

# Bessere Oberflächenqualität durch Optimierung des dynamischen Maschinenverhaltens

<sup>1)</sup> Prof. Dr.-Ing. U. Heisel ist Institutsleiter am Institut für Werkzeugmaschinen (IFW) der Universität Stuttgart mit dem Versuchsfeld für Holzbearbeitungsmaschinen. Dipl.-Ing. A. Fischer ist wissenschaftlicher Mitarbeiter und Leiter der Arbeitsgruppe Maschinendynamik am IFW.

## Einleitung

Es hat sich gezeigt, daß sich praktisch jede Konstruktionsänderung in irgendeiner Weise auf das Maschinenverhalten auswirkt. Aufgrund der diskreten Anregungsmechanismen sind jedoch nur wenige Konstruktionsänderungen für das Verhalten im Betrieb und letztlich für die Oberflächenqualität verantwortlich. Um kostengünstige Optimierungen zu erreichen, ist es notwendig, das gesamte derzeit verfügbare Spektrum an Hilfsmitteln und Möglichkeiten zu kennen, um diejenigen Konstruktionsvariationen durchzuführen, die maximale Verbesserung der Bearbeitungsqualität bei geringstem technischen und finanziellen Aufwand bedeuten.

## Allgemeines zu Nachgiebigkeitsfrequenzgängen und Modalanalysen

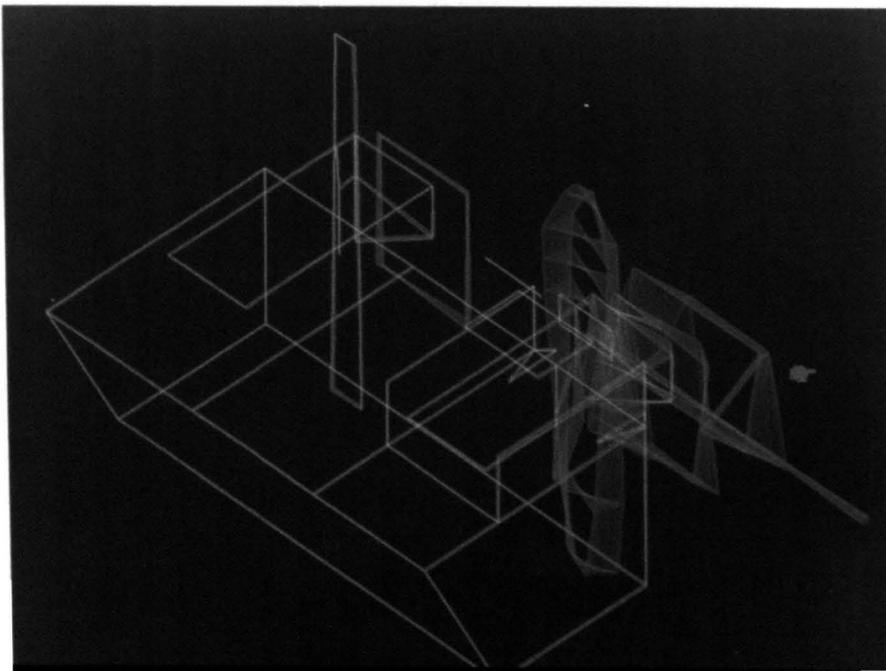
Will man das dynamische Verhalten einer Holzbearbeitungsmaschine beschreiben, so werden üblicherweise Nachgiebigkeitsfrequenzgänge für oder zwischen Werkstück und Werkzeug als Beurteilungskriterium für das Verhalten bei Kräfteinwirkungen angegeben [2]. Die Nachgiebigkeit ist eine auf die Kraft bezogene Verformung. Bei linearen Systemen kann die anregende Kraftamplitude, wie beispielsweise die Schnittkraft oder eine durch Wellenunwuchten erzeugte Kraft, mit der Nachgiebigkeit multipliziert werden, um die während dem Betrieb auftretende Schwingungsamplitude zu berechnen.

