Beurteilung von Oberflächen durch Prozeßsimulation

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. Zur Beurteilung von Oberflächen wurde ein Softwarepaket entwickelt, mit dem sowohl der kinematisch reine Prozeß als auch der durch das dynamische Verhalten der Maschine gestörte Prozeß, dargestellt werden kann. Durch Definition einer Kennzahl für die Ungleichmäßigkeit der Rillenabfolge können mit diesem Instrumentarium verschiedene Prozesse bzw. deren Störungen in ihrer Auswirkung auf die Oberflächenqualität verglichen werden. Am Institut für Werkzeugmaschinen der Universität Stuttgart werden mit Betriebsschwingungs- und Modalanalysen, Konstruktionsänderungen 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, Dipl.-Ing. A. Fischer und Volker Maier[1]).

Einleitung

Im ersten Teil [1] der Serie zur Oberflächenqualität beim Umfangsplanfräsen wurden herkömmliche Hilfsmittel und Möglichkeiten zur Beschreibung des dynamischen Maschinenverhaltens im Hinblick auf Maschinenoptimierungen vorgestellt. Mit Nachgiebigkeitsfre-

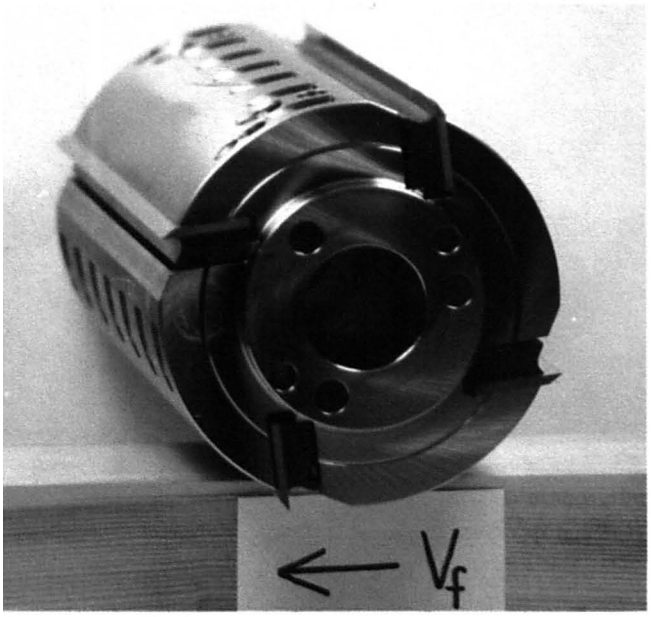


Abb. 1: Werkzeugbeispiel für Umfangsplanfräsen

[1]) 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. Volker Maier ist Mitarbeiter am IfW.

Assessing surfaces by process simulation. By Prof. Dr.-Ing. U. Heisel, Dipl.-Ing. A. Fischer and Volker Maier[1]).

Surface quality is influenced by the dynamic behavior of the machine during circumferential face milling. During the milling process, engagement of the teeth on the workpiece surface gives rise to cycloid movements in the form of pointed wave crests and round wave troughs. A software package has been developed to assess surfaces. This package allows representation of both the kinematically pure process and the process interrupted by the dynamic behavior of the machine. These instruments allow various processes and their interruptions to be compared with regard to their effect on surface quality. This is possible by defining a characteristic number for the unevenness of the groove sequence. At the Institute for Machine Tools at the University of Stuttgart, design changes are being made with operational vibration and modal analyses. These changes are also being made with regard to surface quality in woodworking. The possibilities arising from evaluating surface profiles in order to optimize machines are described in a three-part series on surface quality during circumferential face milling.

Evaluation des surfaces par simulation de processus. De Prof. Dr.-Ing. U. Heisel, Dipl.-Ing. A. Fischer et Volker Maier.

