



Ernst-Abbe-Hochschule Jena
University of Applied Sciences

Optimierung von Schleifprozessen mittels KI-Methodik für die Fertigung präzisionsoptischer Bauelemente

Sebastian Henkel¹, Marcel Binder¹, Jens Bliedtner¹, Marco Fritzsche², Jörg Flügge³

¹Ernst-Abbe-Hochschule Jena

²Polytec GmbH

³Batix Software GmbH

Tag der Forschung - EAH Jena

19.10.2022

Vorstellung AG Bliedtner

Arbeitsgruppe im Fachbereich SciTec der Ernst-Abbe-Hochschule Jena

- Prof. Dr.-Ing. Jens Bliedtner
- 4 Laboringenieure
- 9 Doktoranden
- 21 wissenschaftliche/technische Mitarbeiter



Forschungsschwerpunkte

- Lasermaterialbearbeitung
- Optiktechnologie
- Additive Technologien (3D-Druck)

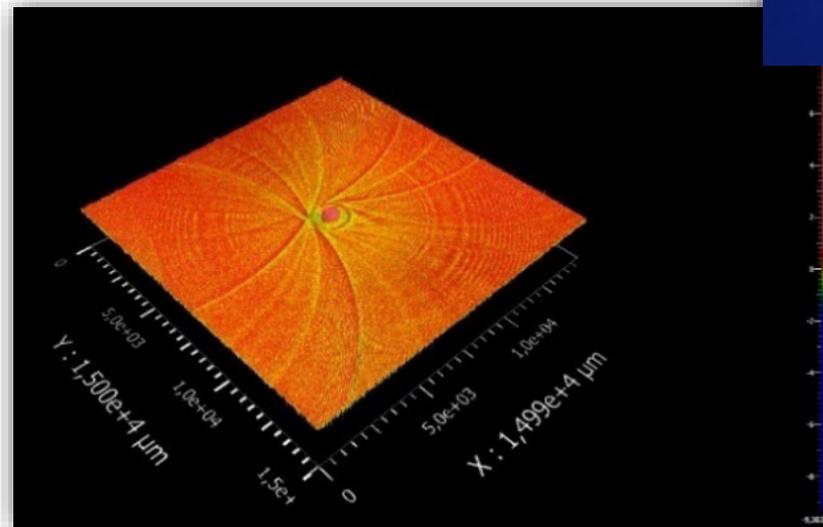
Durchführung von

- öffentlich finanzierten und bilateralen Forschungsprojekten
- Studien zu neuen Technologien und Entwicklungsleistungen
- Mitarbeiterqualifizierung und Weiterbildung im Bereich der Laser-/ Optiktechnologien



Agenda

1. Motivation und Zielstellung
2. Experimenteller Aufbau
3. Aktuelle Untersuchungen und Ergebnisse
4. Zusammenfassung und Ausblick



1. Motivation und Zielstellung

Motivation:

- hohe Komplexität des Schleifprozesses → verschiedene Schleifparameter, Maschineneinflüsse etc. haben einen starken Einfluss auf das Bearbeitungsergebnis bezüglich der geschliffenen Oberflächenqualität und Prozesseffizienz
- bei der Glasbearbeitung basieren die verwendeten Schleifparameter zum großen Teil auf der Erfahrung des Maschinenbedieners

Werkzeugeingriffsform

Kühlmittelzufuhr

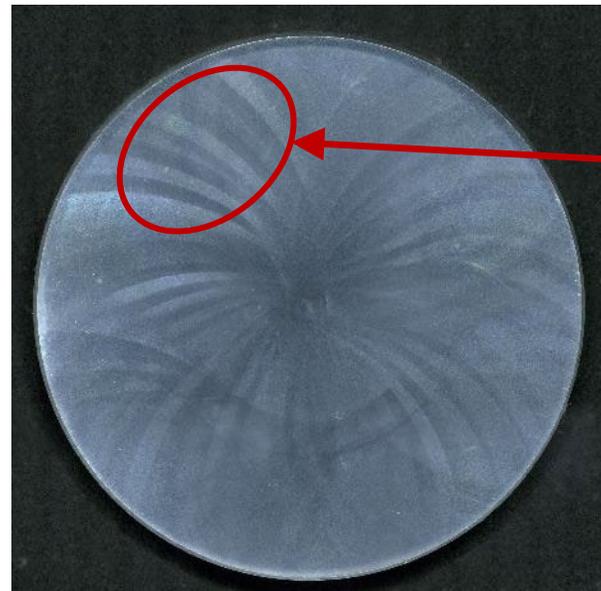
Vorschubgeschwindigkeit v_f

Arbeitseingriff a_e

Zustelltiefe a_p

Schnittgeschwindigkeit v_c

Spindeldrehzahl



Schleifkinematik

Werkzeugzustand

Werkzeuggeometrie

Korngröße des Werkzeugs

Werkzeugbindung

periodische Oberflächenstrukturen sind ein Hauptproblem beim Schleifen, da diese in anschließenden Läpp-/Polierprozessen schwer zu entfernen sind

