund stand. Faseroptische Sensoren sind gewissermaßen ein Nebenprodukt der Lichtleitertechnik, die jedoch heute ein recht komplex gewordenen Gebiet beanspruchen. Ein faseroptischer Sensor besteht aus der Kombination Versorgungsfaser/Signalfaser und kann sowohl aus zwei verschiedenen Fasern (äußerer Typ) als auch aus einer speziell präparierten Faser zusammengesetzt sein. Faseroptische Sensoren mit Multimode-Fasern gestatten die Messung von Ereignissen, Abständen, Positionen, Druck, Kraft, Brechungsindex, Verschiebung und Temperatur. In jedem Fall ist ein neuer Sensoraufbau mit speziellen Meßeigenschaften möglich. Faseroptische Sensoren mit Monomode-Fasern nutzen die sehr geringe Dämpfung und die eindeutige Phase und Polarisationsrichtung bei Verwendung von kohärentem monochromatischem Licht aus. Damit ist der Aufbau hochempfindlicher faseroptischer Interferometer möglich, mit denen Temperatur-, Längen- und Druckdifferenzen als Phasendifferenzen nachgewiesen werden können. Mit Hilfe von speziellen Faserbeschichtungen können Strom- und Magnetfeldmessungen ausgeführt werden. Ein faseroptisches Sagnac-Interferometer gestattet die Messung von Winkelgeschwindigkeiten.

Faseroptische Sensoren finden zunehmend Eingang in die experimentelle Technik der Festkörper- und Strömungsmechanik. Dabei steht die gesamte Entwicklung noch am Anfang.

– Digitale Bildverarbeitung [3]

Sie hat bei den optischen Feldmeßverfahren einen differenzierten Stand erreicht, wobei heute das interaktive Arbeiten ein technisch-wissenschaftliches Optimum darstellt. Dazu müssen entsprechende interaktive Bildverarbeitungssysteme noch geschaffen werden. Vom Prinzip her wird das in Form von Interferenzlinien oder Interferenzstreifenmustern vorliegende Bild digitalisiert und über das Bildverarbeitungssystem dem Rechner zugeführt. Während die Hardware und die vom Hersteller mitgelieferte Grundsoftware, auch als allgemeine Bildverarbeitungsroutinen bezeichnet, meist universell eingesetzt werden kann, ist die Anwendersoftware praktisch nicht käuflich. Sie muß vom Anwender selbst erarbeitet werden, und zwar für jedes Verfahren einzeln, da zwischen diesen kaum Gemeinsamkeiten bestehen.

Die digitale Bildverarbeitung wird in der Reihenfolge des erreichten Standes bei folgenden Verfahren angewandt: Specklemeßtechnik, Holografische Interferometrie, Moiréverfahren, Spannungsoptik.

– Hybride Techniken [8]

Sie haben sich sowohl in der Festkörper- als auch Strömungsmechanik herausgebildet. Beispiele hierfür sind die hybride Analyse von Plattenproblemen [9] [10], die gemeinsame Anwendung des spannungsoptischen

Erstarrungsverfahrens und des Isothetenverfahrens bei der Spannungsermittlung in Bauteilen [11], die experimentelle Ermittlung der Koeffizienten der Erhaltungsgleichung, wodurch deren weitere mathematische Bearbeitung einfacher möglich wird.

2.2. Wechselwirkungen

Wechselwirkungen sind vor allem

– bei der Übertragung von in der Strömungsmechanik entwickelter Verfahren auf die Festkörpermechanik und umgekehrt zu erkennen, z. B.

Dopplerverfahren zur Messung von Strömungsgeschwindigkeiten wird auf Messung an festen Körpern übertragen;

Doppelimpulsholografie bei schnell ablaufenden Vorgängen der Festkörpermechanik wird zur Messung von Konzentration, Geschwindigkeit und Größe der Feststoffphase in Strömungen angewandt.

– in der Rheologie ausgeprägt. Hier werden Meßverfahren der Festkörpermechanik und Strömungsmechanik (Spannungsoptik, Tracerverfahren, Strömungsdoppelbrechung, Laser-Doppler-Anemometrie) angepaßt und zur Bestimmung rheologischer Materialfunktionen eingesetzt [12].

Während sich die Beispiele bezüglich Gemeinsamkeiten und Wechselwirkungen noch weiter fortsetzen ließen, sind gravierende Unterschiede in der Entwicklung von Festkörper- und Strömungsmechanik nicht feststellbar.

3. Zur Anwendung einiger ausgewählter Verfahren

3.1. Optische Feldmeßverfahren

3.1.1. Räumliche Spannungsoptik [13], [14]

Das Erstarrungsverfahren ist nach wie vor führend und kann gegenwärtig nicht durch ein besseres experimentelles Verfahren ersetzt werden. Es erfordert einen hohen Arbeitsaufwand, aber dafür werden sehr viele Informationen erhalten, wobei der Einblick in das Innere des Bauteils über ein Modell nur mit diesem Verfahren in umfassender Weise möglich ist. Digitale Bildverarbeitung wird mit zu einer Effektivitätserhöhung beitragen.

Mit dem Oberflächenschichtverfahren gelingt die qualitative und quantitative Spannungsbestimmung in der lastfreien Oberfläche komplizierter räumlicher Bauteile. Hervorzuheben ist seine Eignung zur Ermittlung und Sichtbarmachung plastischer Bereiche bzw. Dehnungen. Da die spannungsoptisch aktive Schicht zweimal durchlaufen wird, besitzt die Hauptgleichung die Form

$$\sigma_1 - \sigma_2 = n \frac{S}{2d} \quad (1)$$

Unter Beachtung der Zwangsbedingung, wonach die spannungsoptische Schicht die gleiche Verformung wie die Bauteiloberfläche erfährt, ergibt sich dort die Hauptspannungsdifferenz zu

$$(\sigma_1 - \sigma_2)_B = \frac{E_B}{E_F} \frac{1 + \nu_F}{1 + \nu_B} n \frac{S}{2d}, \quad (2)$$

wobei sich der Index B auf das Bauteil und der Index F auf die Schicht bezieht. Weiter bedeuten: n Isochroma-

tenordnung, S spannungsoptische Konstante, d Schichtdicke, E Elastizitätsmodul, ν Querdehnzahl.

Weiterentwicklungen spezieller Verfahren der räumlichen Spannungsoptik haben vor allem die Rationalisierung des Untersuchungsprozesses unter Umgehung des Erstarrungsverfahrens zum Ziel. Bezüglich der Modelltechnik wurden geklebte Skelettmodelle aus Epoxidharz einschließlich des Einsatzes geeigneter Klebstoffe und -technologien getestet. Solche Modelle eignen sich besonders gut zur Untersuchung nach dem Verfahren mit eingebetteten Reflexionsschichten.

Diesem Verfahren liegen Gedanken des Oberflächenschicht- und Zwischenschichtverfahrens zugrunde. An bekannten, hochbeanspruchten Stellen in der Oberfläche räumlicher Modelle wird eine genau passende, separat hergestellte, unten verspiegelte Schicht (Reflexionsschicht) aus dem gleichen Werkstoff eingeklebt. Die Reflexionsschichten haben etwa die gleiche Dicke wie die eines beim Erstarrungsverfahren an dieser Stelle des Modells entnommenen Schnittes und zeigen – im Reflexionspolaroskop – die Isochromaten und Isoklinen dieser Ebene. Die Weiterentwicklung beinhaltet auch mit das Einbetten von Schichten an durch Abwinkelungen nicht direkt sichtbaren Oberflächen räumlicher Modelle und ihre Betrachtung über Spiegelanordnungen sowie die Herstellung und Übertragung der Reflexionsschichten. Im Gegensatz zur üblichen Methode des Beimischens von reflektierenden Partikeln zum Klebstoff wird hier eine im Hochvakuum aufgedampfte und zur Verbesserung der Haftung mit Öffnungen versehene Metallschicht auf die Schicht aus Epoxidharz übertragen.

Bild 1 zeigt dazu eine eingebettete Reflexionsschicht in einem Pressenmodell aus Epoxidharz und Bild 2 eine dazugehörige Isochromatenaufnahme, aus der auf die Modellspannungen in diesem Bereich geschlossen werden kann.

Vorteile gegenüber dem Oberflächenschichtverfahren bestehen im Wegfall des Dicken- und Versteifungseffektes, da nun das gesamte Modell aus homogenem Werkstoff besteht und die Reflexionsschicht mit der Modelloberfläche abschließt.

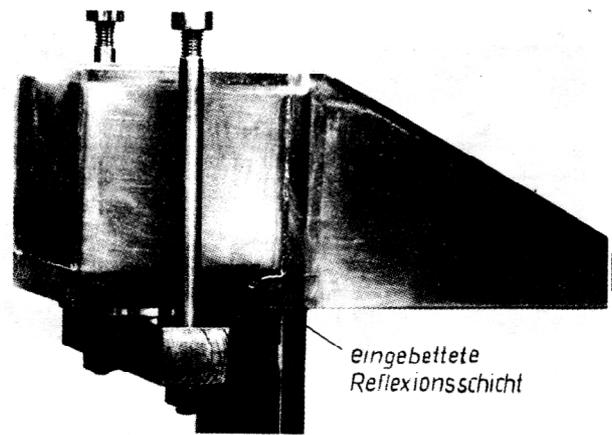


Bild 1

Ausschnitt aus dem Modell eines Pressengestells mit eingebetteter Reflexionsschicht

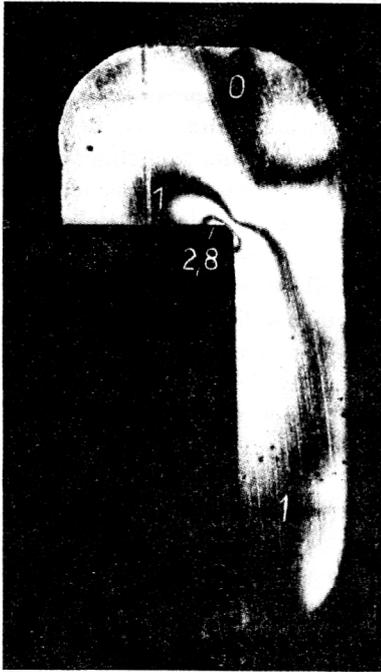


Bild 2
Isochromatenbild dieser Reflexionsschicht

Gegenüber dem Erstarrungsverfahren liegen die Vorteile in der zerstörungsfreien Untersuchung der Modelle bei Raumtemperatur, wodurch eine geringere Dehnungsüber-
treibung entsteht und das Poissonsche Modellgesetz erfüllt wird. Außerdem ist es bei Variantenuntersuchungen unter Verwendung desselben Modells möglich, Fehlerquellen auszuschalten, die beim Erstarrungsverfahren mit der Verwendung immer neu angefertigter Modelle entstehen würden. Schließlich ist auch der Versuchsaufwand wesentlich geringer.