Au cours du dressage à la fraise, la qualité des surfaces est notablement influencée par le comportement dynamique de la machine. L'attaque des dents à la surface de la pièce pendant le fraisage produit des mouvements cycloidaux en forme de sommets pointus et de creux ronds. Un progiciel qui permet de visualiser aussi bien le processus purement cinématique que le comportement dynamique de la machine a été développé pour l'évaluation des surfaces. En définissant un nombre caractéristique pour l'irrégularité de la succession des rainures, cet équipement permet de comparer l'effet sur la qualité de surface de différents processus ou de leurs incidents. L'institut des machines-outils de l'université de Stuttgart effectue, á l'aide d'analyses vibrationnelles sous conditions de service et d'analyses modales, des modifications constructives visant également à la qualité de surface dans le travail du bois. Les possibilités d'optimisation des machines découlant de l'analyse des

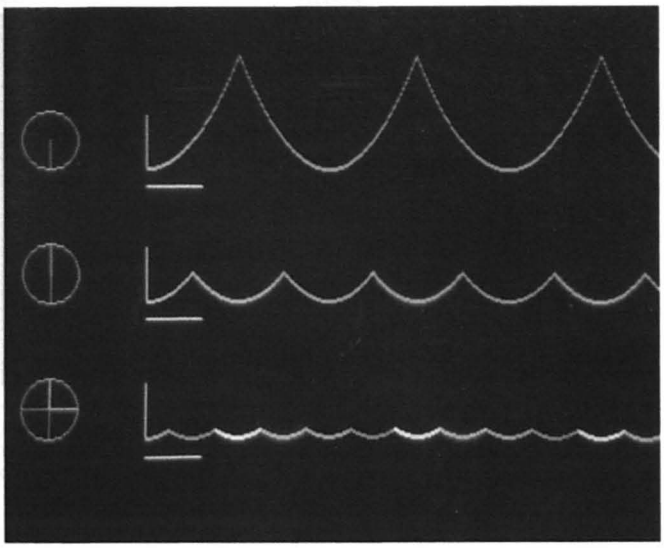


Abb. 2: Einfluß der Schneidenzahl auf die Rillenbildung

quenzgängen wurde beschrieben, wie das System, die Maschine, auf künstlich eingeleitete Kräfte in Form von Schwingungen reagiert. Durch die experimentelle Modalanalyse können dann die in den verschiedenen Frequenzbereichen auftretenden elementaren Schwingungsformen als Maschinendeformationen dargestellt werden. Bei der weiteren Vorgehensweise zur Maschinenoptimierung treten jedoch zwei wesentliche Probleme auf.

1. Während der Bearbeitung können weder die anregenden Kräfte, noch die sich einstellenden Schwingungen mit vertretbarem Meßaufwand genügend genau beschrieben werden. Anstelle der direkten Messung zwischen Werkstück und Werkzeug wird oft eine an den Prozeßbewegungen nicht beteiligte Ersatzstelle im Bereich der Spindellagerung verwendet. Je nach Frequenz können die dort ermittelten Schwingungen nahezu beliebig große Abweichungen aufweisen.

2. Wie wirken sich gemessene Relativschwingungen zwischen Werkstück und Werkzeug auf die erzielte Oberflächenstruktur aus?

Für die Beantwortung der Frage in Punkt 2 wird im folgenden das am IfW in Stuttgart entwickelte Programm zur Prozeßsimulation vorgestellt. Aufbauend auf dieser Prozeßsimulation wird in einer der nachfolgenden Ausgaben ein Verfahren zur Bestimmung von Relativschwingungen aus Oberlfächenmessungen vorgestellt.