Beispiel unerwünschter Schleifstrukturen auf einer Quarzglasoberfläche (Digital-Mikroskop– 30x Vergrößerung)

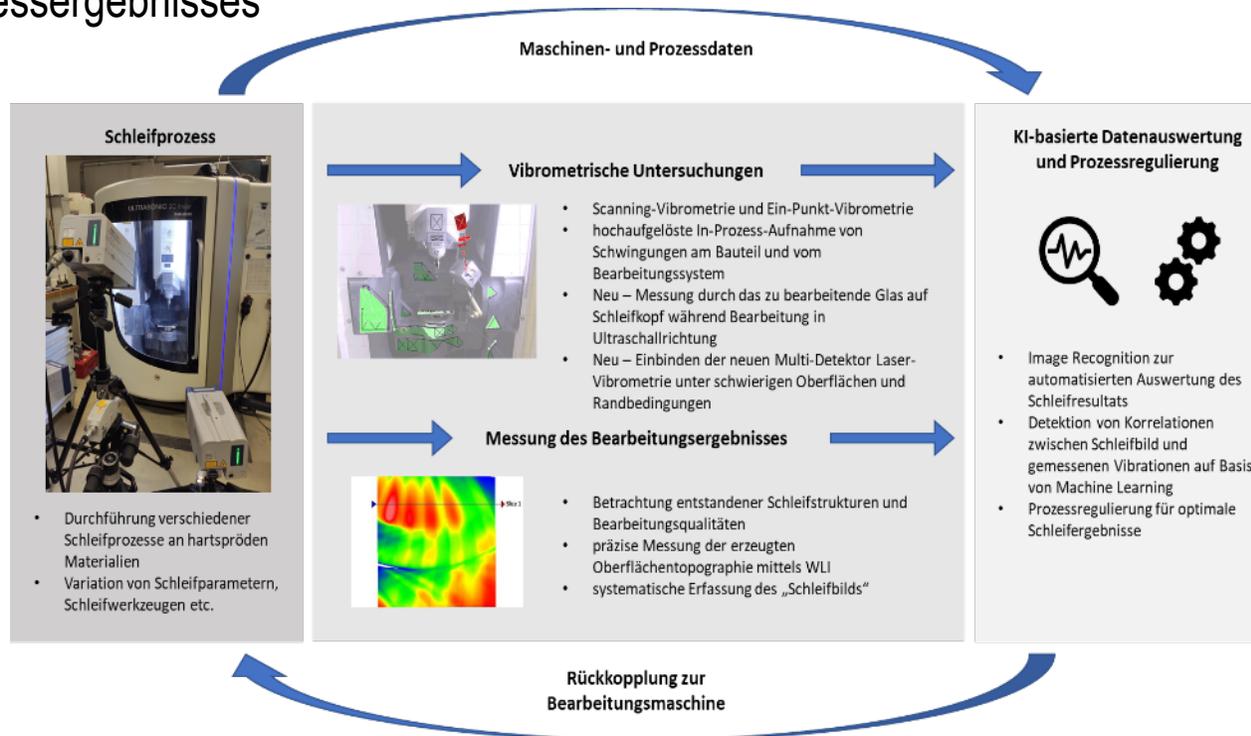
Ultraschallamplitude

Ultraschallfrequenz

1. Motivation und Zielstellung

Zielstellung:

- Ansatz: umfangreiche Schleifuntersuchungen in Kombination mit hochauflösenden In-Prozess-Messungen und Untersuchungen an der resultierenden Werkstückoberfläche nach dem Schleifen
- prozessbegleitende Erfassung von Schwingungs- und Kraftdaten → Untersuchung von Korrelationen mit den Topographiedaten des Bauteils
- Analyse der Topographie in Bezug auf Form, Welligkeit, mittelfrequente/periodische Abweichungen und Rauheit
- Implementierung einer auf den Messdaten basierenden KI zur Unterstützung der Parameterauswahl und Vorhersage des Prozessergebnisses



→ experimenteller Ansatz für Untersuchungen im aktuellen Forschungsprojekt "VibroKI"

2. Experimenteller Aufbau

Schleifversuche mittels der Maschine *Ultrasonic 20 linear* von der Firma *DMG Mori AG*

- 5-Achs CNC-Schleifmaschine
- Herstellung komplexer Bauteilgeometrien aus Glas oder Keramik möglich
- hohe Spindeldrehzahlen bis zu 40000 U/min mit Ultraschallunterstützung
- Arbeitsbereich [mm]: 200 x 200 x 280
- einstellbare Ultraschallfrequenzen zwischen 20 – 30,5 kHz bei Amplituden im Mikrometer-Bereich (werkzeugabhängig)