3.1.2. Moireverfahren [13], [14]

Da hier der Werkstoff nicht doppelbrechend und transparent zu sein braucht, besitzen die verschiedenen Methoden einen weiten Anwendungsbereich. Das Moireverfahren ist besonders zur Untersuchung inelastischen Materialverhaltens geeignet. Durch die Trennung der Raster-

herstellung von der Rasterübertragung konnte das Isothetenverfahren anwenderfreundlicher gestaltet werden. Auch bei der Rasterherstellung selbst wurden Fortschritte erreicht. Dies betrifft einmal die Anwendung und Weiterentwicklung des Phasengitter-Moireverfahrens [14] und zum anderen die Verwendung von Objektrastern aus Silikonkautschuk, mit denen die Analyse des elastisch-plastischen Tragverhaltens von Gewinden möglich wurde [11].

Phasenraster aus Silikonkautschuk werden mittels der Replicatechnik hergestellt. Sie besitzen gegenüber Phasenrastern aus anderen Stoffen eine Reihe von Vorteilen. So wird die Reliefstruktur bis zu mehreren Hundert Linien/mm exakt nachgebildet. Weiterhin besteht zu verschiedenen Epoxidharzen bei der Rastervervielfältigung eine ausgezeichnete Trennwirkung und schließlich sind Formstabilität und Standzeit groß. Um Gewindeverbindungen unter maximaler Ausnutzung ihres Tragverhaltens einsetzen zu können, müssen die elastisch-plastischen Verformungen der Gewindegänge genau bekannt sein. Solche Untersuchungen können an kompletten eingebneten Gewindeverbindungen mit dem Moireverfahren durchgeführt werden, wenn die Oberfläche des Gewindemodells mit einem Objektraster aus Silikonkautschuk präpariert wird. Der besondere Vorteil besteht hier darin, daß damit gleichzeitig alle im Gewindeverbund vorhandenen oder bei Belastung sich bildenden Spalte mit dieser elastischen Substanz ausgefüllt werden. Dadurch wird die Relativbewegung der Gewindegänge nicht behindert und die Oberfläche bleibt geschlossen. Nach Belastung bzw. anschließender Entlastung werden Abdrücke des deformierten Objektrasters mittels Replicatechnik abgeformt und separat ausgewertet. Im Bild 3 sind als Beispiel die Isotheten einer Gewindeverbindung nach Entlastung dargestellt. Hier zeigt sich, daß die bleibenden Verformungen ausschließlich auf das Muttergewinde (im Bild 3 oben) beschränkt bleiben. Im

Bild 3
Isotheten der Schraubenverbindung
M 48 x 3, 42 CrMo 4, d = 6 mm, nach F = 75 kN
entlastet, p = 0,004 mm



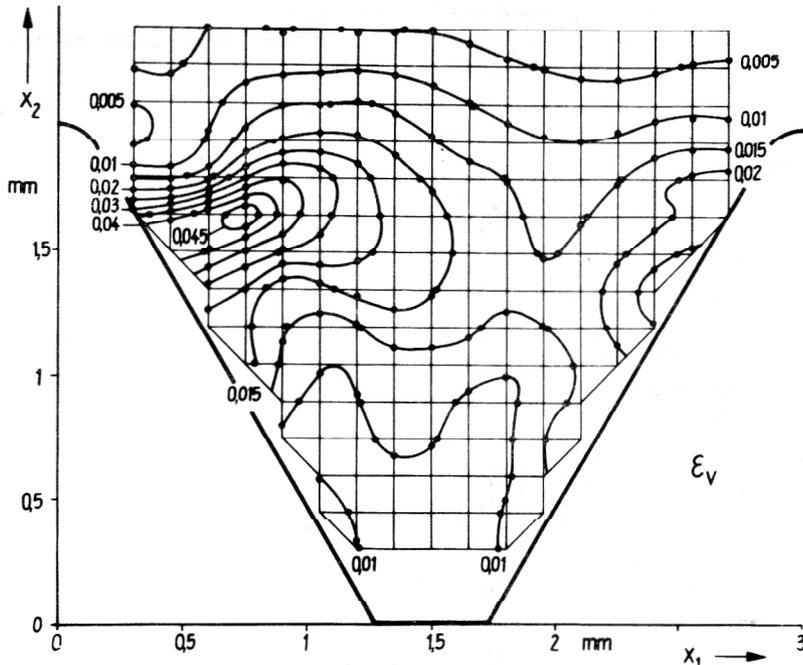


Bild 4
Feld der einachsigen Vergleichsdehnung ϵ_v

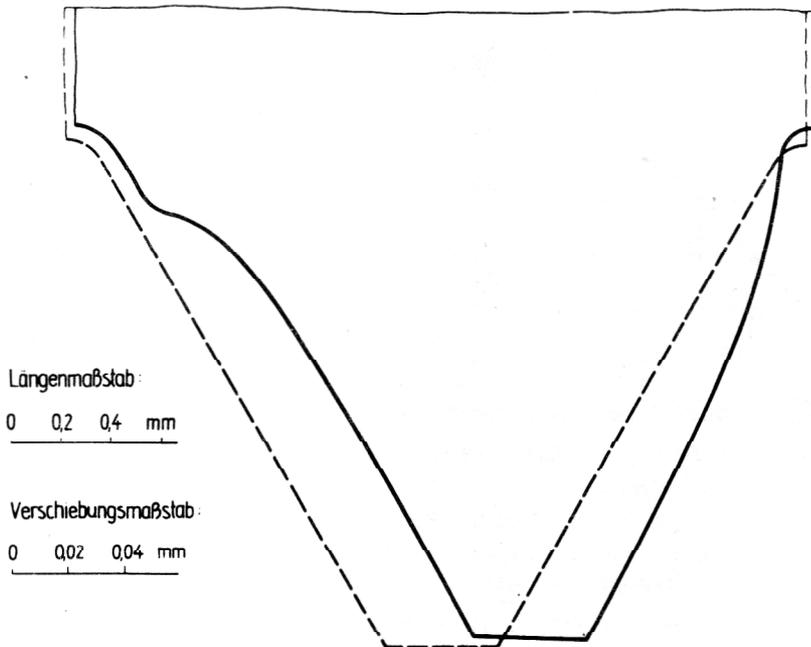


Bild 5
Verformung des Gewindeprofils

kaltgewalzten Bolzengewinde sind die Verformungen rein elastisch.

Bild 4 zeigt die berechnete einachsige Vergleichsdehnung.

$$\epsilon_v = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\epsilon_{11}^2 + \epsilon_{12}^2 + \epsilon_{22}^2 + \epsilon_{11} \cdot \epsilon_{22}} \quad (3)$$

des rechten Zahns als Isolinienfeld. Die maximalen Deformationen treten dort auf, wo die Zahnspitze des Bolzengewindes anliegt. Im Bild 5 ist die Verformung der Außenkontur dieses Zahns dargestellt.

3.1.3. Specklefotografie

Die Specklefotografie gestattet bei Anwendung der Doppelbelichtungstechnik eine quantitative Verformungsanalyse orthogonal zur Beobachtungsrichtung. Dabei wird

die optisch raue Oberfläche des Objekts mit divergentem bzw. parallelem Laserlicht beleuchtet. Zur Aufzeichnung des sich formierenden Specklemusters ist eine abbildende Optik mit kontinuierlich variierbarer Apertur erforderlich. Die Specklestruktur wird vor und nach der Verformung des Objekts auf der gleichen Fotoplatte gespeichert.

Nach dem Entwickeln des Specklegramms erfolgt das punktweise Abtasten des Fotonegativs mit einem dünnen Laserstrahl. Dadurch wird auf einem dahinterliegenden Schirm (Bild 6) eine Schar gerader, äquidistanter Makrointerferenzstreifen sichtbar [15]. Diese sog. Youngschen Streifen verlaufen senkrecht zur erfolgten Verschiebung. Sie ermöglichen die Bestimmung der Verschiebung nach Betrag und Richtung für den betrachteten Punkt auf der

