

Einsatz von Klein- und Prozeßrechnern bei der experimentellen Untersuchung stochastischer Schwingungen und von mechanischen Systemen

Adolf Lingener, Friedrich Wahl

Die experimentelle Forschung auf dem Gebiet der Festkörpermechanik befaßt sich überwiegend mit der Entwicklung und Anwendung von Methoden zur Analyse des Verhaltens oder der Struktur mechanischer Systeme. Dabei stützen sich die experimentellen Verfahren außer auf bewährte sozusagen klassische Grundlagen zunehmend auf theoretisch bekannte Zusammenhänge anderer Wissenschaftsdisziplinen, die vor allem mit Hilfe rechen technischer Hilfsmittel für die unmittelbare praktische Anwendung mit dem Ziel der Gewinnung von Informationen über ein reales System erschlossen werden.

Von diesem Aspekt der experimentellen Mechanik-Forschung ausgehend wird der erreichte Stand auf den beiden Teilgebieten Analyse stochastischer Signale und Systemanalyse bei stochastischer Erregung dargestellt. Dabei wird ausschließlich auf digitale Verfahren Bezug genommen.

1. Aufgaben und Lösungswege bei der Analyse stochastischer Schwingungen

Die Untersuchung von technischen Systemen, die stochastischen Belastungen ausgesetzt sind, erlangt zunehmende Bedeutung, vor allem unter den Aspekten einer material-ökonomischen Dimensionierung und der Sicherheit und Zuverlässigkeit. Eine umfassende Aussage erfor-

dert Kenntnisse über den Charakter von Erregung und Systemverhalten, über Struktur und Parameter des Systems und über das Schädigungsverhalten. Der vorliegende Bericht beschränkt sich auf die Untersuchung von Ein- und Ausgangssignalen an mechanischen Systemen und auf die Untersuchung der Parameter der Systeme selbst. Gestützt auf weitgehend klassische Meßverfahren erfolgen solche Untersuchungen heute überwiegend auf digitalem Wege, und zwar entweder mit Hilfe festprogrammierter Kleinrechner, deren Bedienung nur geringe EDV-Kenntnisse voraussetzt, oder auf frei-programmierbaren Rechnern unter Verwendung spezieller Analyseprogramme. Der Nachteil dieser letzten Variante, daß ein relativ hoher Programmieraufwand erforderlich ist und ein entsprechender Rechner zur Verfügung stehen muß, wird durch die Vorteile, die in der praktisch beliebigen Erweiterungsfähigkeit eines einmal entwickelten Programmsystems und dessen breiter Nachnutzungsmöglichkeit sowie der Möglichkeit auch anderweitiger Nutzung des Rechners bestehen, bei weitem aufgewogen. Ein auf dieser Basis [1] entwickeltes Meßlabor, das über Kabel mit dem Rechenzentrum verbunden ist, zeigt Bild 1. Die Meßwertaufnahme bzw. das Überspielen der Analogwerte vom Magnetband, die Bedienung des Rechners und die Darstellung der Ergebnisse erfolgen vom Labor aus. Die erforderlichen Programme werden vor Beginn des Meßwerteinlesens entweder über Magnetband eingegeben oder vom externen Plattenspeicher des PRS 4000 abgerufen.