Ultrasonic-Prinzip

- rotatorische Bewegung des Werkzeugs
- zusätzliche longitudinale Oszillation

→ kinematische Überlagerung der Vektoren

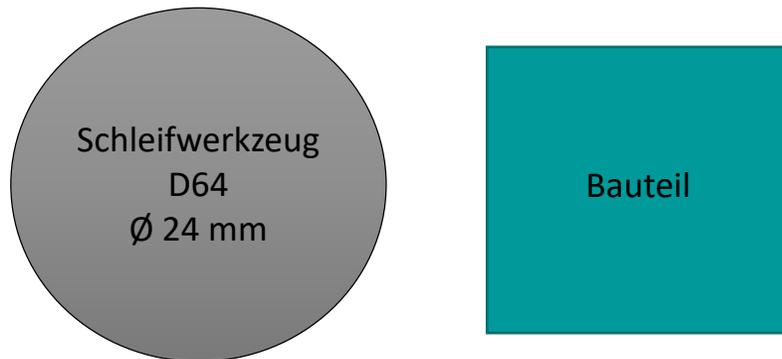
$$v_{cGes} = \sqrt{v_c^2 + v_{cUS}^2} = \sqrt{\left(\frac{\pi \cdot d \cdot n}{60000}\right)^2 + (4 \cdot X_{max} \cdot f)^2}$$



2. Experimenteller Aufbau

Schleifversuche mittels der Maschine *Ultrasonic 20 linear* von der Firma *DMG Mori AG*

- Schleifen von quaderförmigen SiO₂-Bauteilen (CORNING7980 5F); Oberfläche 20 x 20 mm²
- zunächst Anwendung einfacher Schleifkinematik → Planschleifen; eine Schleifbahn pro Zustelltiefen-Schritt



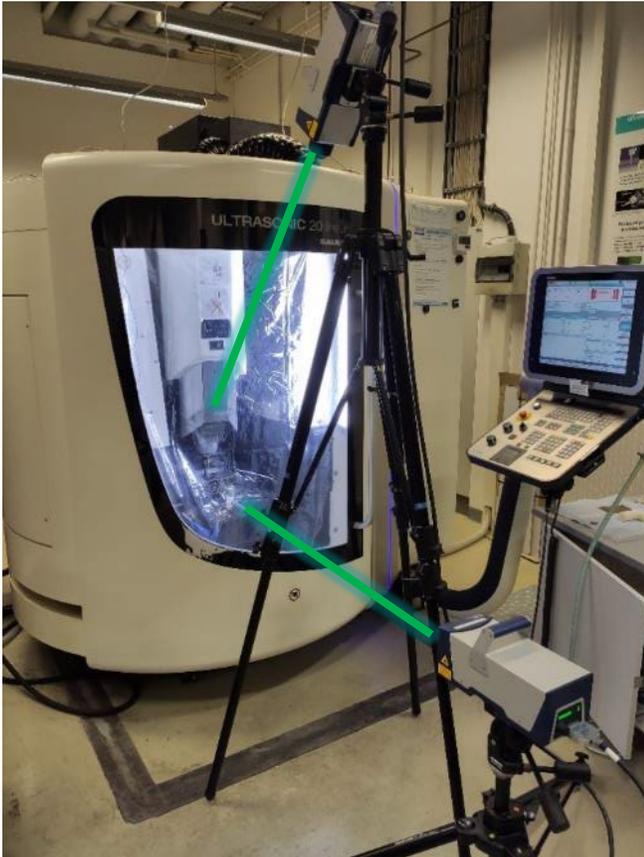
- statistische Versuchsplanung und -durchführung bei Variation der Schleifparameter, u.a. Vorschubgeschwindigkeit v_f , Drehzahl n , Zustelltiefe a_p , Ultraschall an/aus
- während der Versuche Messung von Vibrationen/Bewegungen der Maschine und wirksamer Schleifkräfte; Auswertung entstandener Topographien nach dem Prozess



2. Experimenteller Aufbau

Messtechnik: optische Vibrationsmessungen

- In-Prozess-Messung von Schwingungen und kleinräumigen internen Bewegungen innerhalb der Schleifmaschine
- reale Prozessbedingungen mit notwendiger Kühlmittelzufuhr beim Schleifen sprödharter Werkstoffe
- Versuchsaufbauten mit hochauflösender Laservibrometertechnik der Firma POLYTEC