Simulation des ungestörten Fräsprozesses

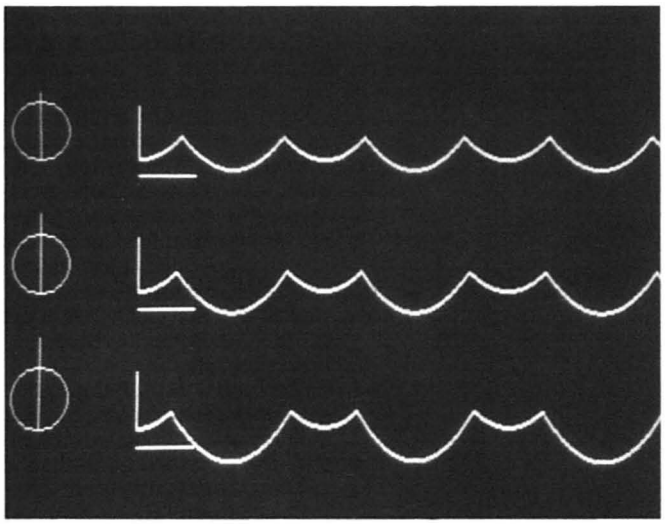
Durch die Vorschubbewegung des Werkstücks in Abb. 1 bei gleichzeitig überlagerter Drehbewegung des Werkzeugs entsteht zwischen Werkstück und Werkzeugschneide eine zykloidenförmige Relativbewegung. Zum Zeitpunkt des Schnittvorgangs wird ein Teil, ein Zykloidenabschnitt, auf der Werkstückoberfläche abgebildet. Parameter für die Zykloidenform sind daher:

- Werkstückvorschubgeschwindigkeit v_f
- Werkzeugdrehzahl n und
- Schneidenflugkreisdurchmesser D.

Für den ungestörten Prozeß wird angenommen, daß keine Relativbewegung zwischen Werkzeugdrehachse und Vorschubachse stattfindet. Zur Veranschaulichung der Ereignisse wurden folgende Prozeßparameter gewählt: v_f = 20 m/min, n = 6000 l/min^{-1} und D = 125 mm.

Durch die Abfolge der Schneideneingriffe wird die endgültige Form des auf der Werkstückoberfläche verbleibenden

Abb. 3: Entstehung von Ungleichförmigkeiten in der Rillenstruktur durch Schneidenüberstände ▼

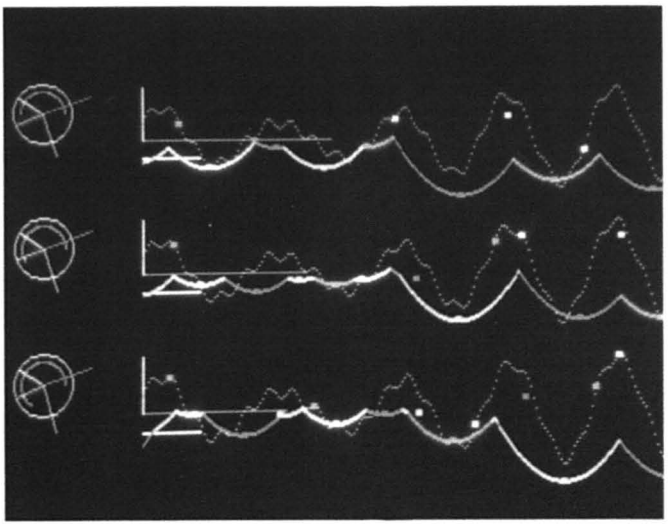


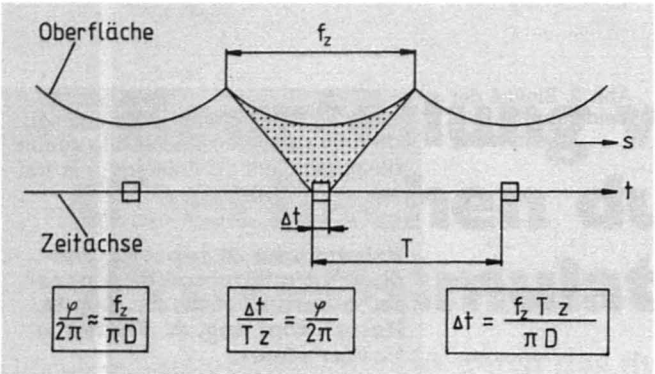
surfaces sont décrites dans une série de trois articles consacrés á la qualité de surface lors du dressage à la fraise.

