

Abschlussbericht

Zum InnoNet Projekt

„Ultraschallunterstütztes Superfinishing von zylindrischen Präzisionsbauteilen“

Kurzbezeichnung: Sofi

Förderkennzeichen: 16 IN 0540

Projektlaufzeit: 11/2007 – 07/2010

Vorgelegt von:

Prof. Dr.-Ing. Taghi Tawakoli

Hochschule Furtwangen University

Institut für Angewandte Forschung IAF

Kompetenzzentrum für Schleiftechnologie und Feinstbearbeitung

Jakob-Kienzle-Straße 17

78054 Villingen-Schwenningen



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Technologie



0

VDI | VDE | IT

Verbundpartner

Hochschule Furtwangen

Prof. Dr.-Ing. Taghi Tawakoli
Kompetenzzentrum für Schleiftechnologie
und Feinstbearbeitung (KSF)
Jakob-Kienzle-Straße 17
78054 Villingen-Schwenningen



Fraunhofer IPT

Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher
Lehrstuhl Werkzeugmaschinen
Steinbachstraße 17
52074 Aachen



Fraunhofer Institut
Produktionstechnologie

Atlantic GmbH Bonn

Dipl.-Ing. Lars Junghanns
Gartenstraße 7-17
53229 Bonn



Clemens GbR

Dipl.-Math. Jürgen Clemens
Feldstraße 13
21680 Stade

Clemens GbR – Entwicklung und
Programmierung
mathematischer Methoden

Daimler AG

Dipl.-Ing. Jens Böhm
Frau Dipl.-Phys. Dorothea Widmann
H150, PWT / VEM
70546 Stuttgart

DAIMLER

Güntert Präzisionstechnik GmbH & Co. KG

Dipl.-Wirt.-Ing. (FH) Georg Güntert
Max-Planck-Straße 17
78052 Villingen-Schwenningen



HAKOS Präzisionswerkzeuge Hakenjos GmbH

Frau Birgit Hakenjos-Schlenker, Herr Werner Hakenjos
Eichendorffstraße 37
78054 Villingen-Schwenningen



HERMES Schleifmittel GmbH & Co. KG

Dr. Jan Petersen
Luruper Hauptstraße 106 – 122
22547 Hamburg



Supfina Grieshaber GmbH & Co. KG

Herr Dipl.-Ing. (FH) Oliver Hildebrandt
Schmelzegrün 7
77709 Wolfach



Weber Ultrasonics GmbH

Dr.-Ing. Thomas Dreyer
Im Hinteracker 7
76307 Karlsbad-Ittersbach



Inhaltverzeichnis

1	Zusammenfassung	5
2	Aufgabenstellung.....	6
3	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	7
4	Planung und Ablauf des Vorhabens	9
5	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	11
5.1	Superfinish-Prozess.....	11
5.2	Ultraschalltechnik.....	12
5.2.1	Potentiale des ultraschallunterstützten Superfinishings	13
6	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	14
7	Erzielte Ergebnisse	15
7.1	Durchführung der technologischen Untersuchungen.....	15
7.2	Systematische Untersuchungen zum konventionellen Superfinish	17
7.2.1	Taguchi-Methode.....	17
7.2.2	Konventionelles Superfinishing mit Band	18
7.2.3	Konventionelles Superfinishing mit Stein.....	23
7.2.4	Vergleich des Superfinishing-Prozesses mit Band und Stein.....	30
7.2.5	Untersuchung des Verschleißes von Finish-Steinen	36
7.2.6	Zusammenfassung zum konventionellen Finishing	38
7.3	Ultraschallunterstütztes Finishing	38
7.3.1	Konzepte.....	38
7.3.2	Installation und Inbetriebnahme des Prüfstandes.....	39
7.3.3	Untersuchungen zum ultraschallunterstützten Superfinishing mit Band.....	40
7.3.4	Abtragsverhalten an Werkstücken.....	44

7.3.5	Prozesstechnologische Untersuchungen zum Trockenfinish	46
7.3.6	Untersuchungen zum ultraschallunterstützten Superfinishing mit Stein	48
7.4	Prozesstechnologische Untersuchungen mit dem Prototypen	50
7.4.1	Versuchsbedingungen und Ergebnisse mit Finishingband	51
7.4.2	Versuchsbedingungen mit Finishingstein	57
7.4.3	Optimierung, zukünftige Anpassungsarbeiten	57
8	Voraussichtlicher Nutzen	58
9	Erfolge und geplante Veröffentlichungen.....	59
	Literatur.....	60
	Danksagung.....	61

1 Zusammenfassung

Der steigende Bedarf an definierten Strukturen, feineren Oberflächen und wettbewerbsfähigen Fertigungsprozessen erfordert auch die Weiterentwicklung des Superfinishing. Das Superfinishverfahren wird in der Industrie als abschließende Bearbeitungsmethode von Werkstücken eingesetzt. Dadurch lässt sich insbesondere eine sehr genaue zylindrische Geometrie erzeugen. Durch die kurzhubige Bewegung der Körner bei der Superfinish-Bearbeitung werden die Spitzen der aufgerauten Struktur (erzeugt durch Drehen und Schleifen) abgetragen, der Traganteil erhöht und die Oberflächenrauheit verringert. Da das Superfinishverfahren nicht umfassend untersucht wurde, sollte das Verbundprojekt Probleme, wie den relativ kleinen Abtrag und die längere Bearbeitungszeit optimieren.

Die neuesten Forschungen in der Zerspanungstechnik zeigen die Potenziale von ultraschallunterstützten Prozessen für den Spanbildungsprozess. Auch die Erfahrungen des Kompetenzzentrums für Schleiftechnologie und Feinstbearbeitung (KSF) zum Abrichten und Schleifen mit Ultraschallunterstützung zeigen die positiven Auswirkungen des Ultraschalls, wie höhere Abtragsraten, geringeren Werkzeugverschleiß, geringere Kraft, usw.

Das beantragte Projekt fokussierte erstmalig auf der Erweiterung des industriell eingesetzten Superfinishingprozesses mit einer Ultraschallschwingung zu einem Hybridprozess mit dem Ziel, höhere Abtragsraten bei niedrigerem Werkzeugverschleiß am Beispiel der Bearbeitung zylindrischer Präzisionskomponenten zu realisieren. Hierzu wurde im beantragten Verbundprojekt neben ausgiebigen prozesstechnologischen Versuchen zum Prozess des Superfinishing mit und ohne Ultraschall unter anderem die ultraschallerzeugende Aktorik gemeinschaftlich so entwickelt, dass diese sich für die Integration in eine kompakte, modular einsetzbare Aufbaueinheit eignet und die prozesseitig notwendigen Ultraschallwellen realisiert. Die im Projekt entwickelte kompakte Einheit zum ultraschallunterstützten Superfinishing von zylindrischen Präzisionskomponenten wurde vom Fraunhofer IPT Aachen konstruiert. Neben der Anwendung im Bereich der Stahlwerkstoffe kann die Einheit auch für den Einsatz zur Oberflächenveredelung sprödharter, zylindrischer Komponenten aus Keramik und Hartmetall verwendet werden. So deckt die Einheit die ganze Breite zylindrischer Präzisionsbauteile ab, die in ihrer industriellen Vielzahl ein erhebliches Volumensegment darstellen.

Im InnoNet-Projekt 16IN0540 „SoFi“ wurde in einer Verbundstruktur aus zwei Forschungseinrichtungen und 8 Industriepartnern ein neues innovatives Konzept zur Feinstbearbeitung von funktionalen Oberflächen bis zum Prototypenstadium entwickelt. Dabei wurde das Verfahren des Superfinishing, auch Kurzhubhonen genannt, durch Applikation einer Ultraschallschwingung erweitert, der Einfluss der Eingangsparameter auf

die Prozessgrößen genauer untersucht und eine höhere Abtragsrate mit Ultraschallunterstützung erreicht.

2 Aufgabenstellung

Im Rahmen des Projektes wurde eine Erweiterung des industriell eingesetzten Superfinishing-Prozesses mit einer Ultraschallschwingung zu einem Hybridprozess entwickelt, mit dem Ziel, höhere Abtragsraten bei niedrigerem Werkzeugverschleiß am Beispiel zylindrischer Präzisionskomponenten zu realisieren. Zur Umsetzung des ultraschallunterstützten Superfinishing sieht der ganzheitliche Projektansatz neben konstruktiven Neuentwicklungen einer den Prozess realisierenden Maschineneinheit auch die grundlegende Optimierung und Anpassung von Maschinenelementen zur Erzeugung von Ultraschallwellen vor. Dabei wurden die optimierten Komponenten unmittelbar in Prüfstände für prozesstechnologische Untersuchungen überführt und so schon während des Projektverlaufs unter realen Bedingungen getestet. Die prozesstechnologischen Untersuchungen dienten der projektbegleitenden Analyse von Einflussfaktoren, die im Prozess hinsichtlich der Spanbildungsmechanismen und Oberflächenentstehung auftreten. So fließen schon während des Projektzeitlaufs kontinuierlich wichtige prozesstechnologische Erkenntnisse in den Konstruktionsprozess ein. Den industriellen Verbundpartnern stehen damit nach Abschluss des Projekts neben einer seriennahen Einheit zum ultraschallunterstützten Superfinishing auch die Information über optimierte prozesstechnische Parameter zur Verfügung, die es den Anwendern erlauben, den Prozess zielgerichtet einzustellen und die Technologie zeitnaher zu vermarkten.

Die Teilziele des Projekts waren:

- die Umsetzung ultraschallunterstützter Superfinish-Einheiten für prozesstechnologische Untersuchungen,
- die anforderungsgerechte Auslegung der ultraschallerzeugenden Systeme bestehend aus Schallwandler, so genannten Boostern und Werkzeughaltern,
- die Entwicklung neuartiger ultraschallgerechter Schleifwerkzeuge (Bänder und Steine),
- die Entwicklung praxistauglicher, ultraschallunterstützter Superfinish-Einheiten mit kompakter Integration aller Systemkomponenten im Supfina LCM 2000
- systematische prozesstechnologische Untersuchungen zum Superfinishing mit und ohne Ultraschall.

3 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Um das Hybridverfahren des ultraschallunterstützten Superfinishing realisieren zu können, wurde das konventionelle Finishverfahren genauer betrachtet, da es in dieser Art noch nicht untersucht worden war. Das Konsortium ging somit eine große komplexe Thematik an und baute dabei auf den Erfahrungen der Partner in der Oberflächenbearbeitung, in der Ultraschallbearbeitung sowie der Werkzeugherstellung auf. Die Aufgaben im Vorhaben umfassten die Teilgebiete Finishing-Prozess, Vermessung der Oberflächen, Werkzeugverschleiß, Kräfte und Analyse der Oberflächen unter dem Mikroskop.

In einem starken Netzwerk mit renommierten Maschinensystem- und Werkzeugherstellern sowie Anwendern und zwei Forschungsinstituten mit Erfahrungen auf den Gebieten der Maschinen- und Maschinensystementwicklung sowie in der Feinstbearbeitung wurde eine Superfinishing-Technologie mit Ultraschallunterstützung entwickelt. Dabei wurden Prozesse, neue Werkzeuge und eine Ultraschalleinheit weiterentwickelt, optimiert und als neues hybrides Modul in eine Maschine integriert. Hierfür wurden die Stärken und das Know-how der Maschinenhersteller, Ultraschallsystemhersteller und Werkzeughersteller zusammengefügt und gemeinsam die notwendigen Entwicklungen vorangetrieben.

Die Wünsche und Erwartungen der Anwender im Netzwerk für die Fertigung von Bauteilen aus unterschiedlichen Werkstoffen mit definierten Oberflächeneigenschaften sollten durch systematische Untersuchungen des ultraschallunterstützten Zerspanungsprozesses erfüllt werden. Auch bei den Industriepartnern wurde auf diese Aufgaben- und Wissensverteilung Wert gelegt, nicht nur um die gestellte Aufgabe zu lösen, sondern auch um eine schnelle Verwertung der Ergebnisse und damit eine Platzierung neuer Produkte auf dem Markt zu garantieren. Dabei bestand das Konsortium aus Partnern des Anlagenbaus, Werkzeughersteller, Mathematiker und Anwender.

Sowohl der Kraftaufnehmer als auch der Prototyp der Ultraschalleinheit sollte in der Finishing-Anlage, die von der Fa. Supfina zur Verfügung gestellt wurde, integriert werden. Deshalb fand sowohl bei der Konstruktion der Prototypen und Werkstückhalterung als auch bei den Bearbeitungsversuchen eine enge Zusammenarbeit zwischen den Partnern statt. Neben dem Labor zur Versuchsdurchführung stehen dem KSF Messtechnik wie z.B. ein Kraftaufnehmer der Fa. Kistler, ein Oberflächenmessgerät der Fa. Hommel-Etamic und ein Digital-Mikroskop der Fa. Keyence zur Verfügung. Die Firma Weber Ultrasonics stellte den Generator und Schallwandler bereit und arbeitete gemeinsam mit dem Fraunhofer IPT an der Konzeption und Entwicklung der Ultraschallschwingungskette als maßgeblichem

Baustein der kompakten ultraschallunterstützten Superfinisheinheit und der Prüfstände. Die Auslegung der Schwingungskette mittels mathematischer Methoden wurde in enger Zusammenarbeit mit Herrn Clemens durchgeführt. Die grundlegenden prozesstechnologischen Untersuchungen wurden maßgeblich durch die Hochschule Furtwangen in enger Zusammenarbeit mit den Verbundpartnern Atlantic, Hermes, Hakos und Güntert durchgeführt. Hermes und Atlantic entwickelten und optimierten interaktiv die benötigten Schleifmittel.

4 Planung und Ablauf des Vorhabens

Bis auf unvorhergesehene Schwierigkeiten bei der Herstellung des Prüfstandes und den Prototypen und die Integration in der Supfina LCM 2000 verlief das Vorhaben weitgehend problemlos. Die Ergebnisse konnten jeweils in den regelmäßig stattfindenden Partnertreffen präsentiert werden und stießen auf großes Interesse. Das Projekt war auf 3 Jahre ausgelegt. Die **Tabelle 1** zeigt die Hauptarbeitspakete und deren zeitlichen Verlauf. Die Hauptarbeitspakete beinhalteten die Erstellung einer detaillierten Anforderungsliste an den ultraschallunterstützten Superfinishing-Prozess und in einem weiteren Schritt wurden die Anforderungen an die Einzelkomponenten des Maschinensystems abgeleitet. In enger Zusammenarbeit zwischen den Verbundpartnern erfolgten dann die Analyse des konventionellen Superfinishings und die Konzeption und der Aufbau für prozesstechnologische Untersuchungen notwendiger Prüfstände zum ultraschallunterstützten Superfinishing mit Stein und Band.

Tabelle 1: Hauptarbeitspakete und zeitlicher Ablauf

		1. Jahr				2. Jahr				3. Jahr				
1	Erstellung der Anforderungsliste	■	■											
2	Durchführung der systematischer Untersuchungen zum konventionellen Superfinishing	■	■	■	■									
3	Prüfstandskonzeption zum ultraschallunterstützten Superfinishing mit Band und Stein		■	■	■									
4	Prozesstechnologische Voruntersuchungen					■	■	■	■	■				
5	Konzeption eines Geräteprototypen fürs ultraschallunterstützte Superfinishing					■	■	■	■	■	■			
6	Qualifizierung des seriennahen Geräteprototypen										■	■	■	■
7	Projektkoordination	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■

In gleicher intensiver Abstimmung zwischen Prozesstechnologie und Entwicklung erfolgte im zweiten Projektjahr simultan die Untersuchung des ultraschallunterstützten Superfinishing und die Konstruktion der ultraschallunterstützten Superfinishingeinheit, bevor im dritten Projektjahr vornehmlich die Erprobung, Qualifizierung und Optimierung der entwickelten Einheit auf einem Maschinensystem erfolgte.

Die Zuwendungsempfänger hatten für den Ablauf des Projektes folgende Aufgaben:

Hochschule Furtwangen: Ausgiebige prozesstechnologische Untersuchungen zum Superfinishing mit und ohne Ultraschall mit Band und mit Stein; Integration einer Superfinishing-Einheit in eine Schleifmaschine, prozesstechnologische Qualifizierung der kompakten ultraschallunterstützten Superfinishingeinheit;

Fraunhofer IPT: Konzeption von Prüfständen sowie eines serienreifen Systemprototypen; Auslegung von Schallwandler, Sonotrode und Werkzeug; Konstruktion und Montage von Prüfständen; Konstruktion, Aufbau, Vermessung und Qualifizierung des finalen Geräteprototyps;

Aufgrund von Lieferverzögerungen der Teile für den Prototypen konnte der geplante Aufbau und Versuchsdurchlauf der Einheit erst später in Betrieb genommen werden, die Versuche aber konnten trotzdem mit dem Prototypen plangemäß durchgeführt werden.

Aufgrund der Schwierigkeiten bei der Verwendung von konventionellen Finish-Steinen mit Ultraschall konnten keine Versuche durchgeführt werden. Beim den Versuchen mit Ultraschall löste sich der Stein aus seiner Fassung oder brach aus, da die Dämpfung durch den Stein sehr groß ist. Hier gilt es jetzt zusammen mit dem IPT Aachen ein neues System zu entwickeln. Die Überlegungen gehen dabei in Richtung der Verwendung von metallisch gebundenen CBN-Steinen. Bei der Konzeption muss beachtet werden, dass die Halterung aber gleichzeitig Teil der Sonotrode ist und jedes Masseteil die Schwingungskette beeinflusst. Das Ziel für die Verwendung des Steines wird weiterhin verfolgt.

5 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

5.1 Superfinish-Prozess

Der Superfinish-Prozess zählt nach DIN 8589 T.14 zur Familie des Spanens mit geometrisch unbestimmter Schneide, auch Kurzhubhonen genannt (**Bild 1**) [Den 89]. Eine Besonderheit dieses Verfahrens ist, dass durch sich überlagernde Bewegungen von Werkzeug und Werkstück ein Kreuzschliffmuster erzeugt wird, mit dem zum einen besonders ebene oder sphärisch exakte Oberflächen geschaffen, zum anderen hervorragende tribologische Eigenschaften erzielt werden können [Tön 87, Kön 86]. Die erzielte Oberfläche entspricht den beim Honen und Läppen erreichbaren Werten. Die Grenzstruktur mit den größten Rautiefen bleibt erhalten, so dass eine optisch glänzende Fläche (in der Vergrößerung) Riefenstrukturen und damit die häufig gewünschten Schmiertaschen aufweist. Mit dem Superfinishgerät können nur Rauigkeitsspitzen abgetragen werden, dies bedeutet, dass am Werkstück keine Geometrieänderungen erfolgen. Als Werkzeug wird heute üblicherweise für rotationssymmetrische bzw. zylindrische Werkstücke ein abrasives Band eingesetzt, welches mittels passgenauer Schalen unterschiedlicher Härte mit $10 - 40 \text{ N/cm}^2$ auf die zu bearbeitende Werkstückoberfläche gepresst wird. Zur Bearbeitung von Planen oder sphärischen Flächen, Kugeln, Walzkörpern sowie Außen- und Innenringen von Lagern werden nach wie vor Steine oder Topfscheiben als Werkzeuge eingesetzt [Rud 04].

Das Superfinish-Verfahren kommt als abschließender Prozess in der Oberflächenfeinstbearbeitung bei den verschiedensten Werkstücken zum Einsatz. **Bild 2** zeigt einige Beispielbauteile für die Superfinishbearbeitung wie Kurbelwellen, Nockenwellen, Kolbenbolzen, Kipphebelwellen, Ausgleichswellen und Dichtflächen des Einspritzsystems, Getriebewellen (Lagerstellen), Stirn- und Sonnenräder.

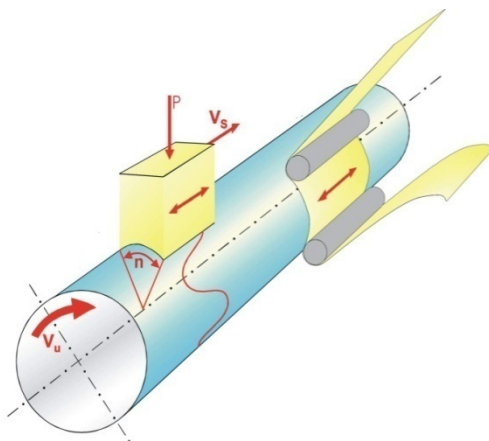


Bild 1: Der Superfinish-Prozess [Rud 04]

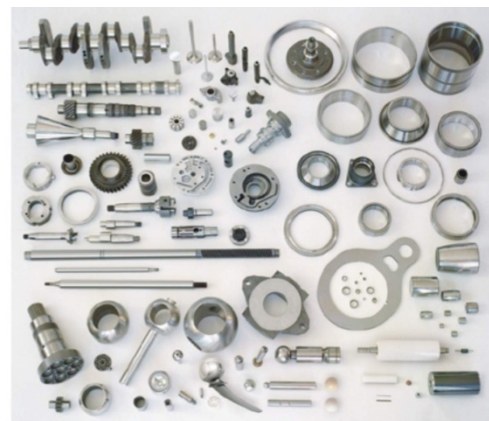


Bild 2: Bauteile nach dem Superfinish

Obwohl das Superfinishing in seiner bisherigen Form breite Anwendung gefunden und sich etabliert hat [Bru 06, Fro 92, Jou 05, Wan 04], konnten vor allem nachfolgend genannte Hauptprobleme durch wissenschaftliche Untersuchungen isoliert werden:

- sehr kleine Abtragraten
- meist Bedarf an einem zusätzlichen Bearbeitungsschritt vor dem Superfinishing in der Produktionskette, um das abzutragende Ausmaß auf max. 5 μm zu reduzieren
- fehlende Druckeigenspannungen an der Werkstückoberfläche nach dem Prozess
- hoher Werkzeugverschleiß
- schnelles Zusetzen des Superfinish-Steines
- begrenzte bzw. keine Möglichkeit zur Erzeugung neuer Oberflächenstrukturen
- Schwierigkeiten beim Superfinishing von sprödharten Werkstoffen

5.2 Ultraschalltechnik

Bei der dem konventionellen Prozess zu überlagernden Ultraschallschwingung werden Amplituden zwischen 1 μm und 10 μm bei einer Frequenz von ca. 20.000 Hz realisiert. Die Frequenz ist dabei so gewählt, dass sie den Hörbereich des Menschen gerade übersteigt und somit keine negativen Einflüsse auf Mensch und Umwelt hat. Bei Schwingungen derart hoher Frequenzen verhalten sich die angeregten Massen nicht mehr wie starre Körper. Vielmehr setzen sich die Schwingungen als akustische Wellen innerhalb der angeregten Bauteile fort. Die dabei entstehenden Festkörperverformungen werden in ultraschallunterstützten Fertigungsverfahren prozesstechnologisch genutzt, d. h. beim Superfinishing in die Prozesszone überführt.