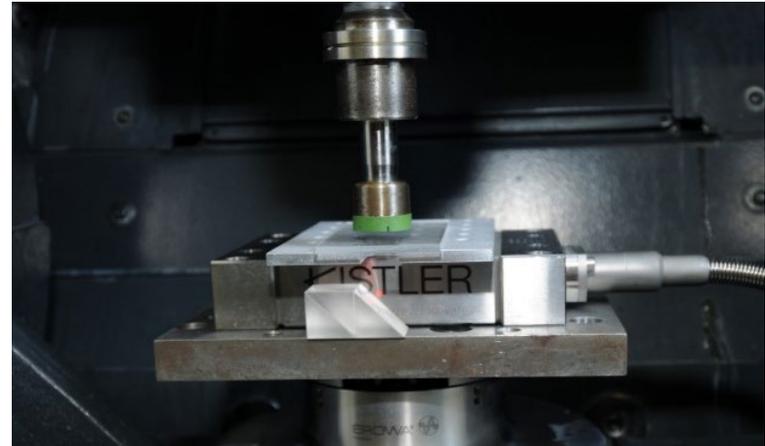
aktueller Aufbau:

- Einsatz von QTec-Vibrometern (Multi-Detektor-Technologie), die ein gutes Signal-Rausch-Verhältnis auch bei Kühlmittelzufuhr beim Schleifen ermöglichen
- externe Positionierung von Vibrometern zur Messung von Achs- und Spindelschwingungen und Bewegungen durch das Maschinenfenster

2. Experimenteller Aufbau

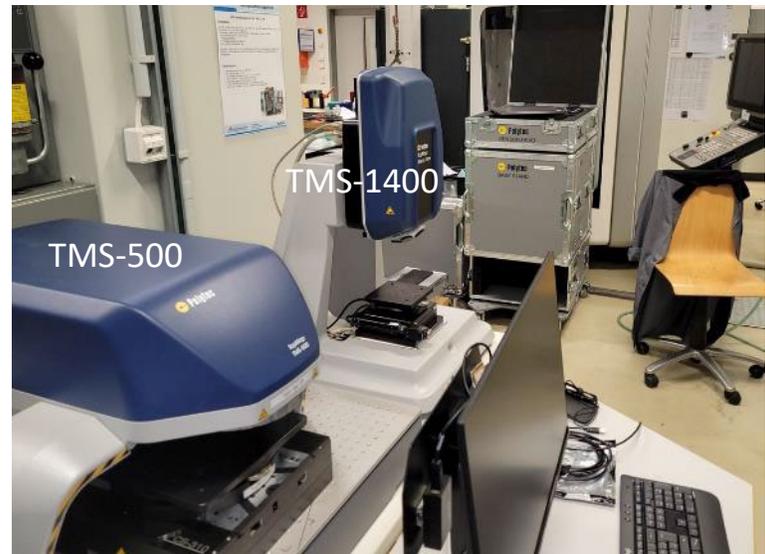
Messtechnik: Kraftmessungen

- In-Prozess-Messungen von Schleifkräften, synchronisiert mit den Vibrometermessungen
- Dynamometer Typ 9129AA von der Firma KISTLER



Messtechnik: optische Topographie-Messungen

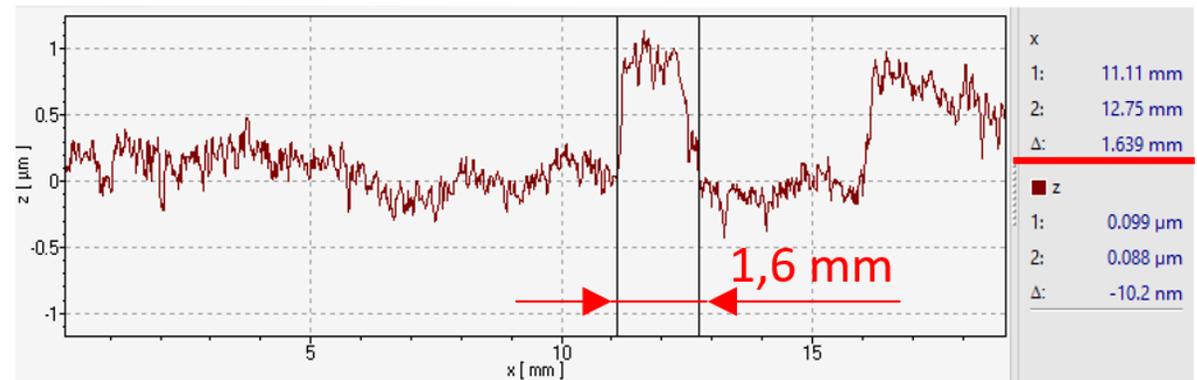
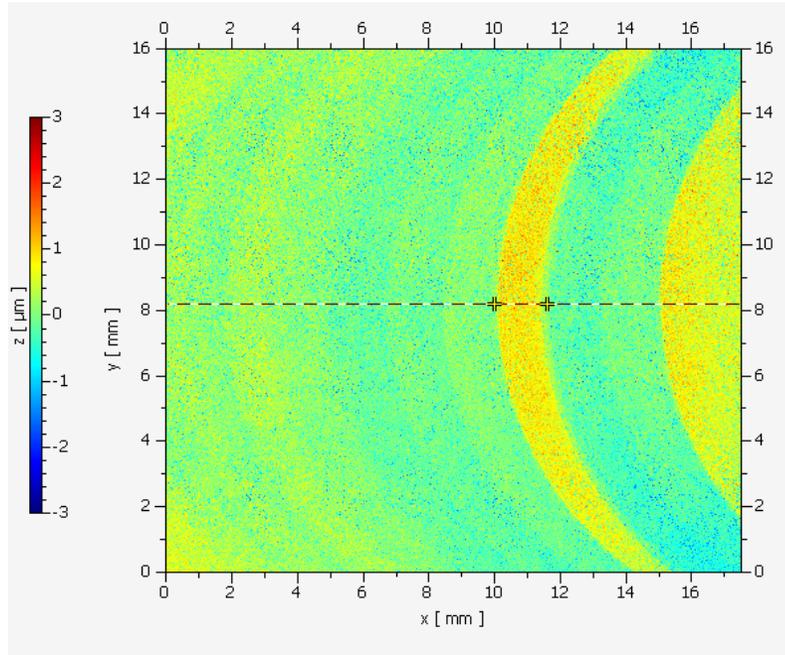
- zwei Weißlichtinterferometer der Firma Polytec werden eingesetzt
- TMS-1400 (TopMap Micro.View) ist ein optisches WLI mit mehreren Mikroobjektiven → Anwendung für die Messung von Oberflächendetails mit höheren Frequenzen
- TMS-500 (TopMap Pro.Surf) ist ein makroskopisches, telezentrisches System → aufgrund seiner großen Messfläche von ca. 22 x 17 mm² ideal für die Messung der niedrigfrequenten Form- und Welligkeitsabweichungen