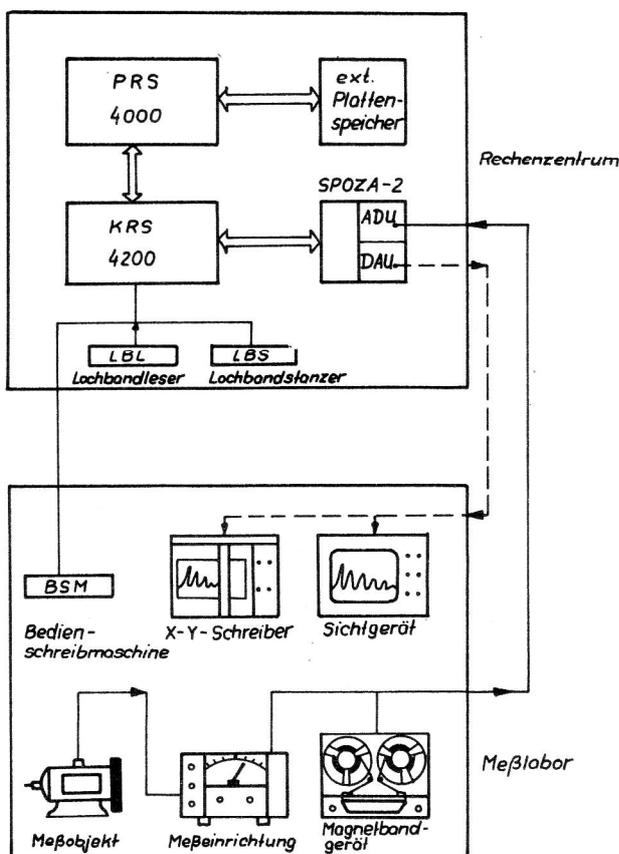


Bild 1
Schematische Darstellung der Verbindung Meßlabor – Rechenzentrum

2. Einsatz von Klein- und Prozeßrechnern bei der Lösung spezieller Aufgaben der Festkörpermechanik

Eine sinnvoll abgestimmte Programmentwicklung für die in Bild 1 dargestellte Hardware-Konfiguration ermöglicht prinzipiell die Lösung aller anfallenden Aufgaben der Signalanalyse aus dem Bereich der Festkörpermechanik, wenn dabei die üblicherweise zu stellenden Randbedingungen berücksichtigt werden.

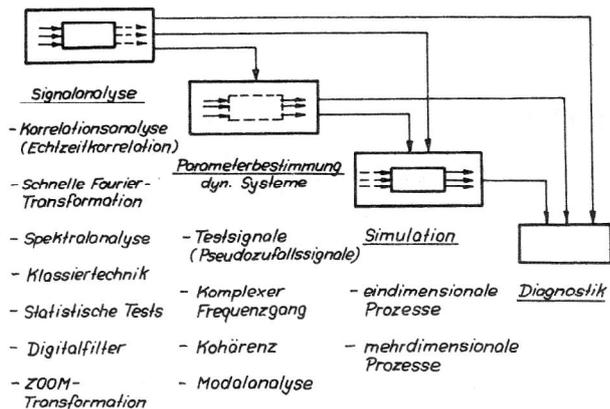


Bild 2
Anwendungsgebiete und Programme der Analyse stochastischer Schwingungen

Unter diesen Bedingungen erhält man Ergebnisse, deren Fehler anhand vorliegender Kriterien abgeschätzt werden können [2].

Ausgehend von den Anforderungen industrieller Nutzer und den abgestimmten Forschungsaufgaben im Rahmen der Hauptforschungsrichtung Festkörpermechanik liegen bisher Analyseprogramme auf einer Reihe von Teilgebieten vor bzw. befinden sich in Bearbeitung. Sie sollen im folgenden kurz vorgestellt werden. Eine Zusammenfassung in Form eines Schemas befindet sich im Bild 2. Dabei symbolisieren gestrichelte Pfeile oder Kästen die jeweils gesuchten Signale oder Systemparameter. Die Anordnung im Schema entspricht etwa der Reihenfolge der Erarbeitung der Programme. Die Teilprogramme sind vorwiegend in der Sprache SYPS 4200 geschrieben. Ihr Aufruf und die Abarbeitung ist über FORTRAN-Programme möglich.

2.1. Programme zur Signalanalyse

Die Technik der Signalanalyse wurde durch die Entwicklung von Klein- und Mikrorechnern ganz entscheidend beeinflusst. Während früher die digitalen Verfahren immer an größere Rechenzentren gebunden waren, ist es nun möglich geworden, die Analyse vom Rechenzentrum weg in das Labor bzw. an den Meßort zu verlegen. Dadurch ist der den digitalen Verfahren noch anhaftende Nachteil des zeitaufwendigen Umwegs über ein Rechenzentrum ohne Möglichkeit der direkten Beeinflussung endgültig überwunden.

Der experimentell arbeitende Ingenieur, der mit der technischen Problemstellung vertraut ist, kann nun jederzeit in den Prozeß der Signalanalyse eingreifen bzw. die Signalanalyse direkt in das Experiment integrieren. Ein solches Vorgehen ist bei digitalen Verfahren unerlässlich, da die volle Leistungsfähigkeit dieser Methoden oft erst nach mehrmaligen Voruntersuchungen zur Ermittlung der optimalen Parameter (Bandbreite, Samplingfrequenz, Frequenzinhalt, Meßdauer usw.) erreicht wird.

Aus diesem Grund wurde an der TH Magdeburg bei der Entwicklung leistungsfähiger Analyseprogramme auf die Nutzung verfügbarer Kleinrechner (KRS 4200) orientiert.