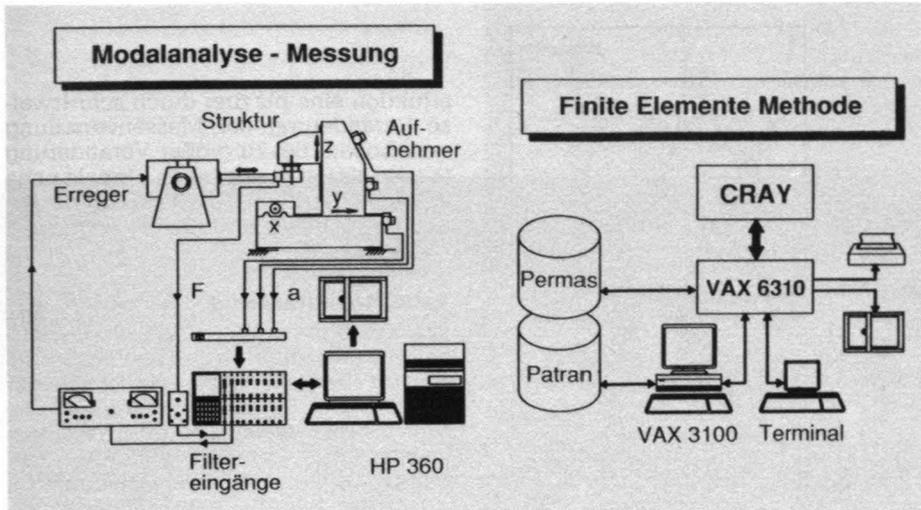
Die Nachgiebigkeit ist weiter eine frequenzabhängige Größe. Je nach Frequenz der anregenden Kraftamplitude ergibt sich ein anderer komplexer Verstärkungsfaktor (gekennzeichnet durch Amplitudenverstärkung und Phasenacheilung) zur Berechnung der sich einstellenden Schwingwegamplitude mit gleicher Frequenz.

Leitet man nun eine Kraft als breitbandiges Rauschen an einer Stelle 1 der Struktur ein, so regt man die Maschine gleichzeitig zum Schwingen in vielen Frequenzen an. Mißt man die auftretenden Schwingungen an einem Strukturpunkt - Stelle 2 - und bezieht diese auf das an der Stelle 1 eingeleitete Kraftspektrum, so erhält man den Nachgiebigkeitsfrequenzgang als komplexen Verstärkungsfaktor für diesen Übertragungsweg. Eine weitere Information zur Beschreibung des dynamischen Verhaltens sind die bei den jeweiligen Frequenzen vorliegenden Schwingungsformen der Maschine. Die im Betrieb auftretenden Schwingungsformen können

Abb. 1: Eigenschwingungsform einer Vertikalspindel­einheit im Bereich von 50 Hz

Die Oberflächenqualität wird durch das dynamische Verhalten der Maschine beim Umfangsplanfräsen wesentlich beeinflußt. Beim Fräsvorgang entstehen durch den Zahn­eingriff auf der Werkstückoberfläche Zykloidenbewegungen in Form von spitzen Wellenbergen und runden Wellentälern. Entsprechend dem dynamischen Verhalten des Maschinensystems werden zusätzlich Relativbewegungen zwischen Werkstück und Werkzeug hervorgerufen. Durch diese zusätzlichen Relativbewegungen werden die Wellentäler im Mikrometerbereich angehoben und abgesenkt. Die Oberflächenstruktur wird damit durch das dynamische Verhalten der Holzbearbeitungsmaschine verändert. Am Institut für Werkzeugmaschinen der Universität Stuttgart werden mit Betriebsschwingungs- und Modalanalysen (Abb. 1) Konstruktionsänderungen [1] auch im Hinblick auf Oberflächenqualität in der Holzbearbeitung durchgeführt. In einer dreiteiligen Serie zur Oberflächenqualität beim Umfangsplanfräsen werden die Möglichkeiten beschrieben, die aus der Auswertung von Oberflächenprofilen zur Maschinenoptimierung entstehen. - Von Prof. Dr.-Ing. U. Heisel und Dipl.-Ing. A. Fischer<sup>1)</sup>.





als ungestörte Überlagerungen von elementaren Schwingungsformen verstanden werden. Die Modalanalyse beschreibt die für verschiedene Frequenzen vorkommenden elementaren Schwingungsformen.