Valutazione di superfici mediante simulazione di processo. A cura di Prof. Dr.-Ing. U. Heisel, Dipl.-Ing. A. Fischer e Volker Maier.

La qualità della superficie lavorata dipende notevolmente dal comportamento dinamico della macchina durante la fresatura periferica in piano. Durante l'operazione di fresatura, a causa dell'azione dei denti sulla superficie del pezzo vengono generati movimenti cicloidali con forma di onde a punta e con avvallamenti di onde tonde. Per poter valutare le superfici dei materiali è stato sviluppato un pacchetto software che consente di rappresentare non solo il puro processo cinematico, ma anche il processo disturbato dal comportamento dinamico della macchina. Mediante la definizione di caratteristiche per la sequenza non uniforme delle scanalature, i suddetti strumenti consentono di confrontare diversi processi nonché i relativi disturbi e il loro impatto sulla qualità della superficie lavorata. Presso l'istituto per macchine utensili dell'Università di Stoccarda vengono eseguite modifiche costruttive mediante analisi delle oscillazioni funzionali e modali anche in considerazione della qualità della superficie nella lavorazione del legno. In una serie in tre parti sulla qualità della superficie lavorata con fresatura periferica in piano vengono descritte le possibilità consentite dall' analisi dei profili delle superfici per l'ottimizzazione della macchina utensile.

Abb. 7: Darstellung eines allgemeinen Prozesses mit einem vierschneidigen Werkzeugs bei Variation des Prozeßparameters Drehzahl





▲ Abb. 4: Vergleich von Zeitachse und Wegachse bei der Oberflächenentstehung

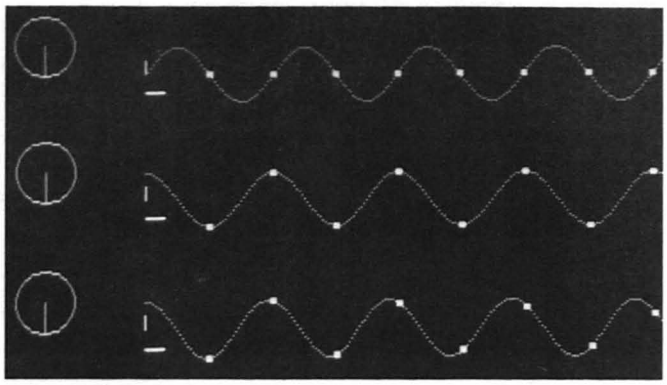


Abb. 5: Relativbewegung zwischen Werkzeug und Werkstück mit Markierung der Lage zum Zeitpunkt der Schnittbildung für verschiedene Phasenlagen

Zykloidenabschnitts bestimmt. Die Abfolge der Schneideneingriffe hängt dabei von der verwendeten Anzahl der Schneiden ab. Abb. 2 zeigt für den obigen Prozeß einen Werkstückoberflächenschnitt in Vorschubrichtung für Werkzeuge mit einer, zwei bzw. vier Schneiden. Die unterschiedliche Farbwahl der Schneiden (siehe Werkzeugsymbol, jeweils links im Bild) ermöglicht eine Zuordnung, welcher Teil der Oberfläche durch welche Schneide entstanden ist. Zur Verdeutlichung der Rillenstruktur im Bild wurde der vertikale Maßstab um den Faktor 100 vergrößert. Als Orientierung für die Rillenabmessungen ist in den folgenden Bildern ein horizontaler gelber Balken als Referenz der Länge 1 mm dargestellt sowie ein vertikaler gelber Balken, der entsprechend der Vergrößerung nur eine Länge von 10 µm repräsentiert. In der Literatur [2] findet man folgenden einfachen Zusammenhang zwischen erzeugter Wellentiefe W_t und dem Zahnvorschub f_z:

$$W_t = \frac{f_z^2}{4D} \qquad f_z = \frac{v_f}{nz}$$

Im Beispiel entstehen damit folgende gerundete Werte für Zahnvorschub und erzeugter Wellentiefe.