Entscheidend für die Wirksamkeit der Ultraschallwelle für den Prozess ist hierbei die gezielte Einstellung der Schwingungsform der Schall durchflossenen Strukturbauteile. Letztere sind üblicherweise der Schallwandler, der Booster und das Werkzeug. Der Schallwandler hat dabei die Aufgabe, elektrische Wechselspannung in die gewünschte mechanische Schallwelle zu transformieren. Dazu nutzt er den umgekehrten piezoelektrischen Effekt, d. h. eine Piezokeramik dehnt und staucht sich in Abhängigkeit einer anliegenden elektrischen Wechselspannung. Eine mit diesem Prinzip erzeugte Schallamplitude ist oft sehr klein im Vergleich zu den prozesstechnologisch erwünschten Amplituden. Über eine Querschnittsverengung eines an den Schallwandler fixierten Übergangsstücks (dem sog. Booster) kann die Schwingungsamplitude stark vergrößert werden. Ein daran angeflanshtes Werkzeug überträgt letztlich die Schwingungsamplituden in die Prozesszone (**Bild 3**, Mitte und rechts).

Dabei werden die genannten Komponenten aus energetischen Gründen geometrisch so gestaltet, dass sie bei Anregung durch den Schallwandler in Resonanz schwingen.

Prozessabhängig kann darüber hinaus durch die Gestalt ein Schwingungsmodus eingestellt werden, der in der Prozesszone entweder rein axiale Auslenkungen oder hauptsächlich radiale Schwingungsamplituden realisiert. Die anspruchsvolle Aufgabe der Auslegung prozessunterstützender Geometrien wird im Projekt in der Konstruktionsphase mittels der Methode der Finiten Elemente (FEM) vom Fraunhofer IPT durchgeführt. **Bild 3** (links) zeigt ein Beispiel für die Vorhersage von Schwingungsmoden einer ausgewählten Werkzeuggeometrie. In der oberen Abbildung reagiert das Werkzeug mit einer rein axialen Auslenkung, während das gleiche Werkzeug bei einer anderen Frequenz mit über den Umfang unsymmetrischen radialen Verformungen antwortet.

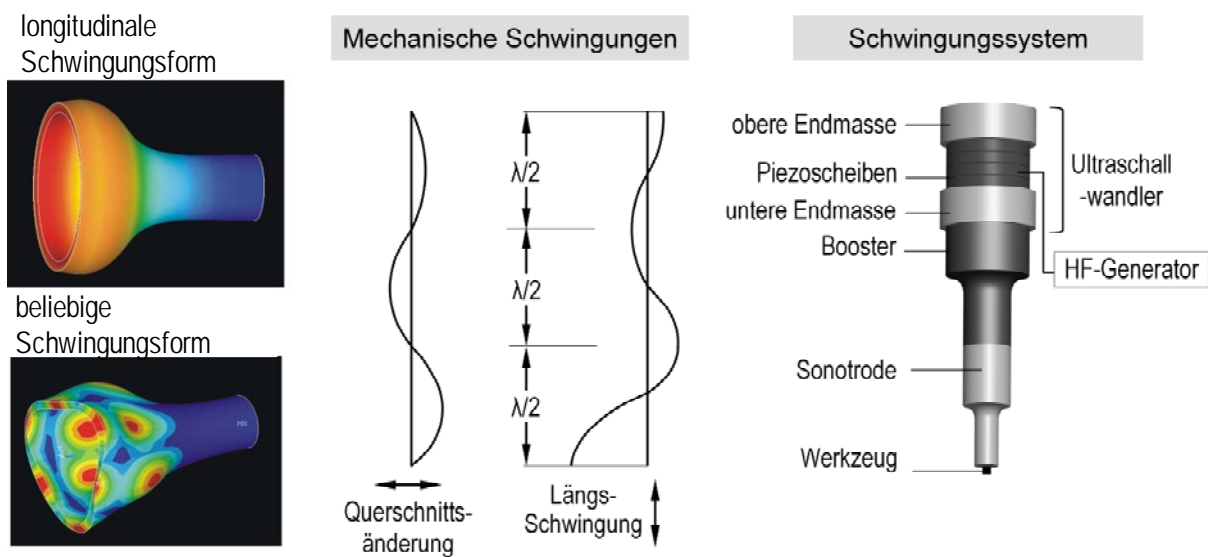


Bild 3: Schwingungskette – Ausbildung einer stehenden Ultraschallwelle und ausgewählte Schwingungsformen eingesetzter Werkzeuge

Im geplanten Projekt sollen in gleicher Weise erstmals Ultraschallschwingungen in den Prozess des Superfinishing eingebracht werden. Die Auslegung und Realisierung der Ultraschallkette derart, dass diese sich für die Integration in eine bestehende Superfinishingmaschine eignet und die gewünschte Verformung am Werkzeug erzeugt, stellt eine große Herausforderung dar, die nur gemeinschaftlich im Projektverbund gelöst werden kann.

5.2.1 Potentiale des ultraschallunterstützten Superfinishings

Bei ultraschallunterstützten Bearbeitungsprozessen stehen die Auswirkungen der Schwingungen auf die Kontaktvorgänge im Vordergrund des Interesses. Die hochfrequente Radial- bzw. Longitudinalschwingung des Werkzeugs verändert Reibvorgänge und verursacht somit hochfrequente Mikrostoßvorgänge zwischen dem Werkzeug und dem Untergrund [Dau 04]. Der entscheidende Vorteil der überlagerten Ultraschallenergie liegt dabei im Vergleich zu ähnlichen Fertigungsverfahren nachweislich in einer Reduzierung der

wirkenden Bearbeitungskräfte und einer Verbesserung der Spülwirkung in der Prozesszone [Sch 02]. Diese ermöglichen beispielsweise beim Schleifen die Realisierung höherer Vorschubgeschwindigkeiten und damit die Erzielung größerer Zeitspannvolumina [Kap 99, Zha 99]. Außerdem erlauben sie aufgrund der reduzierten Materialschädigung im mikroskopischen und makroskopischen Bereich die Erzeugung wesentlich feinerer Strukturelemente [Tho 98]. Darüber hinaus stellen sich günstige tribologische Bedingungen ein, und die Zu- und Abfuhr des Kühlschmierstoffs wird verbessert [Lit 01]. Die folgenden Punkte zählen zu den wichtigsten Vorteilen des ultraschallunterstützten Superfinish-Prozesses:

- Durch die Reibungsreduzierung nehmen die Wärmeerzeugung und die Oberflächentemperatur ab.
- Eine höhere Materialabtragsrate wird ohne das Risiko einer thermischen Schädigung ermöglicht.
- Der Mikrostoß verursacht eine hohe Druckeigenspannung auf der Oberfläche des Teils und führt so zur Erhöhung der Standzeit des Werkstücks.
- Durch das Zusammenwirken der Ultraschallschwingungskinematik mit der Superfinishingkinematik in Kombination mit der passenden Prozesskenngroßeneinstellung können definierte Strukturen mit speziellen Eigenschaften sowie funktionale Oberflächen erzeugt werden.

6 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Über die Projektkooperation hinaus erfolgte keine Zusammenarbeit mit anderen Stellen

7 Erzielte Ergebnisse

7.1 Durchführung der technologischen Untersuchungen

Um das ultraschallunterstützte Superfinish durchzuführen, mussten Voruntersuchungen zum konventionellen Superfinish mit Stein und Band ausgeführt werden, um ein Benchmark zu erhalten. Um den Aufwand für die Versuche in akzeptablen Grenzen zu halten, wurde auf eine statistische Versuchsplanung zurückgegriffen. Hierfür wurde die Methode nach Taguchi verwendet, wobei das Ziel der Untersuchungen die Minimierung der Oberflächenrauheit als auch der Prozesskräfte war. Die Taguchi-Methode benutzt ein spezielles Planungssystem mit orthogonalen Bausteinen zur Untersuchung der gesamten Parameter mit nur einer kleinen Anzahl von Versuchen. Die Versuchsergebnisse werden dann in ein Signal-Stör-Verhältnis umgewandelt. Ferner wurde auf Wunsch der Partner der Verschleiß und Abtrag beim konventionellen Finishen mit Stein gemessen. Mit der erzielten Benchmark war die Grundlage für den ultraschallunterstützten Superfinish-Prozess gegeben.

Für die Durchführung sämtlicher Versuche hat die Fa. Supfina einen Superfinish-Maschine LCM 2000 (**Bild 4**) zur Verfügung gestellt. Zur Vermessung und Begutachtung der Werkstücke und Werkzeuge wurde ein Rauheits- und Konturmessgerät (**Bild 5**) sowie ein digitales Mikroskop (**Bild 6**) verwendet.



Bild 4: Superfinish-Maschine Supfina LCM 2000



Bild 5: Rauheits- und Konturmessgerät „T8000“



Bild 6: Digitalmikroskop Keyence VHX

Für die Kraftmessung am Werkstück wurde das in **Bild 7** dargestellte rotierende 4-Komponenten-Dynamometer der Fa. Kistler verwendet. Das Dynamometer ist für gängige Spindeladapter und Werkzeugaufnehmer geeignet. Außerdem hat es eine interne Kühlschmierstoffzufuhr und ist gegen Eindringen von Wasser und Kühlmittel geschützt. Dennoch musste für den Einsatz in der Supfina LCM 2000 ein Adapter für die Aufnahme des Dynamometers und für das Werkstück gefertigt werden (**Bild 8**).



Bild 7: Rotierendes 4-Komponenten-Dynamometer

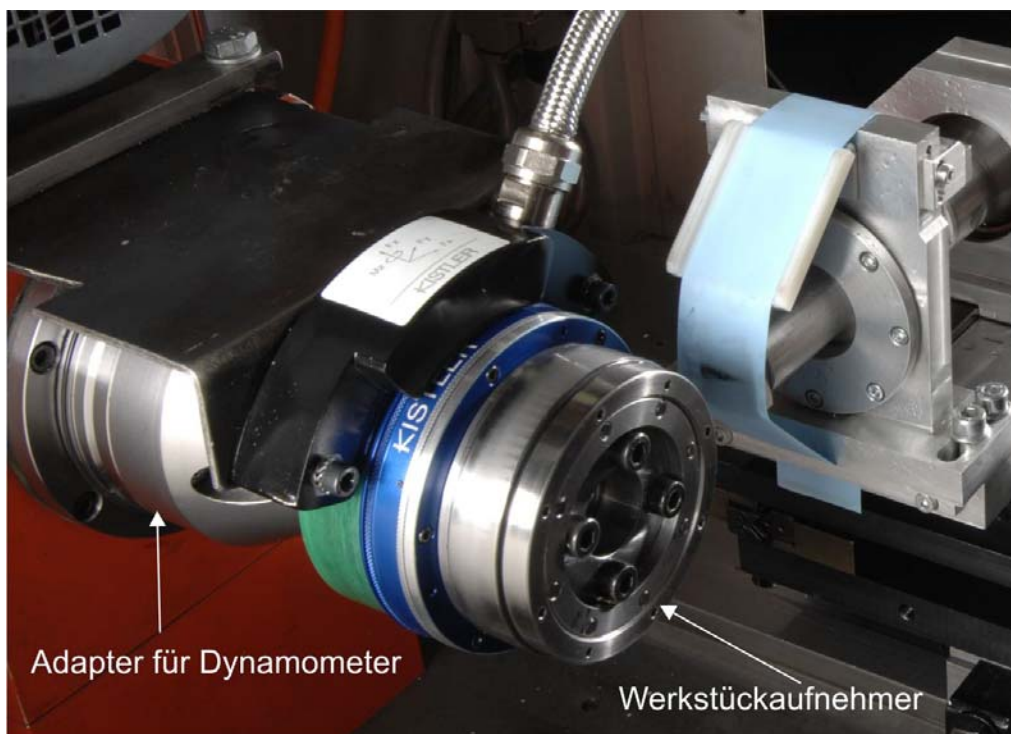


Bild 8: Dynamometer mit den dazugehörigen Adapter und Aufnehmer

7.2 Systematische Untersuchungen zum konventionellen Superfinish

Superfinish ist ein Bearbeitungsverfahren, das entwickelt wurde, um wiederholbare, spezifische und hohe Oberflächenqualitäten zu erreichen. Ziel ist es, die Oberflächenstruktur im Mikrometerbereich zu verbessern. Vorteil dieses Verfahrens ist das gleichmäßige, ansatzfreie Finish über die gesamte Oberfläche. Superfinish erhöht den Materialanteil (Traganteil) und damit die Verschleißfestigkeit. Der Materialabtrag bewegt sich in der Größenordnung von wenigen Tausendstel Millimetern. Je nach Werkstück, Material oder Bearbeitungsstelle wird Band oder Stein eingesetzt. Daher gilt es zuerst den konventionellen Superfinish-Prozess genauer unter die Lupe zu nehmen, um mehr Erkenntnisse über das Verfahren zu erhalten und um den Prozess mit Superfinish–Stein oder -Band zu optimieren.

7.2.1 Taguchi-Methode

Die Taguchi-Methode, benannt nach Ihrem Erfinder Taguchi Gen'ichi (anglisiert: Genichi Taguchi), ist eine Versuchsmethode, die vor allem auf die Minimierung der Streuung um einen Sollwert abzielt. Die Taguchi-Methode versucht, dieses Ziel dadurch zu erreichen, dass Produkte, Prozesse und Systeme möglichst robust gestaltet werden. Damit ist gemeint, dass sie möglichst unempfindlich gegenüber Störeinflüssen (engl. noise) sein sollen, denen sie in der Praxis ausgesetzt sein werden.

Die Vorteile der Taguchi Methode:

- Verringerung des Kosten-und Zeitaufwandes für die Versuche.
- Eine der flexibelsten Methoden für die Versuchsplanung.
- Planungsoptimierung für eine bessere Leistung und Qualität.

Die Taguchi-Methode benutzt ein spezielles Planungssystem mit orthogonalen Bausteinen zur Untersuchung der gesamten Parameter mit nur einer kleinen Anzahl von Versuchen. Die Versuchsergebnisse werden dann in ein Signal-Stör-Verhältnis (Signal/Noise-Ratio S/N) umgewandelt. Dabei wird definiert:

Signal = gewünschter Wert der Ausgabe (Mittelwert)

Noise = ungewünschter Wert derselben Ausgabe (Normalabweichung)

Das (S/N)-Verhältnis ist ein messbarer Wert, der die Unterschiede in der Qualität der Ergebnisse festlegt. Die Bestimmung der (S/N)-Verhältnisse ist abhängig von dem Ziel einer Untersuchung. Das Ziel dieser Untersuchung war die Minimierung der Oberflächenrauheit und der Kräfte. Entsprechend dieser Strategie wurde die "je kleiner, desto besser"-Methode gewählt.

7.2.2 Konventionelles Superfinishing mit Band

Versuchsbedingungen

Die Versuchsdurchführung erfolgte analog zu der beim Superfinishing mit Stein. Zur Auswertung der Versuchsergebnisse wurde auch hier die Taguchi-Methode herangezogen. In **Tabelle 2** sind die Versuchsdaten dargestellt.

Tabelle 2: Versuchsdaten beim Superfinishing mit Band

Versuch	Band [mesh]	Drehzahl [rpm]	Vorschub [mm/min]	Druck [bar]	Zeit [s]	Oszillation [min ⁻¹]	Hublänge [mm]
1	1000	250	0	2	4	300	1
2	1000	250	20	3	8	400	2
3	1000	250	40	4	12	500	3
4	1000	250	60	6	16	600	4
5	1000	320	0	2	8	400	3
6	1000	320	20	3	4	300	4
7	1000	320	40	4	16	600	1
8	1000	320	60	6	12	500	2
9	1000	380	0	3	12	600	1
10	1000	380	20	2	16	500	2
11	1000	380	40	6	4	400	3
12	1000	380	60	4	8	300	4
13	1000	450	0	3	16	500	3
14	1000	450	20	2	12	600	4
15	1000	450	40	6	8	300	1
16	1000	450	60	4	4	400	2
17	400	250	0	6	4	600	2
18	400	250	20	4	8	500	1
19	400	250	40	3	12	400	4
20	400	250	60	2	16	300	3
21	400	320	0	6	8	500	4
22	400	320	20	4	4	600	3
23	400	320	40	3	16	300	2
24	400	320	60	2	12	400	1
25	400	380	0	4	12	300	2
26	400	380	20	6	16	400	1
27	400	380	40	2	4	500	4
28	400	380	60	3	8	600	3
29	400	450	0	4	16	400	4
30	400	450	20	6	12	300	3
31	400	450	40	2	8	600	2
32	400	450	60	3	4	500	1

Beim konventionellen Superfinishing mit Band sind folgende Einstellgrößen und Werkzeugdaten ausschlaggebend:

- Hub
- Oszillation
- Anpressdruck
- Schnittgeschwindigkeit
- Zyklusdauer
- Bandvorschub
- Bandpezifikationen: Hermes Typ FB 637
 - Korntyp → Korund
 - Korngröße → 400; 1000
 - Bindung → Kunstharz
 - Unterlage → Folie

Versuchsergebnisse

Folgende Parameter sollen als Resultat der Untersuchungen verbessert werden:

- R_a arithmetischer Mittelrauwert
- R_z gemittelte Rautiefe
- R_k Kernrautiefe (Traganteil)
- F_x Kraft (Tangentialkraft)
- F_y Kraft (Normalkraft)

Aus Messungen der geschliffenen Prüfkörper vor dem Finishen wurden die in **Tabelle 3** gezeigten Durchschnittswerte ermittelt.

Tabelle 3: Durchschnittswerte der Rauheitsmessung vor dem Finishen

R_a vor dem Finishing [μm]	R_z vor dem Finishing [μm]	R_k vor dem Finishing [μm]
0,45	3,46	1,4

Wie schon beim Finishing mit Stein beschrieben, können aus den Versuchswerten die besten Werte für die Oberflächenrauheit extrahiert werden. Auch hier gilt wie bereits erwähnt, dass diese in **Tabelle 4** dargestellten Werte **nicht** das Optimum für den ganzen Prozess darstellen. Es sind lediglich die Bestwerte der durchgeführten Versuche.

Tabelle 4: Die besten Oberflächenrauheiten nach dem Finishing

Band	Druck [bar]	Drehzahl [min^{-1}]	Oszillations- frequenz [min^{-1}]	Hublänge [mm]	Vorschub [mm/min]	Zyklusdauer [s]	R_a [μm]	R_z [μm]	R_k [μm]
400	3	450	500	3	0	16	0,05	0,907	0,1
1000	6	450	400	4	0	16	0,083	1,002	0,24

Auswertung der Resultate nach der Taguchi-Methode

Nach der Auswertung der Versuchsergebnisse mit dem Programm „Minitab“ ergibt sich die in **Bild 9** gezeigte Statistik, aus der deutlich wird, dass wiederum die Zykluszeit einen wesentlichen Einfluss auf die Oberflächenrauigkeit der Werkstücke hat. Da diese Aussage wieder nach der Taguchi-Methode abgeleitet wurde, gilt sie nicht nur für die durchgeführten Versuche, sondern beschreibt den Prozess allgemein.

Durch den höheren Anteil an Körnern auf dem 1000er Band wird die zu bearbeitende Oberfläche feiner, da mehr Körner in Eingriff sind und durch ihre Korngröße kleinere Späne abtragen.

Bild 10 zeigt noch deutlicher die Rangfolge des Einflusses der Parameter zum Erreichen einer besseren Oberflächenqualität.

Die Kraft bei der Zerspaltung mit unbestimmten Schneiden entsteht allgemein größtenteils durch Reibung, Pflügen und Spanen. Daher ist die Kraft bei dem Einsatz vom 400er Band geringer als beim 1000er Band, da weniger und gröbere Körner im Einsatz sind. Die analoge Vorgehensweise liefert die Statistik für die Prozesskräfte, dargestellt in **Bild 11**.