Dabei mußte allerdings ein z. T. erheblicher Programmieraufwand in Kauf genommen werden, da die Programme zur vollen Nutzung der Rechengeschwindigkeit und des verfügbaren Speicherplatzes in Assemblersprache geschrieben werden mußten, wobei die Rechenoperationen vorwiegend im Festkommaformat ablaufen.

Zu den Grundbausteinen der Analyseprogramme für den Kleinrechner KRS 4200 gehören:

- Echtzeitkorrelation
- Klassierung (alle Arten) bei beliebiger Klassenzahl
- schnelle Fouriertransformation (FFT)
- Auto- und Kreuzleistungsdichte
- Auto- und Kreuzkorrelation über FFT
- Kohärenzfunktionen

Die beiden erstgenannten Bausteine sind Teile eines Echtzeitsystems, das die on-line-Analyse von Signalen erlaubt. Mit Hilfe der Echtzeitkorrelation ist es möglich, die Brauchbarkeit eines Experimentes über einen längeren Zeitraum visuell einzuschätzen und Vorinformationen über gewisse statistische Kenngrößen zu gewinnen (Signal-Rausch-Verhältnis, Stationarität).

Über Leistungen und Anwendungen des entwickelten Systems ist in [3] berichtet worden.

Die folgenden Bausteine zur Spektral- und Korrelationsanalyse basieren auf dem Algorithmus der schnellen Fouriertransformation (FFT), der den besonderen Bedingungen des Rechners KRS 4200 angepaßt wurde [4]. Mit den aus diesen Bausteinen aufgebauten Programmen ist eine on-line-Analyse nicht vorgesehen. Hier ist ein Abspeichern der digitalisierten Meßwerte vor der Analyse erforderlich, wobei für größere Datenmengen oder für mehrkanalige Analysen (maximal 8 Kanäle) eine Magnetbandeinheit zur Zwischenspeicherung von Meßwerten oder Ergebnissen genutzt wird.

Im Ergebnis der Signalanalyse ist es möglich, die interessierenden Kennfunktionen errechnen und über die Peripherie des Rechners (Sichtgerät, x-y-Schreiber, Mosaikdrucker) ausgeben zu lassen.

Im Bild 3 ist das Ergebnis der Analyse eines realen stochastischen Prozesses dargestellt.

Ein Signalausschnitt und die wichtigsten Kennfunktionen im Zeit-, Amplituden- und Frequenzbereich wurden so aufgetragen, daß eine anschauliche Interpretation der Ergebnisse möglich ist. Die Berechnung der Kennfunktionen sowie das Auszeichnen mit Hilfe eines x-y-Schreibers erfolgen hier vollkommen automatisch.

Für einige spezielle Analyseprogramme, wie Digitalfilterung und bandselektive Fouriertransformation (sog. ZOOM-Transformation) reichen die Möglichkeiten des Kleinrechners KRS 4200 nicht aus. Zur Bearbeitung derartiger Problemstellungen ist man auf die Nutzung einer größeren Anlage, etwa in der Art gemäß Bild 1, angewiesen.

2.2. Systemanalyse

Die Systemanalyse verfolgt das Ziel, ein mechanisches System durch ein Berechnungsmodell zu beschreiben und dessen Parameter zu bestimmen. Für ein experimentelles Herangehen ist dabei immer die Erregung des Systems mit einem bekannten Signal (oder mehreren)