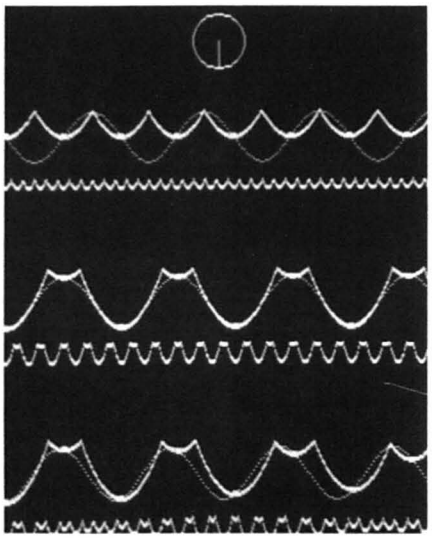
Schneidenzahl	f_z	W_t
z=1	3,33 mm	22,2 µm
z=2	1,67 mm	5,6 µm
z=4	0,83 mm	1,4 µm

In der Praxis liegen jedoch nicht alle Schneiden auf dem selben Flugkreisdurchmesser. Bei einem zweischneidigen Werkzeug wurde für die zweite Schneide ein stufenweiser um jeweils 2 µm vergrößerter Flugkreisradius angenommen. Der Schneidenüberstand zur ersten Schneide ist im jeweiligen Werkzeugteilbild in Abb. 3 entsprechend dem vertikalen Maßstab für das Oberflächenprofil dargestellt. Durch den unterschiedlichen Flugkreisdurchmesser ergeben sich Ungleichmäßigkeiten, sowohl in der Höhe der Rillenspitzen als auch in der Abstandsfolge der Bearbeitungsrillen. Durch Lichtreflexe, beispielsweise nach dem Lackieren, wird dieser Effekt noch verstärkt und führt eventuell zur Beanstandung der visuell empfundenen Werkstückqualität. Ursachen für unterschiedliche Flugkreisdurchmesser können neben unterschiedlichen Schneidenüberständen auch Rundlauffehler der Werkzeug- bzw. Spindelachse gegenüber der tatsächlichen Drehachse sein. Hierzu zählen auch dynamische Bewegungen (beispielsweise infolge von Unwuchten), welche periodisch bezüglich der Drehfrequenz auftreten.

Simulation des gestörten Fräsprozesses

Während des Fräsprozesses entstehen Relativbewegungen zwischen Werkzeugdrehachse und Vorschubachse. Bedeutend für die weitere Betrachtung ist die Tatsache, daß das Werkzeug nur einen Bruchteil der Umdrehung mit dem Werkstück in Kontakt ist (Abb. 4). Der Anteil der Kontaktzeit für die oberflächenrelevante Schnittbildung an der Gesamtbearbeitungszeit entspricht beim Einmesserfinish näherungsweise dem Verhältnis von Vorschubgeschwindigkeit zu Schnittgeschwindigkeit. In den Beispielen führt die Vorschubgeschwindigkeit von 20 m/min bei einer Schnittgeschwindigkeit von ca. 40 m/s zu einem Kontaktzeitanteil von weniger als einem Prozent. Damit sich eine Relativschwingung während der Entstehungszeit einer Bearbeitungsrille abbildet, darf eine Schwingungsdauer nicht mehr als dem Kontaktzeitanteil bezogen auf die Dauer einer Werkzeugdrehung betragen. Bei der vorliegenden Drehzahl von 6000 min^{-1} (Drehfrequenz 100 Hz) ergibt sich damit eine Störschwingungsfrequenz von ca. 10 kHz.