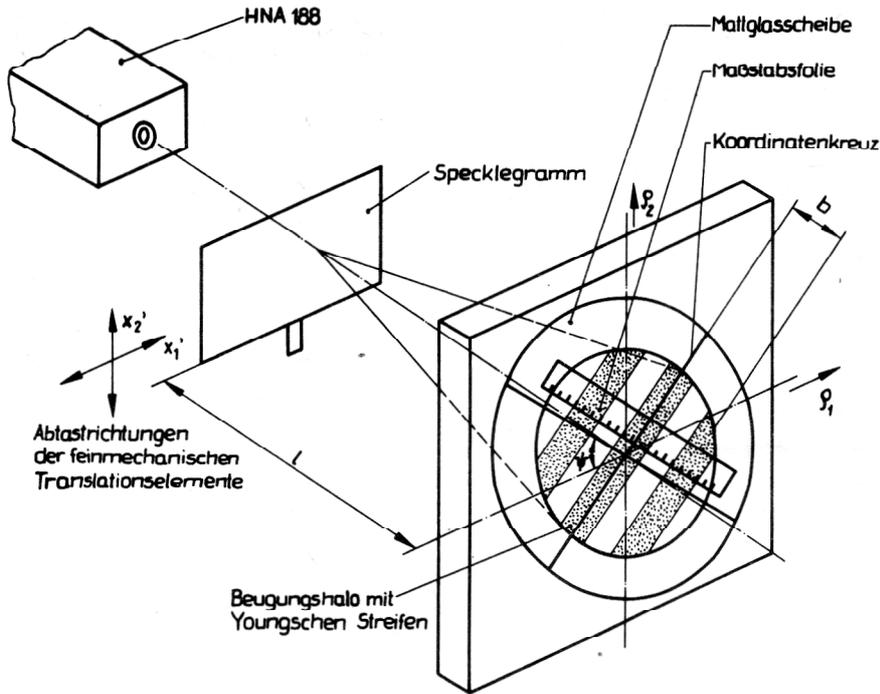


Bild 6
Prinzipische Skizze des Versuchsaufbaus zur Specklephotografie

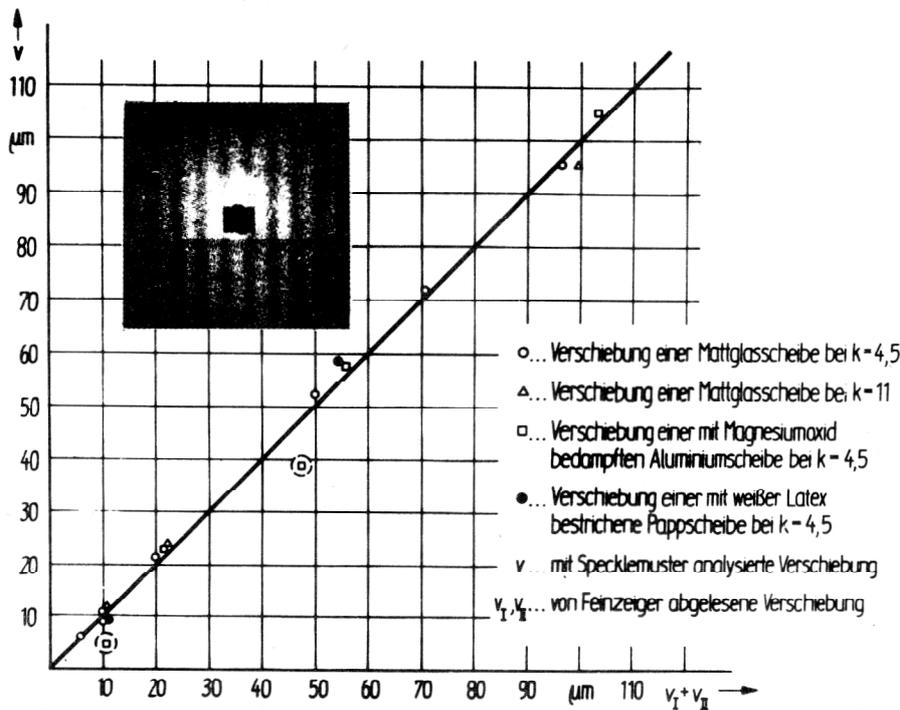


Bild 7
Auswertung der Starrkörperverschiebungen. Links oben ist das mit Youngschen Streifen überzogene Beugungshalo für $u = 52,2 \mu\text{m}$ zu sehen

Objektoberfläche. Der Betrag der gesuchten Verschiebung u wird aus der Beziehung

$$u = \frac{\lambda l}{\beta' b} = \frac{n \lambda l}{\beta' b_n} \quad (4)$$

ermittelt, wobei λ Wellenlänge des Laserlichts, l Abstand Specklegramm-Schirm, b Abstand zwei benachbarter Interferenzminima bzw. -maxima, β' Abbildungsmaßstab bedeuten.

Bild 7 zeigt die Testung ausgewählter Verfahrensparameter im Intervall von 6 bis $100 \mu\text{m}$ bei einer definierten Starrkörperverschiebung. Der Meßbereich liegt in der Größenordnung von $1 \mu\text{m}$ bis etwa 1mm . Die Specklephotografie schließt somit die Lücke zwischen dem Moiréverfahren und der holografischen Interferometrie.

3.2. Experimentelle Schwingungsanalyse und Untersuchung stochastischer Vorgänge

Die eingangs dargestellten Tendenzen eines verstärkten Einsatzes der EDV zur Meßdatenerfassung und -verarbeitung ist auf diesem Gebiet besonders rasch und beeindruckend vor sich gegangen. Einmal betrifft das den

Übergang zu digitalen Verfahren überhaupt. Hatten die analogen Verfahren auf dem Gebiet der Schwingungsanalyse vor etwa zehn Jahren noch eine gewisse Bedeutung, so sind sie heute bei anspruchsvollen Aufgaben, vor allem bei solchen, die weiterführenden Charakter haben, wie z. B. die Systemanalyse, völlig durch die digitalen Verfahren verdrängt. Zum anderen ist die Leistungsfähigkeit der digitalen Verfahren in einem Maße gewachsen, das den Leistungsanstieg aller vorangegangenen Generationen von analogen Meßgeräten und -verfahren um ein Vielfaches übertrifft.

Ausgangspunkt dieser Entwicklung der digitalen Verfahren zur Schwingungsanalyse war die Entdeckung des Algorithmus der schnellen Fouriertransformation durch Cooley und Tuckey im Jahre 1965, mit dessen Hilfe es möglich wurde, den Übergang von gemessenen Signaldarstellungen im Zeitbereich zu einer Darstellung im Frequenzbereich in außerordentlich kurzen Verarbeitungszeiten zu realisieren [16].

Grundlage der digitalen Signalverarbeitung ist die Abtastung des kontinuierlich anfallenden Zeitsignals mit einer vorzugebenden Abtastfrequenz und eine anschließende Verarbeitung der entstehenden diskreten Werte in einem hinreichend schnellen Digitalrechner. Der formale Übergang von Zeitbereich zu Frequenzbereich wird bekanntlich durch die Fouriertransformation

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \exp(-2\pi jft) dt \quad (5)$$

vermittelt. Diese Integraltransformation ordnet jeder Zeitfunktion $x(t)$ eine Funktion $X(f)$ der Frequenz zu. Eine für die praktische Meßtechnik brauchbare Form muß sich aber auf endliche Zeitabschnitte (endliche Integrationsgrenzen) und endlich viele diskrete Meßwerte innerhalb dieses Zeitabschnittes beschränken. Damit das Ergebnis der Transformation dieser diskreten Werte ebenfalls in diskreter Form erhalten wird, muß die Zeitfunktion $x(t)$ periodisch gemacht werden. Dies erreicht man durch periodische Aneinanderreihung der gemessenen Funktionsabschnitte. Damit wird das Problem auf eine einfache Fourierreihenentwicklung zurückgeführt. Sind x_0, x_1, \dots, x_{N-1} die abgetasteten Funktionswerte in Abständen $\Delta t = 1/f_s$ (f_s -Abtastfrequenz), dann erhält man die diskreten Werte der in den Zeitbereich transformierten Funktion als endliche Summe:

$$X_k = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_n \exp\left(-\frac{2\pi jkn}{N}\right) \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (6)$$

Der Frequenzabstand der einzelnen Linien beträgt $\Delta f = \frac{1}{T}$ (T-Meßdauer). Diese Formel läßt sich leicht programmieren, wobei durch geschickte Zusammenfassung von Teilsummen für den immer realisierbaren Fall, daß N eine Potenz von 2 ist, mit dem Algorithmus der schnellen Fouriertransformation sehr zeitsparende Verarbeitungsvarianten möglich sind.

Bild 8 zeigt das anschaulich für $N = 16$.

Aus der Zeitfunktion (erste Zeile) werden 16 äquidistante Punkte (2. Zeile) herausgegriffen und periodisch

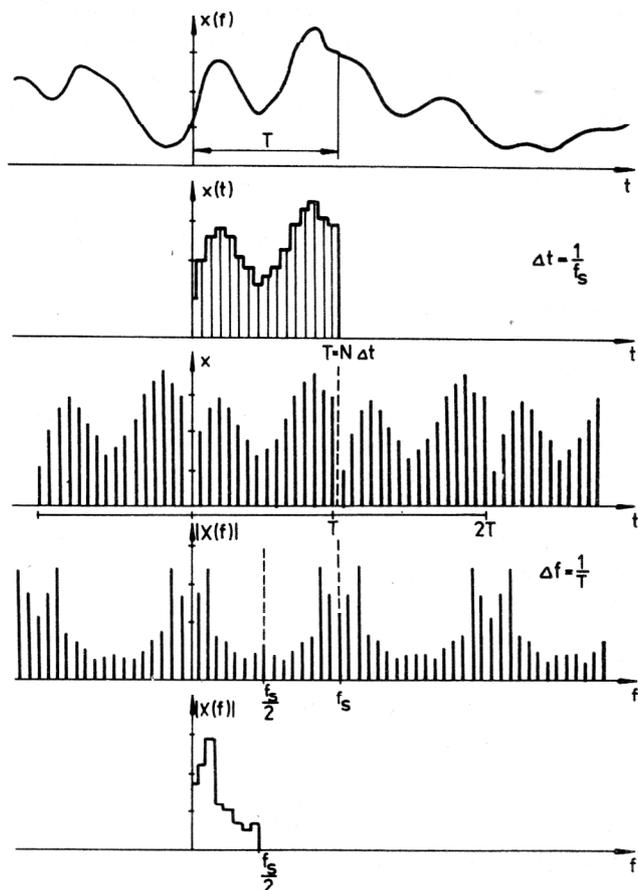


Bild 8
Anschauliche Darstellung der schnellen Fouriertransformation

fortgesetzt (3. Zeile). Diese werden nach der angegebenen Formel transformiert mit dem Ergebnis eines diskreten, aber auch periodischen Spektrums (4. Zeile), das symmetrisch ist bezüglich der Frequenz Null und jedes Vielfachen von $f_s/2$. Wirklich brauchbar ist also nur der Frequenzbereich zwischen 0 und $f_s/2$ (negative Frequenzen liefern nichts prinzipiell Neues). Die Spektrallinien bei Frequenzen oberhalb $f_s/2$ entsprechen nicht der Realität, sondern resultieren aus dem gewählten digitalen Verfahren. Da auch umgekehrt höhere Frequenzen des Signals durch die Symmetrieeigenschaften in den Bereich zwischen 0 und $f_s/2$ gespiegelt werden können, müssen vor jeglicher Verarbeitung des Signals alle Frequenzen oberhalb $f_s/2$ durch ein Tiefpaßfilter unterdrückt werden.