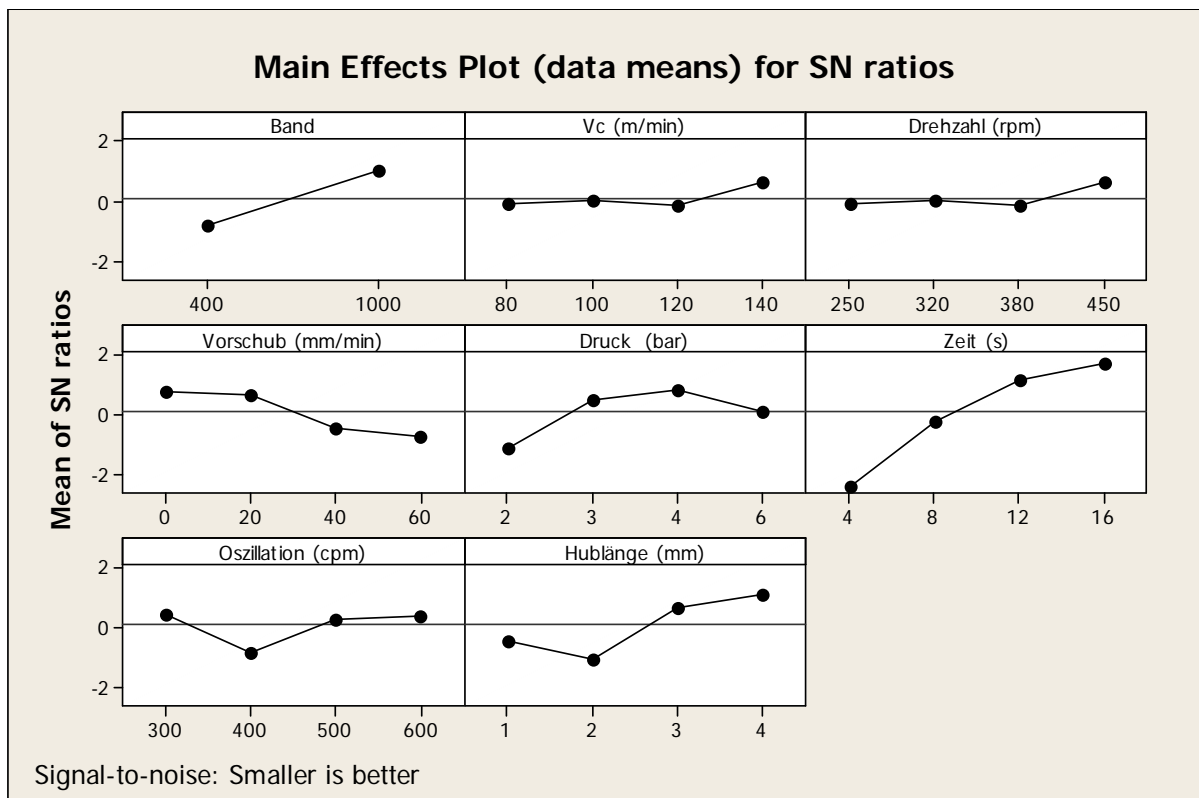


Bild 9: Deltastatistik des Rauheitsprofils R_a , R_z und R_k zusammen

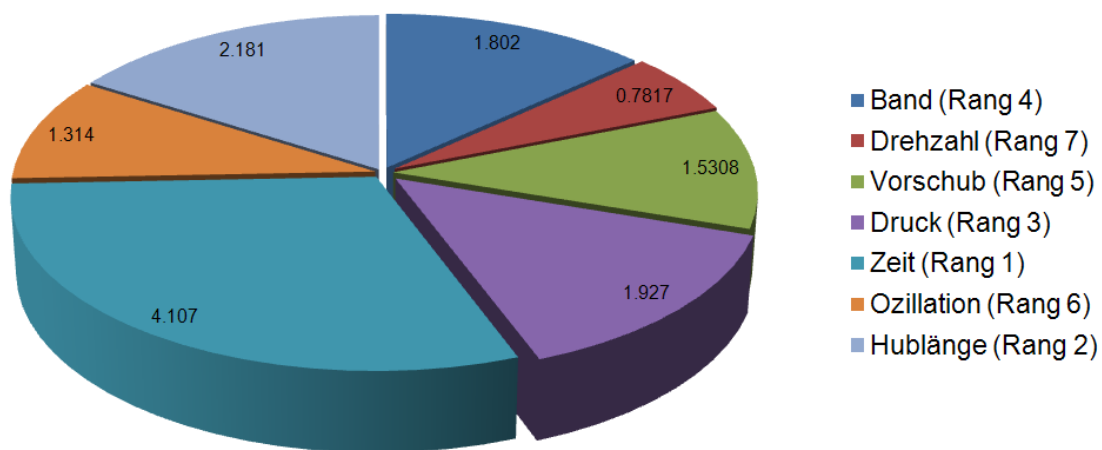


Bild 10: Rangordnung der Parameter für das Rauheitsprofil R_a , R_z und R_k

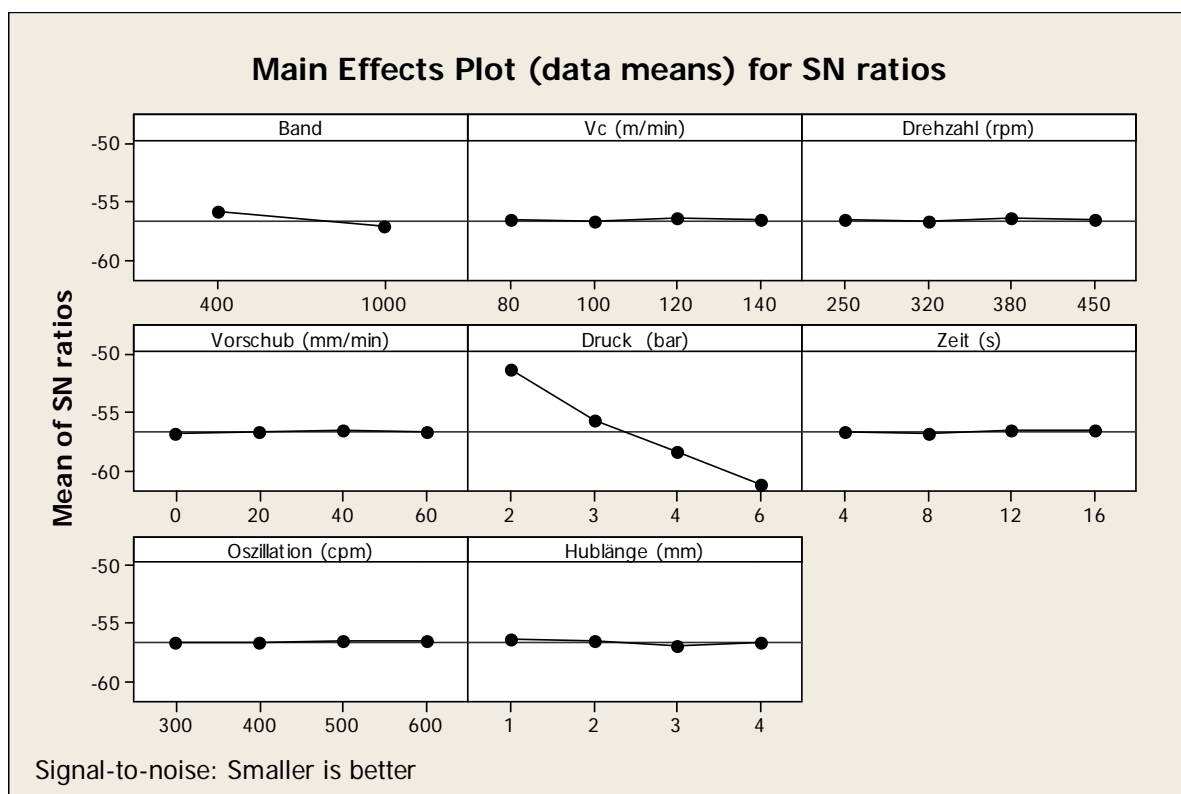


Bild 11: Deltastatistik der Kräfte

Wie beim Finishing mit Stein ist auch hier der weit überwiegende Einfluss des Druckes zu erkennen. Das Band hat wie schon beschrieben einen großen Einfluss auf die Kraftbildung, was im **Bild 12** graphisch dargestellt wurde. Auch hier stimmen die Ergebnisse mit den theoretischen Vorüberlegungen und den Erfahrungswerten sehr gut überein.

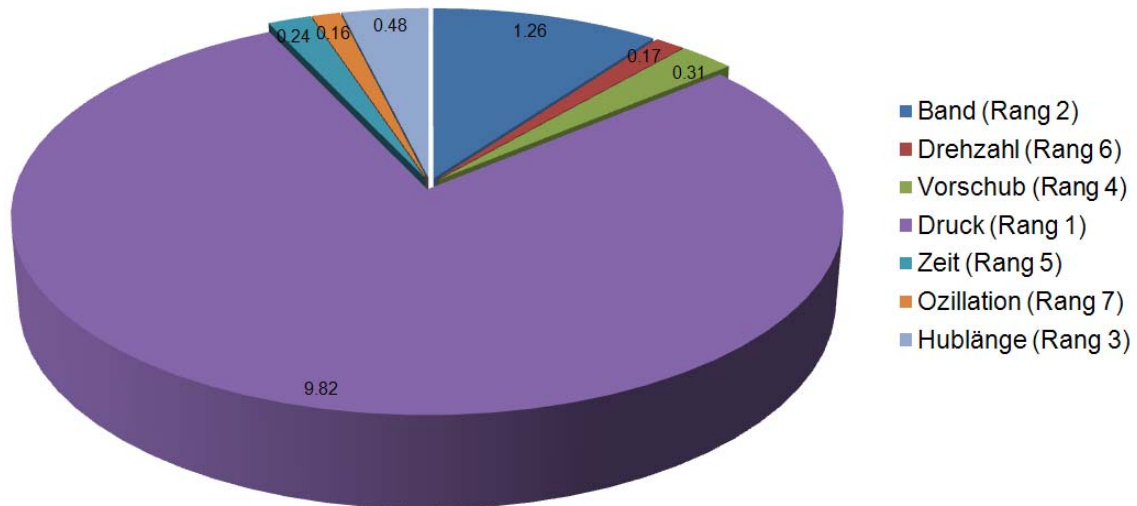


Bild 12: Rangordnung der Parameter für Prozesskräfte

Optimale Parameterkombinationen

Nachfolgend werden in **Tabelle 5** die mit der Taguchi-Methode ermittelten Kombinationen für die Eingangsparameter, die zu optimalen Ausgangsparametern führen, aufgeführt.

Tabelle 5: Optimale Werte

Die optimalen Werte für R_a :	Die optimalen Werte für R_z :
<ul style="list-style-type: none"> • Bandkörnung 400 • Druck: 3-6 bar • Drehzahl: 380 rpm • Oszillation: 500 min⁻¹ • Hublänge: 4 mm • Zyklusdauer: 16 s 	<ul style="list-style-type: none"> • Bandkörnung 1000 • Druck: 4 bar • Drehzahl: 450 rpm • Oszillation: 300 min⁻¹ • Hublänge: 4 mm • Zyklusdauer: 16s
Die optimalen Werte für ein R_k :	Die optimale Werte für Rauheit gesamt:
<ul style="list-style-type: none"> • Band 1000 • Druck: 6 bar • Drehzahl: 380 rpm • Oszillation: 500 min⁻¹ • Hublänge: 3 mm • Zyklusdauer: 16 s 	<ul style="list-style-type: none"> • Band 1000 • Druck: 4 bar • Drehzahl: 450 rpm • Oszillation: 300 min⁻¹ • Hublänge: 4 mm • Zyklusdauer: 16 s
Die optimalen Werte für minimale Prozesskräfte:	
<ul style="list-style-type: none"> • Band 400 • Druck: 2 bar • Drehzahl: 380 rpm • Oszillation: 500 min⁻¹ • Hublänge: 1 mm • Zyklusdauer: 12 s 	

Tabelle 6: Qualitativer Zusammenhang der Parameter

<i>Band</i>	R_a	R_z	R_k	Prozesskräfte
Anpressdruck ↗	↘	↘	↘	↗
Drehzahl ↗	↘	↘	↘	→
Oszillationsfrequenz ↗	↘	→	↘	→
Hublänge ↗	↘	↘	↘	→
Zyklusdauer ↗	↘	↘	↘	→

Damit lässt sich der Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsparametern qualitativ wie in **Tabelle 6** beschreiben.

7.2.3 Konventionelles Superfinishing mit Stein

Versuchsbedingungen

Zur Ermittlung des Einflusses der Einstellgrößen beim konventionellen Superfinishing mit Stein wurden Untersuchungen mit den folgenden Schritten durchgeführt:

Vorbereitung:

- Rauheitsmessung der Werkstücke (100Cr6 – 60HRC Kugellager-Außenring)
- Kalibrierung des Kraftmesssystems
- Rundlaufprüfung der Aufnahme
- Finishing-Stein mit einer Schmiergelleine formen bzw. schärfen. Dadurch wird die Form des Werkstückes auf den Stein aufgebracht und Flächenkontakt erzeugt.

Ausführung:

- Parameter einstellen
- Stein schärfen
- Finishen
- Mikroskopische Aufnahme der Werkstück- und Werkzeugoberfläche
- Oberflächenrauheit messen
- Messung von Abtrag am Stein und Werkstück
- Verschleißmessung

Beim konventionellen Superfinishing mit Stein sind folgende Einstellgrößen und Werkzeugdaten ausschlaggebend:

- Hub
- Oszillation
- Anpressdruck
- Schnittgeschwindigkeit
- Zyklusdauer
- Steinspezifikationen
 - Al₂O₃ 800 115 w
 - SiC 800 115 s
 - Korntyp: (Aluminiumoxyd, Siliziumkarbid)
 - Korngröße: (nach DIN ISO 6344 von 1 – 270 µm)
Korngrößenbezeichnung (mesh) von 60 – 8000 z.B.
Bezeichnung 800 = 7 µm
 - Tränkungsart: s → Schwefel; w → Wachs (Durch die Tränkung entsteht ein Gleitfilm zwischen Stein und Werkstück → geringerer Verschleiß, bessere Spanabfuhr)
 - Härte: Haltekraft der Schleifkörner in der Bindung (für die Korngröße <150, bezeichnet durch 0 als höchste bis 200 als kleinste Härte und für Korngröße >120, bezeichnet durch A als geringste bis Z als höchste Härte)

Auf Basis der im AP1 erstellten Anforderungsliste und Literaturrecherchen wurden die in **Tabelle 7** dargestellten Einstellgrößen zur Untersuchung des konventionellen Superfinishing-Prozesses mit Stein verwendet. Als Prüfkörper dienen Kugellageraußenschalen aus 100Cr6 mit einer Härte von 60 HRC.

Tabelle 7: Einstellgrößen bei den prozesstechnologischen Untersuchungen mit Stein

Stein	Druck [bar]	Drehzahl [rpm]	Oszillationsfrequenz [min ⁻¹]	Hublänge [mm]	Zyklusdauer [s]
Al ₂ O ₃ (800-115) W	1	250	300	1	10
	2	600	600	2	40
SiC (800-115) S	4	900	900	4	80
	6	1250	1200	5	120

Eine individuelle Kombination aus allen Einstellgrößen würde eine Anzahl von Versuchen ergeben, die so nicht zu bewältigen wäre. Deshalb wurde mittels der Taguchi-Methode die Anzahl der Versuche auf 32 beschränkt (**Tabelle 8**).

Tabelle 8: Die Versuche bei Anwendung der Taguchi-Methode

Versuch	Stein	Druck [MPa]	Drehzahl [rpm]	Oszillationsfrequenz [min^{-1}]	Hublänge [mm]	Zyklusdauer [s]
1	Al ₂ O ₃ 800-115	0.5	250	500	0.25	10
2	Al ₂ O ₃ 800-115	0.5	600	1200	0.55	40
3	Al ₂ O ₃ 800-115	0.5	900	1800	0.9	80
4	Al ₂ O ₃ 800-115	0.5	1250	2500	1.25	120
5	Al ₂ O ₃ 800-115	1.2	250	500	0.55	40
6	Al ₂ O ₃ 800-115	1.2	600	1200	0.25	10
7	Al ₂ O ₃ 800-115	1.2	900	1800	1.25	120
8	Al ₂ O ₃ 800-115	1.2	1250	2500	0.9	80
9	Al ₂ O ₃ 800-115	1.9	250	1200	0.9	120
10	Al ₂ O ₃ 800-115	1.9	600	500	1.25	80
11	Al ₂ O ₃ 800-115	1.9	900	2500	0.25	40
12	Al ₂ O ₃ 800-115	1.9	1250	1800	0.55	10
13	Al ₂ O ₃ 800-115	2.5	250	1200	1.25	80
14	Al ₂ O ₃ 800-115	2.5	600	500	0.9	120
15	Al ₂ O ₃ 800-115	2.5	900	2500	0.55	10
16	Al ₂ O ₃ 800-115	2.5	1250	1800	0.25	40
17	SiC 800-115	0.5	250	2500	0.25	120
18	SiC 800-115	0.5	600	1800	0.55	80
19	SiC 800-115	0.5	900	1200	0.9	40
20	SiC 800-115	0.5	1250	500	1.25	10
21	SiC 800-115	1.2	250	2500	0.55	80
22	SiC 800-115	1.2	600	1800	0.25	120
23	SiC 800-115	1.2	900	1200	1.25	10
24	SiC 800-115	1.2	1250	500	0.9	40
25	SiC 800-115	1.9	250	1800	0.9	10
26	SiC 800-115	1.9	600	2500	1.25	40
27	SiC 800-115	1.9	900	500	0.25	80
28	SiC 800-115	1.9	1250	1200	0.55	120
29	SiC 800-115	2.5	250	1800	1.25	40
30	SiC 800-115	2.5	600	2500	0.9	10
31	SiC 800-115	2.5	900	500	0.55	120
32	SiC 800-115	2.5	1250	1200	0.25	80

Untersuchungsergebnisse

Folgende Parameter sollen als Resultat der Untersuchungen verbessert werden:

- R_a arithmetischer Mittelrauwert
- R_z gemittelte Rautiefe
- R_k Kernrautiefe (Traganteil)
- F_x Tangentialkraft
- F_y Normalkraft

Die Prüfkörper (100Cr6 – 60HRC Kugellager-Außenring) wurden vor dem Finishing mit gleichen Parametern vorgeschliffen und der Durchschnittswert der Oberflächenbeschaffenheit in **Tabelle 9** eingetragen.

Tabelle 9: Durchschnittswerte der Rauheitsmessung vor dem Finishing

R _a vor dem Finishing [µm]	R _z vor dem Finishing [µm]	R _k vor dem Finishing [µm]
0,382	2,81	1,29

Die Ergebnisse eines Superfinishing-Versuches sind in **Bild 13** beispielhaft dargestellt. Die Bilder wurden mit einem portablen, hochauflösenden Digitalmikroskop aufgenommen (s. Abschnitt 6.1).

Stein	Druck [bar]	Drehzahl [1/min]	Oszillationsfrequenz [1/min]	Hublänge [mm]	Zyklusdauer [s]	R _a vor dem finishing [µm]	R _a nach dem finishing [µm]	R _z vor dem finishing [µm]	R _z nach dem finishing [µm]	R _k [µm]
AL2O3	4	900	1200	1	40	0,43	0,085	3,31	1,08	0,25

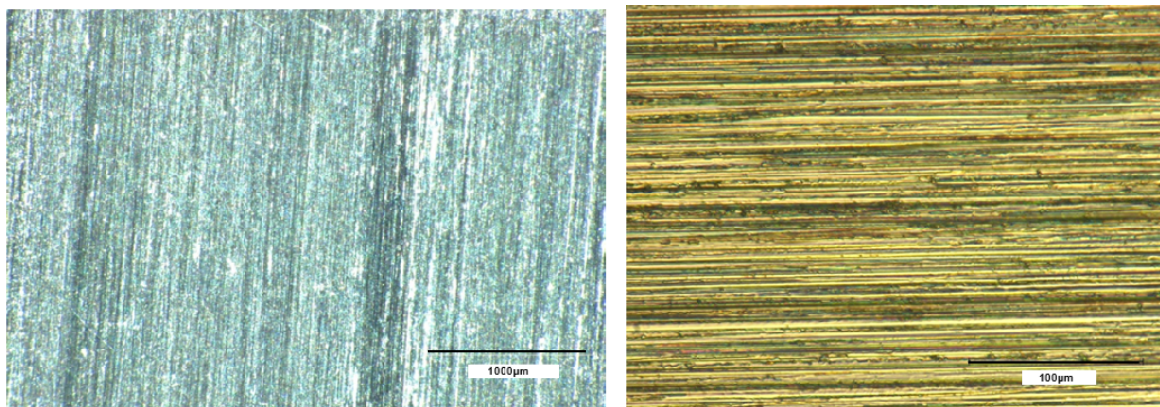


Bild 13: Stark vergrößerte Aufnahmen einer gefinishten Oberfläche

In **Tabelle 10** sind die aus den 32 Versuchen ermittelten Bestwerte für die Oberflächenrauheit dargestellt. Hierbei sei ausdrücklich darauf hingewiesen, dass dies **nicht** das absolute Optimum dieses Ausgangsparameters für den Prozess darstellt. Mithin sind diese Werte nicht als Benchmark zu betrachten. Diese Werte sind lediglich als lokales Optimum anzusehen. Die Ermittlung des absoluten oder globalen Optimums erfolgt durch die anschließend beschriebene Berechnungsmethode nach Taguchi.

Tabelle 10: Die besten Oberflächenrauheiten nach dem Finishing mit Stein

Stein	Druck [bar]	Drehzahl [rpm]	Oszillationsfrequenz [min ⁻¹]	Hublänge [mm]	Zyklusdauer [s]	R _a [µm]	R _z [µm]	R _k [µm]
SiC 800	6	1250	600	1	80	0,02	0,19	0,1
SiC 800	6	900	300	2	120	0,03	0,255	0,05

Auswertung der Resultate nach der Taguchi-Methode

Bei der Auswertung der Versuchsergebnisse wurde, wie schon erwähnt, auf Methoden der statistischen Versuchsplanung nach Taguchi zurückgegriffen. Diese Methode gestattet es unter Verwendung dafür geeigneter Software (Minitab), aus relativ wenigen Versuchen eine optimale Konfiguration für die Eingangsparameter eines Prozesses zu finden, die für die Erreichung eines optimalen Ausgangsparameters notwendig ist. Mathematisch gesehen handelt es sich um eine sogenannte Delta-Statistik. Wie in **Bild 14** zu erkennen, ergeben sich für die verschiedenen Eingangsparameter wie Steinwerkstoff oder Hublänge verschiedene mittlere Signal-Rausch-Verhältnisse. Diejenigen Parameter, die hier die größte Differenz zwischen minimalem und maximalem mittlerem Signal-Rausch-Verhältnis ergeben, haben auch den größten Einfluss auf den Ausgangsparameter.