Abb. 6: Auswirkung von Phasenlagen mit Entstehung von Schwebungen für den dritten Fall (unten)



In Verbindung mit den vorliegenden Werkzeugmassen sind solche hochfrequente Schwingungen mit entsprechender Amplitude nicht vorstellbar. Anschaulich kann deshalb folgende Oberflächenentstehung aufgrund von Störschwingungen bis ca. 1 kHz beschrieben werden (Abb. 5). Die im Bild als weiße Linie dargestellte Relativbewegung zwischen Dreh- und Vorschubachse führt zu den gekennzeichneten Zeitpunkten (bei mehreren Werkzeugschneiden mit der zugehörigen Farbe gekennzeichnet) zur Entstehung einer Bearbeitungsrille (ein Messereinschlag). Eine Störschwingung beeinflußt praktisch nur das vertikale Niveau der entstehenden Rille und nicht deren Form. Durch diese Veranschaulichung kann eine Schwingung als eine dem Bearbeitungsprozeß überlagerte Treppenfunktion gedeutet werden. Die Treppenbildung wird durch den Bewegungszustand zum Zeitpunkt des Schnittes festgelegt.

Je nach Phasenlage zwischen Drehfrequenz und Störfrequenz können unterschiedliche Niveaufolgen entstehen. Bei der ersten Schwingung von 50 Hz entsteht ein gleichbleibendes Niveau. Durch reine Phasenverschiebung entsteht bei gleicher Störfrequenz eine für die Oberflächenqualität ungünstige Abfolge für das Rillenniveau. Im allgemeinen Fall wird sich die Phasenlage ständig ändern, so daß diese beiden Zustände ineinander übergehen können. In Abb. 6 sind zu den Störfrequenzen der Abb. 5 die entstehenden Oberflächenrillen eingezeichnet. Die jeweils darunter liegenden Kurven beschreiben längere Werkstückabschnitte, so daß für den dritten Fall die erst nach längerem Weg sichtbar werdende Schwebung dargestellt werden kann.

Die allgemeine Prozeßsimulation kann derzeit unter Berücksichtigung der unten aufgeführten Parameter durchgeführt werden. Dabei ist lediglich für die die Schwingung beschreibenden Parametern zu entscheiden, ob es sich um

stationäre oder instationäre Prozesse handelt. (Werkstückan- und -austritt sowie Astlöcher führen beispielsweise zu instationären Prozessen).

Liste der Programmparameter:
- Prozeßparameter wie Vorschubgeschwindigkeit, Drehzahl und Werkzeugdurchmesser,
- Schneidenparamter wie Anzahl, Winkelanordnungen und unterschiedliche statische Flugkreisdurchmesser und
- Schwingungsparameter: Für stationäre Prozesse ist eine spektrale Darstellung in Form von Amplituden- und Phasengängen möglich, für instationäre Prozesse muß dagegen der Zeitverlauf der Relativbewegung vorliegen.

Ein Beispiel für die allgemeinen Möglichkeiten der Software ist in Abb. 7 beschrieben, dabei wurde außerdem die Möglichkeit der Parametervariation exemplarisch vorgestellt (Variation der Drehzahl: 6000, 7000 und 8000 min^{-1}).

Abb. 8: Gestaltabweichung nach DIN 4760

Gestaltabweichung (als Profilschnitt überhöht dargestellt)	Beispiele für die Art der Abweichung
1. Ordnung: Formabweichungen	Geradheits-, Ebenheits-, Rundheits-Abweichung, u.a.
2. Ordnung: Welligkeit	Wellen (siehe DIN 4761)
3. Ordnung: Rauheit	Rillen (siehe DIN 4761)
4. Ordnung: Rauheit	Riefen Schuppen Kuppen (siehe DIN 4761)
5. Ordnung: Rauheit Anmerkung: nicht mehr in einfacher Weise bildlich darstellbar	Gefügestruktur
6. Ordnung: Anmerkung: nicht mehr in einfacher Weise bildlich darstellbar	Gitteraufbau des Werkstoffes

