

ISSN 0073-8433

# PUBLIKATIONEN ZU WISSENSCHAFTLICHEN FILMEN

SEKTION  
TECHNISCHE WISSENSCHAFTEN  
NATURWISSENSCHAFTEN

SERIE 5 · NUMMER 9 · 1979

FILM C 1288

Untersuchung des Schwingungsverhaltens  
von Werkzeugmaschinen  
Rechnerunterstützte Modalanalyse



INSTITUT FÜR DEN WISSENSCHAFTLICHEN FILM · GÖTTINGEN

*Angaben zum Film:*

Tonfilm (Komm., deutsch), 16 mm, farbig, 133 m, 12<sup>1</sup>/<sub>2</sub> min (24 B/s). Hergestellt 1977, veröffentlicht 1978.

Der Film ist für die Verwendung im Hochschulunterricht bestimmt.

Veröffentlichung aus dem Laboratorium für Werkzeugmaschinen und Betriebslehre der Technischen Hochschule Aachen, Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen, Prof. Dr.-Ing. M. WECK, Dipl.-Ing. E.-K. PRÖSSLER, und dem Institut für den Wissenschaftlichen Film, Göttingen, Dipl.-Ing. H. ADOLF; Kamera: J. WEISS; Schnitt: E. FISCHER.

*Zitierform:*

WECK, M., E.-K. PRÖSSLER und INST. WISS. FILM: Untersuchung des Schwingungsverhaltens von Werkzeugmaschinen – Rechnerunterstützte Modalanalyse. Film C 1288 des IWF, Göttingen 1978. Publikation von M. WECK und E.-K. PRÖSSLER, Publ. Wiss. Film., Sekt. Techn. Wiss./Naturw., Ser. 5, Nr. 9/C 1288 (1979), 7 S.

*Anschrift der Verfasser der Publikation:*

Dipl.-Ing. E.-K. PRÖSSLER, Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen der RWTH Aachen, Seffent-Melaten, Sommerfeldstr. 33 b.

o. Prof. Dr.-Ing. M. WECK, Lehrstuhl für Werkzeugmaschinen der RWTH Aachen, Seffent-Melaten, Sommerfeldstr. 33 b, 5100 Aachen.

---

PUBLIKATIONEN ZU WISSENSCHAFTLICHEN FILMEN

Sektion BIOLOGIE

Sektion PSYCHOLOGIE · PÄDAGOGIK

Sektion ETHNOLOGIE

Sektion TECHNISCHE WISSENSCHAFTEN

Sektion MEDIZIN

NATURWISSENSCHAFTEN

Sektion GESCHICHTE · PUBLIZISTIK

Herausgeber: H.-K. GALLE · Schriftleitung: E. BETZ, I. SIMON

PUBLIKATIONEN ZU WISSENSCHAFTLICHEN FILMEN sind die schriftlichen Ergänzungen zu den Filmen des Instituts für den Wissenschaftlichen Film und der Encyclopaedia Cinematographica. Sie enthalten jeweils eine Einführung in das im Film behandelte Thema und die Begleitumstände des Films sowie eine genaue Beschreibung des Filminhalts. Film und Publikation zusammen stellen die wissenschaftliche Veröffentlichung dar.

PUBLIKATIONEN ZU WISSENSCHAFTLICHEN FILMEN werden in deutscher, englischer oder französischer Sprache herausgegeben. Sie erscheinen als Einzelhefte, die in den fachlichen Sektionen zu Serien zusammengefaßt und im Abonnement bezogen werden können. Jede Serie besteht aus mehreren Lieferungen.

Bestellungen und Anfragen an: Institut für den Wissenschaftlichen Film  
Nonnenstieg 72 · D-3400 Göttingen  
Tel. (05 51) 2 10 34

## FILME FÜR FORSCHUNG UND HOCHSCHULUNTERRICHT

MANFRED WECK, ERNST-KURT PRÖSSLER, Aachen und INSTITUT FÜR DEN WISSENSCHAFTLICHEN FILM, Göttingen:

Film C 1288

### **Untersuchung des Schwingungsverhaltens von Werkzeugmaschinen – Rechnerunterstützte Modalanalyse**

Verfasser der Publikation: MANFRED WECK und ERNST-KURT PRÖSSLER

#### *Inhalt des Films:*

**Untersuchung des Schwingungsverhaltens von Werkzeugmaschinen. Rechnerunterstützte Modalanalyse.** Am Beispiel einer Senkrechtdrehmaschine wird die Durchführung einer meßtechnischen Untersuchung zur Ermittlung des dynamischen Verhaltens einer Werkzeugmaschinenstruktur gezeigt. Der erste Filmteil behandelt die Messung der Resonanzfrequenzen und der dynamischen Nachgiebigkeiten an der Zerspanstelle. Im zweiten Teil werden die Vorgehensweise und die Ergebnisse bei der Ermittlung der Maschinenschwingungsformen unter Einsatz des Verfahrens der rechnerunterstützten Modalanalyse gezeigt. Hierbei wird besonders das auf einem Bildschirm sichtbar gemachte Schwingungsverhalten herausgestellt.