Diese Zusammenhänge wurden hier ausführlich dargestellt, um den Unterschied zwischen der Fourier-Integraltransformation und dieser sogenannten diskreten Fouriertransformation und die Konsequenzen für das Experiment deutlich zu machen und auf den dadurch entstehenden Aufwand zur Genauigkeitssicherung hinzuweisen [17].

Für die Realisierung der diskreten Fouriertransformation bei konkreten Meßsignalen und ebenso für die Bildung anderer für die Meßdatenverarbeitung wichtiger Signalkennfunktionen gibt es zwei Wege

1. Festprogrammierte Gerätesysteme. Diese kamen zu Beginn der 70er Jahre auf und werden heute für mehrkanalige Auswertung mit hohem Bedienungskonfort von

einer Reihe renommierter Firmen des kapitalistischen Auslandes angeboten. Sie verfügen über ein sehr leistungsfähiges Angebot von Verarbeitungsprogrammen.

2. Programmpakete auf der Basis von Klein-, Prozeß- und Mikrorechnern. Solche Programmpakete sind dort im Einsatz, wo festprogrammierte Systeme entweder nicht zur Verfügung stehen oder ihr Einsatz wegen einer zu geringen Auslastung nicht lohnt. Sie sind aufwendig in der Erarbeitung und Pflege, bieten aber den Vorteil beliebiger Erweiterungsfähigkeit bei neuen Anforderungen. Die Verarbeitungsgeschwindigkeiten sind geringer, genügen aber den Erfordernissen der Festkörpermechanik vollständig [1].

In der DDR wurde der zweite Weg, vor allem zur Analyse stochastischer Vorgänge durch die Entwicklung eines Programmsystems unter der Bezeichnung ASAM [18] beschrieben (Analyse Stochastischer Analoger Meßsignale). Dieses Programmsystem arbeitet bisher auf der Basis des Kleinrechners KRS 4200 oder des Prozeßrechners PRS 4000. Es wird z. Z. daran gearbeitet, die vorhandenen Programme auch auf Mikrorechnern zum Einsatz zu bringen. Eine Übersicht der Bausteine des Programmsystems und zugleich der Programmleistungen zeigt Bild 9.

Die häufigste Einsatzvariante ist die Verarbeitung gespeicherter Meßdaten von einem Magnetbandspeicher. Die analogen Meßwerte werden zunächst mittels eines Analog-Digitalumsetzers zu diskreten Werten aufbereitet und auf einer Datenplatte gespeichert.

Eine parallele Erfassung von maximal 8 Kanälen ist möglich. Es ist aber auch eine unmittelbare digitale Eingabe möglich. Mittels der auf einer Programmplatte gespeicherten Programme können dann je nach der gestellten Aufgabe die Meßdaten verarbeitet werden. Der Block „Spektralanalyse“ enthält als wesentliche, aber auch zeitintensive Operation die schnelle Fouriertransformation, mit deren Hilfe die verschiedenen Spektren berechnet werden, die ebenfalls auf der Datenplatte abgespeichert werden.

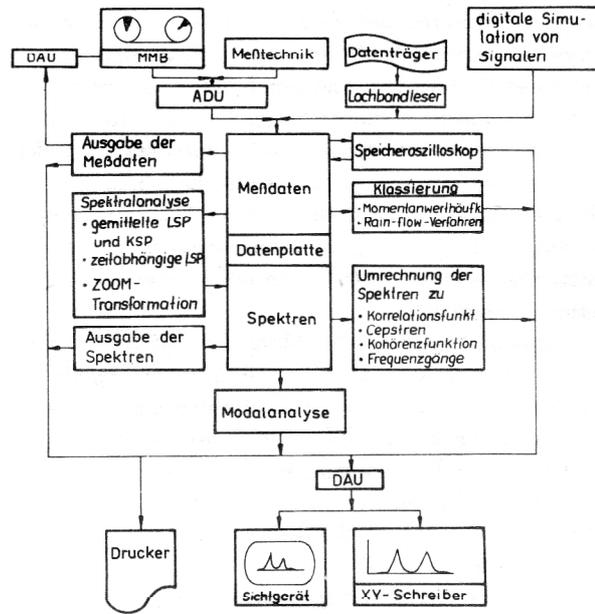


Bild 9
Bausteine des Programmsystems ASAM

Das Programmsystem ASAM besteht nun aus einer ganzen Reihe von Teilprogrammen, die durch ein übergeordnetes Organisationsprogramm aufgerufen werden können. Dazu gehören, wie im Bild 9 dargestellt, Programme zur Frequenzgangbestimmung, der Cepstrumanalyse, aber auch Programme zur Analyse im Zeitbereich wie Korrelationsfunktion und Klassierung.

Der große Vorteil dieser Variante auf der Basis eines frei programmierbaren Rechners liegt in der Erweiterungsfähigkeit des Programmsystems. Die Ergebnisausgabe erfolgt je nach Bedarf über Breitdrucker, über XY-Scheiber oder ein Sichtgerät. Auf den beiden letzteren erfolgt die Darstellung der Ergebnisse in analoger Form.

Gut bewährt hat sich die Ausgabe auf einem A3-Format, das je nach Anzahl der darzustellenden Funktionsver-

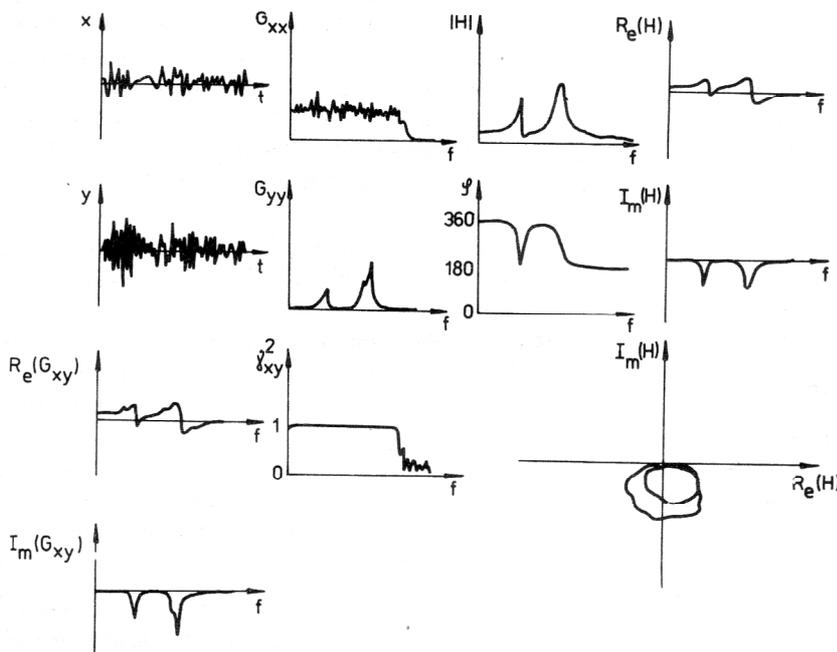


Bild 10
Grafische Ausgabe von Analyseergebnissen

läufe in bis zu 20 Felder mit kalibriertem Koordinatensystem unterteilt werden kann. Als Beispiel dient Bild 10, in dem für zwei Eingangssignale, die am Ein- und Ausgang eines Zweimassenschwingers gemessen wurden, die Auswertesignale dargestellt sind, und zwar links oben die beiden Zeitsignale $x(t)$ und $y(t)$, daneben die zugehörigen einseitigen Leistungsspektren G_{xx} und G_{yy} . Unten links sind Real- und Imaginärteil des aus x und y gebildeten Kreuzleistungsspektrums G_{xy} dargestellt und die dazugehörige Kohärenzfunktion γ_{xy}^2 , die über die Anwesenheit von Störungen eine Aussage zulässt. In den 5 Diagrammen der rechten Bildhälfte sind verschiedene Darstellungen des Frequenzganges des beaufschlagten mechanischen Systems dargestellt, und zwar nach Betrag und Phase (Mitte), Real- und Imaginärteil (rechts) sowie als Ortskurve (unten rechts).

Natürlich können hier nicht alle Leistungen der experimentellen Signalanalyse erläutert werden. Auf einen Punkt sei aber noch hingewiesen: Die bei der Analyse stochastischer Signale erforderlichen Mittelungen erfordern teilweise einen hohen Aufwand. Wenn es sich um natürliche Rauschsignale handelt, ist dieser Aufwand nicht zu umgehen. Wie groß dieser Aufwand ist, zeigt Bild 11. Hier ist das Ausgangsspektrum eines Einfreiheitsgradsystems bei Erregung mit natürlichem Rauschen in Abhängigkeit von der Anzahl der Mittelungen dargestellt. Erst nach 192 Mittelungen entsteht ein dem Erwartungswert nahekommendes Ergebnis.

Soll ein vorgegebenes System analysiert werden und muß dazu stochastisch erregt werden, dann ist der Einsatz von sogenannten Pseudozufallssignalen vorteilhaft [19], [20]. Hierbei handelt es sich um künstlich erzeugte stochastische Signale mit vorgegebenen Spektren, die in Wirklichkeit aber periodisch sind und dadurch bei linearen Systemen ohne Mittelungen auskommen. Die Erzeugung dieser Signale erfolgt aus vorgegebenen Leistungsspektren durch Zuordnung zufälliger Phasenwinkel zu den Amplituden bei den diskreten Frequenzen des Spektrums und anschließende inverse Fouriertransformation. Im Programmsystem (Bild 9) ist diese Pseudozufallssignalerzeugung als Teilprogramm enthalten.