Maschinenschwingungen und Oberflächenqualität

In [3] – DIN 4760 – sind Gestaltabweichungen in Form von Profilschnitten dargestellt (Abb. 8). Für die Oberflächenqualität sind im wesentlichen Gestaltabweichungen der 2. bis 5. Ordnung relevant. Generell trennen Oberflächenmeßgeräte das Oberflächenprofil rein mathematisch in Welligkeiten und Rauheiten auf. In Abhängigkeit der Eckfrequenz des Welligkeitsfilters wird versucht, vom Oberflächenprofil eine wellige Linie abzuziehen. Das verbleibende Profil wird dem Rauheitsprofil zugeordnet. Mit den verfügbaren Kennzahlen kann eine Oberflächenqualität bislang nicht sinnvoll beschrieben werden. Die durch den ungestörten Prozeß entstehende spitzkämmige Bearbeitungsrille wird aufgrund ihrer Längenausdehnung teilweise in Welligkeiten und teilweise in Rauheiten durch den Welligkeitsfilter aufgetrennt.

Eine überlagerte Schwingung ändert die Niveauhöhe der entstehenden Rille, wie in vorigem Abschnitt gezeigt wurde, und kann deshalb als Überlagerung einer Treppenfunktion aufgefaßt werden. Hier ist ebenfalls keine sinnvolle Aufteilung über einen Welligkeitsfilter denkbar, da die Übergänge auch hier sprunghaft erfolgen.

Zur Beschreibung der Oberflächenqualität sind verfahrensspezifische Kennzahlen besser geeignet. Mit Hilfe der Simulationssoftware können neue Kennzahlen für verschiedene Prozesse schnell berechnet und bearbeitet werden. Zunächst könnte man versuchen, die Störschwingungen als Kennzahlen für die Prozeßqualität direkt zu verwerten. Schwingungen führen jedoch nicht unbedingt zur Verminderung der Oberflächenqualität, wie in Abb. 9 gezeigt wird. Im ersten Fall führt eine Unwuchtschwingung zwischen Werkstück und Werkzeug zu einer Ungleichmäßigkeit in der Rillenabfolge. Im zweiten Fall wurden durch einen vorherigen Jointvorgang die Unwuchtschwingungen durch Nivellierung der Schneidenflugkreise kompensiert. Es wurde bei gleicher Relativschwingung ein „gutes" Bearbeitungsergebnis erzielt. Neben Unwuchtschwingungen wird der Schwingungssummenpegel in der Wirkstelle meist nur noch durch die Zahneingriffsfrequenz mit ihrem Vielfachen wesentlich verursacht. Abb. 10 zeigt, daß durch zusätzliche Überlagerungen von solchen Schwingungen lediglich das gesamte Oberflächenniveau verschoben

Abb. 9: Rillenungleichförmigkeiten vor und nach einem Jointvorgang eines zweischneidigen Werkzeugs ▼

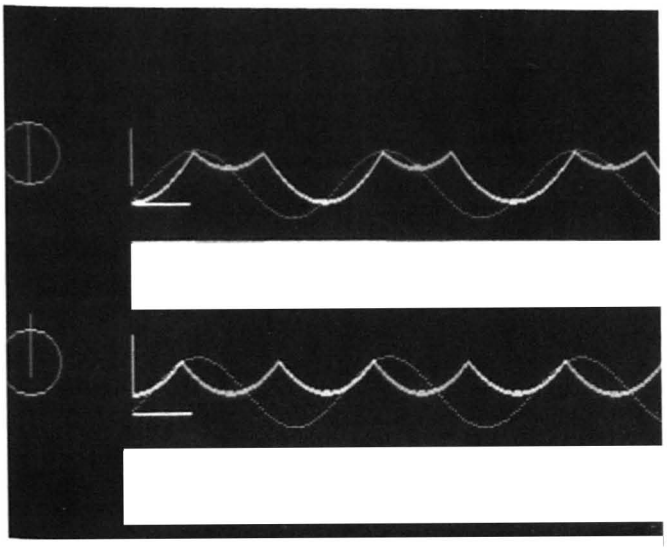
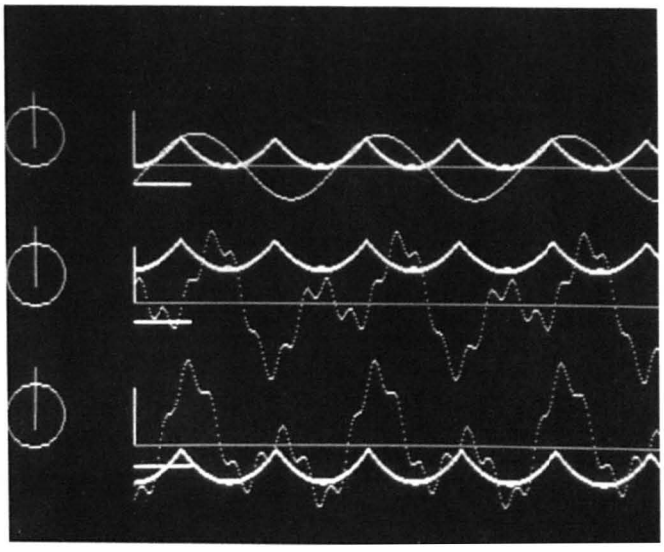


