

Ultraschallunterstützte Innenrundbearbeitung von sprödharten Werkstoffen durch Seitenquer- und Umfangsquerschleifen

Doctoral Thesis

Author(s):

Gull, Michael

Publication date:

2015

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010579313>

Rights / license:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

DISS. ETH Nr. 22752

**Ultraschallunterstützte Innenrundbearbeitung
von sprödharten Werkstoffen
durch Seitenquer- und Umfangsquerschleifen**

Abhandlung zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER WISSENSCHAFTEN DER ETH ZÜRICH

(Dr. sc. ETH Zürich)

vorgelegt von

MICHAEL GULL

Dipl. Ing. ETH Lausanne

geboren am 14.05.1978

von

Dübendorf, ZH

angenommen auf Antrag von

Prof. Dr.-Ing. Konrad Wegener, Referent (ETH Zürich)

Prof. Dr.-Ing. Pavel Hora, Korreferent (ETH Zürich)

2015

Abstract

Ultrasonic assisted grinding is the object of numerous scientific studies that have been conducted since the early 1970s. The integration of the ultrasonic vibration in the conventional manufacturing process is usually associated with a loss in cutting speed. Therefore, to date, the scientific applications of the ultrasonic assisted grinding will be held in a cutting speed range, which is deeper and is adapted approximately to the ultrasonic vibration of typically 20 kHz. This will not effect in an ultrasonic support, but rather in a superposition of two equivalent movements with respect to their cutting speeds. However, ultrasonic assisted processes are of interest both for research and industrial applications, which enable processing in the range of the conventional cutting speed and which superimpose an additional ultrasonic vibration.

The impact of an ultrasonic assisted grinding tool on the internal cylindrical grinding process is examined in this work, both side plunge and peripheral plunge grinding. The forces of the grinding process are described by different models. The basic model according to Tönshoff [TÖNS92] describes the conventional process forces by kinematic and physical aspects. The impact of the ultrasonic assistance is not included. In this work, a new terminology is presented which defines uniformly the impact direction of ultrasonic vibration. This terminology considers the ultrasonic vibration in relation to the cutting speed of the conventional process and the normal direction of the procedural characterizing surface. Thereby, the various ultrasonic assisted manufacturing processes can be allocated reliably to the different directions of the impact their associated mechanisms.

In this work, an experimental setup is developed and built in close cooperation with the industry. The ultrasonic system consists of a newly developed high-precision grinding spindle with contactless energy transfer. This spindle allows speeds up to $60'000 \text{ min}^{-1}$, corresponding to an increase of the values listed in literature up to 50 %. Thus, cutting speeds of 20 m/s can be reached with a tool diameter of 6 mm. Furthermore, oscillation amplitudes up to $\pm 6 \mu\text{m}$ can be realized at an operating frequency of 70 kHz. The ultrasonic vibration is applied via the tool in order to cover a wider range of grinding applications, workpieces and their materials. With the workpiece-side excitation, the vibration excitation has to be designed for the resonant frequency of the workpiece and is primarily dependent upon the Young's modulus, density and geometry form. The basic model according to Tönshoff [TÖNS92] can now be extended based on experimental results, the distinction in brittle and ductile removal after Bifano [BIFA91], as shown in Table I:

Table I: Extension of the basic model according to Tönshoff [TÖNS92] for brittle and ductile removal.

material removal	
brittle	ductile
$F'_n = c_{wp} \cdot \left(\frac{1}{q}\right)^{e_1} \cdot a_e^{e_2} \cdot d_{eq}^{e_3}$	$F'_n = c_{wp} \cdot c_{gw} \cdot \left(\frac{1}{q}\right)^{e_1} \cdot a_e^{e_2} \cdot d_{eq}^{e_3}$

with:

- F'_n : specific normal process force
- c_{wp} : constant for the workpiece (physical part)
- c_{gw} : constant for the grinding wheel (physical part)
- q : speed ratio (kinematic part)
- a_e : depth of cut (kinematic part)
- d_{eq} : equivalent diameter (kinematic part)
- e_1, e_2, e_3 : parameters for weighting (exponents)