Abschließend zu diesem Komplex eine Bemerkung zur Überlegenheit der digitalen Verfahren.

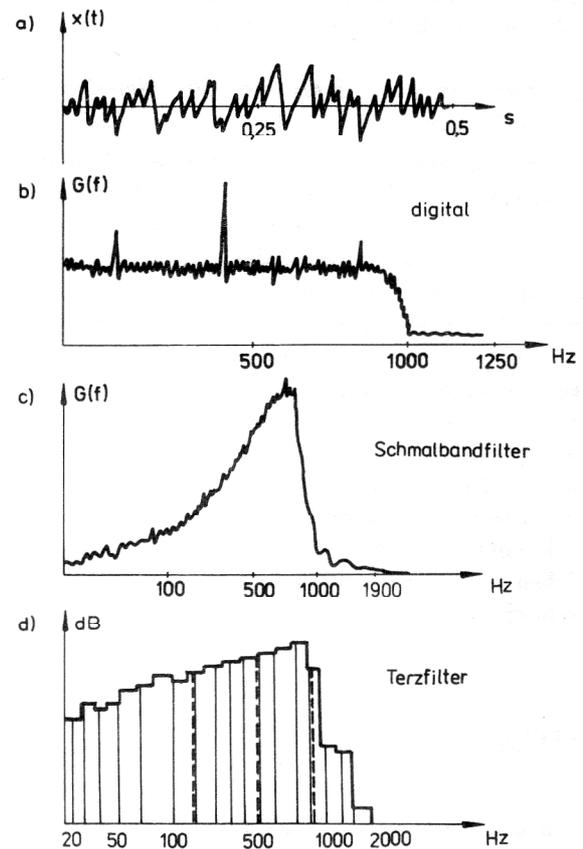


Bild 12
Vergleich verschiedener Analyseverfahren bei ihrer Anwendung auf stochastische Schwingungen

Bild 12 zeigt die Analyse eines stark verrauschten Signals, das 3 Einzelfrequenzen enthält.

Das Zeitsignal (oben) läßt zunächst keine dominierende Frequenz erkennen. Aus der digitalen Analyse (2. Zeile) erkennt man im Leistungsspektrum bei 100 Mittelungen die drei Einzelfrequenzen mit unterschiedlichen Pegeln. Alle anderen Verfahren, die Analyse mit einem Terzfilter, einem durchstimmbaren Filter oder dem sehr trennscharfen Wattmeterverfahren sind nicht in der Lage, die gesuchten Frequenzen zu identifizieren.

Die digitalen Verfahren zur Auswertung analoger Meßsignale mechanischer Schwingungen stellen also eine neue

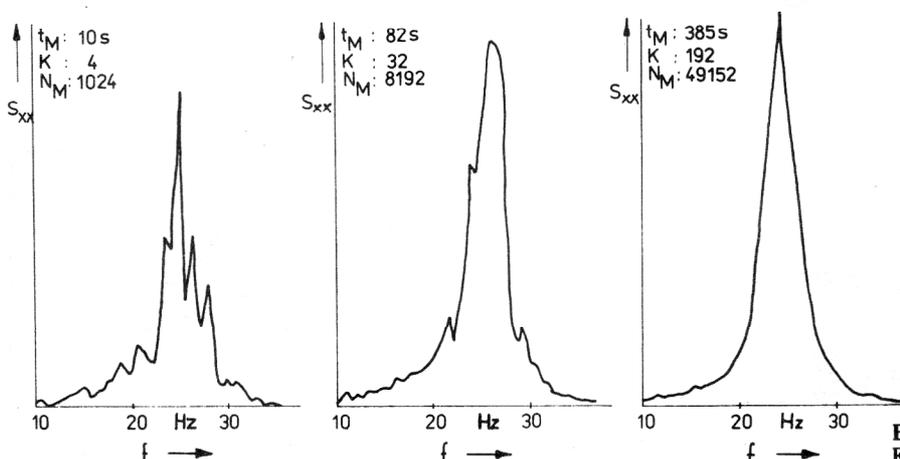


Bild 11
Einfluß von Mittelungen auf das Ergebnis von digital ausgewerteten Meßergebnissen

Qualität bei der Analyse von Meßsignalen vor allem bei solchen mit stochastischem Charakter dar.

3.3. Faseroptisches Meßsystem für Fluid-Feststoff-Strömungen

Feststoffbeladene Strömungen werden seit Beginn dieses Jahrhunderts wissenschaftlich untersucht. Bekannte praxisorientierte Beispiele sind der pneumatische und hydraulische Transport, Abscheider, Sichter und Klassierer, die Wirbelschicht und Fluid-Feststoff-Injektoren. Aufgrund der Komplexität des Strömungsablaufs in einer Fluid-Feststoff-Strömung bilden nach wie vor dimensionslose Kennzahlen das unentbehrliche Werkzeug bei der Bildung eines ingenieurtechnischen Konzepts. Ein wesentlicher Beitrag hierzu wurde von Molerus [21] geleistet, der mit einer umfassenden Dimensionsanalyse verschiedene technologische Aufgabenstellungen erfassen konnte. Die Schwerpunktsbewegung der Feststoffteilchen wird durch die folgende Kenngrößenbeziehung beschrieben:

$$F \left[\left(\frac{v_{f,rel}^2}{\left(\frac{\rho_p}{\rho_f} - 1\right) d_p g} ; \frac{v_{sink}^2}{\left(\frac{\rho_p}{\rho_f} - 1\right) d_p g} ; \frac{v_{f,rel} d_p}{\nu} \right) ; \frac{\rho_p}{\rho_p - \rho_f} \frac{v_f^2}{d_p g} ; \frac{d_p}{D} \right] = 0 \quad (7)$$

Darin bedeuten: v_f, v_p Geschwindigkeiten der beiden Phasen; ρ_f, ρ_p deren Dichten; d_p Teilchengröße; ν kinematische Zähigkeit; g Erdbeschleunigung; D Apparatekennzeichnung. Die Gleichung (7) kann auf unterschiedliche technische Apparate (pneumatischer und hydraulischer Transport, Wirbelschicht-Anlagen u. a.) angewandt werden.

Für die Berechnung feststoffbeladener Strömungen werden gegenwärtig Modelle eingesetzt, die sich für Einphasenströmungen bewährt haben. Neben dem Ein-Fluid-Modell und statistischen Modellen beschäftigt man sich hauptsächlich mit dem Zwei-Fluid-Modell in Lagrange-

scher und Eulerscher Betrachtung, das an einfachen Fluid-Feststoff-Strömungen numerisch getestet wird.

Sowohl für die Bestimmung der Ähnlichkeitskennzahlen als auch für die Überprüfung der numerischen Rechenwerte benötigt man lokale Meßverfahren, die möglichst störungsfrei und in-stream arbeiten. Eine betriebliche Anwendung in verfahrenstechnischen Apparaten ist anzustreben. In diesem Sinn wurde von Petrak und Hoffmann [22] bis [24] ein faseroptisches Sonden-Meßsystem entwickelt und erprobt, das die Messung der Konzentration, Geschwindigkeit und Größe der dispersen Phase in einer Fluid-Feststoff-Strömung gestattet. Wesentliches Bauelement der miniaturisierten Meßsonden sind Multimode-Stufen-Index-Lichtleitfasern der Kombination Glas/Glas, Quarz/Quarz und Kunststoff/Kunststoff, die entsprechend der Meßaufgabe in unterschiedlicher Weise angeordnet sind. Die faseroptischen Sensoren bestehen aus der Kombination Versorgungsfaser/Signalfaser und sind vom äußeren Typ. Wenn die Teilchen die Meßsonde passieren, so verursachen sie auf Grund ihrer optischen Eigenschaften intensitätsmodulierte Lichtsignale, die von den Lichtleitfasern zu optoelektronischen Empfängern geleitet und dort in Spannungssignale umgesetzt werden. Als optoelektronische Empfänger werden vorzugsweise Photovervielfacher und Phototransistoren verwendet. Die Signale werden dann je nach Meßaufgabe in unterschiedlicher Weise genutzt. Die bisher erprobten Varianten des faseroptischen Meßsystems sind folgende:

3.3.1. Messung der Teilchenkonzentration

Für die Messung der Teilchenkonzentration werden nach Bild 13 einfache Lichtabsorptions- und Lichtreflexionschranken benutzt. Die als Lichtgeber und Lichtempfänger dienenden Elemente, die optischen Sensoren, sind einzelne Lichtleitfasern mit einem Faserdurchmesser von

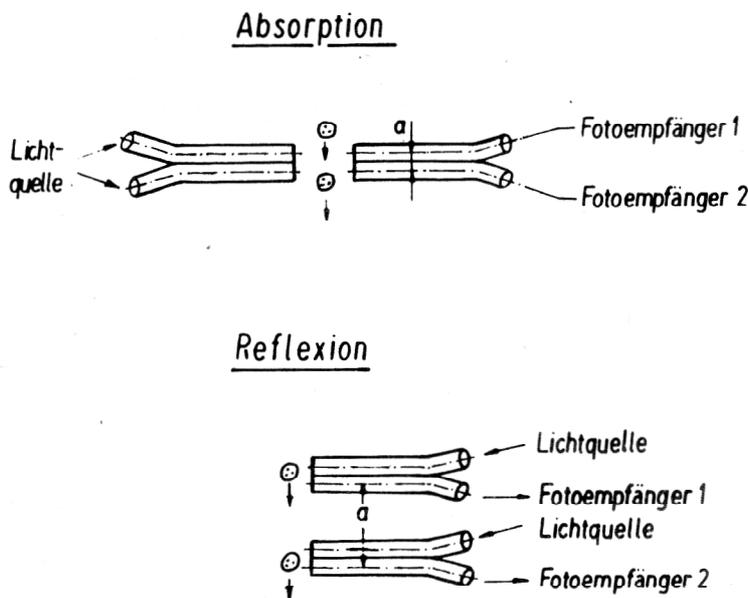
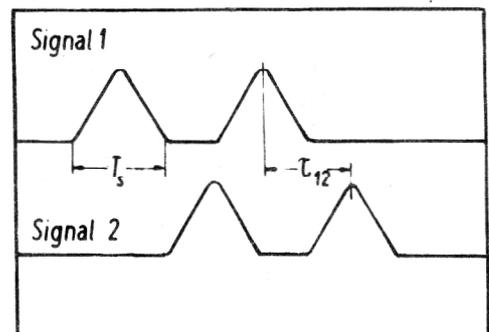
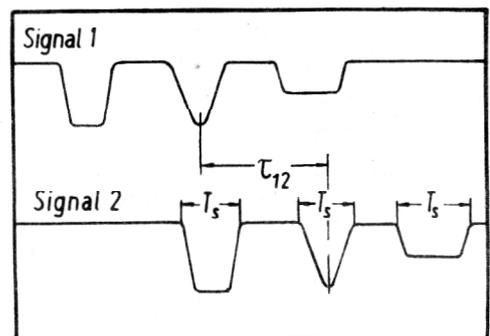