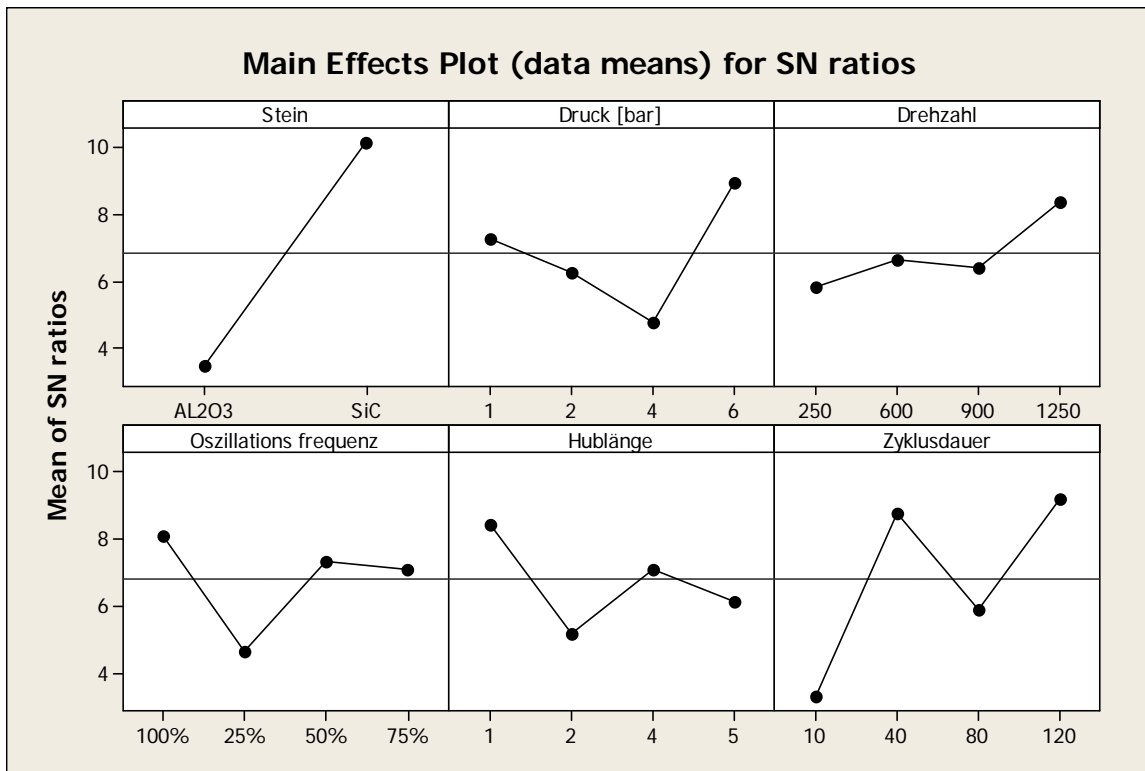


Bild 14: Deltastatistik für das Rauheitsprofil R_a , R_z und R_k zusammen

Aus den Diagrammen in Bild 14 lässt sich so unmittelbar auch die optimale Parameterkombination für die besten Rauheitswerte bei der Steinbearbeitung, die gewünschte Benchmark des Prozesses, ablesen:

- Stein: SiC
- Druck: 4 bar
- Drehzahl: 1250 rpm
- Oszillationsfrequenz: 1200 cpm
- Hublänge: 1 mm
- Zyklusdauer: 120 s

Der Einfluss der Eingangsparameter lässt sich noch übersichtlicher darstellen, nämlich in der in **Bild 15** gezeigten Grafik. Daraus ist klar ersichtlich, dass der Steinwerkstoff (hier Siliziumkarbid) den größten Einfluss hat, gefolgt von der Zyklusdauer. Die anderen Parameter haben geringere Auswirkungen auf das Prozessergebnis. Dies kann auch als eine Art Rangfolge unter den Parametern aufgefasst werden. Rang 1 kommt wie beschrieben dem Steinwerkstoff zu.

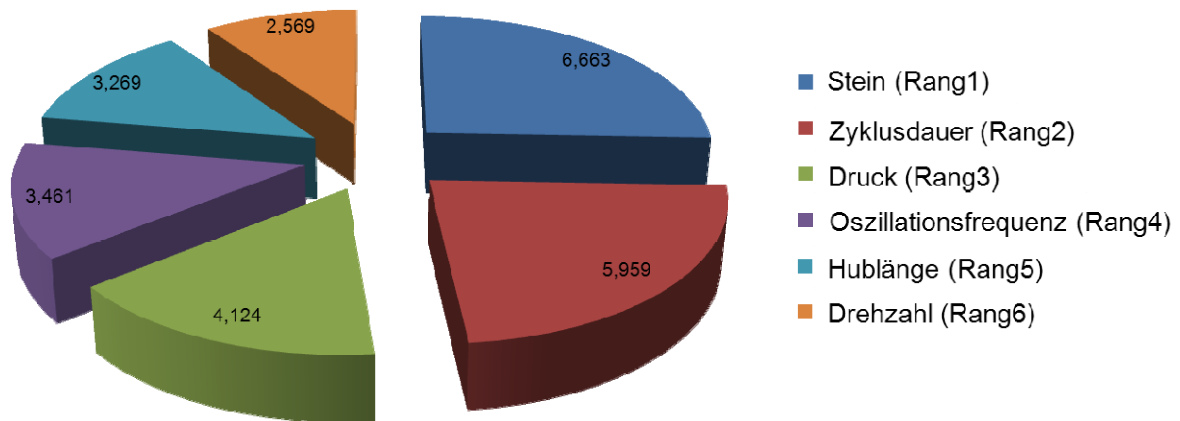


Bild 15: Rangordnung der Parameter für das Rauheitsprofil R_a , R_z und R_k

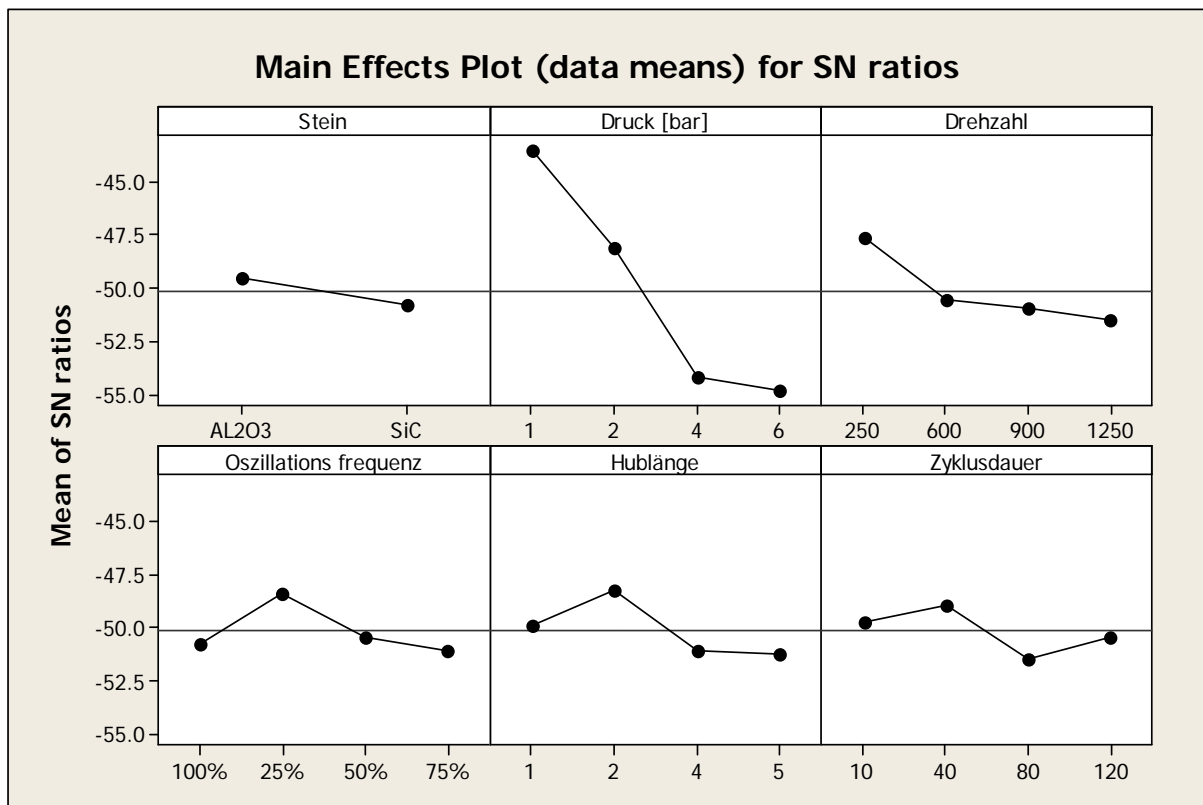


Bild 16: Deltastatistik der Kräfte

Analog zu der oben beschriebenen Vorgehensweise erfolgte die Ermittlung des Optimums für die Prozesskräfte. Wieder wurden die mittleren Signal-Rausch-Verhältnisse errechnet und daraus eine Rangfolge der Parameter abgeleitet. Aus **Bild 16** kann sehr deutlich der überragende Einfluss des Druckes abgelesen werden. Je stärker das Werkzeug an das Werkstück gedrückt wird, desto höher sind auch die Prozesskräfte. Dieses Ergebnis entspricht auch sehr gut den theoretischen Vorüberlegungen und den Erfahrungswerten. Das obige Ergebnis kann im **Bild 17** sehr übersichtlich dargestellt werden.

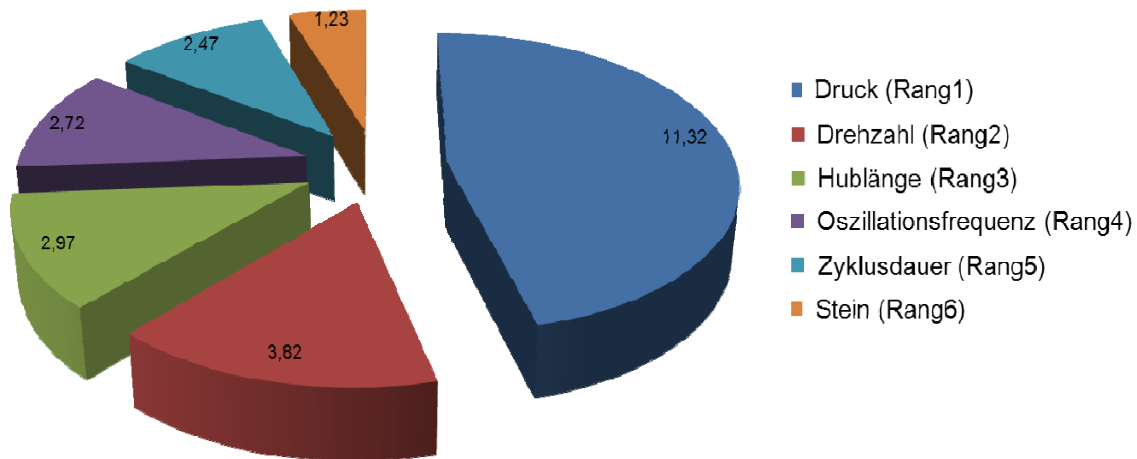


Bild 17: Rangordnung der Parameter für die Prozesskräfte

Optimale Parameterkombinationen

Nachfolgend werden in **Tabelle 11** die mit der Taguchi-Methode ermittelten Kombinationen für die Eingangsparameter, die zu optimalen Ausgangsparametern führen, aufgeführt.

Tabelle 11: Optimalwerte für das Erreichen der jeweiligen Ziele

Die optimalen Werte für R_a :	Die optimalen Werte für R_z :
<ul style="list-style-type: none"> Stein: SiC Druck: 6 bar Drehzahl: 1250 rpm Oszillationsfrequenz: 1200 min⁻¹ Hublänge: 1 mm Zyklusdauer: 40 s 	<ul style="list-style-type: none"> Stein: SiC Druck: 6 bar Drehzahl: 1250 rpm Oszillationsfrequenz: 600 min⁻¹ Hublänge: 1 mm Zyklusdauer: 120 s
Die optimalen Werte für ein R_k :	Die optimale Werte für Rauheit gesamt:
<ul style="list-style-type: none"> Stein: SiC Druck: 6 bar Drehzahl: 1250 rpm Oszillationsfrequenz: 1200 min⁻¹ Hublänge: 1 mm Zyklusdauer: 80 s 	<ul style="list-style-type: none"> Stein: SiC Druck: 4 bar Drehzahl: 1250 rpm Oszillationsfrequenz: 1200 min⁻¹ Hublänge: 1 mm Zyklusdauer: 120 s

Die optimalen Werte für minimale Prozesskräfte:

- Stein: Al₂O₃
- Druck: 1 bar
- Drehzahl: 250 rpm
- Oszillationsfrequenz: 300 min⁻¹
- Hublänge: 2 mm
- Zyklusdauer: 40 s

Damit lässt sich der Zusammenhang zwischen Eingangs- und Ausgangsparametern qualitativ wie in **Tabelle 12** beschreiben.

Tabelle 12: Qualitativer Zusammenhang der Parameter

	R _a	R _z	R _k	Prozesskräfte
Anpressdruck ↗	↘	↘	↘	↗
Drehzahl ↗	↘	↘	↘	↗
Oszillationsfrequenz ↗	→	→	→	↗
Hublänge ↗	→	→	↗	↗
Zyklusdauer ↗	↘	↘	↘	→

7.2.4 Vergleich des Superfinishing-Prozesses mit Band und Stein

Allgemeines

Im Folgenden wird ein Vergleich der Superfinishing-Prozesse mit Band und Stein beschrieben. Bei den Untersuchungen der beiden Prozesse ergaben sich signifikante Unterschiede bei der Oberflächenbeschaffenheit der bearbeiteten Teile. Dies entspricht den Erfahrungen aus der Praxis. Diese Untersuchung sollte zeigen, mit welchem Werkzeug die erforderliche Oberflächenbeschaffenheit schneller erreicht werden kann.

Oberflächenprofile für die verschiedenen Prozesse

In **Bild 17** ist ein Oberflächenprofil (quasi ein Schnitt durch die Oberfläche) für ein geschliffenes Versuchsteil dargestellt. Der Rauheitswert R_a entspricht mit 0,39 µm fast ideal dem in der Anforderungsliste definierten Ausgangszustand vor dem Finishen (R_a = 0,45 µm).

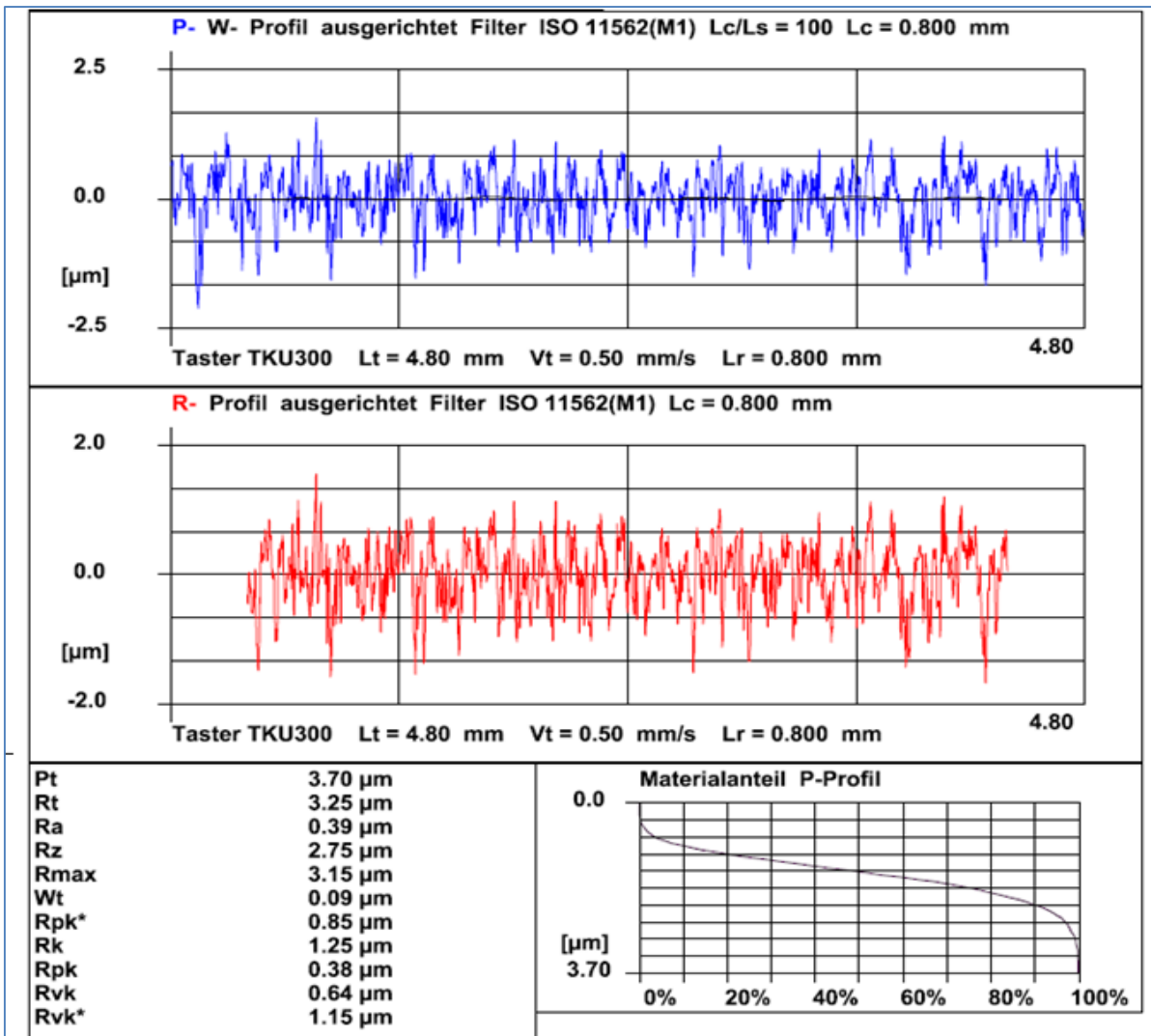


Bild 17: Oberflächenprofil eines Versuchsteils nach dem Schleifen

Die nachstehenden **Bilder 18 und 19** zeigen die Oberflächenbeschaffenheit der Teile nach dem Superfinish mit Stein und Band. Sehr deutlich ist beim Finishing eine Verfeinerung der Oberfläche erkennbar. Der Wert von R_a (**Bild 15**) sinkt auf $0,02 \mu\text{m}$. Bemerkenswert ist aber vor allem die Gleichmäßigkeit des Oberflächenprofils. Es sind keine tiefen „Gräben“ erkennbar. Durch den Stein wurde eine neue Oberfläche erzeugt und die Schleifspuren entfernt.

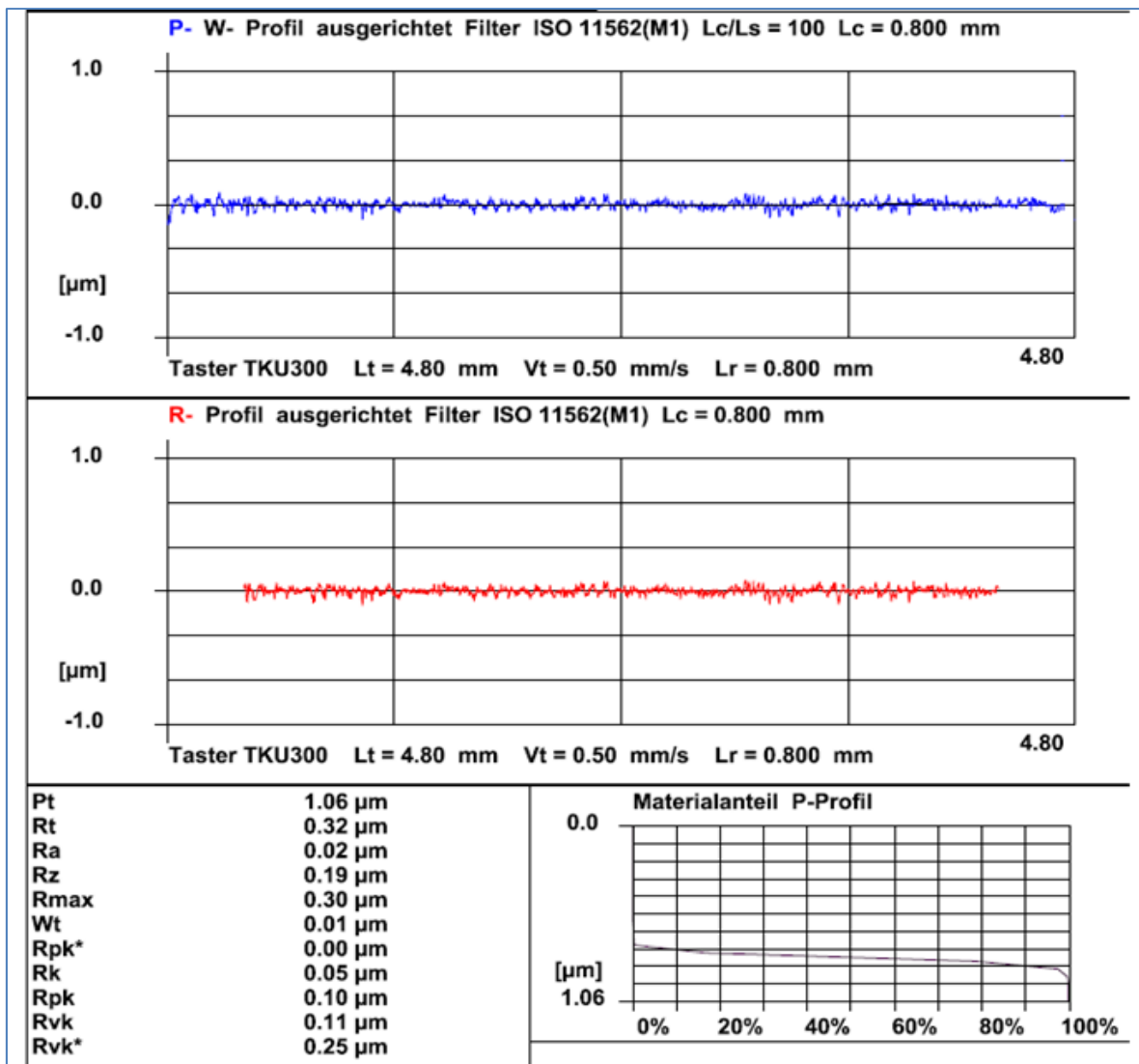


Bild 18: Oberflächenprofil nach dem Finish mit Stein. Prozessbedingungen: Stein: SiC 1200, Druck: 6 bar, Drehzahl: 900 rpm, Oszillationsfrequenz: 300 min⁻¹, Hublänge: 2 mm, Zyklusdauer: 20 s,

Das Superfinish mit Band führt zu einem anderen Oberflächenprofil. Hierbei wird keine neue Oberfläche erzeugt sondern nur wie aus **Bild 19** ersichtlich, die Erhebungen des vorhandenen Profils entfernt. Dies ergibt auch einen deutlich höheren R_a-Wert von 0,05 µm.