In a next step, the model of Tönshoff [TÖNS92] can be extended so that the influence of the ultrasonic vibration is considered. The findings reveal the causes of the measured force reduction as described below and shown schematically in Table II:

- The grinding force can be described directly as a function of the ultrasonic amplitude at brittle material removal and an impact direction normal to the machined surface. The ultrasonic vibration has no effect on the measured process force at an impact direction tangential to the machined surface.
- The ultrasonic vibration can be defined as function of the ultrasonic vibration and the workpiece constant at ductile material removal and an impact direction tangential to the machined surface. An influence of the ultrasonic vibration on the process forces at an impact direction normal to the machined surface can be observed, but no consistent image of the force reduction can be drawn.

Table II: Schematic representation of the process force reduction due to the ultrasonic assistance, depending on the impact direction (normal/tangential) and the material removal (brittle/ductile).

material removal \ impact direction	brittle	ductile
normal	+	(+)
tangential	-	+

with:

- + : force reduction quantitatively detected
- (+) : force reduction can be observed, but not quantitatively detectable
- - : no force reduction detectable

The observed force reduction can be used in reverse to increase the feed rate. The material removal rate and the productivity of machining are increased at the same impact forces on the workpiece and thus the same elastic induced geometric deviations. An increase in productivity of about 200 % is proven in this work experimentally. Assuming that this underlying process force to this increase in productivity further increases linearly with increasing feed rate, productivity gains are theoretically possible up to 350 %. Furthermore, a reduction of the macroscopic tool wear with ultrasonic assistance of up to 20 % is achieved compared to conventional processing.

The surface quality with ultrasonic assistance is improved to 20–30 % compared to the conventional process. The surface roughness R_a of the pure pendulum motion of $1.35 \mu\text{m}$ is reduced to $0.83 \mu\text{m}$ through a combination of a pendulum motion of the machine tool and ultrasonic assistance, representing a reduction of 39 %, respectively. The dependence of the surface roughness of the workpieces on the chosen variant of the internal peripheral plunge grinding process is shown in Figure I.

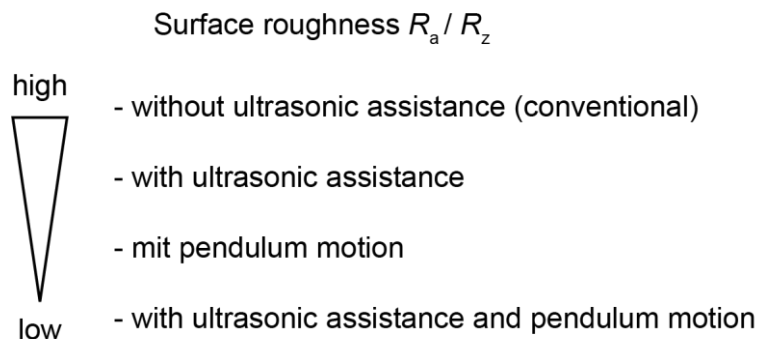


Figure I: Surface roughness for different variants of the internal peripheral plunge grinding process.

Zusammenfassung

Ultraschallunterstütztes Schleifen ist Gegenstand zahlreicher wissenschaftlicher Studien, die seit den frühen 1970er-Jahren durchgeführt werden. Die Integration der Ultraschallschwingung in das konventionelle Fertigungsverfahren ist meist mit Einbußen bei der Schnittgeschwindigkeit verbunden. Deshalb finden bis heute die wissenschaftlichen Anwendungen des ultraschallunterstützten Schleifens in einem Schnittgeschwindigkeitsbereich statt, der tiefer liegt bzw. in etwa der Ultraschallschwingung von typischerweise 20 kHz angepasst wird. Dadurch kann nicht von einer Ultraschallunterstützung gesprochen werden, sondern vielmehr von einer Überlagerung zweier gleichwertiger Bewegungen bezüglich der Schnittgeschwindigkeiten. Von Interesse sowohl für Forschung als auch Industrie sind jedoch ultraschallunterstützte Prozesse, welche dieselben Schnittgeschwindigkeiten ermöglichen wie die konventionelle Bearbeitung und denen eine zusätzliche Ultraschallschwingung überlagert wird.