Abb. 10: Einfluß von harmonischen Schwingungen bezüglich der Zahneingriffsfrequenz auf die Oberflächenentstehung (Bildnachweis: DIN 4760, ansonsten IfW)



◀ HOB-KENNZIFFER **65**

wird. Diese Schwingungen führen demnach zu quasistatistischen Maßabweichungen und haben keinen Einfluß auf die Oberflächenqualität. In gleichem Maße ist zu folgern, daß solche Schwingungen ebenfalls keinen Einfluß auf das Standzeitverhalten besitzen, da die Spanbildung offensichtlich nicht verändert wird. Von Interesse sind nur diejenigen Schwingungen, die die Spanbildung verändern. Auch wenn sie einen vergleichsweise geringen Anteil an der Gesamtschwingungsenergie besitzen, können sie für die mangelnde Qualität der Oberfläche verantwortlich sein.

Beurteilung der Oberflächenqualität durch Prozeßsimulation

Zur Beurteilung der Ungleichförmigkeit der Rillenabfolge bei der Massivholzbearbeitung kann analog der subjektiven Beurteilung durch das menschliche Auge eine Ungleichförmigkeit in der Rillenfolge definiert werden. Der Rillenungleichförmigkeitsgrad δ_s wird dabei aus zwei Rillenlängen s_i und s_{i+1} berechnet:

$$\delta_s = \frac{2\,|s_{i+1} - s_i|}{s_i + s_{i+1}}$$

Ein Ungleichförmigkeitsgrad von 200 % wird nach dieser Formel erreicht, wenn eine der beiden Bearbeitungsrillen praktisch verschwindet. Für die drei Bearbeitungsfälle in Abb. 3 erhält man Ungleichförmigkeiten von beispielsweise ca. 19 %, 37 % bzw. 55 %. Eine Mittelungsbildung der Oberfläche ist für allgemeine Anwendungen denkbar, sollte jedoch berücksichtigen, daß gerade bei Schwebungen oder instationären Prozessen lokale Bereiche separat betrachtet werden sollten.

Mit der vorliegenden Kennzahl können komplexe Schwingungsvorgänge bezüglich ihres Einflusses auf die Oberflächenentstehung beurteilt werden. Das eigentlich zu verfolgende Ziel – die Optimierung des dynamischen Maschinenverhaltens – kann durch die Anwendung von Prozeßsimulationen schneller erreicht bzw. besser abgesichert werden. Weitere Ergebnisse werden demnächst in dieser Zeitschrift veröffentlicht.

Literatur

[1] Heisel, U.; Fischer, A.: Bessere Oberflächenqualität durch Optimierung des dynamischen Maschinenverhaltens, HOB 4 (1992)

[2] Estrich, J.: Maschinenwerkzeuge für die Holzbearbeitung, Verlag Moderne Industrie, Landsberg/Lech, 1992.

[3] DIN 4760: Begriffe für die Gestalt von Oberflächen.

HOB-KENNZIFFER **66**