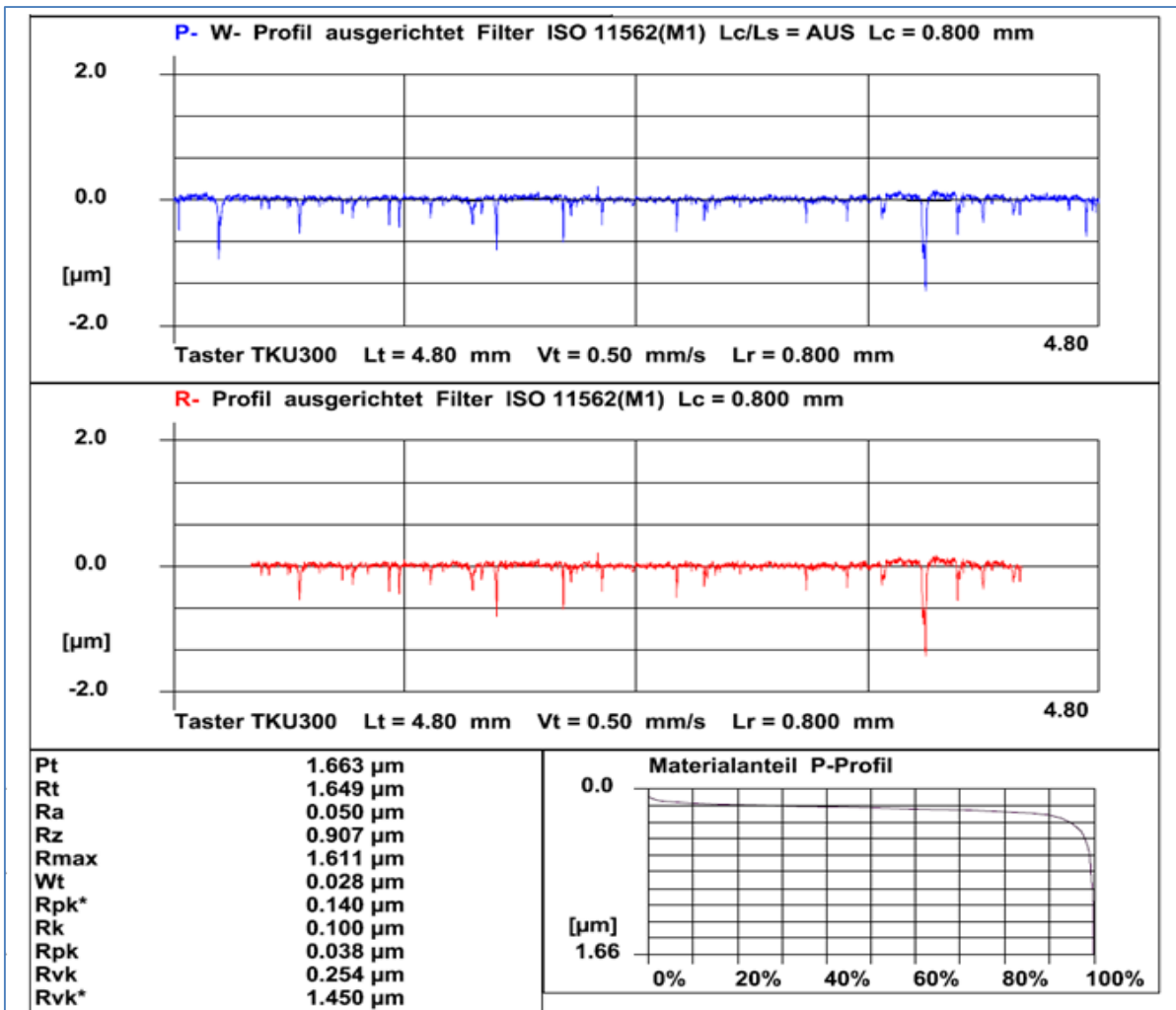


Bild 19: Oberflächenprofil nach dem Finish mit Band. Prozessbedingungen: Band: 1000, Druck: 3 bar, Drehzahl: 450 rpm, Oszillationsfrequenz: 500 min⁻¹, Hublänge: 3 mm, Zyklusdauer: 3 s

Direkter Vergleich von Stein und Band

Um Erkenntnisse zu den Unterschieden der Bearbeitung mit Stein und Band zu erlangen, wurden diesbezüglich mehrere Versuche durchgeführt. Die Versuche wurden mit einem Al₂O₃-Stein und einem Al₂O₃-Band durchgeführt. Beide Werkzeuge besitzen eine Korngröße von 9 µm. Des Weiteren hatten die geschliffenen Teile in etwa die gleiche Oberflächenbeschaffenheit. In **Tabelle 13** sind die jeweiligen Vergleichsversuche aufgeführt. Die Versuchsparameter wurden aus den gesammelten Erfahrungspunkten ausgewählt und jeweils mit Stein und Band durchgeführt.

Tabelle 13: Parameter für die Vergleichsversuche von Band und Stein

Versuch	Druck	Drehzahl	Oszillation	Zyklusdauer	Werkzeug
1	4	1250	1200	40	Stein Al ₂ O ₃ 600 9µm; Band Al ₂ O ₃ 2500 9µm
2	4	1250	1200	20	
3	1	250	300	20	



Bild 20: Vergrößerungen der Werkstückoberfläche um das 100-fache

In **Bild 20** werden die Resultate der jeweiligen Versuche aufgeführt. Gemessen wurden Abtrag, Oberflächenrauheit und –profil. Des Weiteren wurden mit einem Digitalmikroskop Bilder von der Oberflächenstruktur aufgenommen.

Bild 21 zeigt den Vergleich der beiden Bearbeitungsmethoden. Aufgeführt sind die Oberflächenrauheit und der Abtrag in Abhängigkeit von der Zyklusdauer. Zu erkennen ist, dass der Abtrag von Stein zwar größer ist, aber die Oberflächenrauheit eher schlechter.

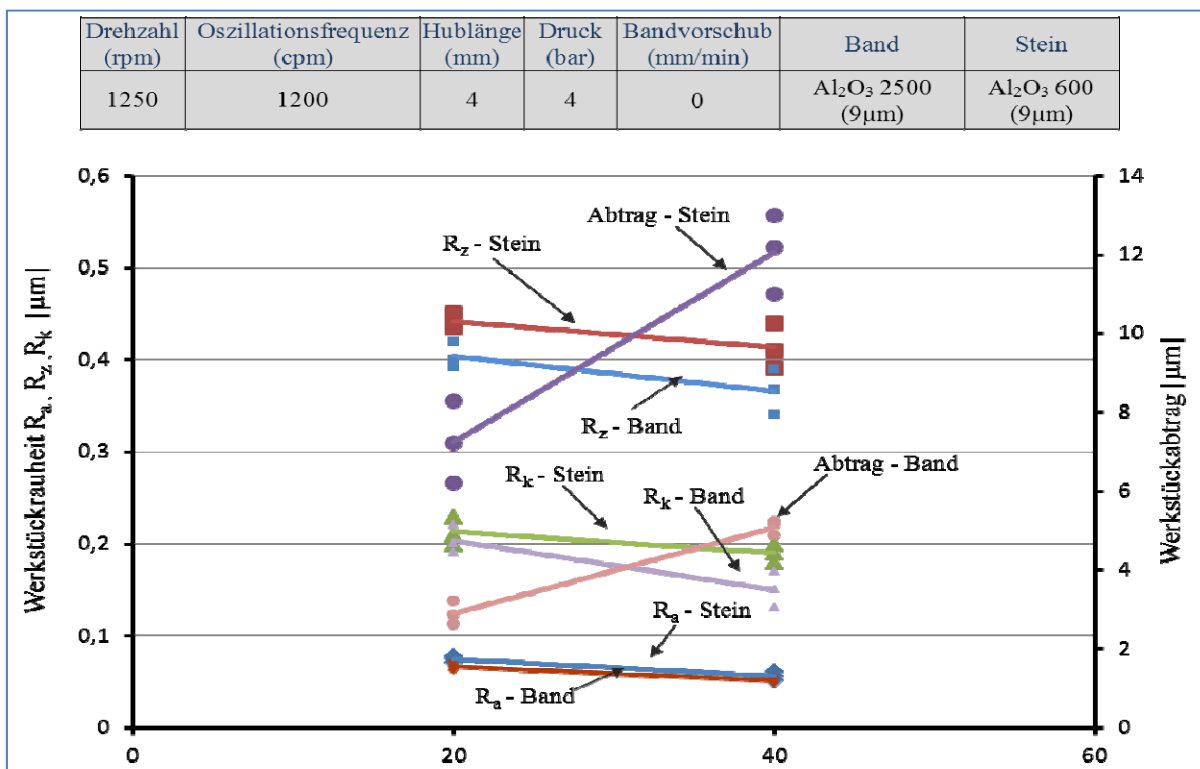


Bild 21: Oberflächenrauheit und Abtrag in Abhängigkeit von der Zyklusdauer

Es kann davon ausgegangen werden, dass durch den Stein eine völlig neue Oberflächenstruktur erzeugt wird aber durch das Band nur die „Berge“ der Oberflächenstruktur abgetragen werden und die „Täler“ stehen bleiben. **Bild 20** zeigt ein solches Oberflächenprofil der Bearbeitung mit Band (oben) und Stein (unten).

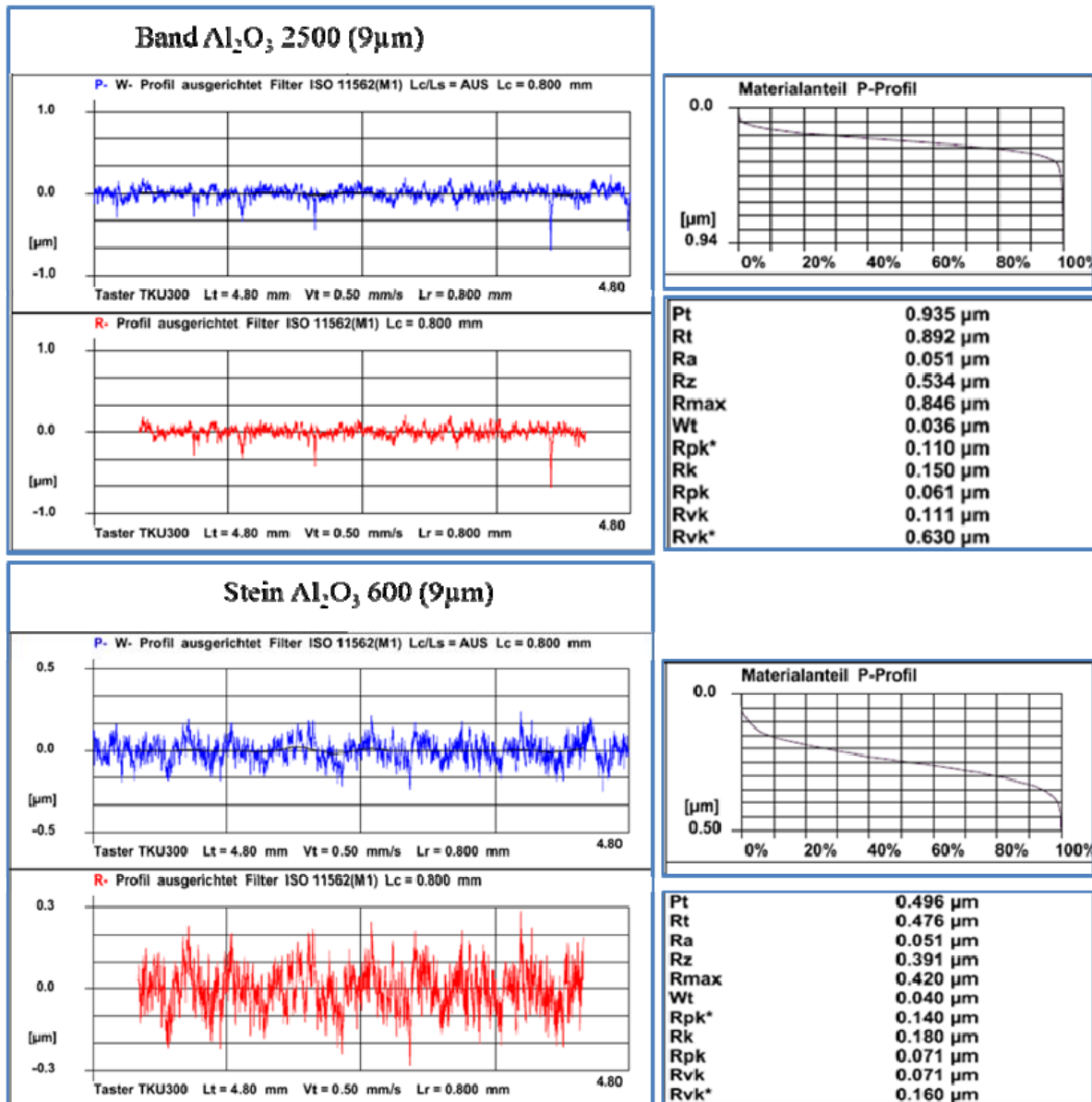


Bild 22: Vergleiche der Oberflächenprofile des Werkstückes

Fazit

Durch die Untersuchung wurde nachgewiesen, dass durch die Verwendung von Finish-Band eine feinere Oberfläche erreicht werden kann. Der Abtrag mit Band ist geringer als mit Stein, daher werden nur die Spitzen des Oberflächenprofils abgetragen. Mit dem Finish-Stein wird eine neue Oberflächentopographie erzeugt und das Schleifbild völlig entfernt.

7.2.5 Untersuchung des Verschleißes von Finish-Steinen

Versuchsablauf

Um den Verschleiß von Finishing-Steinen zu bestimmen, wurde in einem Langzeitversuch unter verschiedenen Parametern der Abtrag der Steine gemessen.

Dazu wurden bei den Versuchen des konventionellen Steinfinishings im AP2 die drei besten Kombinationen (betreffend Oberflächenrauheit) von Versuchsparametern bestimmt. Mit diesen wurden dann jeweils zehn Versuche gefahren. Anzumerken ist hier, dass die Steine nicht nach jedem Versuch neu geschärft wurden.

Vorbereitung:

- Rauheitsmessung der Werkstücke (100Cr6 – 60HRC Kugellager-Außenring)
- Kalibrierung des Kraftmesssystems (Federwaage)
- Rundlaufprüfung der Aufnahme
- Finishing-Stein formen bzw. schärfen

Ausführung:

- Parameter einstellen
- Finishen
- Aufnahme der Kräfte
- Oberflächenrauheit messen
- Messung des Abtrags am Stein

Beim konventionellen Superfinishing mit Stein sind folgende Einstellgrößen und Werkzeugdaten ausschlaggebend:

- Hub
- Oszillation
- Anpressdruck
- Zyklusdauer
- Steinspezifikation
 - SiC 800 115 S

Auf Basis der im AP2 erstellten Anforderungsliste wurden die in **Tabelle 13** dargestellten Einstellgrößen zur Untersuchung des Verschleißes des konventionellen Superfinishing-Prozesses mit Stein verwendet. Als Prüfkörper dienten Kugellageraußenschalen aus 100Cr6 mit einer Härte von 60HRC.

Tabelle 14: Einstellgrößen bei den Verschleißuntersuchungen mit Stein

Stein	Serie	Druck [bar]	Drehzahl [rpm]	Oszillationsfrequenz [min ⁻¹]	Hublänge [mm]	Zyklusdauer [s]
SiC 800 115 S	1	6	900	300	2	120
	2	4	900	300	2	120
	3	6	1250	600	1	80

Untersuchungsergebnisse

Im **Bild 23** ist der Verlauf des Verschleißes beim Superfinish mit Stein zu erkennen. Die Tests ergaben, dass der Verschleiß am Stein vom Anpressdruck und der Zyklusdauer abhängt.

Der Abtrag wurde mit einer Messuhr nach jedem Versuch direkt am Stein gemessen. Durch den Verschleiß am Stein, sollte die Kurve nach jedem Versuch ansteigen. Die Versuche zeigten jedoch ein anderes Ergebnis. Es ist zu erkennen, dass durch die Zusetzung und den Selbstschärfungseffekt des Steines die Messungen voneinander abweichen. Außerdem konnte durch Vergleich der Rauheitswerte (R_z) am Werkstück mit den Versuchsnummern festgestellt werden, wann ein Selbstschärfungseffekt stattfindet (**Bild 24**). Das Ergebnis der Untersuchungen zeigt, dass mit der Zusetzung des Steines die Kräfte zunehmen. Dann kommt es irgendwann zum Selbstschärfungseffekt, die Körnung bricht mit der Zusetzung aus und die Kräfte sinken wieder. Folglich nimmt an diesen Stellen der Verschleiß zu.

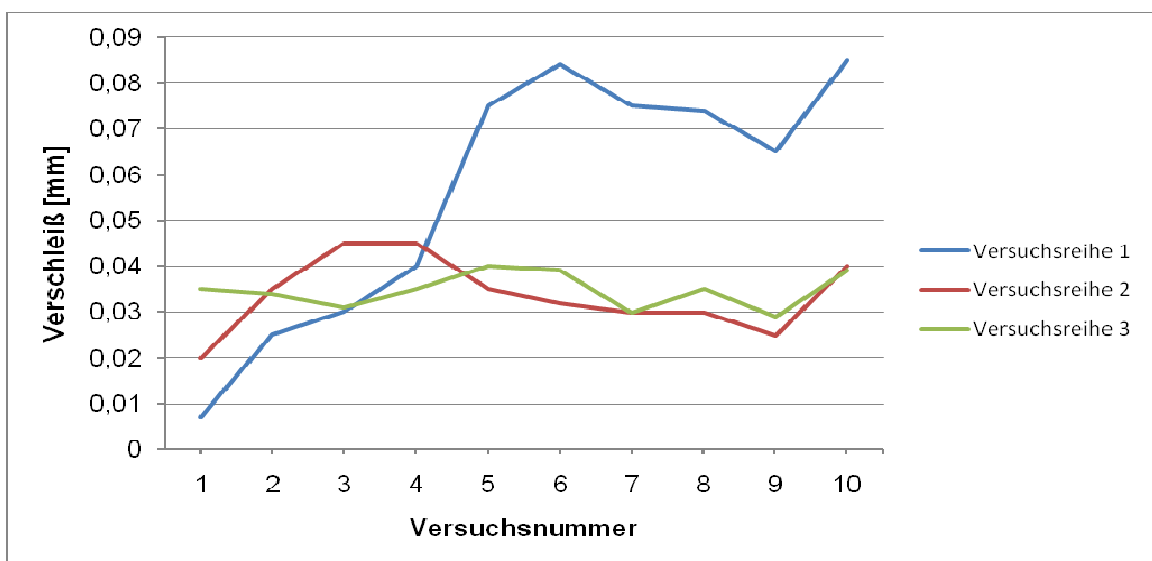


Bild 23: Verschleiß an Finishing-Steinen nach 10 Versuchen

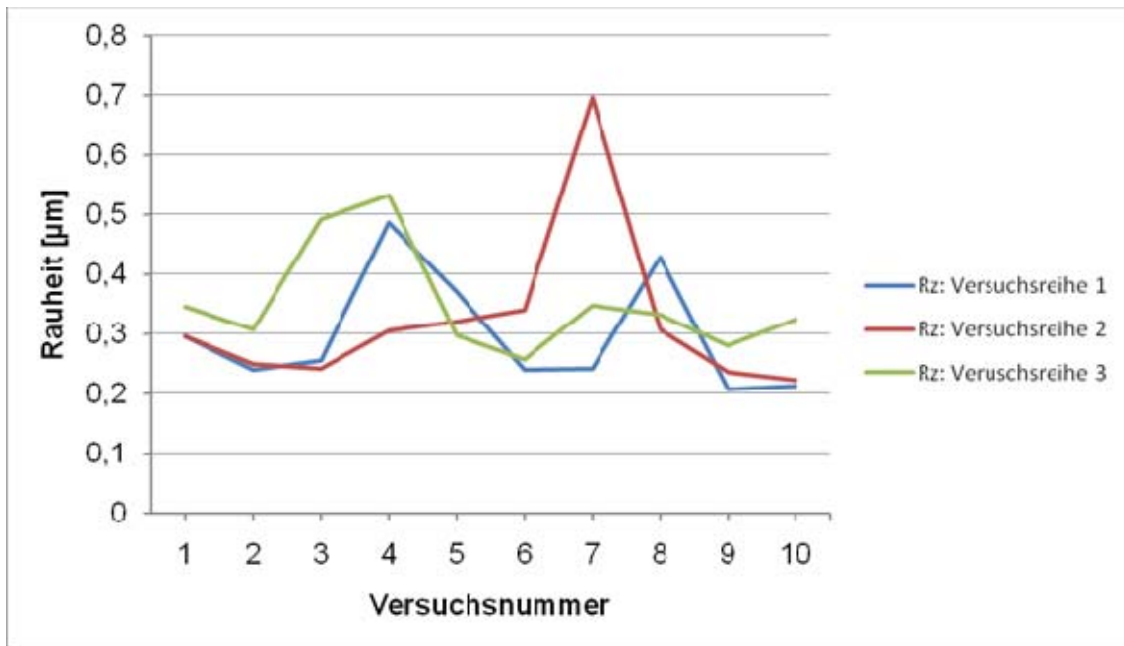


Bild 24: Rauheitswerte der Versuchsreihen nach 10 Versuchen

7.2.6 Zusammenfassung zum konventionellen Finishing

Es wurden umfassende prozesstechnologische Untersuchungen zum konventionellen Superfinishing durchgeführt. Dazu wurden verschiedene Bänder und Steine mit unterschiedlichen Eigenschaften verwendet. Um den Aufwand für die Versuche in akzeptablen Grenzen zu halten, wurde auf eine statistische Versuchsplanung zurückgegriffen. Hierfür wurde die Methode nach Taguchi verwendet. Sie gestattet unter Anwendung geeigneter Software die Ermittlung der Wirkzusammenhänge des Prozesses. Dazu gehört auch die Feststellung der Rangfolge, also der jeweiligen Stärke des Einflusses eines Parameters. So können Aussagen zur Optimierung des Prozesses abgeleitet werden. Des Weiteren wurden die Werkstücke vor jedem Versuch vorgeschliffen, damit immer die gleichen Bedingungen gegeben sind. Es liegen nun also Vergleichswerte für die Beurteilung des ultraschallunterstützten Superfinishing-Prozesses vor.

7.3 Ultraschallunterstütztes Finishing

7.3.1 Konzepte

Das **Bild 25** zeigt ein im Verbundprojekt umzusetzendes Konzept zur Realisierung des ultraschallunterstützten Superfinishing für die Bearbeitung mit Band. Beim vorliegenden Konzept wird die konventionelle Kinematik des Superfinishing mit einer hochfrequenten Schwingungsamplitude überlagert, wobei die Ultraschallschwingung durch den Superfinish-Stein bzw., wie in der Skizze dargestellt, über das Werkzeug und das Superfinishingband in die Bearbeitungszone übertragen wird.