Bild 13 Schematischer Aufbau der Lichtabsorptions- und Lichtreflexionsschranke mit den von ihnen erzeugten Impulsen

Registrierte Impulse



13 bis 250 μm . Daneben können auch einzelne Lichtleitfaserbündel mit einem Bündeldurchmesser von ca. 2 mm verwendet werden. Die von den Teilchen verursachten Spannungsimpulse werden nach ihrer Verstärkung und Formung von einem Impulszähler in üblicher Weise erfasst. Die Meßsonde registriert zunächst die Zählrate \dot{I} und mit Bezug auf den zur Strömungsrichtung senkrecht orientierten Querschnitt A_M des Meßvolumens die Teilchenstromdichte j . Bei Kenntnis der mittleren örtlichen Teilchengeschwindigkeit \bar{v}_p ergibt sich die mittlere lokale Teilchenkonzentration als Anzahlkonzentration zu

$$\bar{c}_p = j/\bar{v}_p \quad (8)$$

$$\text{bzw. } \bar{c}_p = \dot{I}/A_M \bar{v}_p \quad (9)$$

und als Volumenkonzentration zu

$$\bar{c}_V = \bar{c}_p k_V d_p^3, \quad (10)$$

k_V ist ein mittlerer Teilchenformfaktor.

3.3.2. Messung der Teilchengeschwindigkeit

Wie bei der Konzentrationsbestimmung werden ebenfalls Lichtabsorptions- und Lichtreflexionsschranken benutzt. Es stehen prinzipiell zwei Meßmethoden zur Verfügung: die Laufzeitmethode und die Frequenzmethode. Bei der Laufzeitmethode sind die Lichtschranken in doppelter Ausführung vorhanden und in Strömungsrichtung um einen bekannten Abstand a versetzt. Es gilt dann für die Teilchengeschwindigkeit:

$$v_p = a/\tau_{12}, \quad (11)$$

wenn τ_{12} die Zeitverschiebung zwischen beiden Signalen ist. Diese wird bei determinierten Signalen mit einem Zeitintervall-Meßgerät und im Fall verrauschter Signale mit Hilfe eines Kreuzkorrelators aus dem Maximum der Kreuzkorrelationsfunktion nach

$$\Phi(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{+T} X(t) Y(t+\tau) dt \quad (12)$$

ermittelt. Das Prinzip der Frequenzmethode ist in Bild 14 angegeben. Auf der optischen Wirkungsfläche der Meßsonde sind eine Reihe von Lichtleitfasern äquidistant in einer Linie parallel zur Strömungsrichtung angeordnet. Um ein auswertbares Signal zu erhalten, muß in Analogie zur Laser-Doppler-Anemometrie der äqui-

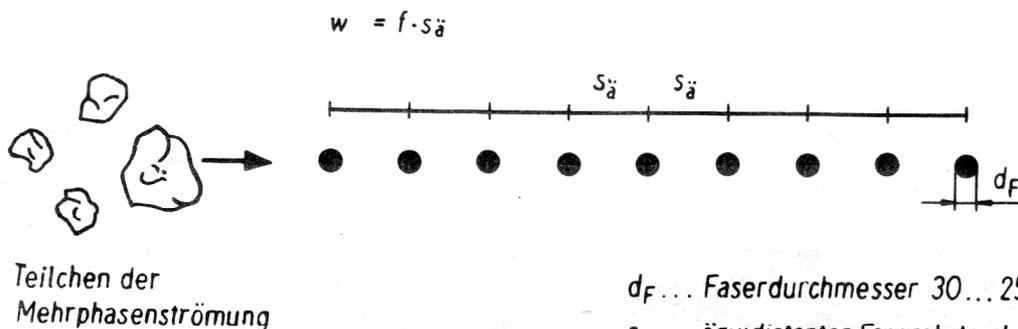


Bild 14
Meßprinzip zur Bestimmung der Teilchengeschwindigkeit nach der Frequenzmethode

distante Faserabstand größer als der Teilchendurchmesser sein. Alle einzeln angeordneten Signalfasern werden zusammengefaßt und einem optoelektronischen Empfänger zugeführt. Passiert ein Teilchen das Meßvolumen der Sonde, so erzeugt es entsprechend der Faseranzahl eine Impulsfolge, deren Frequenz proportional der Teilchengeschwindigkeit ist:

$$v_p = f s_{\ddot{a}}, \quad (13)$$

wobei $s_{\ddot{a}}$ den äquidistanten Faserabstand bedeutet. In verdünnten Fluid-Feststoff-Strömungen, bei denen die Teilchenkonzentration so gering ist, daß im Mittel nur ein Teilchen das Meßvolumen der Sonde passiert, wird als Frequenzanalysator ein Zähler eingesetzt. In allen anderen Fällen erfolgt die Bestimmung der Impulsfolgefrequenz mit Hilfe eines Schmalbandanalysators, dem ein einstellbarer Bandpaß vorgeschaltet ist. Wenn ein ausreichender mechanischer Schutz der Sonde gegeben ist, können alle technisch interessierenden Teilchengeschwindigkeiten bestimmt werden.

3.3.3. Messung der Teilchengröße

Wie bei den bereits genannten Varianten erfolgt die Messung in der Zeit, in der das Teilchen an der optischen Wirkungsfläche der Sonde vorbeiströmt und ist damit eine in-stream-Messung. Das Prinzip ist in Bild 15 dargestellt. Danach wird das Schattenbild eines Teilchens mit einer in ihrer Größe abgestuften Reihe von Meßlängen verglichen. Stimmen Teilchengröße und gewählte Meßlänge überein, so wird ein Spannungssignal ausgelöst, das zur Ermittlung des Mengenanteils der Teilchengröße be-

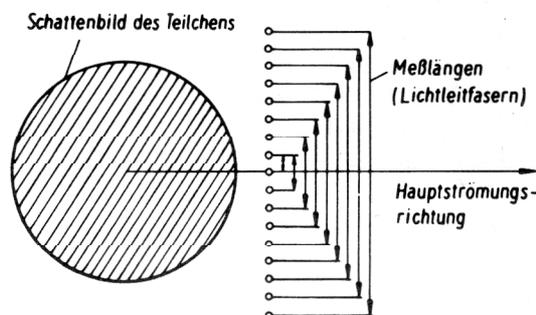


Bild 15
Meßprinzip zur Bestimmung der Teilchengröße

nutzt wird. Die Meßschranken bestehen aus einzelnen Lichtleitfasern möglichst kleiner Faserdurchmesser d_F , die auf der optischen Wirkungsfläche der Meßsonde senkrecht zur Strömungsrichtung der Teilchen angeordnet sind. Passiert ein Teilchen den beleuchteten Meßspalt der Absorptionslichtschranke entsprechend Bild 16,

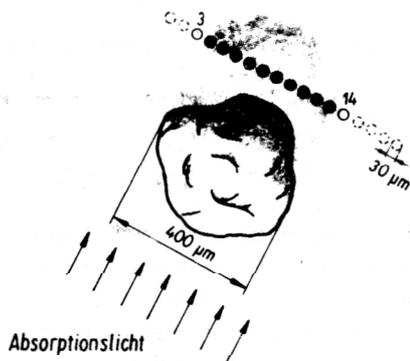


Bild 16
Teilchen im Meßvolumen einer Lichtabsorptionsschranke, $d_p = 400 \mu\text{m}$, $d_F = 30 \mu\text{m}$

so werden je nach der Teilchengröße eine mehr oder weniger große Anzahl von Empfängerfasern vom Teilchenschatten verdunkelt. Ein Signal wird dann für eine Teilchengrößenklasse registriert, wenn die Fasern der gewählten Schranke im Schatten liegen, während gleichzeitig die begrenzenden Fasern schattenfrei bleiben. Die Lichtleitfasern können einzeln oder zusammengefaßt in einem Schattenbündel bzw. Helligkeitsbündel mit optoelektronischen Empfängern verbunden werden. Für Teilchengeschwindigkeiten bis 0,3 m/s werden Phototransistoren und darüber hinaus Photovervielfacher eingesetzt. Jedes von einer Lichtleitfaser bzw. Faserbündel stammende Spannungssignal wird in ein TTL-Signal umgewandelt und einer Logik zugeführt, die im Koinzidenzfall einem Impuls für einen nachgeschalteten Zähler ausgibt. Die realisierte Gerätevariante in der Betriebsart

Bild 17
Meßplatz zur Bestimmung der Teilchengeschwindigkeit in einer vertikalen Rohrleitung NW 100 nach der Frequenzmethode



Lichtabsorptionsschranke besitzt einen Teilchengrößenmeßbereich von 26 bis 1000 μm .