Der Einfluss eines ultraschallunterstützten Schleifwerkzeugs auf den Schleifprozess wird in dieser Arbeit anhand des Innenrundschleifens untersucht, sowohl beim Seitenquer- als auch beim Umfangsquerschleifen. Die Prozesskräfte beim Schleifen lassen sich durch verschiedene Modelle beschreiben. Das Grundmodell nach Tönshoff [TÖNS92] beschreibt die konventionellen Prozesskräfte nach kinematischen und physikalischen Aspekten. Der Einfluss der Ultraschallschwingung ist darin nicht enthalten. Mit der in dieser Arbeit vorgestellten Neuauslegung der Terminologie kann die Wirkrichtung der Ultraschallschwingung einheitlich definiert werden. Diese beschreibt die Ultraschallschwingung relativ zur Schnittgeschwindigkeit des konventionellen Prozesses sowie zur Normalenrichtung der bearbeiteten bzw. verfahrenskennzeichnenden Oberfläche. Damit können die verschiedenen ultraschallunterstützten Fertigungsverfahren zuverlässig den verschiedenen Wirkrichtungen und deren damit verbundenen Wirkmechanismen zugeordnet werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Versuchsaufbau in enger Zusammenarbeit mit der Industrie entwickelt und aufgebaut. Das Ultraschallsystem besteht aus einer neu entwickelten Hochpräzisionsschleifspindel mit berührungsloser Energieübertragung, womit Drehzahlen von bis zu $60'000 \text{ min}^{-1}$ möglich sind, was einer Steigerung der in der Literatur aufgeführten Werte um bis zu 50 % entspricht. Damit werden mit einem Werkzeugdurchmesser von 6 mm Schnittgeschwindigkeiten von 20 m/s erreicht. Weiter lassen sich mit diesem System Schwingungsamplituden von bis zu $\pm 6 \text{ }\mu\text{m}$ bei einer Arbeitsfrequenz von 70 kHz realisieren. Die Ultraschallschwingung wird über das Werkzeug eingebracht, weil damit ein breiteres Anwendungsspektrum des Schleifprozesses auf verschiedene Bauteile abgedeckt werden kann. Bei der werkstückseitigen Anregung muss die Schwingungsanregung auf die Eigenfrequenz des anzuregenden Bauteils ausgelegt werden und hängt primär von dessen Elastizitätsmodul, Dichte und Geometrie ab. Basierend auf den experimentellen Ergebnissen, den Modellen und der Unterscheidung in spröden und duktilen Materialabtrag nach Bifano [BIFA91] kann das Modell von Tönshoff [TÖNS92] nun erweitert werden, wie in Tabelle I dargestellt:

Tabelle I: Erweiterung des Grundmodells von Tönshoff [TÖNS92] für spröden und duktilen Materialabtrag.

Materialabtrag	
spröd	duktil
$F'_n = c_{wp} \cdot \left(\frac{1}{q}\right)^{e_1} \cdot a_e^{e_2} \cdot d_{eq}^{e_3}$	$F'_n = c_{wp} \cdot c_{gw} \cdot \left(\frac{1}{q}\right)^{e_1} \cdot a_e^{e_2} \cdot d_{eq}^{e_3}$

mit:

- F'_n : bezogene Schleifnormalkraft
- c_{wp} : Konstante für Werkstück (physikalischer Teil)
- c_{gw} : Konstante für Werkzeug (physikalischer Teil)
- q : Geschwindigkeitsquotient (kinematischer Teil)
- a_e : Zustellung (kinematischer Teil)
- d_{eq} : äquivalenter Schleifscheibendurchmesser (kinematischer Teil)
- e_1, e_2, e_3 : Parameter zur Gewichtung

In einem nächsten Schritt kann das Modell von Tönshoff [TÖNS92] so erweitert werden, dass der Einfluss der Ultraschallschwingung berücksichtigt wird. Die gewonnenen Erkenntnisse offenbaren die Ursachen für die gemessene Kraftreduzierung, wie nachfolgend erläutert und in Tabelle II schematisch dargestellt:

- Bei sprödem Materialabtrag und mit einer Wirkrichtung normal zur bearbeiteten Oberfläche lässt sich die Kraft direkt als Funktion der Ultraschallamplitude beschreiben. Mit einer Wirkrichtung tangential zur Oberfläche bleibt der Ultraschall ohne Wirkung auf die gemessene Prozesskraft.
- Beim duktilen Materialabtrag lässt sich die Ultraschallschwingung bei einer Wirkrichtung tangential zur Oberfläche in Abhängigkeit der Ultraschallamplitude und der Werkzeugkonstante beschreiben. Bei einer Wirkrichtung normal zur Oberfläche ist ein Einfluss der Ultraschallschwingung auf die Prozesskraft erkennbar, jedoch kann kein konsistentes Bild der Kraftreduktion gezeichnet werden.

Tabelle II: Schematische Darstellung der Kraftreduktion durch die Ultraschallunterstützung in Abhängigkeit der Wirkrichtung (normal/tangential) und des Materialabtrags (spröd/duktil).

Wirkrichtung \ Materialabtrag	spröd	duktil
	normal	+
tangential	-	+

mit:

- + : Kraftreduktion quantitativ nachweisbar
- (+) : Kraftreduktion zu beobachten, jedoch nicht quantitativ nachweisbar
- - : keine Kraftreduktion nachweisbar

Die ermittelte Kraftreduktion kann im Umkehrschluss zur Vorschuberrhöhung eingesetzt werden. Damit wird bei gleichen Bearbeitungskräften auf das Werkstück und damit gleichen elastisch bedingten Geometrieabweichungen das Zeitspanvolumen erhöht und die Produktivität der Bearbeitung gesteigert. Die im Rahmen dieser Arbeit experimentell nachgewiesene Produktivitätssteigerung beträgt etwa 200 %. Unter der Annahme, dass die dieser Produktivitätssteigerung zugrunde liegende Prozesskraft weiterhin linear mit zunehmender Vorschubgeschwindigkeit ansteigt, sind Produktivitätssteigerungen theoretisch von bis zu 350 % möglich. Weiter kann gezeigt werden, dass mit der Ultraschallunterstützung eine Reduktion des makroskopischen Werkzeugverschleisses gegenüber der konventionellen Bearbeitung von bis zu 20 % erreicht wird.

Die Oberflächenqualität durch die Ultraschallunterstützung verbessert sich gegenüber dem konventionellen Prozess um 20–30 %. Durch eine Kombination einer Pendelbewegung der Werkzeugmaschine und Ultraschallunterstützung wird die Oberflächenrauheit R_a gegenüber der reinen Pendelbewegung von $1.35 \mu\text{m}$ auf $0.83 \mu\text{m}$ reduziert, was einer Reduktion von 39 % entspricht. Die Abhängigkeit der Oberflächenrauigkeit der Werkstücke von der gewählten Variante des Innenrund-Umfangsquerschleifens ist in Abbildung I dargestellt.

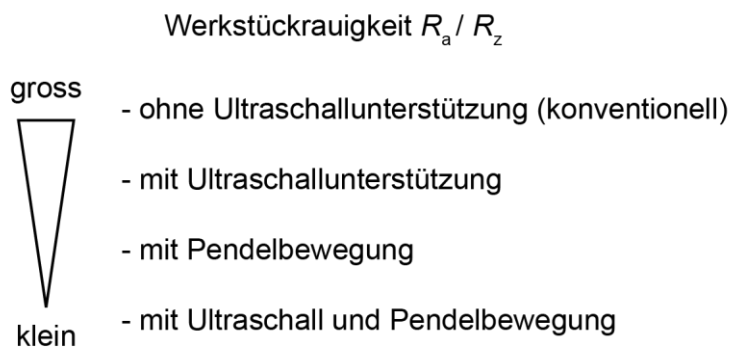


Abbildung I: Oberflächenrauigkeit für verschiedene Varianten des Innenrund-Umfangsquerschleifens.