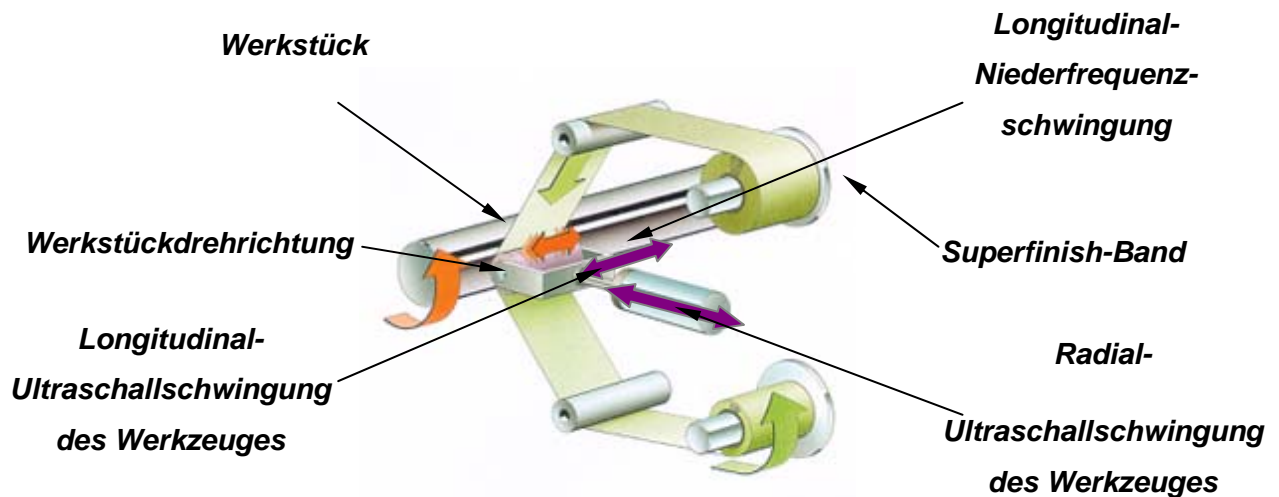


Bild 25: Systemaufbau des ultraschallunterstützten Superfinish-Prozesses

Im beantragten Projekt wird sowohl der Prozess des ultraschallunterstützten Superfinishing mit Band als auch mit Stein umgesetzt und untersucht. Ausgehend von dem oben genannten Konzept beinhaltet die Entwicklung der Systemeinheit die Erstellung weiterer geeigneter Konzepte unter Berücksichtigung der ultraschallbedingten Randbedingungen und Anforderungen, wie die kompakte Bauweise der Ultraschallschwingungskette. Schwerpunkte der nachfolgenden Umsetzung sind dabei die Entwicklung geeigneter Komponenten zur Erzeugung und Verstärkung der am Werkzeug benötigten Ultraschallamplitude, die Entwicklung eines ultraschallgeeigneten Werkzeugs, die Integration der zuvor genannten Komponenten in ein bauraumminimiertes Gehäuse sowie die Charakterisierung und Optimierung des im Projekt entwickelten seriennahen Prototypen einer ultraschallunterstützten Einheit zum Superfinishing. Neben der Qualifizierung der Einzelkomponenten in Versuchsreihen werden ganze Baugruppen im realen Einsatz prozesstechnologisch genutzt und qualifiziert. Um den Prozess des ultraschallunterstützten Superfinishing prozesstechnologisch unter Variation verschiedener Randbedingungen auswerten zu können, sind Kraft- und Temperaturmessungen in unmittelbarer Nähe der Kontaktzone notwendig. Erst durch die Auswertung dieser Messungen wird sowohl der konventionelle als auch der ultraschallunterstützte Prozess transparent und miteinander vergleichbar.

7.3.2 Installation und Inbetriebnahme des Prüfstandes

Um das gelieferte Ultraschallsystem (**Bild 26**) vom IPT-Aachen in Betrieb zu nehmen, waren verschiedene Vorarbeiten nötig. So musste für das ganze System eine Maschinenaufnahme konzipiert und gefertigt werden. Zusätzlich musste ein Laptop bereit gestellt werden, um den Schrittmotor für die Hubbewegungen anzusteuern.

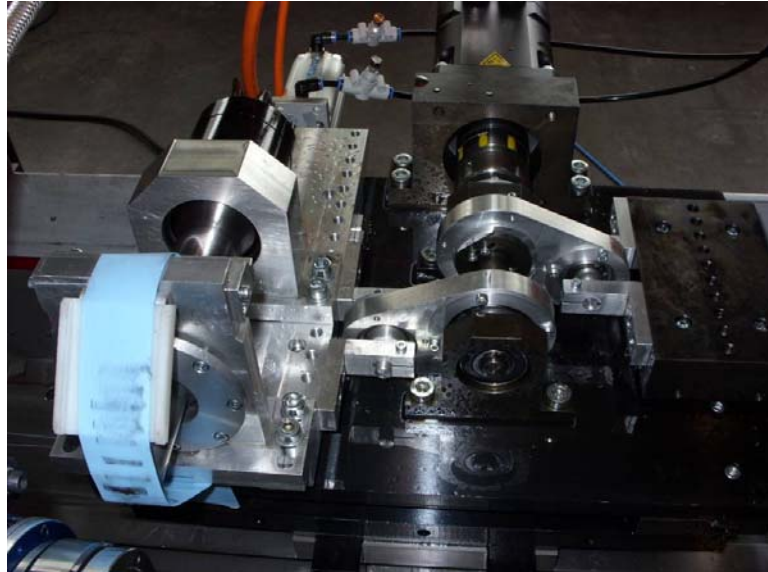


Bild 26: Ultraschallsystem (Prüfstand 2)

Des Weiteren besaß der Pneumatikzylinder für die Vorschubbewegung keine Endlagendrosselung, so dass es bei normalem Einsatz zu einer Kollision des Werkzeugs mit dem Werkstück gekommen wäre. So mussten hier noch zwei Drosseln in die Zuluftleitungen eingefügt werden. Nach Kalibrierung des ganzen Systems (Ausrichtung und Positionierung in der Supfina-Maschine) konnten die Versuche erstmalig durchgeführt werden.

7.3.3 Untersuchungen zum ultraschallunterstützten Superfinishing mit Band

Vorbereitung der Versuche

Aus den vorherigen Untersuchungen konnten nun die besten Versuchswerte ermittelt werden (**Tabelle 15**). Diese Ergebnisse dienen als Benchmarks für den weiteren Vergleich zwischen konventionellem zum US-Finishing. Die Amplitude zeigt an, ob mit oder ohne Ultraschall bearbeitet wurde.

Tabelle 15: Ermittelte Parameter aus vorherigen Versuchen für die Ultraschallbearbeitung

Band	Versuch	Druck [bar]	Drehzahl [rpm]	Oszillationsfrequenz [min ⁻¹]	Hublänge [mm]	Zyklusdauer [s]	Ultraschallfrequenz [kHz]	Ultraschallamplitude
Al ₂ O ₃ (1000)	1	3	320	300	3	16	0	0
	2	3	320	300	3	16	20	50%
	3	3	450	400	3	16	0	0
	4	3	450	400	3	16	20	50%
Al ₂ O ₃ (400)	5	4	450	500	4	16	0	0
	6	4	450	500	4	16	20	50%

Durchführung der Versuche mit Band

Die Versuche wurden analog zu den Versuchen des konventionellen Finishings durchgeführt. Das **Bild 27** stellt den Versuchsablauf mit der installierten Ultraschalleinheit dar. Um einen Vergleich zu haben, wurde für die jeweiligen Versuche die Ultraschallunterstützung ein- bzw. ausgeschaltet.



Bild 27: Versuchsvorgänge mit der Ultraschalleinheit

Auswertung

Die Versuche wurden ausgewertet und die Resultate einander gegenüber gestellt. Erste Ergebnisse zeigten, dass die Kennwerte der Oberflächenrauheit mit Ultraschall schlechter waren als ohne Ultraschall. Jedoch ist durch die Ultraschallunterstützung eine neue Oberflächentopographie entstanden.

Das **Bild 28** zeigt den gemessenen Wert des konventionellen Finishings gegenüber dem Ultraschall-Finishing. Die Versuchsnummern sind der **Tabelle 15** zu entnehmen.

Da durch die Bearbeitung mit Ultraschall eine komplett neue Oberflächenstruktur erzeugt wurde (**Bild 29**), ist eine Übereinstimmung der Rauheitswerte nicht ohne weiteres zu erwarten.

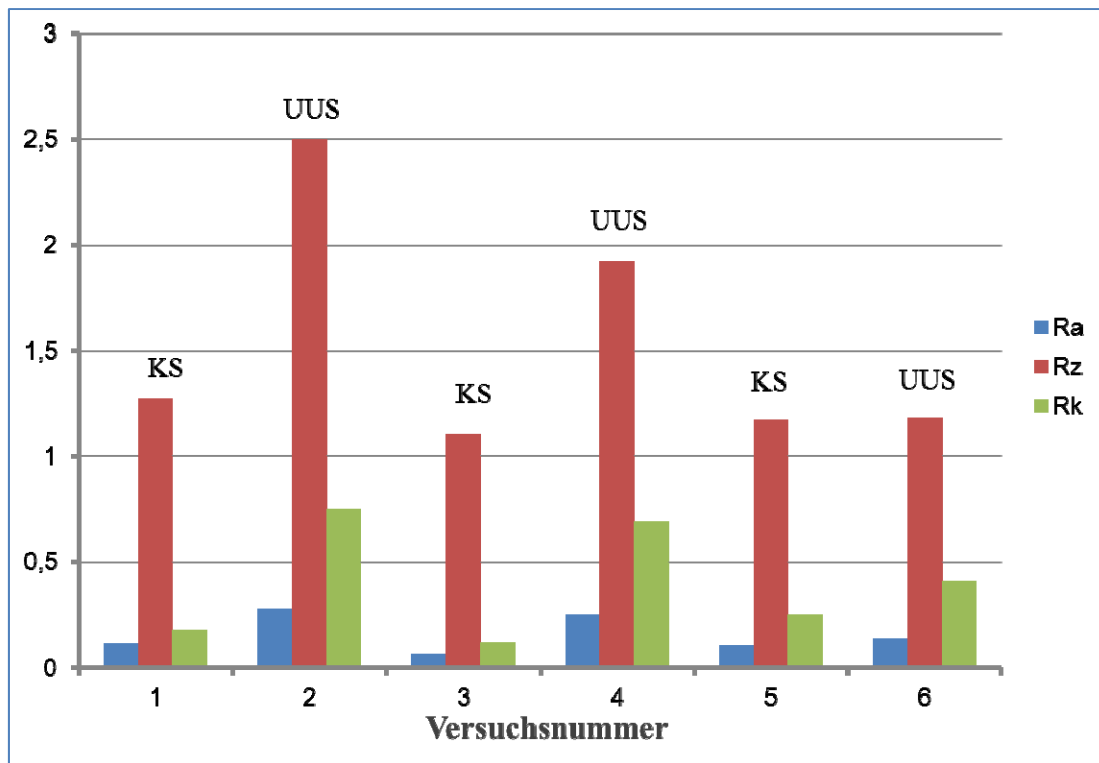


Bild 28: Ergebnisse der Oberflächenrauheiten im Vergleich: konventionelles (KS) und ultraschallunterstütztes Finishing (UUS)



Bild 29: Vergleich der Oberflächen, links: konventionell, rechts: mit UUS

Wie auf **Bild 30** zu sehen ist, bestehen zwischen der Ultraschallbearbeitung und der konventionellen Bearbeitung kaum Unterschiede was die entstehenden Kräfte betrifft, obwohl der Abtrag beim ultraschallunterstützten Finishing wesentlich höher ist (s. Abschnitt 7.3.4). Nur bei den Versuchsnummern 5 und 6 ist ein nennenswerter bzw. erkennbarer Unterschied zu sehen. Die Kräfte beim ultraschallunterstützten Finishing sind größer ausgefallen als beim konventionellen Finishing.

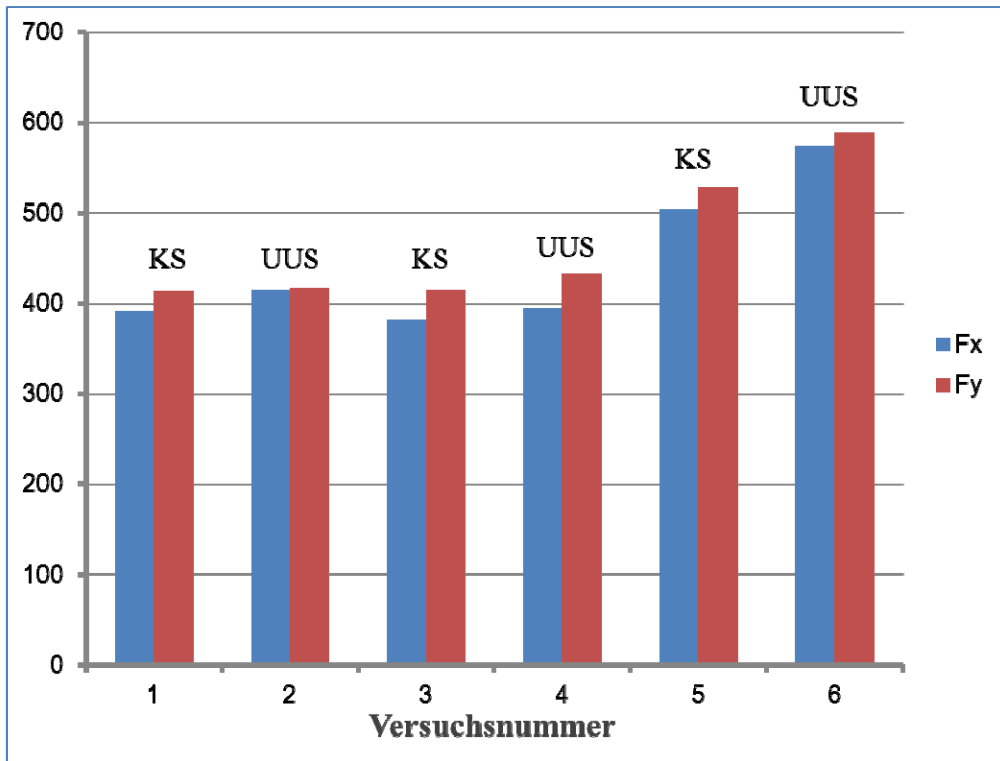


Bild 30: Vergleiche der entstandenen Kräfte beim konventionellen (KS) und ultraschallunterstützten Finishing (UUS)

Auf **Bild 31** ist zu erkennen, dass durch den Ultraschall das Finishing-Band zu heiß (Bild 31 rechts) und dadurch die Bindung zerstört wurde. Dies führte folglich zu größerer Reibung zwischen Band und Werkstück und größeren Kräften.

Zu der im Bild 31 gezeigten Bearbeitung mit Finish-Band sind im **Bild 32** die Oberflächenprofile der Werkstücke dargestellt.

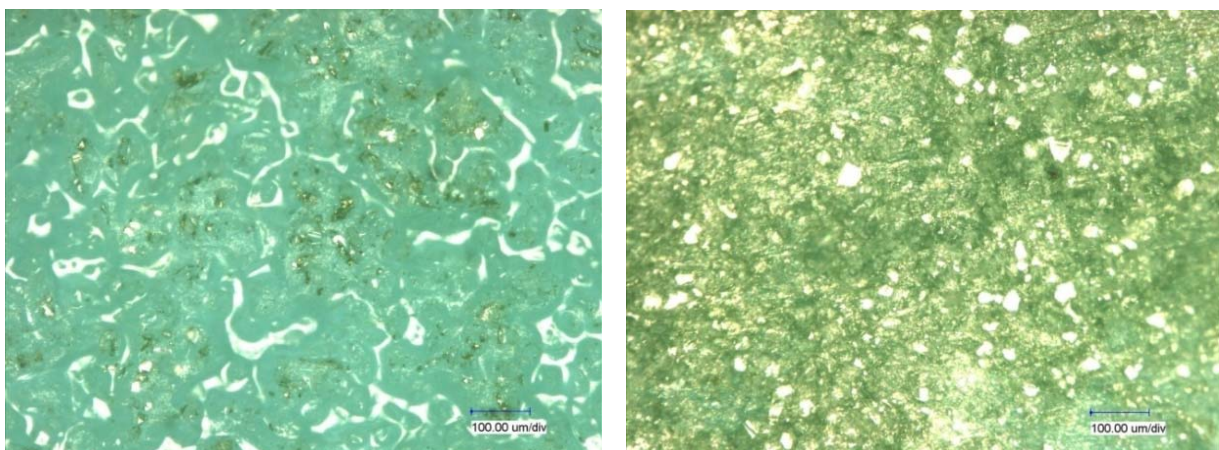


Bild 31: Oberflächen des Finishing-Bandes bei 300-facher Vergrößerung. Links: konventionelle Bearbeitung, rechts: ultraschallunterstützte Bearbeitung

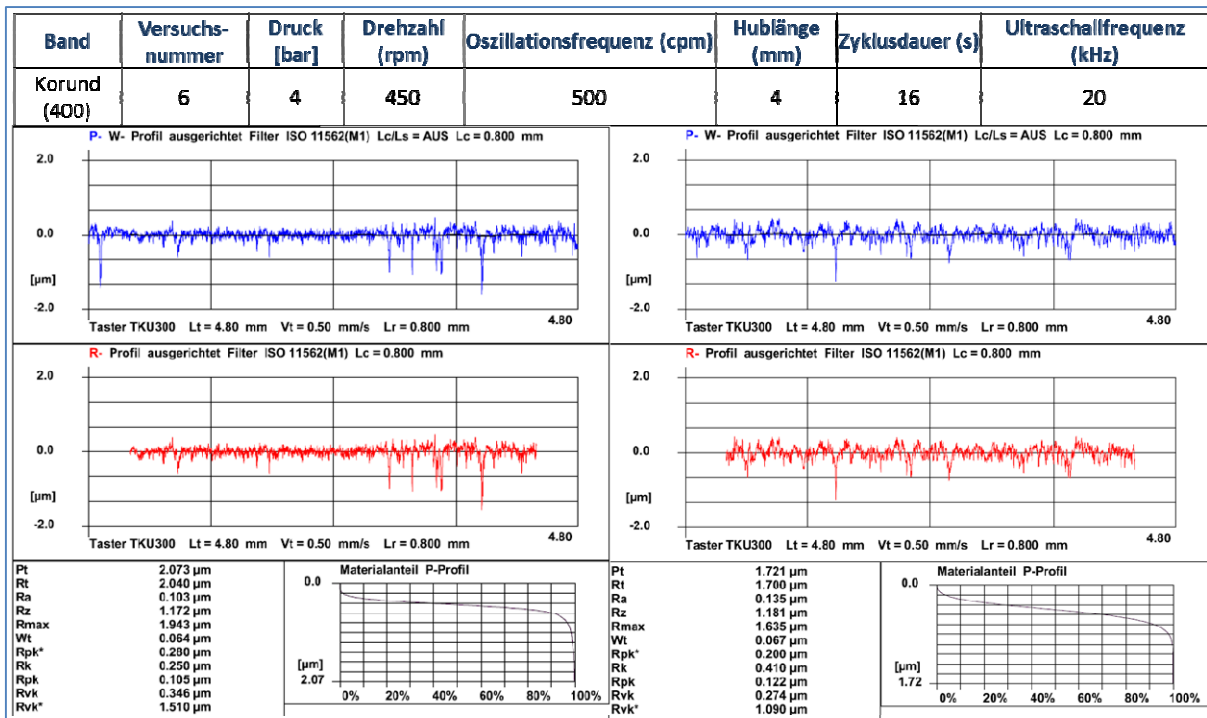


Bild 32: Oberflächenprofile des Werkstückes, links: konventionell, rechts: UUS

7.3.4 Abtragsverhalten an Werkstücken

Um mehr Informationen über den untersuchten Prozess zu erhalten, wurden Abtragsversuche am Werkstück durchgeführt. Es wird erwartet, dass mit US-Unterstützung die Abtragsraten am Werkstück im Vergleich zum konventionellen Finishing steigen.

Versuchsvorbereitung

Zum Vergleich der Abtragsraten wurden die Versuche laut **Tabelle 16** durchgeführt. Die Versuche wurden mit 2 verschiedenen Bändern (400, 1000) und jeweils mit und ohne Ultraschallunterstützung durchgeführt. Die Oberflächenrauheiten wurden vor den Versuchen gemessen, um die Ergebnisse des Finishens analysieren zu können.

Um den Abtrag genau bestimmen zu können, wurde nur ca. die Hälfte des Werkstückes bearbeitet (**Bild 33**). Die Unterschiede an der Grenze zwischen bearbeiteten und unbearbeiteten Bereich des Werkstückes ermöglichten so eine Aussage über den Abtrag am Werkstück.

Tabelle 16: Versuchsparameter für die Abtragsmessung am Werkstück

Ultraschall (f= 20.37kHz A=60% P=80W)	Band (korund)	Druck (bar)	Drehzahl (rpm)	Ozillationsfrequenz (cpm)	Hublänge (mm)	Zyklusdauer (s)	Abtrag (μm)
ohne	1000	4	450	600	4	16	3
ohne	1000	4	450	600	4	20	6
ohne	1000	4	450	300	4	20	2
ohne	1000	4	600	600	4	16	2
ohne	1000	4	600	600	3	16	5
ohne	400	4	450	600	3	16	2
ohne	400	4	450	600	3	20	7
ohne	400	4	450	300	3	20	3
ohne	400	4	600	600	3	16	1
ohne	400	4	600	600	4	16	4
mit	1000	4	450	600	4	16	1
mit	1000	4	450	600	4	20	1
mit	1000	4	450	300	4	20	4
mit	1000	4	600	600	4	16	4
mit	1000	4	600	600	3	16	4
mit	400	4	450	600	3	16	4
mit	400	4	450	600	3	20	5
mit	400	4	450	300	3	20	5
mit	400	4	600	600	3	16	7
mit	400	4	600	600	4	16	5

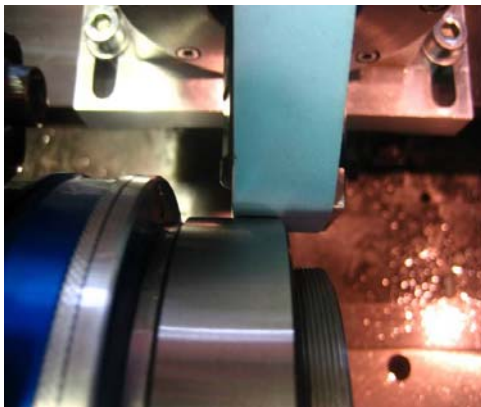


Bild 33: Versuchsdurchführung zur Messung des Abtrages am Werkstück

Der in der **Tabelle 16** gemessene Abtrag wurde mit einem Oberflächen- und Konturenmessgerät der Fa. Hommel-Etamic (T8000) durchgeführt. In **Bild 34** ist ein Beispiel der Messung dargestellt. Durch das Messen an der Grenze zwischen bearbeiteten und unbearbeiteten Bereich des Werkstückes kann eine Aussage über den Abtrag am Werkstück gemacht werden. Der Messtaster bewegt sich an der Grenze zwischen geschliffenen und gefinishten Bereich. Der Weg beträgt nur wenige Millimeter und kann in der Steuerungseinheit angegeben werden. Durch die Computeranalyse der Messungen kann eine Aussage über den Abtrag gemacht werden. Es wird der Abstand zwischen dem bearbeiteten und unbearbeiteten Bereich gemessen.