Ein mehrkanaliger Meßaufbau (Abb. 2) zur Bestimmung von Schwingungsübertragungen in Form von Nachgiebigkeitsfrequenzgängen ist notwendig, um die Messung in den Fertigungsbetrieben vor Ort zügig durchzuführen. In Zukunft wird man die während des Zerspanungsvorganges entstehenden Maschinenschwingungen entsprechend Abbildung 1 darstellen. Während der Messung ist dazu eine Vielzahl von Meßsignalen zu verarbeiten, was eine bedeutende Erhöhung der Kanalzahl zur Folge hat.

### Vorgehensweise bei der Maschinenoptimierung

Die Vorgehensweise wird am Beispiel einer Hobelbearbeitung (Umfangspanfräsen) erläutert. Es handelt sich um eine Massivholzbearbeitung mit einem Vorschub von 10 m/min und einer Werkzeugdrehfrequenz von 100 Hz. In Abbildung 3 ist das Werkzeug, der Fräskopf, während einer Modalanalysemessung dargestellt.

### Erster Schritt: Identifikation des dynamischen Problems

Zunächst muß von der zu verbessern-

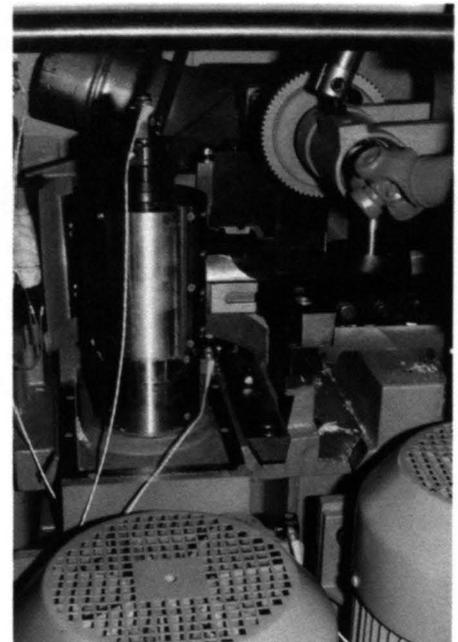
Abb. 2: Hardwarekonfiguration für Modalanalyse und Finite Elemente Methode

Abb. 3: Vertikalspindel mit Fräskopf bei der Schwingungsmessung

den Oberflächenstruktur - Beispiele von Oberflächen siehe [3] - auf die sie verursachende Schwingung geschlossen werden. Im vorliegenden Beispiel konnte für den ungleichmäßigen Hobelschlag des Messers eine Periodizität von ca. 50 Hz ermittelt werden (Abb. 4). In der Regel ist dieser Direktanschluß durch einfaches Ausmessen der Wellenberge und -täler nicht möglich. In Stuttgart wurde jedoch unter Prof. Heisel am IfW jüngst ein allgemeiner Zusammenhang zwischen Schwingungen und Oberflächenentstehung formuliert.

### Zweiter Schritt: Störschwingungsursache und Übertragungsverhalten bestimmen

Zunächst muß überprüft werden, ob die aus der Oberflächenbeurteilung bestimmte Störschwingung im Betrieb verifiziert werden kann. Die Relativbewegung zwischen durchlaufendem Werkstück und drehendem Werkzeug kann nur mit sehr hohem Meßaufwand einigermaßen zufriedenstellend gemessen werden. Im vorliegenden Fall wur-