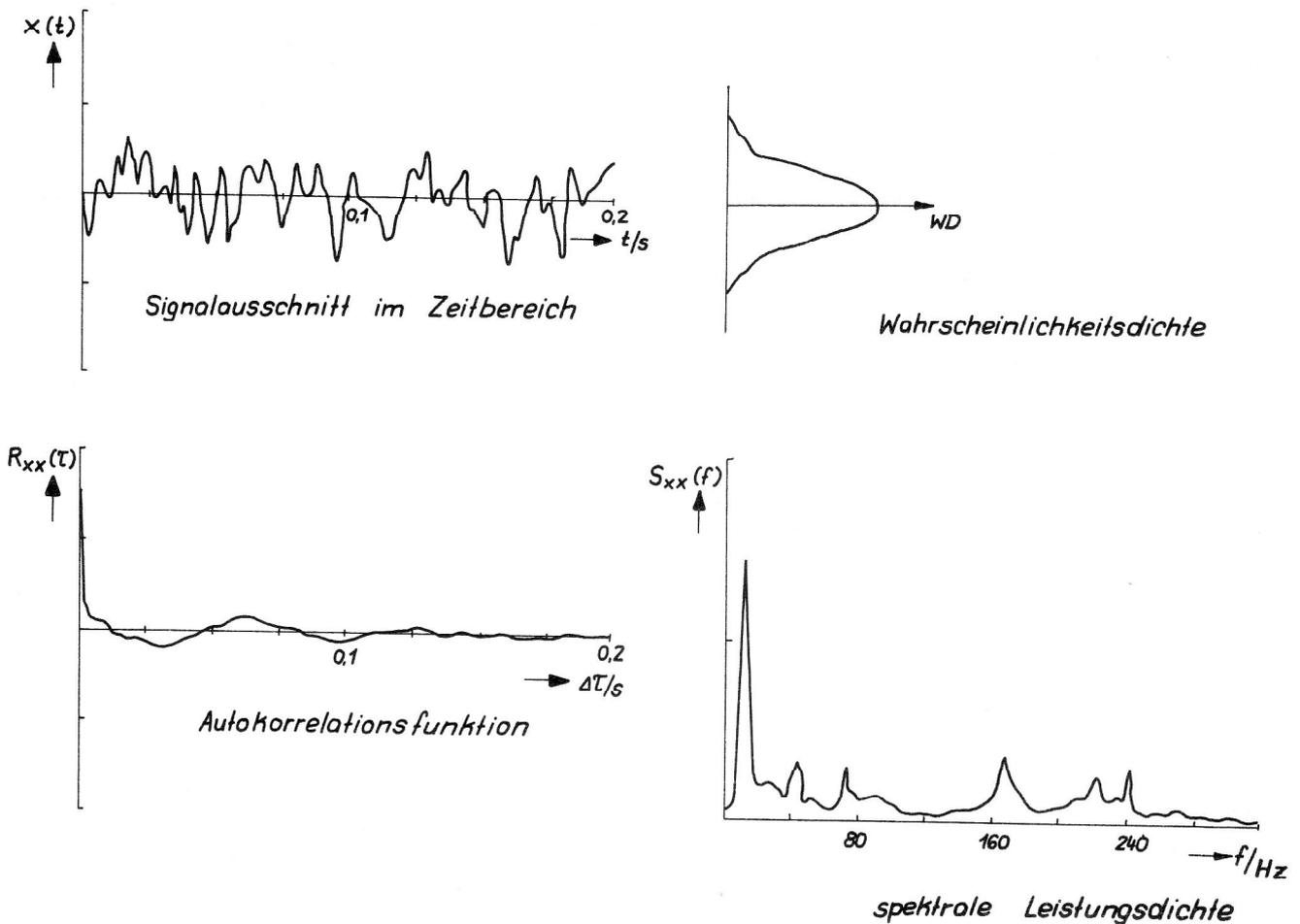


Bild 3
Kennfunktionen eines stochastischen Prozesses
(Belastungen eines Baufahrzeuges)

und die Messung eines Ausgangs (oder mehrerer) notwendig. Die Systemtheorie liefert die Zusammenhänge zwischen den jeweils interessierenden Signal- und Systemkennfunktionen. Letztere bilden den Ausgangspunkt für eine Parameterbestimmung. Dieses an sich bekannte Vorgehen wird mit stochastischen Signalen realisiert. Dabei hat sich die Bestimmung der Systemkennfunktionen im Frequenzbereich auf der Basis von Kreuzleistungsdichtespektren als vorteilhaft erwiesen.

Wegen der prinzipiellen Einfachheit von Systemen mit einem Freiheitsgrad wurden diese zuerst untersucht. Die dabei beim Einsatz von Rauschgeneratoren zur Erzeugung des Erregersignals auftretenden erheblichen Probleme bei der Sicherung der Genauigkeit veranlaßten den Einsatz von Pseudozufallssignalen mit vorgegebenem Spektrum [5].

Eine Konfiguration zur experimentellen Ermittlung komplexer Frequenzgänge mechanischer Systeme mit Hilfe von Zufallssignalen, wie sie an der TH Magdeburg eingesetzt wird, ist im Bild 4 dargestellt.

Die im Rechner erzeugten Zufallssignale werden über einen Digital-Analog-Umsetzer (DAU) dem System zugeführt. Gleichzeitig werden die Systemein- und -ausgänge gemessen, in einem Analog-Digital-Umsetzer (ADU) digitalisiert und im Rechner abgespeichert.