#### *Summary of the Film:*

**Investigation of the Vibrational Behaviour of Machine Tools. Computer Aided Modal Analysis.** A measuring procedure for analysing the dynamic behaviour of a machine tool structure is presented with the aid of an example of a vertical turning machine.

The first part of the film deals with the measurement of the resonance frequencies and the compliances at the cutting point. The procedure for measuring the mode shapes using the method of computer aided Modal Analysis and the results obtained are shown in the second part of the film.

Special emphasis is laid on the vibrating mode shapes displayed on CRT.

#### *Résumé du Film:*

**Etude des vibrations de machines-outils. Analyse modale s'appuyant sur une calculatrice.** La réalisation d'une étude se rapportant à la technique de mesure et visant à déterminer le comportement dynamique d'une structure de machine-outil, est montrée avec pour exemple un tour vertical. La première partie du film traite de la mesure des fréquences de résonance

et des phénomènes dynamiques d'élasticité au point d'usinage. Dans la deuxième partie sont montrés le mode opératoire et les résultats lors de la détermination des formes de vibration de la machine, effectuée en employant la méthode d'analyse modale qui s'appuie sur une calculatrice. Le comportement de vibration, visualisé sur un écran, est particulièrement souligné.

### Allgemeine Vorbemerkungen

Die Leistungsfähigkeit spanender Werkzeugmaschinen wird häufig dadurch begrenzt, daß plötzlich während des Zerspanungsvorganges sog. Ratterschwingungen auftreten (WECK u. TEIPEL [3]). Die Ursache hierfür ist eine Instabilität des Wirkungskreises Maschine – Schnittprozeß. Da die Aussagefähigkeit theoretischer Betrachtungen dieser komplizierten Zusammenhänge von der exakten Kenntnis der den Wirkungskreis beschreibenden Kenngrößen abhängt, diese jedoch quantitativ nur unzureichend bekannt sind, ist man heute noch weitgehend auf meßtechnische Untersuchungen angewiesen (TEIPEL [1], WECK u. PRÖSSLER [2]). Der Film soll dazu dienen, den heutigen Stand der Methoden und eingesetzten Hilfsmittel bei der meßtechnischen Ermittlung der dynamischen Eigenschaften von Maschinenstrukturen aufzuzeigen.

### Zur Entstehung des Films<sup>1</sup>

Der Film faßt in wenigen Minuten eine meßtechnische Untersuchung zur Ermittlung des dynamischen Verhaltens einer Werkzeugmaschinenstruktur zusammen. Der zeitliche Umfang derartiger Untersuchungen hängt von der Komplexität der Struktur und damit im wesentlichen von der Anzahl der durchzuführenden Messungen ab. Durchschnittlich werden ein bis zwei Tage benötigt.

### Erläuterungen zum Film

#### Wortlaut des gesprochenen Kommentars<sup>2</sup>

Die Arbeitsgenauigkeit einer spanenden Werkzeugmaschine wird durch die an der Zerspanstelle zwischen Werkzeug und Werkstück auftretenden Abweichungen von den vorgegebenen Arbeitsbewegungen bestimmt.

Die Ursache der Abweichungen sind zum Teil durch geometrische und kinematische Fehler, zum Teil durch die statischen und dynamischen Zerspankräfte bedingt.

Das Verlagerungsverhalten der Maschine als Reaktion auf die Zerspankräfte wird ermittelt, indem anstelle dieser Kräfte bei stillstehender Maschine eine statische und eine dynamische Kraft mit Hilfe eines Krafterregers relativ zwischen Werkzeug und Werkstück eingeleitet wird.

<sup>1</sup> Die Werkzeugmaschinenhersteller waren mit der Untersuchung der im Film gezeigten Maschinen und der Veröffentlichung der Untersuchungsergebnisse einverstanden.

<sup>2</sup> Die *Kursiv*-Texte entsprechen den Zwischentiteln im Film. – Der eingerückte Abschnitt in Kleindruck gibt zusätzliche Informationen.