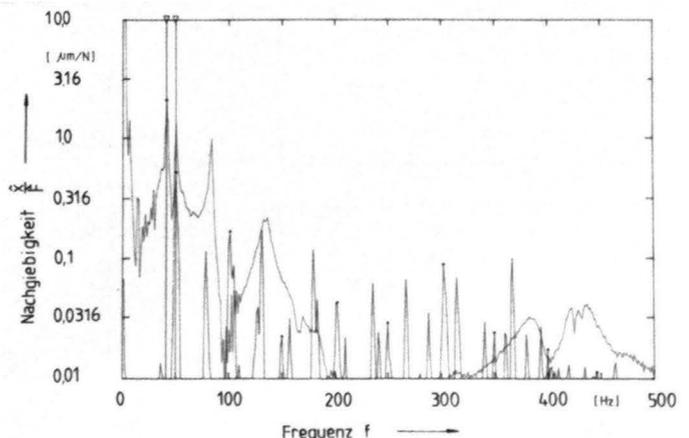
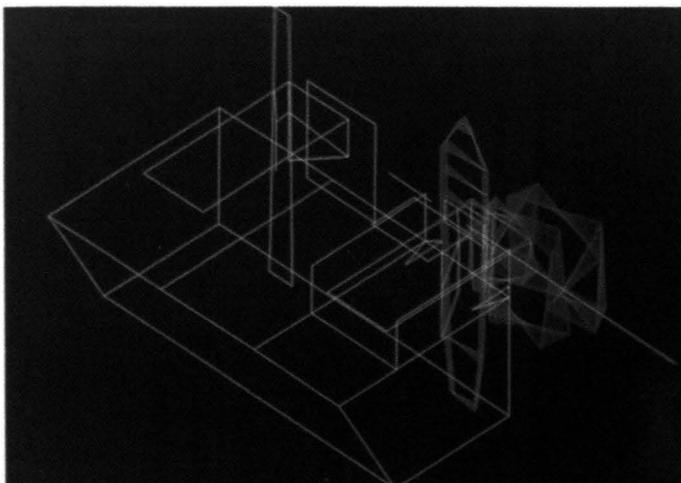
den Schwingungen zwar am durchlaufenden Holz, jedoch nicht am drehenden Werkzeug, sondern lediglich im Bereich der Spindellagerung gemessen.

Die Schwingungen können deshalb nur qualitativ zur Beurteilung herangezogen werden. Ohne Information aus der Holzoberfläche ist es daher nicht möglich festzustellen, welche Frequenz sich hauptsächlich störend auf die Oberflächenstruktur auswirkt. Gegenmaßnahmen sind nicht sicher genug.

Wesentlich für die weitere Vorgehensweise ist nun, welche der „grünen Nadeln“ des Schwingungsspektrums (Abb. 5) sich störend auf die Oberfläche auswirken. Durch diese Kenntnis aus Schritt eins genügt eine Beschränkung auf den Bereich um 50 Hz. Im vorliegenden Fall fällt die Erregung mit einer Eigenfrequenz zusammen. Bei der zugehörigen Eigenform (Abb. 1) handelt es sich um eine Schwingung der vertikal stehenden Werkzeugspindel mit rückseitigem Motorantrieb. Die durch Modalanalyse bestimmte Schwingungsform wird in mehreren Zeitpunkten

▼Abb. 5: Eigenschwingungsform einer Vertikaleinheit im Bereich von 70 bis 80 Hz

Abb. 6: Nachgiebigkeitsfrequenzgang und Bearbeitungsspektrum



stark vergrößert abgebildet. Die Extremlagen verdeutlichen das Verhältnis der Schwingungsamplitude verschiedener Maschinenpunkte. Das Maschinenbett ist dabei nahezu unbeteiligt und liegt außerdem nicht im direkten Übertragungsweg zwischen Erregungsort und Wirkstelle.

Würde aus der Holzoberfläche eine Schwingung mit 70 bis 80 Hz als störend empfunden werden, so wäre das Maschinenverhalten durch die entsprechende Eigenform (Abb. 6) beschrieben. Anstelle der Biegung im Bereich von 50 Hz liegt nun eine Torsion des rückseitigen Motoraufbaus vor.

### Dritter Schritt: Verbesserungsmaßnahmen diskutieren

Nachdem in Schritt eins geklärt wird, welche Schwingung sich qualitätsmindernd auf die Oberfläche auswirkt und im Schritt zwei mögliche Erreger mit ihren Übertragungswegen in Form von Nachgiebigkeitsfrequenzgängen und Schwingungsformen (Modalanalyse) bestimmt werden, stehen folgende Verbesserungsmöglichkeiten zur Verfügung:

1. Verminderung der wirksamen Erregungsamplitude, Richtungsorientierung in Spezialfällen auch Änderungen von Phasenlagen.
2. Veränderung der Erregerfrequenz so, daß die Frequenz mit einem niedrigeren Verstärkungsfaktor des Nachgiebigkeitsfrequenzganges zwischen Erregerstelle und Wirkstelle der Zerspaltung zusammenfällt. (Wahl von anderen Übersetzungen bei Unwuchterregung von drehenden Teilen).
3. Konstruktionsänderung mit dem Ziel, den Nachgiebigkeitsfrequenzgang an der Frequenzstelle der Erregung zu minimieren. Hierbei wird die zugrunde liegende Schwingungsform analysiert. Oftmals sind dabei Schwächungen einfacher und kostengünstiger durchführbar als Veränderungen durch Versteifung der Bauteile.
4. Schnittprozeßänderung mit der Folge, daß die Schwingungen sich weniger deutlich auf die Oberflächenqualität auswirken. Hierzu muß jedoch der