Über den FFT-Algorithmus werden anschließend die interessierenden Kennfunktionen (Leistungsspektren, komplexer Frequenzgang, Kohärenzfunktion) ermittelt. Mit der im Bild 4 dargestellten Anlage wurden eingehende experimentelle Untersuchungen an mechanischen Systemen und an Analogrechner-Modellen durchgeführt. Dabei wurden besonders auch solche Einflüsse wie äußere Störungen und nichtlineares Systemverhalten in die experimentellen Untersuchungen einbezogen. Die Ergebnisse haben gezeigt, daß diese Methoden hinsichtlich Geschwindigkeit und Genauigkeit den klassischen Analogverfahren überlegen sind.

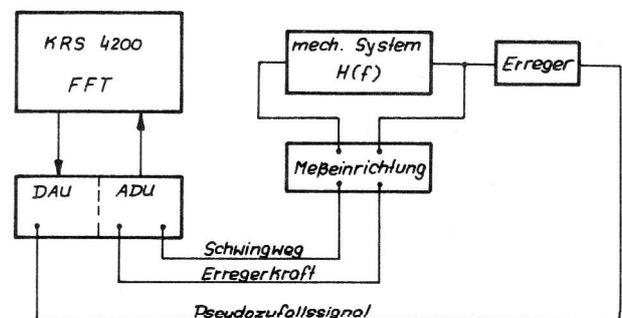


Bild 4
Funktionsprinzip der experimentellen Ermittlung von Frequenzgängen mit Pseudozufallssignalen

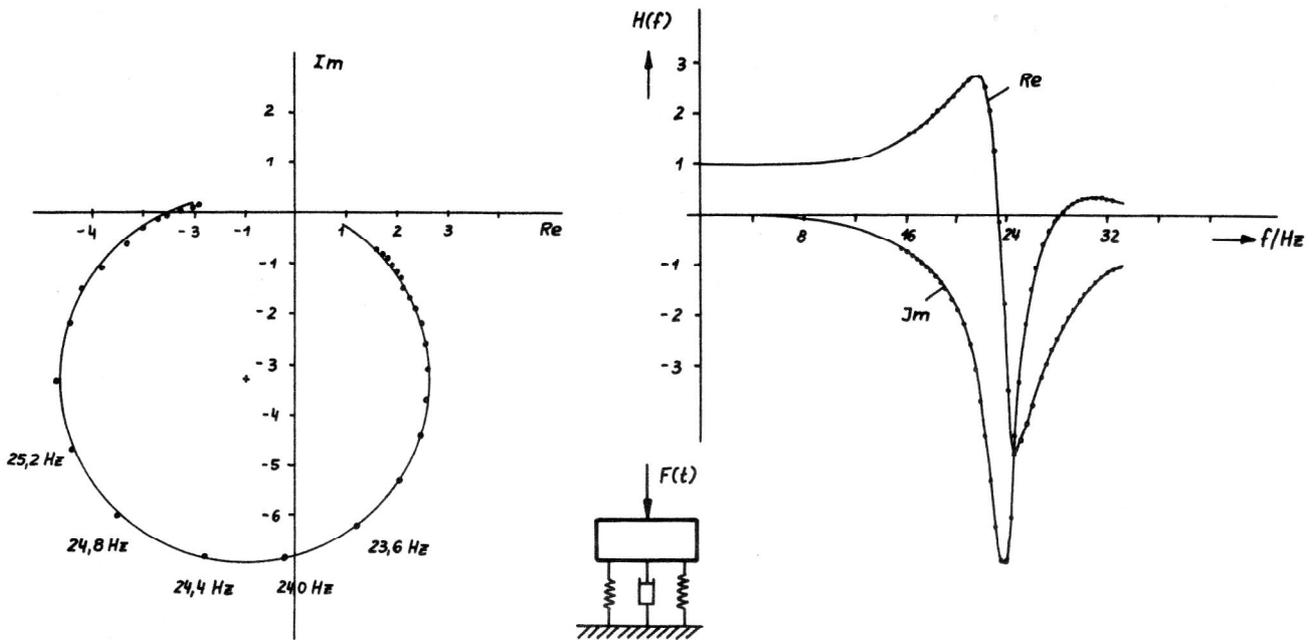


Bild 5
Experimentell ermittelter Frequenzgang eines mechanischen Systems

Bild 5 zeigt den komplexen Frequenzgang eines mechanischen Systems, das mit Pseudozufallssignalen erregt wurde. Die Zuführung der Erregersignale und die Rückführung der Meßsignale erfolgte über die im Bild 1 dargestellte Kabelverbindung zwischen Meßlabor und Rechenzentrum. Die Ergebnisse lassen die hohe Genauigkeit dieser Methode erkennen, wobei die Gesamtzeit für die Analyse (Hin- und Rückspiel der Signale und Berechnung von 512 Punkten des Frequenzgangs) etwa 20 Sekunden betrug.