3. Aktuelle Untersuchungen und Ergebnisse

Schleifuntersuchungen mit Werkzeug D64 ø24 mm

- die geschliffene Topographie, gemessen durch Weißlichtinterferometrie, zeigt deutliche "Stufen" auf der Bauteiloberfläche mit unterschiedlichen Höhen bis zu etwa +/- 1 µm
- es sind periodische Strukturen sichtbar, die an "Rattermarken" aus einem Fräsprozess erinnern



Bsp. geschliffene Topographie mit einer Fläche von 17,5 x 16 mm²

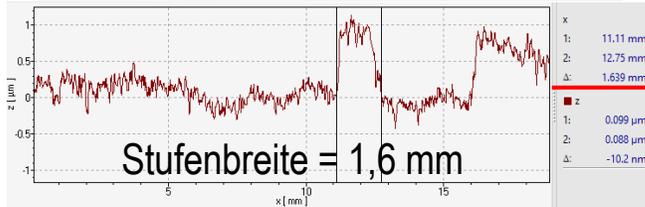
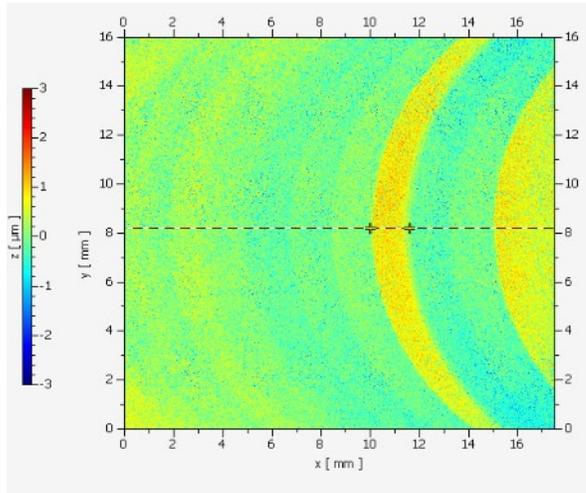
Schnittansicht der Topographie der gleichen Probe

3. Aktuelle Untersuchungen und Ergebnisse

Schleifuntersuchungen mit Werkzeug D64 \varnothing 24 mm \rightarrow direkte Korrelation zwischen Stufenbreite und Vorschubgeschwindigkeit v_f

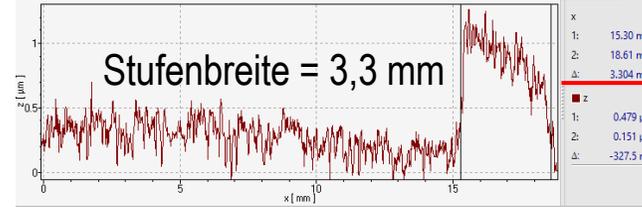
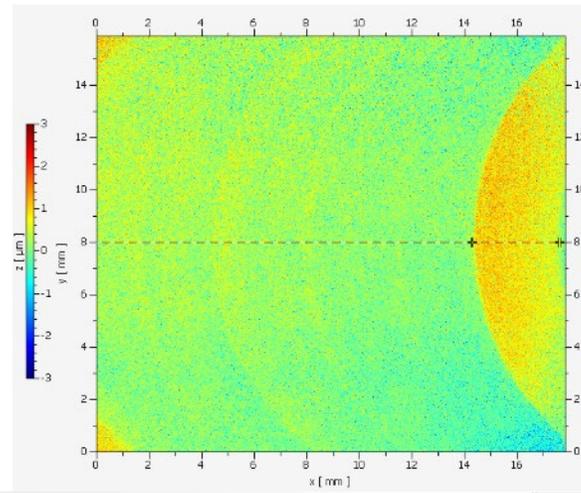
Probe 1