### *Messung der Resonanzfrequenzen und dynamischen Nachgiebigkeiten*

Der Aufbau der umfangreichen Meß- und Untersuchungsgeräte erfolgt in unmittelbarer Nähe der zur Untersuchung vorbereiteten Maschine. Über ein Hydraulikaggregat wird der elektrohydraulische Krafterreger mit Drucköl versorgt. Die Geräte zur Ansteuerung des Erregers und zur Meßsignalerfassung und -auswertung sind zu transportablen Baugruppen zusammengefaßt. Signalgeneratoren, Signalfilter, eine Erregeransteuerung, ein Oszilloskop und für die Auswertung der Meßsignale ein programmierbarer Fourieranalysator bilden die erste Gerätegruppe.

Für die Daten- und Programmein- und -ausgabe sowie deren Speicherung sind periphere Erweiterungen, wie ein Bedienungsblattschreiber, ein Plotter und ein Magnetplattenspeicher nötig.

Die Vorrichtung zur Befestigung des Krafterregers auf dem Maschinentisch wird so montiert, daß die Krafterregung relativ zwischen Tisch und Werkzeug in einer Maschinenkoordinatenrichtung erfolgt. Der zeitliche Verlauf der dynamischen Erregerkräfte wird von einem Signalgenerator aus gesteuert. Die erzeugte Kraft wird von einem Kraftmeßelement erfaßt und auf dem Oszilloskop sichtbar gemacht. Gleichzeitig wird die Reaktion der Maschine auf die Krafterregung als relative Verlagerung zwischen Maschinentisch und Werkzeug mit einem Wegaufnehmer gemessen und ebenfalls auf dem Oszilloskop sichtbar gemacht. Von den Kraft- und Wegsignalen werden Frequenzanalysen und die hierauf basierenden Berechnungen des sogenannten Nachgiebigkeitsfrequenzgangs mit dem Fourieranalysator durchgeführt. Der Betrag des Nachgiebigkeitsfrequenzgangs wird als Amplitudengang bezeichnet. Die frequenzabhängige zeitliche Verschiebung zwischen eingeleiteter Kraft und resultierender Verlagerung heißt Phasengang. Eine andere Darstellungsform des Nachgiebigkeitsfrequenzgangs ist die Ortskurve. Die Dokumentation der Ergebnisse erfolgt mit Hilfe des X-Y-Plotters.

Aus der graphischen Darstellung des Amplitudengangs können die Resonanzfrequenzen an den Stellen der Kurvenmaxima entnommen werden. Bei dieser Maschine wurden für die untersuchte Erregungsrichtung fünf verschiedene Resonanzfrequenzen festgestellt. Die Frequenzangaben in Hertz werden im Amplitudengang gekennzeichnet.

Um einen umfassenden Überblick über das räumliche dynamische Maschinenverhalten für die untersuchte Bauteilposition zu gewinnen, werden die Untersuchungen in der beschriebenen Weise bei Krafterregung und Wegmessung in den drei Maschinenkoordinatenrichtungen durchgeführt. Es sind damit insgesamt neun Nachgiebigkeitsfrequenzgänge zu messen, nämlich drei sog. direkte Nachgiebigkeitsfrequenzgänge, bei denen Kraft- und Wegmeßrichtung gleich sind und sechs Kreuzfrequenzgänge, bei denen Kraft- und Wegmeßrichtung orthogonal zueinander sind.

### *Ermittlung der Maschinenschwingungsformen (Modalanalyse)*

Zur Messung der Schwingungsformen mit dem Verfahren der Modalanalyse wird die Maschinenstruktur geometrisch durch Strukturpunkte approximiert. Die Punkte werden an der realen Maschine markiert und anhand einer vorgefertigten Skizze und einer Koordinatentabelle kontrolliert.

Die Modalanalyse-Software ist auf einer Magnetwechselplatte abgespeichert. Der Befehl zum Laden des Programmsystems von der Platte in den Rechner wird am Tastenfeld des Analysators eingegeben. Im Dialogverkehr wird dann der Programmablauf vom Bedienungsmann hauptsächlich vom Blattschreiber aus gesteuert. Dabei werden zunächst die „Set-up“-Daten, wie zum Beispiel die Kalibrierfaktoren der Meßwertaufnehmer, angegeben.

Die Vorrichtung zur Befestigung des Krafterregers wird jetzt so montiert, daß die Kraft unter fünfundvierzig Grad zu allen drei Maschinenkoordinatenrichtungen zwischen Maschinentisch und Werkzeug wirksam wird. Durch die in den drei Koordinatenrichtungen wirkenden Kraftkomponenten werden sämtliche Schwingungsformen der Maschine angeregt.