Die Bestimmung der Systemparameter aus experimentell ermittelten Frequenzgängen ist bei linearen Systemen mit einem Freiheitsgrad leicht möglich, besonders dann, wenn die Ergebnisse der Messung sehr genau sind. Bei Modellen mit mehreren Freiheitsgraden steigt der Aufwand zur Bestimmung der Systemparameter erheblich an; die Lösung dieser Problemstellung ist nicht nur vom theoretischen Standpunkt aus, sondern auch von der rechen-technischen Realisierung her gesehen, außerordentlich kompliziert.

Ein effektives Verfahren, das in neuerer Zeit zunehmend an Bedeutung gewinnt, ist die sogenannte Modalanalyse. Die theoretische Begründung dieses Verfahrens ist seit langem bekannt [6], die praktische Realisierung wurde jedoch erst mit der Entwicklung leistungsfähiger Prozessrechner und entsprechender Algorithmen möglich.

Der Grundgedanke dieses Verfahrens soll am Beispiel eines linearen Schwingers mit n Freiheitsgraden erläutert werden: Das zugrundeliegende Differentialgleichungssystem der Bewegung dieses Systems lautet:

$$\mathbf{M}\mathbf{x}(t) + \mathbf{D}\mathbf{x}(t) + \mathbf{C}\mathbf{x}(t) = \mathbf{y}(t) \quad (1)$$

Es bedeuten: $\mathbf{x}(t)$ Verschiebungsvektor
 $\mathbf{y}(t)$ Vektor der eingepprägten Kräfte

- M** Massenmatrix ($n \times n$)
- D** Dämpfungsmatrix ($n \times n$)
- C** Steifigkeitsmatrix ($n \times n$)

Das Ziel der experimentellen Modalanalyse ist es, aus gemessenen Frequenzgängen die Übertragungsfunktion des Systems zu berechnen und daraus die Koeffizienten der Matrizen **M**, **D** und **C** abzuleiten. Entscheidend dabei ist, daß nicht die gesamte Übertragungsfunktion ermittelt wird, sondern nur diejenigen Anteile, die innerhalb eines bestimmten Frequenzbereiches dominieren. Zur Erläuterung dieses Grundgedankens ist es zweckmäßig, die Laplace-Transformierte von Gl. (1) zu betrachten:

$$\mathbf{G}(s) \cdot \mathbf{X}(s) = \mathbf{Y}(s) \quad (2)$$

mit $\mathbf{G}(s) = \mathbf{M}s^2 + \mathbf{D}s + \mathbf{C}$ Systemmatrix
 $\mathbf{X}(s)$ Laplace-Transformierte des Verschiebungsvektors
 $\mathbf{Y}(s)$ Laplace-Transformierte des Kraftvektors

Aus Gl. (2) ergibt sich der Verschiebungsvektor zu

$$\mathbf{X}(s) = \mathbf{H}(s) \cdot \mathbf{Y}(s), \quad (3)$$

wobei $\mathbf{H}(s)$ die Übertragungsfunktion des Systems darstellt, die formal definiert ist als Inverse der Systemmatrix $\mathbf{G}(s)$.

Es läßt sich zeigen, daß (unter der Voraussetzung einfacher Polstellen) sich $\mathbf{H}(s)$ stets in der Form