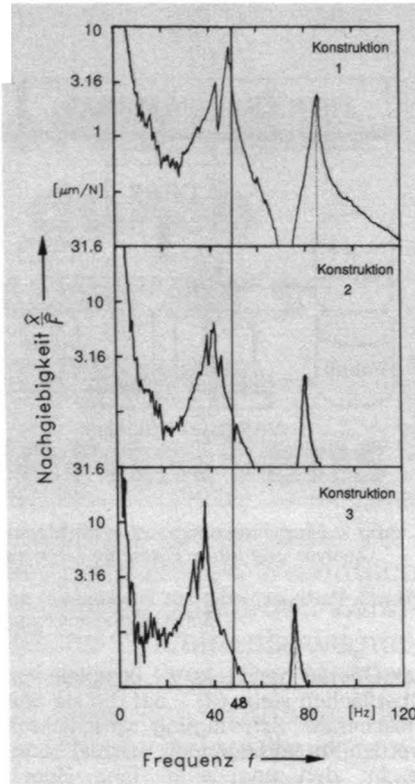


Abb. 7: Einfluß von Konstruktionsanforderungen auf die dynamische Nachgiebigkeit

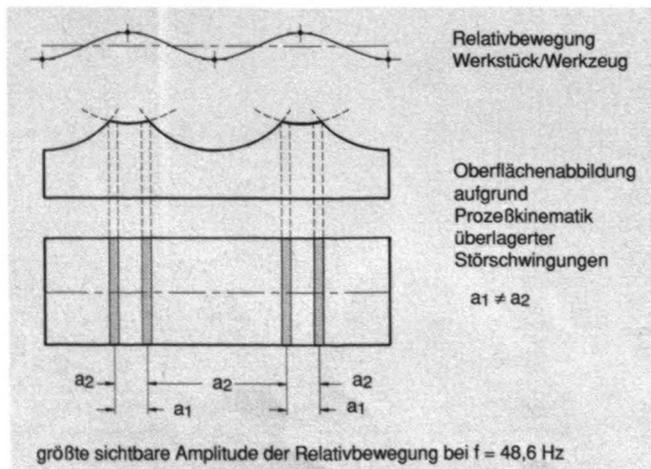
oben erwähnte Zusammenhang zwischen Oberflächenentstehung und Schwingungen berücksichtigt werden.

Im vorliegenden Beispiel wird eine Konstruktionsänderung nach Punkt drei durchgeführt. Der Nachgiebigkeitsfrequenzgang soll dazu im Bereich von 50 Hz deutlich herabgesetzt werden.

Anmerkung: Es ist hier der Nachgiebigkeitsfrequenzgang von der Erregungsstelle zur Wirkstelle der Zerspaltung zu betrachten. Die Erregungsstelle muß dabei nicht notwendigerweise die Wirkstelle sein.

Die Eigenfrequenz wurde durch eine gezielte Konstruktionsänderung verschoben (Abb. 7). Bei gleicher räumlicher Steifigkeitsverteilung wurde die Eigenfrequenz ausgehend von Kon-

▼ Abb. 4: Durch Relativbewegungen verursachter ungleichmäßiger Hobelschlag



struktion eins bis drei durch schrittweise Veränderung der Massenverteilung verschoben. Bei zu großer Veränderung (Konstruktion 3) entstehen oftmals neue Probleme dadurch, daß andere Erregerübertragungswege negativ verändert werden.