- $v_f = 100 \text{ mm/min} \rightarrow 1,6 \text{ mm/s}$



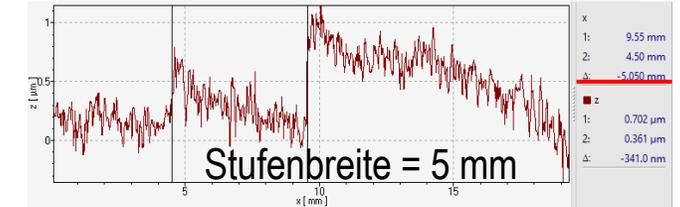
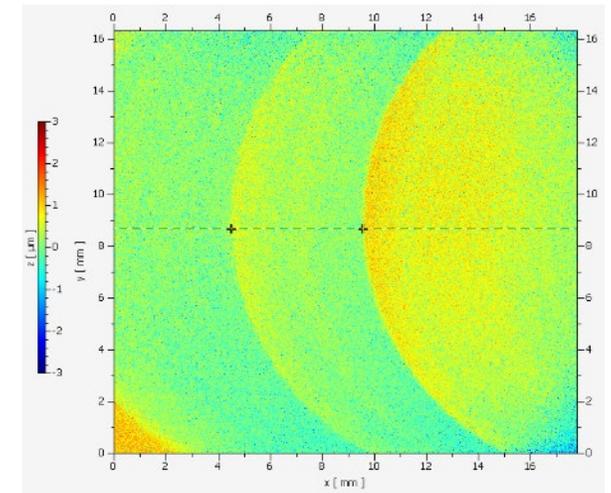
Probe 2

- $v_f = 200 \text{ mm/min} \rightarrow 3,3 \text{ mm/s}$



Probe 3

- $v_f = 300 \text{ mm/min} \rightarrow 5 \text{ mm/s}$



- die Topografie-Stufen werden durch eine integrierte Maschinenregelung namens "Temperaturkompensation" verursacht
- automatische Kompensation der wärmebedingten Ausdehnung des Schleifwerkzeugs in Z-Richtung \rightarrow um eine wiederholbare Maßhaltigkeit eines Werkstücks zu ermöglichen
- Regulierungszeit von 1 s \rightarrow die resultierenden ausgeprägten Stufen beeinflussen die Gleichmäßigkeit der Oberfläche negativ

3. Aktuelle Untersuchungen und Ergebnisse

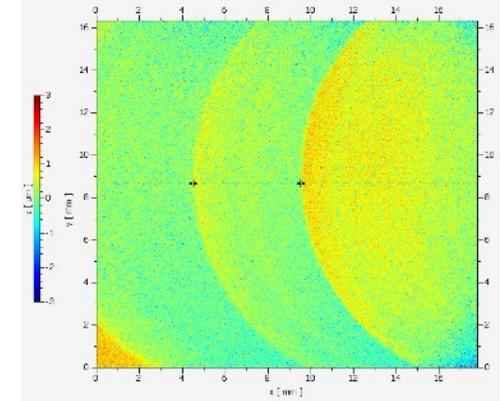
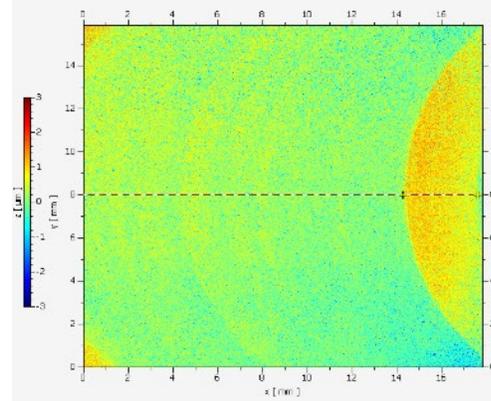
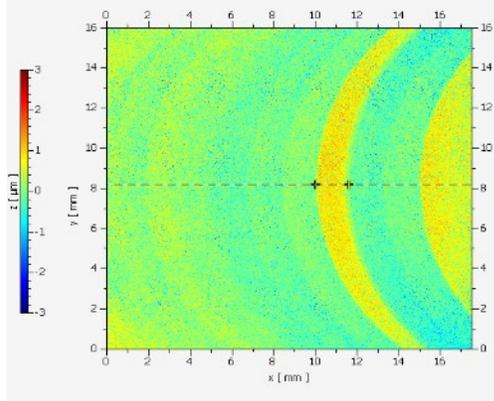
Schleifuntersuchungen mit Werkzeug D64 \varnothing 24 mm \rightarrow Einfluss der Temperaturkompensation