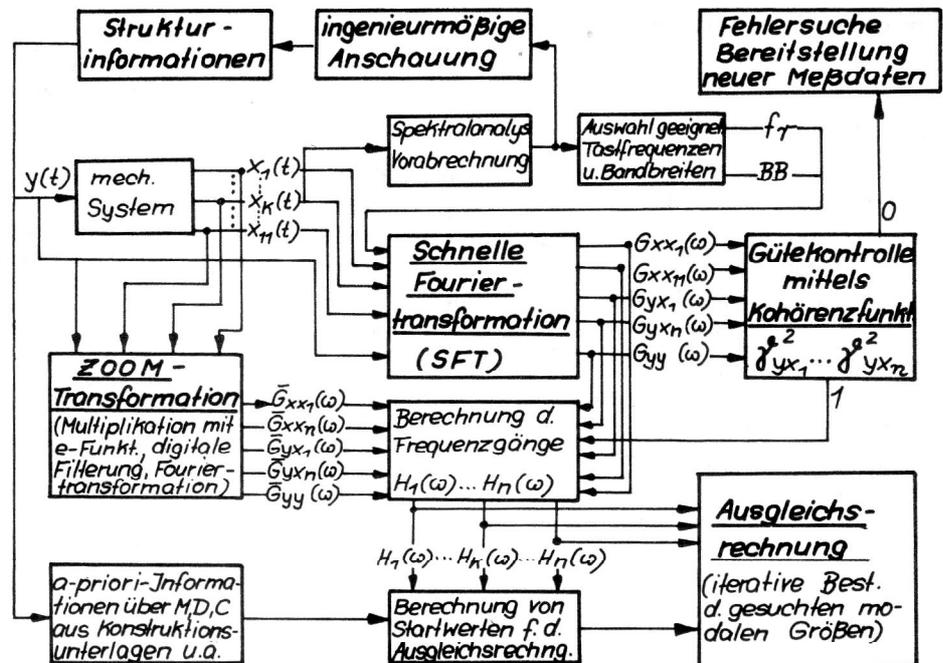
$$\mathbf{H}(s) = \sum_{k=1}^{2n} \frac{1}{s - p_k} \mathbf{R}_k \quad (4)$$

darstellen läßt, mit

p_k k -ter Pol der Systemmatrix

\mathbf{R}_k die dem Pol p_k zugeordnete Residuenmatrix

Bild 6
Blockdiagramm zur Modalanalyse
mit dem Prozeßrechner PRS 4000



Gleichung (4) entspricht einer Entkopplung des ursprünglichen Systems (1) und stellt die Grundgleichung für die experimentelle Modalanalyse dar. Die Matrix $H(s)$ läßt sich eindeutig bestimmen, wenn man eine Zeile oder eine Spalte der Matrix $H(\omega)$ durch Messungen ermittelt hat. Es lassen sich dann prinzipiell alle Polstellen (Eigenfrequenzen und modalen Dämpfungen) und die Matrizen R_k , deren Spaltenvektoren die Eigenschwingungsformen darstellen, bestimmen. Aus den modalen Größen lassen sich dann die Elemente der Matrizen M , D und C errechnen.

Der große Vorteil der modalen Betrachtungsweise gemäß Gl. (4) liegt darin, daß sie es ermöglicht, ein System innerhalb eines interessierenden Frequenzbereiches zu untersuchen, wodurch sich die Anzahl der unbekannt Parameter und damit die Anzahl der erforderlichen Messungen entscheidend verringert.

Bei Systemen mit weit auseinanderliegenden Eigenfrequenzen bringt die Bestimmung von $H(s)$ aus gemessenen Frequenzgängen keine prinzipiellen Schwierigkeiten. Bei Systemen mit dicht benachbarten Eigenfrequenzen ist jedoch ein außerordentlich großer Rechenaufwand erforderlich, da die modalen Parameter durch Ausgleichsrechnungen iterativ bestimmt werden müssen.

Eine entscheidende Voraussetzung für die Konvergenz dieses Iterationsprozesses ist die Kenntnis möglichst guter Startwerte, die andererseits aber nur bestimmt werden können, wenn die Frequenzgänge mit hoher Auflösung gemessen werden können. Hiermit sind dem Verfahren der Modalanalyse durch den gewöhnlichen FFT-Algorithmus Grenzen gesetzt, da die Auflösung mit diesem Algorithmus praktisch nicht beliebig verfeinert werden kann.

Eine Lösung bietet hier die bandselektive Fourieranalyse (sog. ZOOM-Transformation), die es ermöglicht, einen vorgegebenen Frequenzbereich mit hoher Auflösung auf-

zuspreizen. In Verbindung mit der Modalanalyse ergibt sich damit die Möglichkeit, die Parameter eines komplizierten Schwingungssystems zu ermitteln, indem nacheinander die modalen Parameter der entkoppelten Systeme bestimmt werden.

Im Bild 6 ist der schematische Ablauf des für den Prozeßrechner PRS 4000 erarbeiteten Prinzips der Modalanalyse dargestellt, wobei besonders die Bedingungen bei der Anwendung stochastischer Erregersignale berücksichtigt wurden.