Zur Bestimmung des räumlichen Schwingungsverhaltens werden an jedem zuvor markierten Strukturpunkt die Verlagerungen in den drei Maschinenkoordinatenrichtungen gemessen. Aus den Werten jeder dieser Verlagerungsmessungen und den jeweils gleichzeitig erfaßten Erregerkräften wird wieder der Nachgiebigkeitsfrequenzgang berechnet und auf der Magnetplatte abgespeichert.

Nach Durchführung sämtlicher Messungen werden alle Amplitudengänge nacheinander von der Magnetplatte abgerufen und auf dem Bildschirm auf die wesentlichen Resonanzfrequenzen hin untersucht. Ein Amplitudengang, in dem alle wesentlichen Resonanzfrequenzen enthalten sind, dient als Basis für einen Optimierungsprozeß. Für jeden gemessenen Nachgiebigkeitsfrequenzgang werden Parameter einer mathematischen Gleichung derart ermittelt, daß die gemessene Kurve bestmöglich durch den über die Gleichung beschriebenen Kurvenverlauf angenähert wird. Diese berechnete Kurve kann als Amplitudengang und Phasengang oder in Form der Ortskurve mit der gemessenen Kurve verglichen und auf dem Plotter ausgegeben werden. Die sog. „modalen“ Parameter werden auf dem Bedienungsblattschreiber ausgedruckt. Sie umfassen Eigenfrequenzen, Dämpfungskennwerte und Amplitudenparameter.

Anschließend wird eine Tabelle in den Rechner eingegeben, in der eine Zuordnung zwischen den bereits gespeicherten Meßergebnissen und den Meßpunkten und Meßrichtungen getroffen wird. Zu jedem Meßpunkt werden außerdem die zugehörigen Koordinaten eingegeben.

Nun kann die zeitlich veränderliche Darstellung der Schwingungsformen auf dem Bildschirm des Rechnersystems erfolgen. Die perspektivische Ansicht zeigt das stark übertrieben dargestellte Schwingungsgesamtverhalten.

Andere Ansichten, zum Beispiel die Vorderansicht oder die Seitenansicht, können wesentlich zur Analyse der Bauteileinzelverformungen beitragen.

Bei dieser und den folgenden Schwingungsformen sind sehr gut Grundschwingungsformen des Stößels, wie Starrkörper-, Biege- und Torsionsschwingungen zu erkennen. Daneben sind Relativbewegungen in den Führungen der Bauteile zu beobachten. Während die Schwingungsformen bei niedrigen Resonanzfrequenzen sich im wesentlichen auf die genannten Grundformen zurückführen lassen, setzen sie sich bei höheren Frequenzen aus vielen Bauteileinzelverformungen zusammen. Diese Verformungen werden gut sichtbar, weil die Darstellung einer jeden Schwingungsform unabhängig von den tatsächlichen Nachgiebigkeiten auf die jeweils maximale

Amplitude normiert ist. Die tatsächlichen Verlagerungen betragen natürlich in Abhängigkeit von der anregenden Kraft nur Mikrometer. Der Einfluß einer Schwingungsform auf das Stabilitätsverhalten der Maschine wird anhand des an der Zerspanstelle gemessenen Nachgiebigkeitsfrequenzganges bewertet.

Der Aufruf der Ergebnisse von früheren Untersuchungen anderer Maschinen ist jederzeit möglich: z.B. in Gegenüberstellung zur Karusselldrehmaschine – Schwingungsformen einer Spitzendrehmaschine.

Die Ergebnisse zeigen, daß das rechnerunterstützte Verfahren der Modalanalyse für den Konstrukteur eine wertvolle Hilfe darstellt, um das dynamische Verhalten bestehender Maschinenkonstruktionen zu analysieren und gezielte konstruktive Maßnahmen zur Verbesserung des Verhaltens zu ergreifen.

#### Literatur

- [1] TEIPEL, K.: Beurteilung der dynamischen Nachgiebigkeit spanender Werkzeugmaschinen. Entwicklung und Anwendung eines Verfahrens auf der Basis gemessener Nachgiebigkeitsfrequenzgänge. Dissertation TH Aachen 1977.
- [2] WECK, M., und E.-K. PRÖSSLER: Modalanalyse – Ein neuartiges und effektives Hilfsmittel zur Darstellung des dynamischen Maschinenverhaltens. *Industrie-Anzeiger* 98. Jg., Nr. 42, v. 26. 5. 1976.
- [3] WECK, M., und K. TEIPEL: *Dynamisches Verhalten spanender Werkzeugmaschinen*. Berlin, Heidelberg, New York, ISBN 3-540-08468-1.