Probe 1: $vf=100$ mm/min

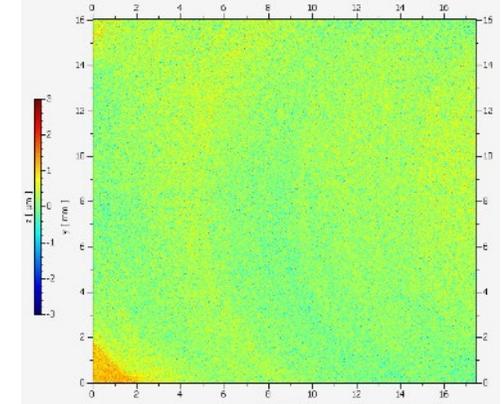
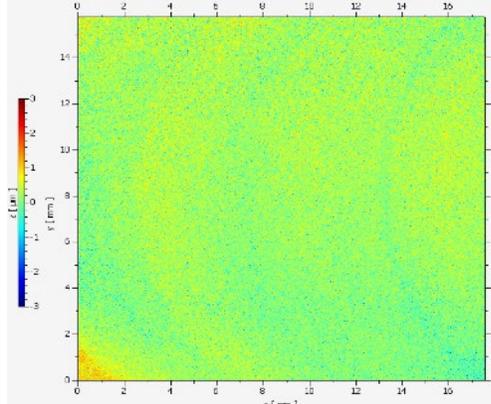
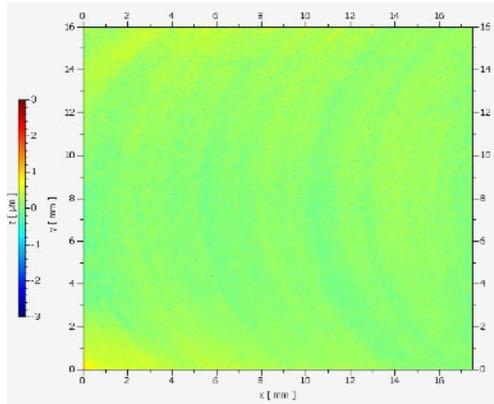
Probe 2: $vf=200$ mm/min

Probe 3: $vf=300$ mm/min

Temp. komp. AN



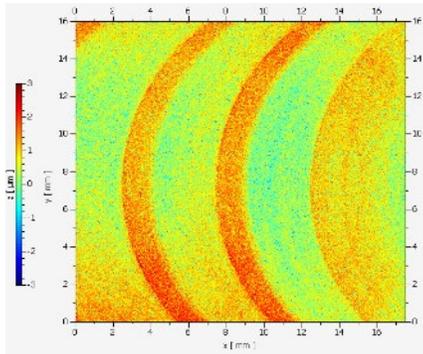
Temp. komp. AUS



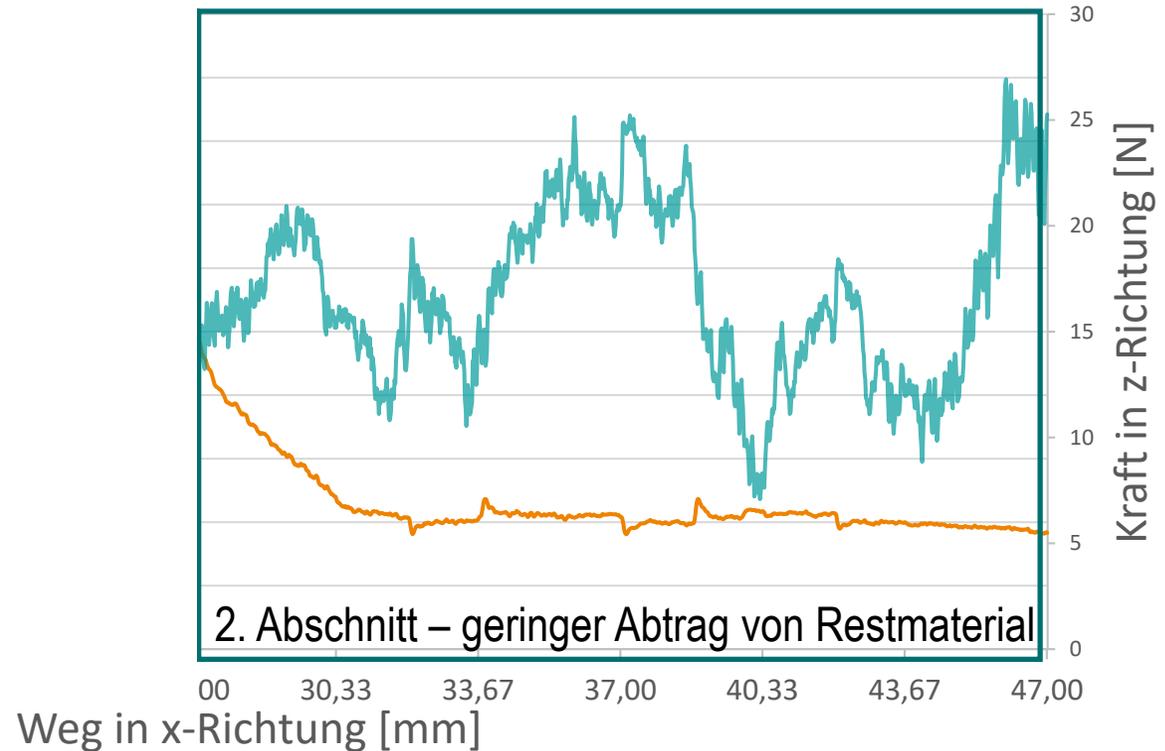
- deutliche Verringerung der scharf abgegrenzten "Stufen" auf der Bauteiloberfläche; Abdrücke des Werkzeugs sind noch sichtbar