2.3. Simulation stochastischer Erregungen

Die Simulation stochastischer Signale gewinnt bei der experimentellen Forschung, besonders im Rahmen von Betriebsfestigkeitsuntersuchungen, zunehmend an Bedeutung. Rauschgeneratoren, in Verbindung mit entsprechenden Filterbänken, ermöglichen prinzipiell das Erzeugen von Zufallssignalen mit vorgegebener spektraler Leistungsdichte. Die mit diesem Verfahren verbundenen Nachteile (nichtkonstante statistische Kennwerte, großer Aufwand bei der Regelung der spektralen Leistungsdichte) haben jedoch dazu geführt, daß Zufallssignale stochastischer Prozesse z. Zt. überwiegend digital erzeugt werden.

Der Vorteil des digitalen Verfahrens besteht darin, daß die erzeugten Signale definierte statistische Kennwerte besitzen und jederzeit reproduzierbar sind.

Von mehreren eingeschlagenen Wegen zur Erzeugung eindimensionaler Prozesse hat sich der bewährt, bei dem punktweise vorgegebenen Werten eines Spektrums zufällige Phasenwinkel zugeordnet werden und anschließend die Fourier-Rücktransformation in den Zeitbereich vorgenommen wird.

Dieses Grundprinzip, das bereits erfolgreich zur Erzeugung von Erregersignalen bei der Untersuchung dynamischer Systeme angewendet wurde (Abschnitt 2.2.), wird gegenwärtig erweitert zur Simulation mehrdimensionaler Prozesse, die z. B. von Beileitung sind bei der experi-

mentellen Betriebsfestigkeitsuntersuchung an Fahrzeugen und Landmaschinen.

2.4. Anwendungen

Die entwickelten Programme haben bereits vielfältige Anwendungen sowohl in der Durchführung von Signalanalysen auf dem an der TH Magdeburg vorhandenen System gemäß Bild 1 als auch durch eine Reihe von Nachnutzungen bei Institutionen gefunden, die mit gleicher oder ähnlicher Technik ausgestattet sind. Ein Teil der Ergebnisse wird sich in einem Spektrenkatalog niederschlagen, der zusammen mit den ingenieurtechnischen Grundlagen der Analyse stochastischer Schwingungen eine Sammlung typischer Auswerteergebnisse und Hinweise zu ihrer Interpretation enthalten wird.

3. Weitere Aufgaben

Die vorgestellte Konfiguration Rechner-Meßlabor und die dafür entwickelten Programme erfordern und erlauben eine ständige Weiterentwicklung. In der Möglichkeit der weiteren Entwicklung liegt der Vorteil dieses Systems der Meßdatenverarbeitung. Die weitere Arbeit zielt ab auf die Erhöhung der Nutzerfreundlichkeit aus der Sicht des im rechnergestützten Meßlabor arbeitenden Ingenieurs durch vereinfachte und zugleich umfassende Softwarebereitstellung im Rahmen eines an der TH Magdeburg konzipierten Mehrrechnersystems und auf die Entwicklung und Integration weiterer Bausteine in das vorhandene Programmsystem. Die konkreten Aufgaben werden aus den volkswirtschaftlichen Erfordernissen abgeleitet.

LITERATUR

- [1] Lingener, A.: Tagungsberichte Festkörpermechanik 1979, Band C, Beitrag L.I. VEB Fachbuchverlag Leipzig 1979.
- [2] Schmidt, G.: Ebenda, Beitrag L.III.
- [3] Wahl, F.: Erfahrungen über den Einsatz des Hybridrechnersystems HRA 4241 bei der Korrelationsanalyse stochastischer Schwingungen. Tagungsberichte „Stochastische Schwingungen und Zuverlässigkeit“ Berlin 1977.
- [4] Schmidt, G.: Die schnelle Fouriertransformation – ein Rechenprogramm für den Kleinrechner ROBOTRON 4200. Wiss. Z. Techn. Hochsch. Magdeburg 22 (1978), S. 77 – 80.
- [5] Lücke, J., Wahl, F.: Tagungsberichte Festkörpermechanik 1979, Band C, Beitrag L.II. VEB Fachbuchverlag Leipzig 1979.
- [6] Hyrty, W.C., Rubinstein, M.F.: Dynamics of Structures, Prentice – Hall, Inc., 1964.

Anschrift der Verfasser:

Prof. Dr. sc. techn. Adolf Lingener,
Dr.-Ing. Friedrich Wahl,
Technische Hochschule Otto von
Guericke, Sektion Maschinenbau,
301 Magdeburg, Bierutplatz 5