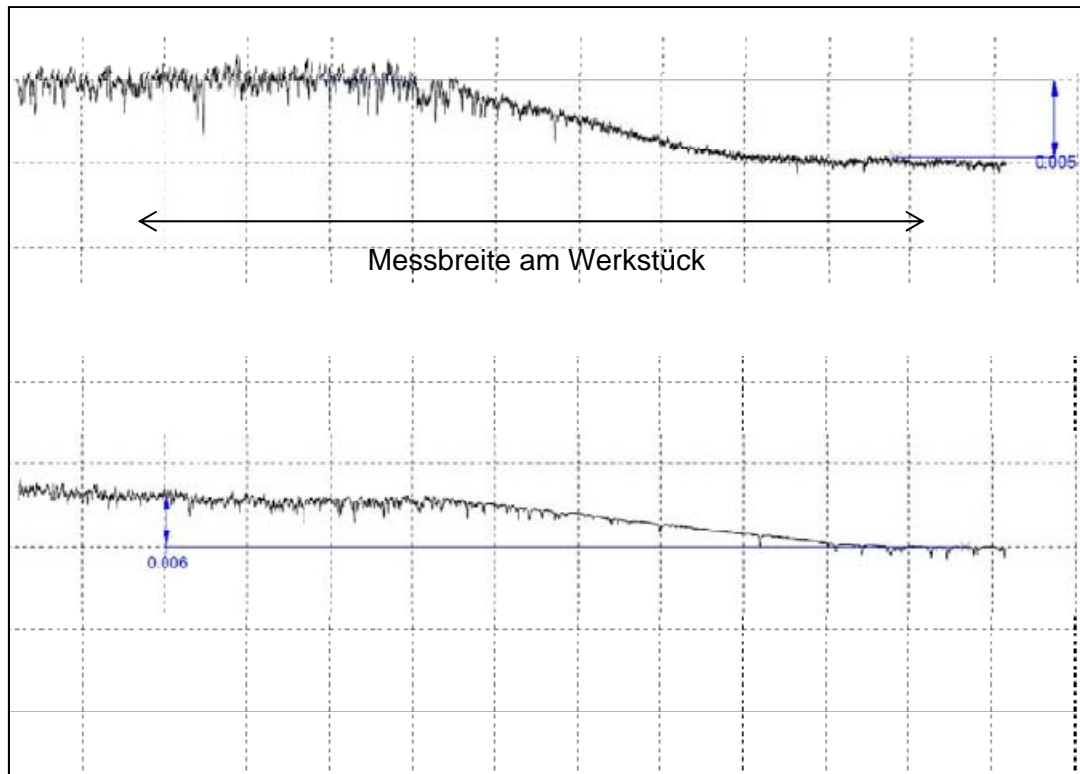


Bild 34: Darstellung des Abtrages am Werkstück

7.3.5 Prozesstechnologische Untersuchungen zum Trockenfinish

Um für das Superfinish-Verfahren Kosten einzusparen, wurden auf Wunsch der Industriepartner Versuche durchgeführt ohne den Einsatz von KSS. Um repräsentative Ergebnisse zur erlangen, wurden mit Hilfe der Taguchi-Methode die Einstellgrößen für die Trockenversuche dargestellt. In **Tabelle 17** sind die Einstellgrößen (Faktoren u. Ebenen) für die Taguchi-Methode dargestellt.

Aus der **Tabelle 18** konnten dann für die prozesstechnologischen Versuche folgende Eingangsparameter aufgestellt werden (**Tabelle 17**).

Tabelle 17: Einstellgrößen für die prozesstechnologischen Untersuchungen

KSS	Druck [bar]	Drehzahl [rpm]	Oszillationsfrequenz [min-1]	Hublänge [mm]	Zyklusdauer [s]
mit	1	250	300	1	4
	2	350	600	2	8
ohne	4	450	900	3	12
	6	600	1200	4	16

Tabelle 18: Einstellgrößen für die Untersuchungen zum Trockenfinish

KSS	Druck [bar]	Drehzahl [rpm]	Oszillationsfrequenz [min-1]	Hublänge [mm]	Zyklusdauer [s]
Ja	1	250	300	1	4
Ja	1	350	600	2	8
Ja	1	450	900	3	12
Ja	1	600	1200	4	16
Ja	2	250	300	2	8
Ja	2	350	600	1	4
Ja	2	450	900	4	16
Ja	2	600	1200	3	12
Ja	4	250	600	3	16
Ja	4	350	300	4	12
Ja	4	450	1200	1	8
Ja	4	600	900	2	4
Ja	6	250	600	4	8
Ja	6	350	300	3	16
Ja	6	450	1200	2	4
Ja	6	600	900	1	8
Nein	1	250	1200	1	16
Nein	1	350	900	2	12
Nein	1	450	600	3	8
Nein	1	600	300	4	4
Nein	2	250	1200	2	12
Nein	2	350	900	1	16
Nein	2	450	600	4	4
Nein	2	600	300	3	8
Nein	4	250	900	3	4
Nein	4	350	1200	4	8
Nein	4	450	300	1	12
Nein	4	600	600	1	16
Nein	6	250	900	4	8
Nein	6	350	1200	3	4
Nein	6	450	300	2	16
Nein	6	600	600	1	12

Es waren keine Versuche mit Ultraschall möglich. Durch die Einwirkung von Ultraschall ohne KSS wurde das Band so heiß, dass es verschmolzen ist. Daher wurden nur Versuche auf konventionelle Weise durchgeführt. In der folgenden **Tabelle 19** sind die Verfahren mit den besten Ergebnissen aufgeführt; verglichen wurden das Trockenfinish und Finish mit KSS.

Tabelle 19: Beste Ergebnisse nach der Versuchsreihe

Verfahren	R _a vor dem Finishing (µm)	R _a nach dem Finishing (µm)	R _z vor dem Finishing (µm)	R _z nach dem Finishing (µm)
mit KSS	0,53	0,22	3,71	1,88
Trocken	0,53	0,31	3,71	2,46

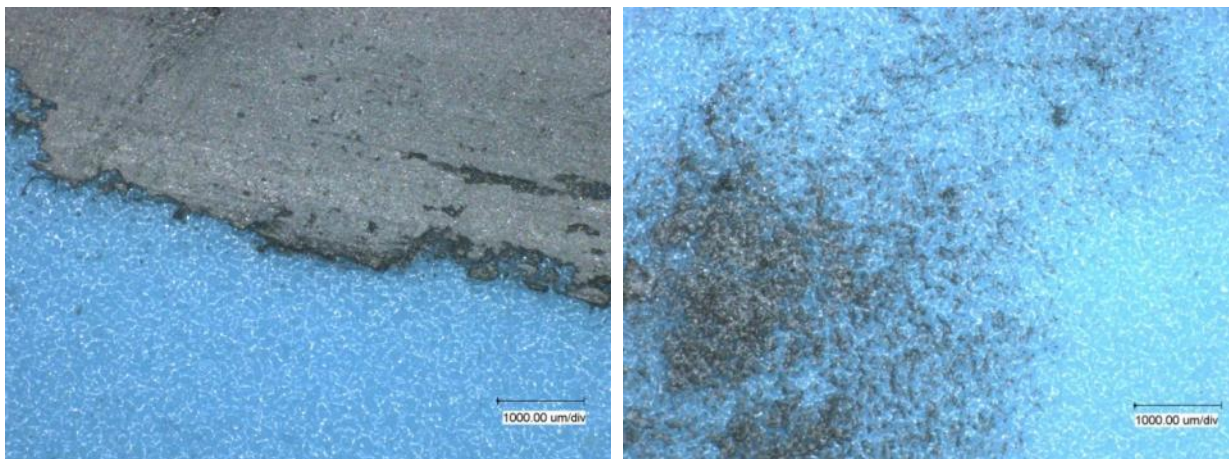


Bild 35: Vergleiche von Superfinish-Band, links: Trockenfinish; rechts: mit KSS

Das **Bild 35** zeigt, dass ohne den Einsatz von Kühlschmierstoff sich das Band nach kurzer Bearbeitungszeit stark zusetzt. Dies führte zu starker Reibung zwischen Band und Werkstück und dadurch zu sichtbaren Brandmarken.

7.3.6 Untersuchungen zum ultraschallunterstützten Superfinishing mit Stein

Vorbereitungen der Versuche mit Stein

Analog zu den US-Versuchen mit Band wurden aus den Benchmark-Ergebnissen Versuche mit Finish-Steinen, SiC und Al₂O₃ durchgeführt. Das **Bild 36** zeigt den Versuchsaufbau mit der Sonotrode und die Halterung für den Finish-Stein. Wie auch beim konventionellen Finishen mit Stein, wurde der Stein an die Form des Kugellagerringes angepasst.

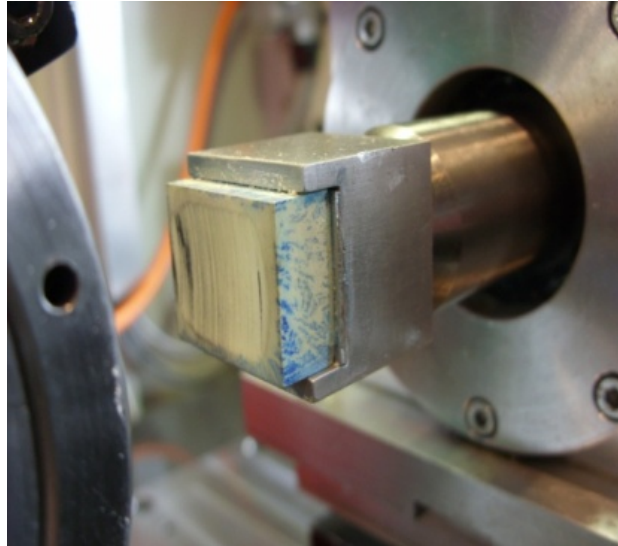


Bild 36: Versuchsaufbauten mit dem Finish-Stein

Abbruch der Versuche und Fazit

Bei den Versuchen mit dem Prüfstand ohne Ultraschall verliefen die einzelnen Durchführungen ohne weitere Probleme; sie können dem konventionellen Verfahren gleichgestellt werden. Beim den Versuchen mit Ultraschall löste sich aber der Stein aus seiner Fassung oder brach aus, da die Dämpfung durch den Stein sehr groß war. Hier galt es zusammen mit dem IPT Aachen ein neues System zu entwickeln. Die Überlegungen gingen dabei in Richtung mechanisches Klemmsystem oder Verwendung von metallisch gebundenen CBN Steinen. Bei der Konzeption musste beachtet werden, dass die Halterung gleichzeitig Teil der Sonotrode ist und jedes Masseteil die Schwingungskette beeinflusst

7.4 Prozesstechnologische Untersuchungen mit dem Prototypen

Integration der Prototypen in der Supfina LCM 2000

Für die Integration der Prototypen (**Bild 37**) waren einige Vorarbeiten notwendig. So musste die Einheit erst mit der vorhandenen Grundplatte verbodrt und verschraubt werden. Die Pneumatik-Einheit der Prototypen musste an die Maschine angeschlossen und durch manuelle Schalter gesteuert werden. Der Antrieb wurde durch einen Elektriker an den schon vorhandenen Schaltkasten des Prüfstandes angepasst und angeschlossen.



Bild 37: Prototyp der Ultraschallfinish-Einheit

Des Weiteren konnte die gelieferte Sonotrode der Prototypen nicht verwendet werden. Der Grund lag darin, dass die Sonotrode mit einem aufschraubbaren Aufsatz versehen war. Die Schrauben brachen unter dem Einsatz von Ultraschall. Daher wurde eine neue Sonotrode gefertigt ohne Aufsatz (**Bild 36**), so dass das Band direkt auf der Sonotrode aufsitzt.



Bild 38: Sonotrode für das Finishing mit Band (ohne Aufsatz)

7.4.1 Versuchsbedingungen und Ergebnisse mit Finishingband

Aus vorherigen Versuchen mit dem Prüfstand 2 wurden folgende Werte als Eingangsparameter für die Untersuchungen verwendet.

- *Band:* 400
- *Druck:* 4 bar
- *Drehzahl:* 450 - 600 U/min
- *Frequenz:* 500 cpm
- *Hublänge:* 4 – 5,5 mm
- *Zyklusdauer:* 16 - 20 s

Bei den Untersuchungen wurden in Abhängigkeit von der Ultraschallamplitude die Oberflächenbeschaffenheit, der Abtrag und die Kraft miteinander verglichen.

Die Werkstücke wurden vor dem Finish immer mit demselben Parameter vorgeschliffen. In der folgenden **Tabelle 20** sind die Durchschnittswerte der Werkstücke vor dem Finish angegeben.

Tabelle 20: Oberflächenrauheit der Werkstücke vor dem Finish

R_a [μm]	R_z [μm]	R_k [μm]	R_{pk} [μm]	R_{vk} [μm]
0,5	4	1,8	0,65	0,96

Bei dem Generator der Prototypen, zu sehen auf **Bild 35** rechts, war es möglich, verschiedene Ultraschallamplituden einzustellen. Die Einstellung erfolgte zwischen 50 – 100% wobei 50% eine Amplitude von ca. 10 μm , 75% eine Amplitude von ca. 15 μm und 100% eine Amplitude von ca. 20 μm betrug. Die Amplitude wurde mit einem Wirbelstromsensor gemessen. In **Bild 38** und **Bild 39** ist die Oberflächenrauheit der Werkstücke bei einer Zyklusdauer von 16 und 20 s gegenüber gestellt. Alle anderen Eingangswerte waren gleich (**Tabelle 21**). Der Verlauf der Geraden zeigt, dass beim Einsatz von Ultraschall die Rauheitswerte etwas ansteigen. Je höher die Amplitude, desto größer die Rauheitswerte. Bei der Zyklusdauer von 20 Sekunden werden die Werte insgesamt etwas schlechter. Das liegt daran, dass das Band keinen Vorschub hat und nur auf einer Stelle abträgt. Dies führt dazu, dass das Band stark verschleißt und nur noch reibt anstatt abzutragen.

Tabelle 21: Eingangswerte für die Untersuchungen der Bilder 38 und 39

Band	Druck [bar]	Drehzahl [rpm]	Oszillationsfrequenz [min^{-1}]	Hublänge [mm]	Bandvorschub [mm]
400	4	450	500	5,5	0

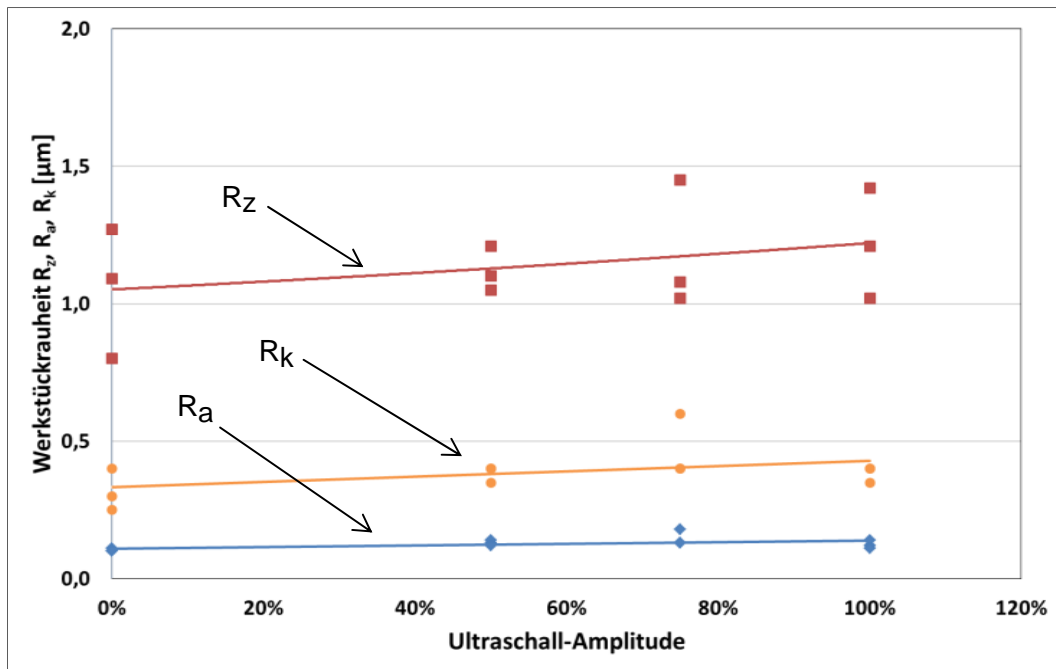


Bild 38: Oberflächenbeschaffenheit in Abhängigkeit von der US-Amplitude; Zyklusdauer 16 s

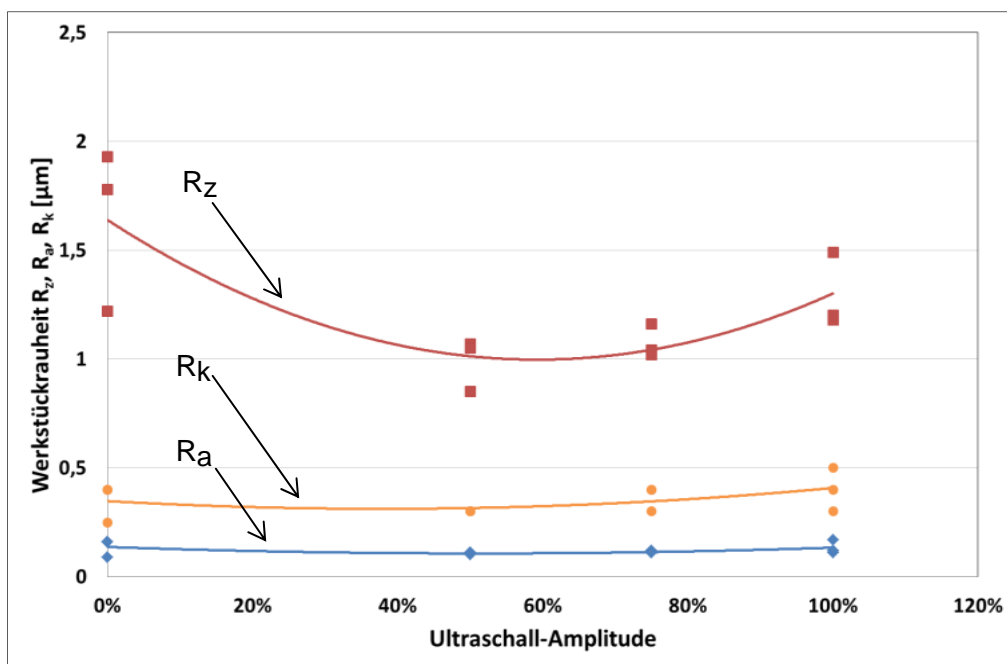


Bild 39: Oberflächenbeschaffenheit in Abhängigkeit von der US-Amplitude; Zyklusdauer 20 s

In **Bild 40** und **Bild 41** wird die Oberflächenrauheit der Werkstücke in Abhängigkeit von der Drehzahl miteinander verglichen, die Zyklusdauer war bei beiden Schaubildern gleich. Der Verlauf der beiden Schaubilder ist in etwa identisch. Aus den Versuchen lässt sich erkennen, dass durch die Erhöhung der Drehzahl eine feinere Oberfläche erzielt werden kann. Die Eingangswerte für die Versuche sind in **Tabelle 22** aufgeführt.

Tabelle 22: Eingangswerte für die Untersuchungen der Bilder 40 und 41

Band	Druck [bar]	Zyklusdauer [s]	Oszillationsfrequenz [min ⁻¹]	Hublänge [mm]	Bandvorschub [mm]
400	4	16	500	5,5	0

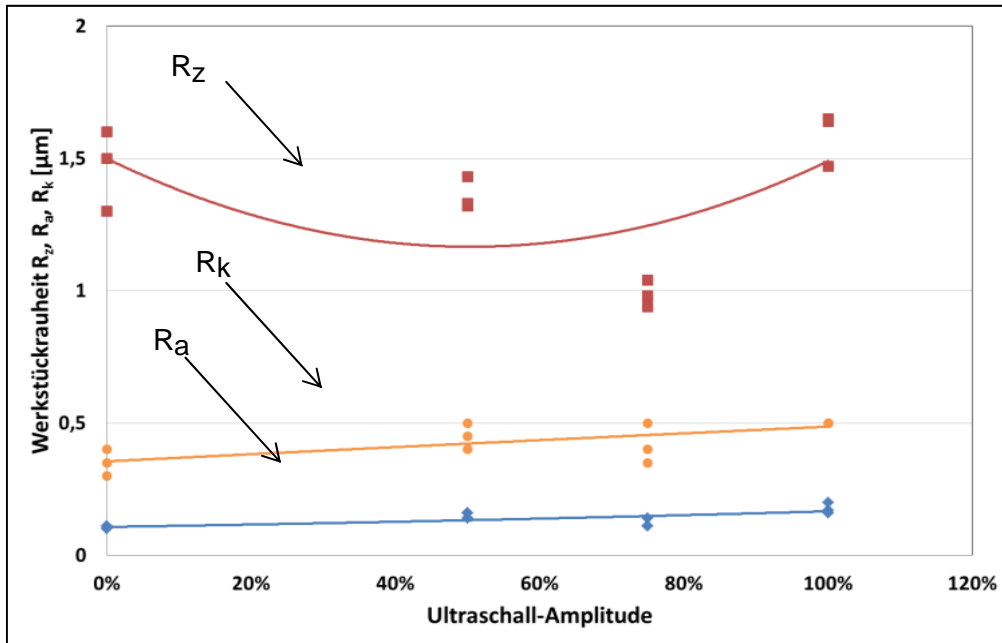


Bild 40: Oberflächenrauheit in Abhängigkeit von der Amplitude, Drehzahl 450 U/min

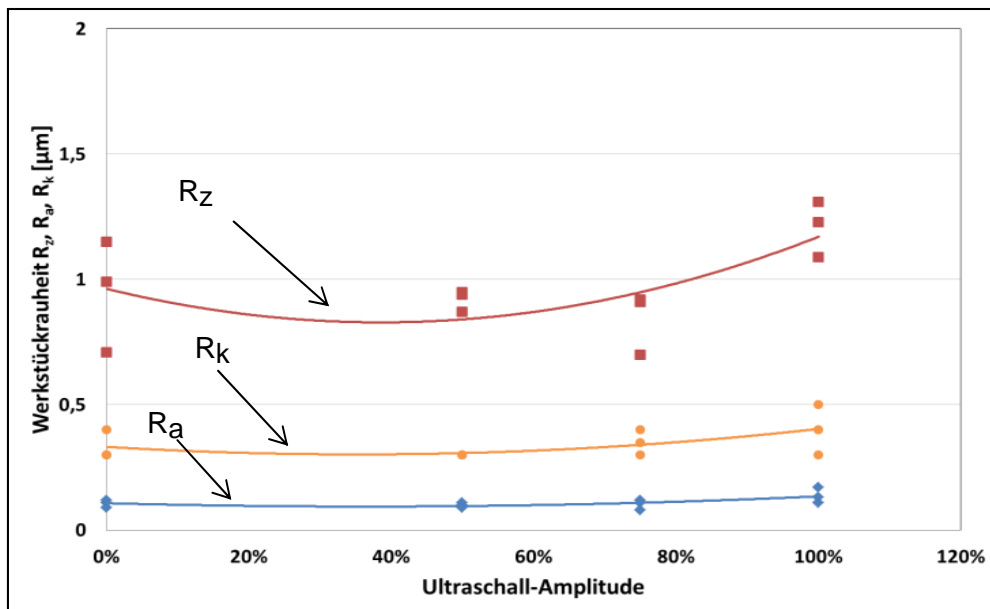


Bild 41: Oberflächenrauheit in Abhängigkeit von der Amplitude, Drehzahl 600 U/min

Auf dem **Bild 42** wird der Abtrag am Werkstück dargestellt. Zu sehen ist, dass durch die Erhöhung der Amplitude der Abtrag steigt. Des Weiteren fällt auf, dass mit einer Hublänge von 4 mm ein höherer Abtrag erreicht wurde. Dies lässt sich dadurch erklären, dass durch die kürzere Hublänge das Band in der gleichen Zyklusdauer öfter die zu bearbeitende Stelle durchlaufen und es daher zu einem höheren Abtrag geführt hat. In der **Tabelle 23** sind die Eingangswerte für den Versuch dargestellt.