3.3.4. Messung der Teilchenbewegung normal zur Hauptströmungsrichtung

Werden zwei einfache Lichtreflexions- oder Lichtabsorptionsschranken so zueinander angeordnet, daß die beiden optischen Wirkungsflächen einen rechten Winkel miteinander einschließen, so ist die simultane Messung der Teilchenströmdichte in Hauptströmungsrichtung und normal dazu möglich. Beide Meßkanäle werden dann identisch ausgeführt. Mit dieser Meßeinrichtung können Querbewegungen der Teilchen erfaßt werden, die aus der Wechselwirkung mit den turbulenten Wirbeln der Fluidströmung oder aus Stoßprozessen der Teilchen untereinander bzw. mit Begrenzungen resultieren.

3.3.5. Tracermesssonden, Meßgenauigkeit

Tracermesssonden können für technisch verschmutzte Einphasenströmungen und für sehr dichte Fluid-Feststoff-Strömungen, deren Feststoff ein nicht ausreichendes optisches Reflexionsvermögen besitzt, eingesetzt werden. Der Tracer wird der jeweiligen Strömung unmittelbar vor der optischen Wirkungsfläche der Sonde zugeführt. Bei Lichtabsorptionsschranken haben sich transparente Teilchen (Ballotini) bewährt, während für Lichtreflexionsschranken Quarzit und Weizengrieß geeignet sind. Zur Überprüfung der Meßgenauigkeit der unterschiedlichen Meßsonden stehen entsprechende Vorrichtungen zur Verfügung. Bezüglich der Teilchenkonzentration, der Teilchengeschwindigkeit und der Teilchengröße wird dabei ein Spektrum von Werten vorgegeben [25].

3.3.6. Experimentelle Ergebnisse

Die faseroptische Meßtechnik wurde sowohl im Labormaßstab als auch an klein- und großtechnischen Anlagen erprobt. Zu den bisherigen wesentlichen Einsatzgebieten gehören:

- Fördertechnik (pneumatische und hydraulische Anlagen)
- Wirbelschichttechnik
- Verfahrenstechnik (Strahl-Mischer, Rührgefäße, Abscheider, Kristallisatoren)
- Biotechnik (Filterüberwachung)
- Papierindustrie (Filterüberwachung)

- Umweltschutz (Abgasüberwachung)
- Granulometrie

Im folgenden sind zwei Meßplätze dargestellt. Bild 17 zeigt einen Meßplatz zur Bestimmung der Feststoffgeschwindigkeit in einer pneumatischen vertikalen Förderleitung der Nennweite 100 mm mit Hilfe einer Frequenzmeßsonde. Im Bild 18 ist ein kompletter Meßplatz zur

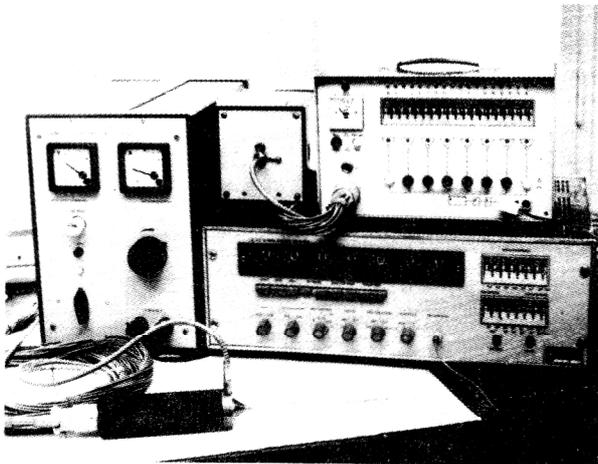


Bild 18
Meßplatz zur Bestimmung der Teilchengröße

Teilchengrößenbestimmung angegeben (Standort Bergakademie Freiberg, Sektion Verfahrenstechnik und Silikatechnik). Im Bild 19 ist ein Beispiel für eine Teilchenkonzentrationsmessung zu finden. Mit Hilfe einer Lichtabsorptionssonde wurde in einer horizontalen Rohrleitung der Nennweite 80 mm, durch die ein Eiweißprodukt mit Luft gefördert wird, die Impulsanzahlverteilung über dem Rohrdurchmesser gemessen. Die Profilentwicklung vom Kernprofil zum Wandprofil ist deutlich zu erkennen. Im Bild 20 ist für den gleichen Meßort der Profilverlauf der Teilchengeschwindigkeit mittels des Laufzeitverfahrens bestimmt worden. Die mittlere Luftgeschwindigkeit in der Rohrleitung beträgt $\bar{v}_f = 29$ m/s, die Feststoffbeladungszahl der Luft $\mu \approx 5$. Eine Simultanmessung von Teilchengeschwindigkeit, Teilchenkonzentration und Teilchengröße ist im Bild 21 dargestellt. Der Meßort befindet sich in der Vertikalstrecke eines pneumatischen Senkrechtförderers der Nennweite 100 mm. Mit Hilfe von Luft wird ein polydisperser Gries mit $d_p \leq 400 \mu\text{m}$ gefördert. Der Feingutanteil reichert sich in Rohrmitte an, die Beladung zeigt ein Wandprofil.

Bild 22 demonstriert den Einsatz der Fasermesstechnik bei der Untersuchung einer technischen Fluid-Feststoff-Strömung, die aus Futterhefe und einer organischen Flüssigkeit besteht. In einer Pilotanlage ist eine Lichtabsorptionssonde zur Filterüberwachung eingesetzt. Die Fasermesstechnik ermöglicht das sichere Erfassen von Filterdurchbrüchen und verhindert damit ökonomische Verluste. Im Bild werden die Filterdurchbrüche durch unterschiedliche Feststoffzugaben simuliert [26].

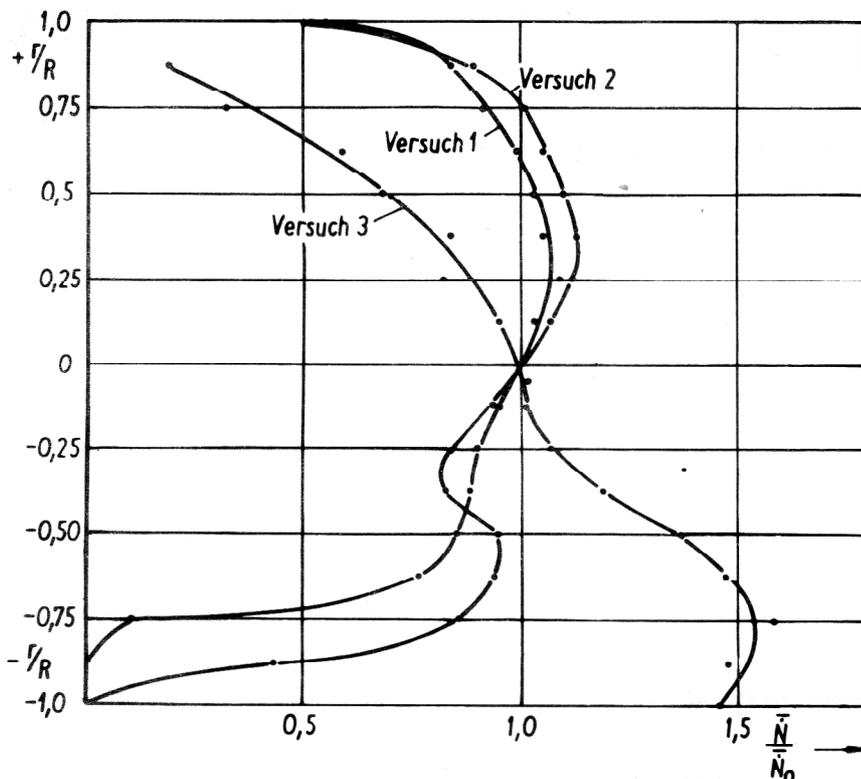


Bild 19
Profile der Teilchenimpulsrate in einer horizontalen pneumatischen Förderleitung $\text{NW } 80$
(Eiweißprodukt in Luft)
Versuch 1 und 2: Kernprofil
Versuch 3: Wandprofil

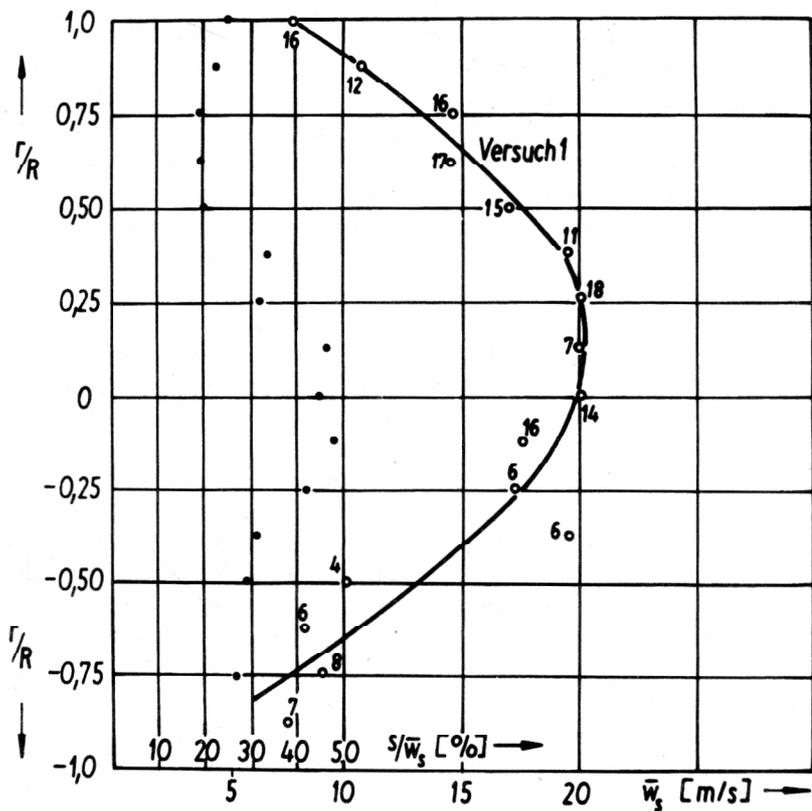


Bild 20
 Profil der mittleren Teilchengeschwindigkeit in einer horizontalen pneumatischen Förderleitung NW 80, Laufzeitmessung, oszillografische Auswertung