### Zusammenfassung

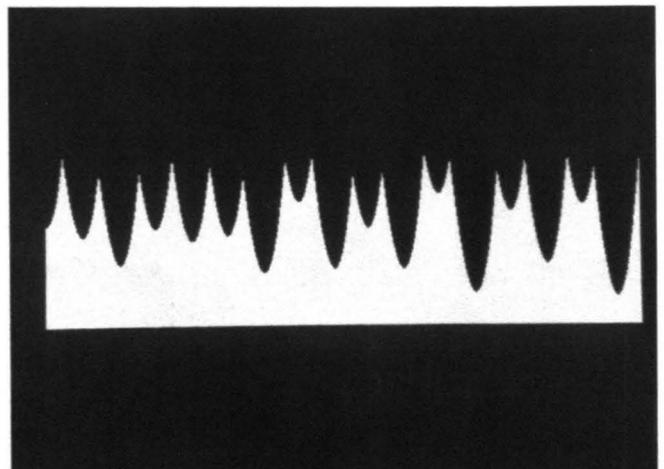
Das dynamische Verhalten einer Bearbeitungsmaschine wird im Gegensatz zum statischen Verhalten von einer Vielzahl von Einflüssen bestimmt, wie zum Beispiel vielschichtige Erregungsmechanismen, räumliche Steifigkeits-, Massen- und Dämpfungsverteilungen.

Um das Maschinenverhalten zur Erzeugung besserer Oberflächen, hier in der Massivholzbearbeitung (Umfangsplanfräsen) zu optimieren, ist für jeden Problemfall eine genaue Ursachenanalyse erforderlich. Oftmals sind die Ursachen schlechter Hobelqualität bei ganz diskreten Erregerstellen und -frequenzen oder in Schwachstellen im Übertragungsverhalten zur Wirkstelle hin zu suchen. Eine Modalanalyse kann beispielsweise nur dann sinnvoll zur Konstruktionsoptimierung eingesetzt werden, wenn die störenden Frequenzen bereits bekannt sind und somit für die Optimierung relevante Eigenformen angegeben werden können.

Allgemeine Konstruktionsempfehlungen, wie Versteifung von Bauteilen im Spindelaufbau, Maschinenbett oder andere Empfehlungen, können im Einzelfall sogar das Gegenteil bewirken oder einfach unwirksam sein. Beispiel: Maschinenbetten aus Polymerharzbeton bringen nur dann die dämpfende Wirkung des Werkstoffes hervor, wenn im Maschinenbett auch Bewegungen mit der Störfrequenz vorkommen.

Im vorliegenden exemplarisch aufgeführten Fall wurde die Verbesserung des dynamischen Verhaltens durch eine geänderte Massenverteilung im Spindelaufbau erzielt, ohne Änderungen des

Abb. 8: Berechnetes Oberflächenprofil für das Umfangsplanfräsen unter Berücksichtigung von Schwingungsüberlagerung (Bildnachweis: alle IFW)



Steifigkeits- oder Dämpfungsverhaltens.

## Ausblick

Der bisherige Schwachpunkt der geschilderten Vorgehensweise ist der Rückschluß von der mangelhaften Oberflächenstruktur auf die sie erzeugende Relativbewegung zwischen Werkstück und Werkzeug. Außerdem kann die Qualität nur subjektiv beurteilt werden. Eine verbesserte Problemidentifikation sollte folgende Punkte berücksichtigen:

1. Bestimmung von Relativbewegungen zwischen Werkstück und Werkzeug aus Oberflächenprofilen und der sich daraus ergebenden Störfrequenzen als Grundlage zur Optimierung.
2. Berechnung von Oberflächenprofilen bei vorgegebener Prozeßkinematik unter Berücksichtigung von Schwingungsüberlagerungen.

Das in Abbildung 8 dargestellte Oberflächenprofil wurde durch Vorgabe der Prozeßkinematik mit gleichzeitiger Störungsüberlagerung berechnet. Die Störschwingungen wurden dazu aus realen Oberflächenmessungen bestimmt.

Weitere Ergebnisse werden demnächst in HOB veröffentlicht.

## Literatur

- [1] Fischer, A.: Konstruktionsoptimierung mit Hilfe der Modalanalyse, schriftliche Fassung der Vorträge zum Fertigungstechnischen Kolloquium in Stuttgart, Oktober 1991, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Barcelona, Budapest.
- [2] Weck, M.: Werkzeugmaschinen Band 4, Messungen an Maschinen, VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf 1985.
- [3] Heisel, U., Tröger, J., Fischer, A., Steinhoff, R.: Berührungsloses Meßverfahren zur Beurteilung der Struktur bearbeiteter Holzoberflächen, HOB 11(1991).

HOB-KENNZIFFER ..... **35**