Tabelle 23: Eingangswerte für die Untersuchungen des Bildes 42

Band	Druck [bar]	Zyklusdauer [s]	Oszillationsfrequenz [min^{-1}]	Drehzahl [rpm]	Bandvorschub [mm]
400	4	16	500	600	0

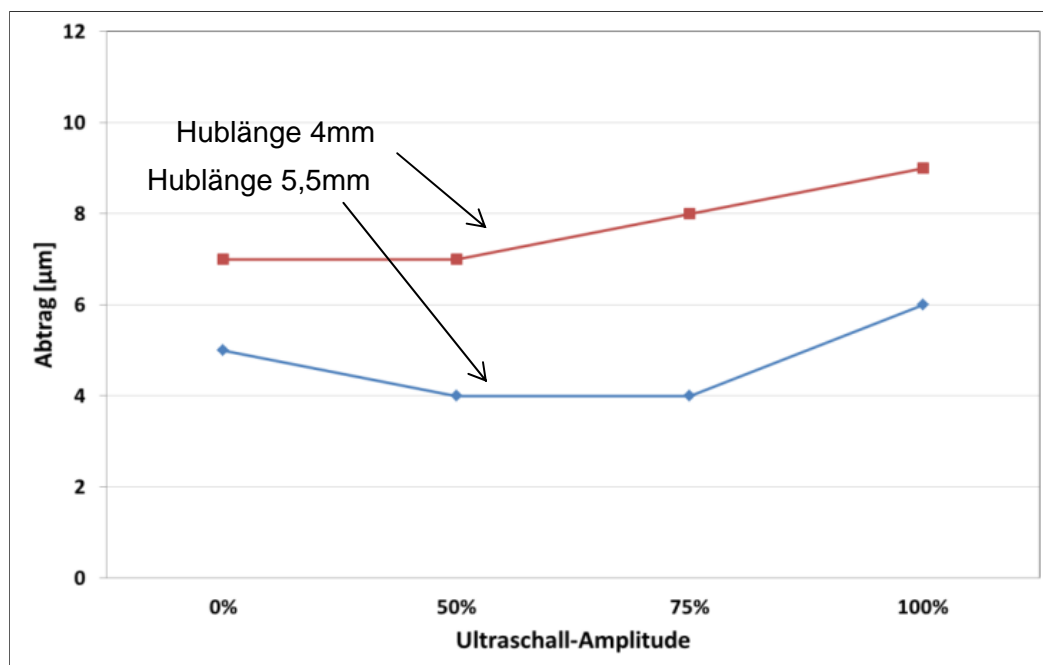


Bild 42: Abtrag am Werkstück bei Erhöhung der Ultraschall-Amplitude

Bild 43 zeigt eine mikroskopische Aufnahme der Oberflächenstruktur im Vergleich konventionelles (a) und ultraschallunterstütztes Superfinishing (b). Es ist ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Verfahren zu erkennen. Bild 41 (a) zeigt eine typische Superfinishing-Struktur mit einem leichten Kreuzschliff wobei die Oberflächenstruktur in Bild 41 (b) eher kraterförmig ist.

Die am besten gelungenen Oberflächenrauheiten sind in **Bild 44** und **Bild 45** dargestellt. In Bild 42 ist das Oberflächenprofil des Werkstückes ohne den Einsatz von Ultraschall abgebildet. Wie vom vorhergehenden konventionellen Superfinishing mit Band zu erwarten sind noch Schleifrillen im Profil zu sehen. Es wurden nur die sogenannten „Berge“ im Profil abgetragen. Die Finishing-Parameter sind oben im Bild angegeben.

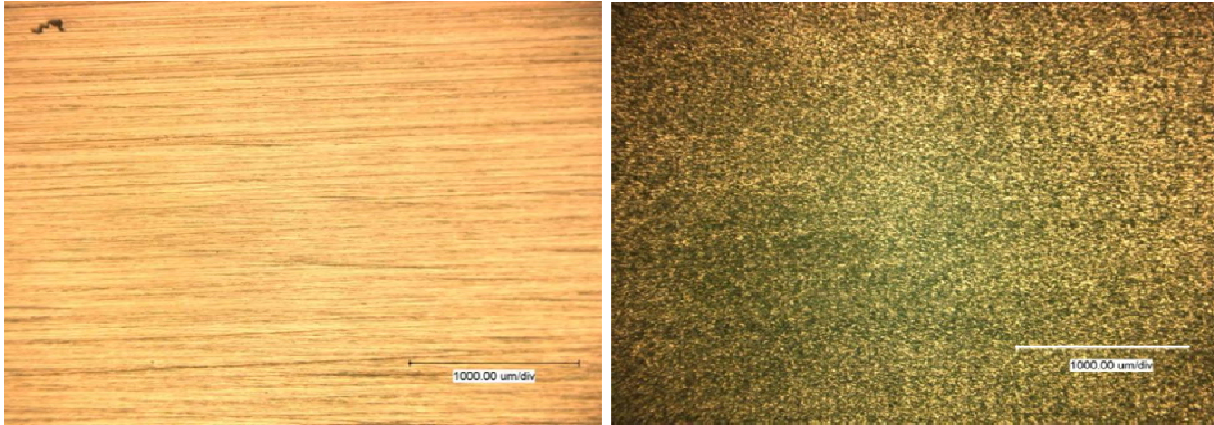


Bild 43: Mikroskopische Aufnahmen der Werkstückoberfläche nach dem Finishing
 (a) konventionell, (b) ultraschallunterstützt

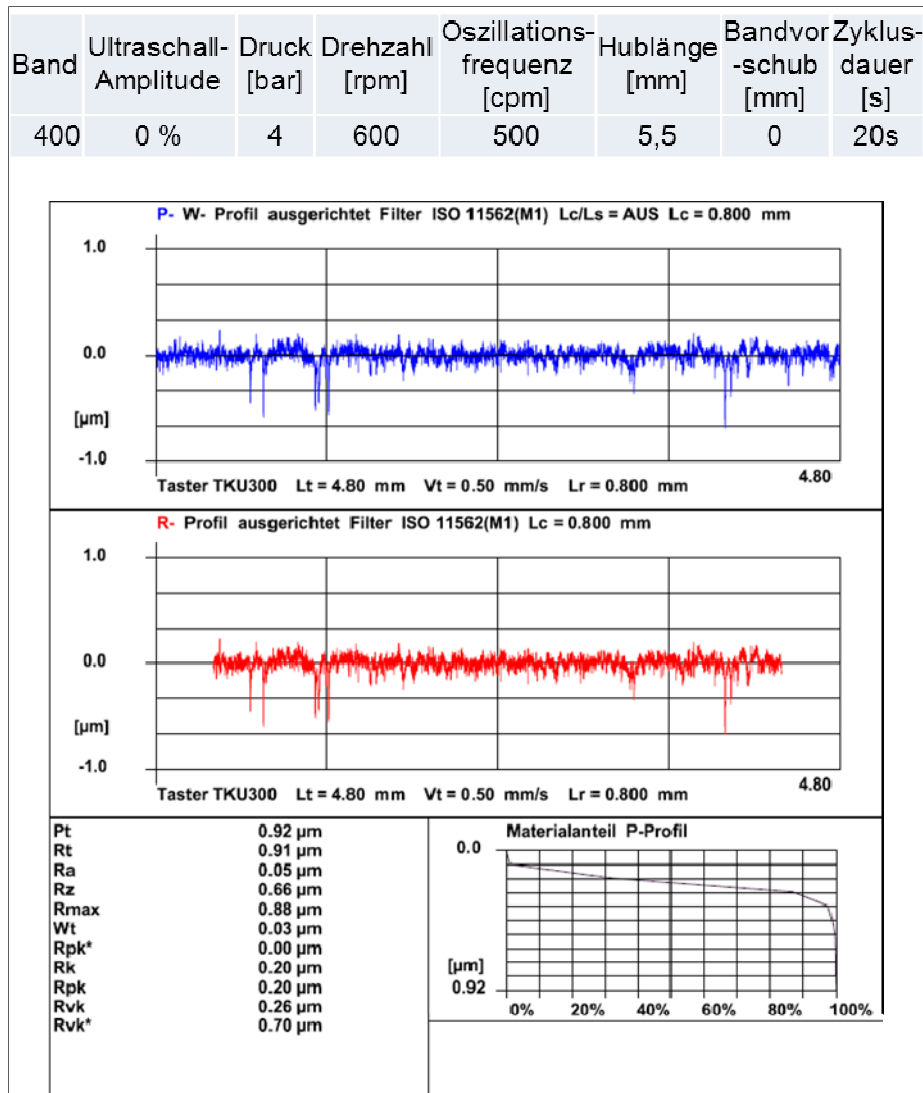


Bild 44: Oberflächenprofil des Werkstückes nach dem konventionellen Superfinish mit Band

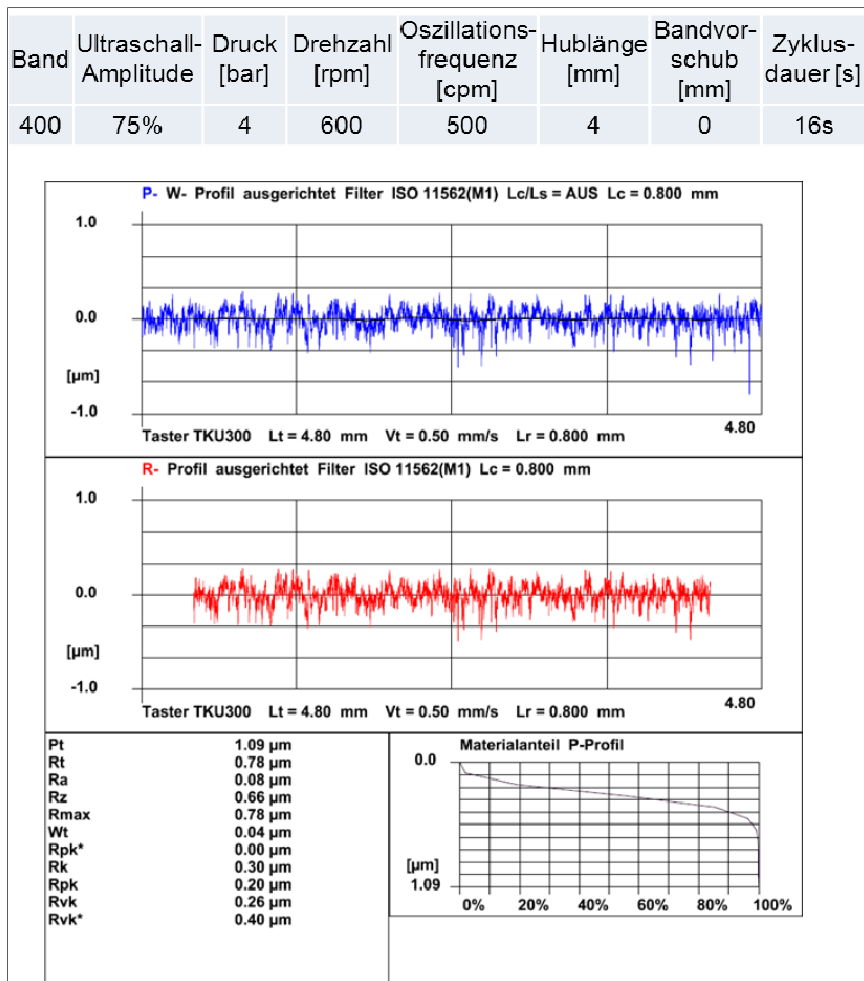


Bild 45: Oberflächenprofil des Werkstückes nach dem konventionellen Superfinish mit Band

Im Bild 44 ist das Profil eines mit ultraschallunterstütztem Superfinish gefertigten Werkstückes abgebildet. Es sind keine tiefen „Täler“ zu erkennen. Da der Abtrag mit Ultraschall wesentlich höher ist, wurde eine neue Oberfläche ohne Schleifspuren erzeugt.

Fazit

Die Oberflächenstruktur beim ultraschallunterstützten Superfinishing ist im Gegensatz zum konventionellen Finishing völlig unbekannt. Die Eigenschaften dieser Oberfläche muss genauer untersucht werden. Es sollten praxisbezogene Bauteile gefertigt und auf Eigenspannung und Laufeigenschaften untersucht werden.

7.4.2 Versuchsbedingungen mit Finishingstein

Wie schon erwähnt gab es Schwierigkeiten beim ultraschallunterstützten Finishing mit Stein. Es wurden verschiedene Werkzeuge konstruiert um den Stein festzuhalten. Die Steine wurden aufgeklebt, aufgeschraubt, mechanisch festgehalten, usw. Das Ergebnis war immer das Gleiche: der Stein löst sich aus der Halterung oder zerbricht, da die Dämpfung im Stein zu hoch ist. Die Überlegung ging daher in Richtung metallisch gebundene Diamant- oder CBN-Steine, wie in **Bild 46** zu sehen. Dazu wurden Hohnsteine auf die Sonotrode aufgelötet.

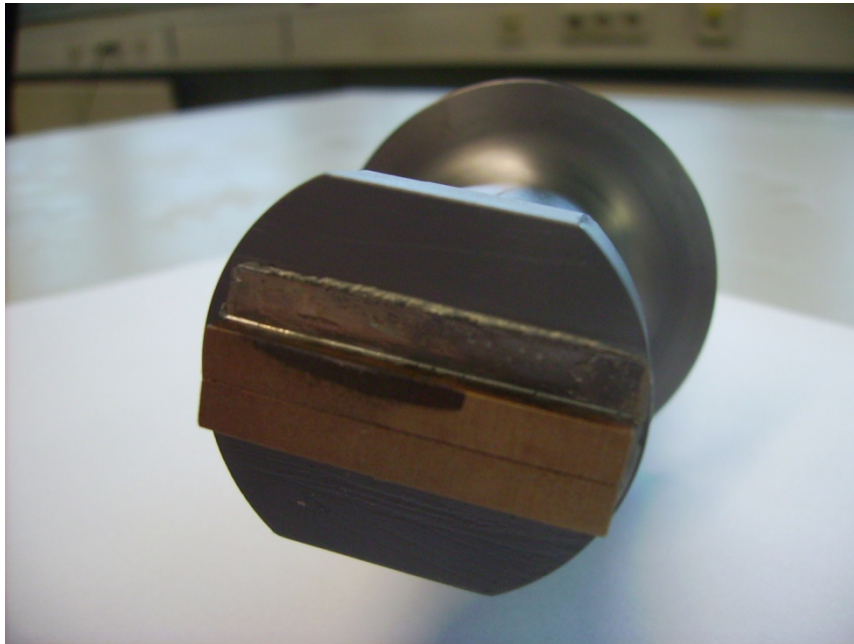


Bild 46: Sonotrode mit aufgelöteten Diamant Hohnsteinen

Beim Versuch das Werkstück mit Einsatz von Ultraschall zu finishen, löste sich auch hierbei einer der drei Hohnsteine aus der Lötung. Die Versuche konnten daher nicht weitergeführt werden. Ein weiteres Problem der Diamanthohnsteine ist, dass sie sich nicht einfach Profilieren lassen.

7.4.3 Optimierung, zukünftige Anpassungsarbeiten

Die Integration in das Maschinensystem wird fortgeführt. Der Kontakt zwischen der Fa. Supfina, Fraunhofer IPT und der Hochschule Furtwangen wird aufrecht gehalten um das System zu verbessern. Durch das ultraschallunterstützte Superfinishing kann der Abtrag am Werkstück wesentlich erhöht und somit die Bearbeitungszeit verkürzt werden.

Die neue Topographie scheint sehr interessant zu sein und muss weiteren Tests unterzogen werden. Da es innerhalb des Projektes zu keinem Ergebnis mit dem ultraschallunterstützten Superfinish mit Stein gekommen ist, wird auch an dem Einsatz von Finish-Steinen weitergearbeitet und optimiert.

8 Voraussichtlicher Nutzen

Der Prototyp, der im Rahmen des Projektes konstruiert und untersucht wurde, findet bei den Projektpartnern unmittelbare Anwendung. Der Prototyp wurde in einer Superfinish-Einheit der Fa. Supfina eingebaut und wird dem Kunden vorgestellt. Für den Einsatz von Werkzeugen für das ultraschallunterstützte Superfinish haben die Fa. Atlas und Fa. Hermes an Erfahrung für neue Werkzeuge gewonnen. Somit ergeben sich neue Marktperspektiven.

Die Erfahrung mit dem ultraschallunterstützten Schleifen zeigt, dass durch den Einsatz von Ultraschall der Werkzeugverschleiß verringert werden kann. Sollte auch der Finish-Stein den Einsatz im Ultraschallfinish finden, wird auch hier der Steinverschleiß verringert und es können Zeit und Kosten eingespart werden.

9 *Erfolge und geplante Veröffentlichungen*

Die Ergebnisse, die im Rahmen des hier berichteten Projektes erzielt wurden, werden in öffentlichen Workshops präsentiert. Darüber hinaus ist die Veröffentlichung der Ergebnisse in verschiedenen Fachzeitschriften und –konferenzen geplant, darunter:

- The International Symposium on Advances in Abrasive Technology (ISAAT) 2011
- The International Journal of Machine Tools and Manufacture
- wt Werkstattstechnik online

Literatur

- [Bru 06] J. Bruhn: „Hochleistungsbandschleifen“ 6. Seminar Moderne Schleiftechnologie und Feinstbearbeitung , Hrg. Prof. Dr.-Ing. Tawakoli, 2006
- [Den 89] P. Dennis: „Hochleistungsbandschleifen“, Dissertation Uni. Hannover, 1989
- [Fro 92] J. Fromlowitz: “Die Standzeiten und Temperaturen beim Hochleistungsbandschleifen”, Dissertation RWTH Aachen, 1992
- [Jou 05] A. Jourani, M. Dursapt, H. Hamdi, J. Rech, H. Zahouani: “Effect of the belt grinding on the surface texture: Modelling of the contact and abrasive wear”, International journal on the science and technology of the friction, lubrication and wear, 259/2005, S. 1137-1143
- [Kap 99] Gregor Kappmeyer: „Hochfrequenzhonen, Beitrag zum ultraschallunterstützten Dornhonen“, Dissertation TU Braunschweig, 1999
- [Kön 86] W. Köng, H.K. Tönshoff, J. Fromlowitz, J. P. Dennis: „Belt Grinding“, Annals of CIRP, 35, (2004), S.487-494
- [Lit 01] W. Littman, H. Storck, J. Wallaschek: “Sliding friction in the presence of ultrasonic oscillations: superposition of longitudinal oscillations”, archive of applied mechanics, 2001, S. 549-554
- [Rud 04] G. Rudolf: “Der Superfinish-Prozess – Superfinish-Bearbeitung mit Band”, 5. Seminar, Moderne Schleiftechnologie und Feinstbearbeitung, Hrg. Prof. Dr.-Ing. Tawakoli, 2004
- [Sch 02] Jörg Schmütz: „Mikrobearbeitung duktiler Werkstoffe mit ultraschallangeregten Diamantwerkzeugen“, Dissertation Uni Bremen, 2002
- [Tho 98] T. B. Thoe, D. K. Aspinwall, M. L. H. Wise: “Review on Ultrasonic Machining”, Int. Journal of machinetools&manufacture, 38/ 1998, S. 239-255
- [Tön 87] H.K. Tönshoff, P. Dennis: „Hochleistungsbandschleifen – Eine Alternative zum Fräsen“, Industrie-Anzeiger, 109 (1987), S. 38/39
- [Wan 04] C.Y. Wang, Y.H. Sun, Z. Qin, L. Zhou: “Platen Belt grinding of brittle Materials”, Key engineering Materials, 2005, S. 129-134
- [Zha 99] Q. H. Zhang, J. H. Zahng, Z. X. Jia, J. L. Sun: “Material-removal-rate analysis in the ultrasonic machining of engineering ceramics”, Journal of materials processing Technology, 88/ 1999, S. 180-184

Danksagung

Dieses Forschungsvorhaben wurde aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) im Rahmen des Programms „Förderung von innovativen Netzwerken“ (InnoNet) unter dem Förderkennzeichen 16IN0540 gefördert. Für diese Förderung sei gedankt. Dem projektbegleitenden Ausschuss sei für seine Unterstützung und die Hinweise aus den zahlreichen Diskussionen gedankt.