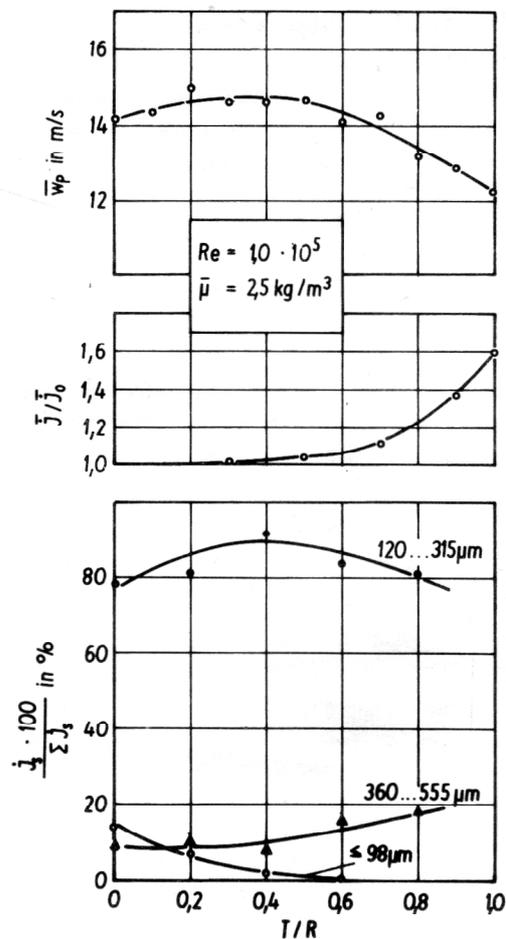


Bild 21
 Simultanmessung von Teilchenimpulsrate, Teilchengeschwindigkeit und Teilchengrößenklassen in einer senkrechten pneumatischen Förderleitung NW 100 (Grieß)

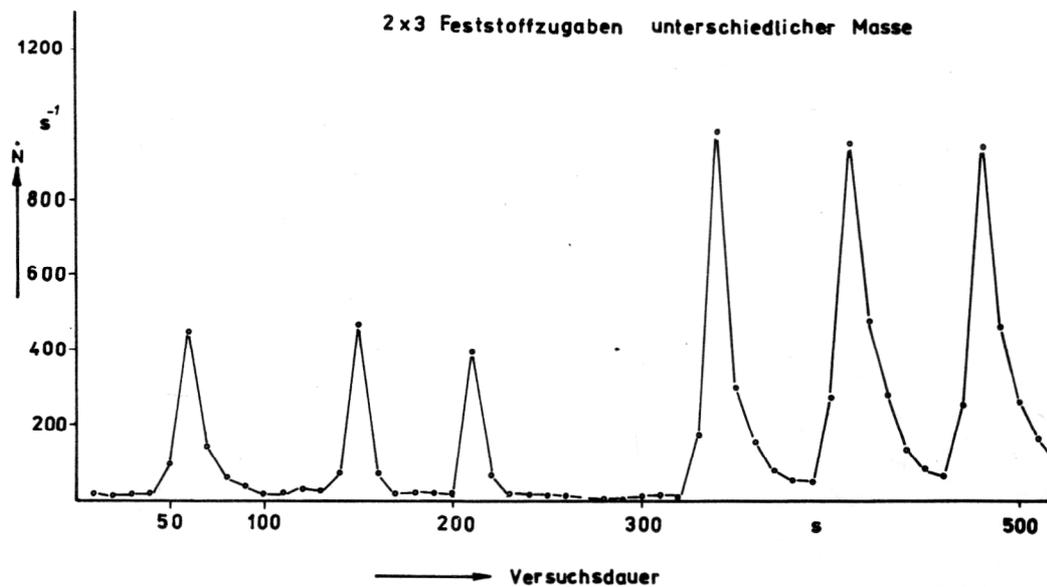


Bild 22
 Zugabe von 2 unterschiedlich großen Feststoffproben je 3 mal hintereinander in die Rohrleitung einer Pilotanlage (Futterhefe in organischer Flüssigkeit)

LITERATUR

- [1] Lingener, A., Wahl, F.: Einsatz von Klein- und Prozeßrechnern bei der experimentellen Untersuchung stochastischer Schwingungen und von mechanischen Systemen. Technische Mechanik 1 (1980) 1, S. 21 – 26.
- [2] Wernicke, G., Osten, W.: Holografische Interferometrie. Leipzig: VEB Fachbuchverlag 1982.
- [3] Blüml, P., Hosp, E., Ritter, R., Simon, B.: Optische Verfahren in der experimentellen Spannungsanalyse. Düsseldorf: VDI-Berichte 439, 1982, S. 97 – 121.
- [4] Kießling, J.: Zur Kombination von holografischer und Speckle-Interferometrie in der experimentellen Festkörpermechanik. Techn. Mechanik 4 (1983) 2, S. 75 – 80.
- [5] Lenk, H.: Grundlagen und Anwendungen der Speckle-technik. Bild und Ton 33 (1980) 4, S. 114 – 118 und 5, S. 133 – 138.
- [6] Hesse, J., Sohler, W.: Faseroptische Sensoren. Elektronik (1982) 12, S. 89 – 92.
- [7] Lemme, H.: Lichtleiter als Sensoren. Elektronik (1981) 19, S. 16.
- [8] Laermann, K. H.: Über das Prinzip der hybriden Technik in der experimentellen Spannungsanalyse. messen + prüfen/automatik (1983) 4, S. 184 – 190.
- [9] Laermann, K. H.: Hybrid Analysis of plate Problems. Exp. Mech. 21 (1981) 10, S. 386 – 388.
- [10] Thamm, F.: Hybride Methoden der Spannungs- und Verformungsanalyse. 3. Frühjahrsschule Experimentelle Methoden der Festkörpermechanik. Berlin: AdW Report R-07/80 1980, S. 66 – 77.
- [11] Stockmann, M.: Experimentelle und numerische Festigkeitsanalyse hochbelasteter Gehäuseschraubenverbindungen. Diss. TH Karl-Marx-Stadt 1984.
- [12] Reher, E.-O., Kärmer, R., Lipp, R.: Zur Modellierung und experimentellen Untersuchung von Dehnströmungsprozessen am Beispiel von hochpolymeren Lösungen. Rheologie Acta 21 (1982) 4/5, S. 641 – 643.
- [13] Heymann, J., Naumann, J., Ullmann, K.: Experimentelle Spannungsanalyse hochbeanspruchter Maschinenbauteile. Techn. Mechanik 2 (1981) 1, S. 19 – 26.
- [14] Heymann, J., Meyer, R.: Variantenuntersuchungen von Pressengestellen mittels Spannungsoptik und Moiréverfahren. Techn. Mechanik 3 (1982) 4, S. 36 – 40.
- [15] Vogcl, J.: Studie „Anwendung der Specklemeßtechnik, insbesondere der Specklefotografie im Maschinenbau“ (unveröff.). Techn. Hochschule Karl-Marx-Stadt, Sektion Maschinen-Bauelemente 1983, 92 S.
- [16] Schmidt, G.: Die schnelle Fouriertransformation – ein Rechenprogramm für den Kleinrechner ROBOTRON 4200. Wiss. Techn. Hochsch. Magdeburg 22 (1977) 1, S. 77 – 80.
- [17] The Discrete Fourier-Transform and FET Analysers. Technical Review Nr. 1 – 1979. Firmenschrift der Firma Brüel & Kjaer Dänemark.
- [18] Schmidt, G.: Das Programmsystem ASAM zur Spektralanalyse analoger Meßsignale für den PRS 4000. Wiss. Techn. Hochsch. Magdeburg 26 (1982) 6, S. 105 – 108.
- [19] Wahl, F.: Ein effektives Verfahren zur experimentellen Ermittlung von Systemkennfunktionen mit Hilfe von Pseudozufallssignalen. Techn. Mechanik 3 (1982) 1. S. 11 – 17.
- [20] Lingener, A.: Untersuchung mechanischer Systeme mit Hilfe von Pseudozufallsereignissen. Maschinenbautechnik 31 (1982) 5, S. 213 – 217.
- [21] Molerus, O.: Fluid-Feststoff-Strömungen. Berlin/Heidelberg/New York: Springer-Verlag 1982.
- [22] Petrak, D., Hoffmann, A.: Meßmethoden zur quantitativen Erfassung von Mehrphasenströmungen. Freiburger Forschungsheft A 608. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1980.
- [23] Hoffmann, A., Petrak, D.: Neuere Meßergebnisse und theoretische Betrachtungen zur feststoffbeladenen Gasströmung in vertikalen Rohrleitungen. Freiburger Forschungsheft A 661. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1983.
- [24] Hoffmann, A., Petrak, D.: In-stream-Messung der Teilchengrößen in Mehrphasenströmungen hoher Geschwindigkeit. Chem. Techn. (1983) 2, S. 98 – 101.
- [25] Hoffmann, A., Petrak, D.: Aussagen zur Genauigkeit faseroptischer Meßtechnik in der Granulometrie und Strömungsmechanik. Chem. Techn., im Druck.
- [26] Hoffmann, A.: Interner Forschungsbericht der Bergakademie Freiberg, Sektion Verfahrenstechnik und Silikatechnik, Bereich Mechanische Verfahrenstechnik und Aufbereitungstechnik. 1980, 4 S.

Anschrift der Verfasser:

Prof. Dr.-Ing. habil. Joachim Heymann
Technische Hochschule Karl-Marx-Stadt
Sektion Maschinen-Bauelemente
DDR – 9010 Karl-Marx-Stadt, PSF 964

Prof. Dr. sc. techn. Adolf Lingener
Technische Hochschule „Otto von Guericke“
Sektion Maschinenbau
DDR – 3010 Magdeburg, PSF 124

Dr. sc. Dieter Petrak
Akademie der Wissenschaften der DDR
Institut für Mechanik
DDR – 9010 Karl-Marx-Stadt, PSF 408