3. Aktuelle Untersuchungen und Ergebnisse

Schleifuntersuchungen mit Werkzeug D64 \varnothing 24 mm \rightarrow synchrone Messungen von Kräften und Schwingungen



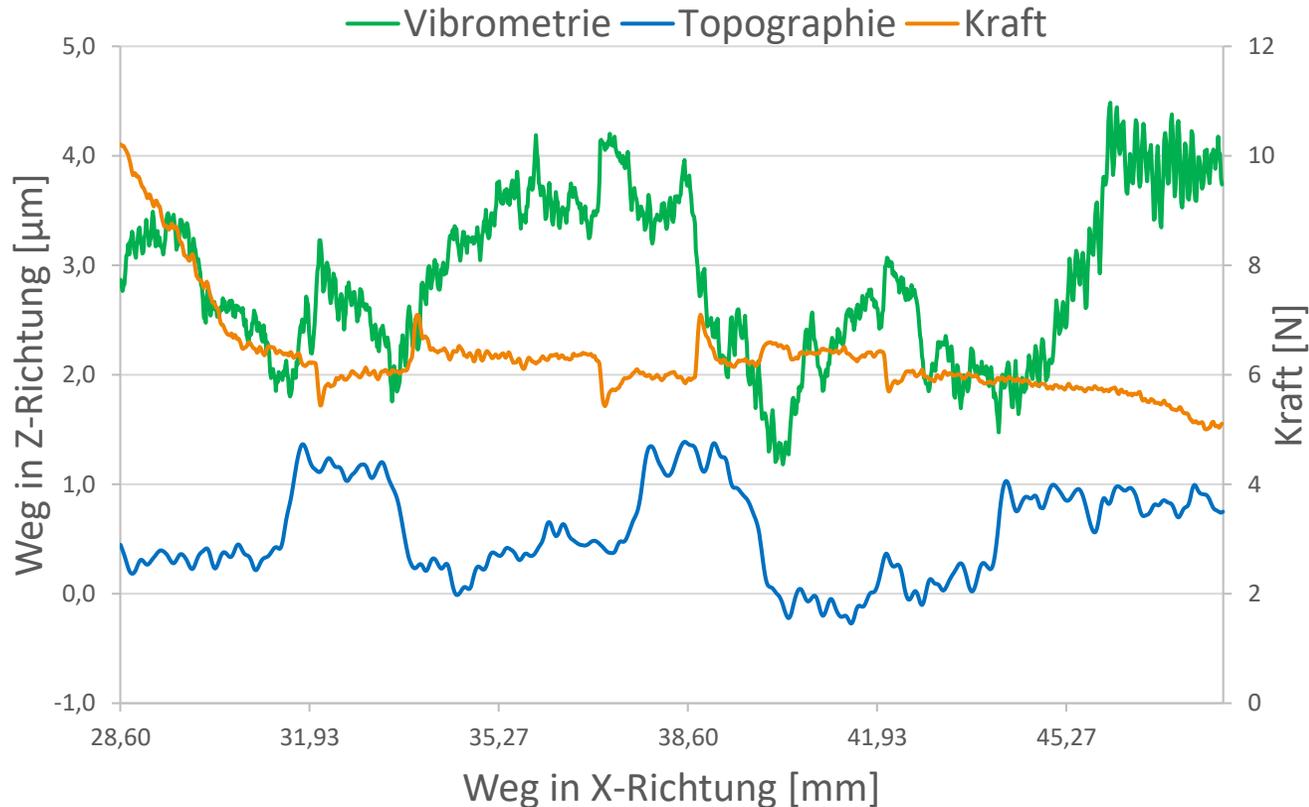
— Kraft — Vibrometrie



- deutliche Spitzen sind im Verlauf der Kraftkurve sichtbar \rightarrow Aktivierung von einzelnen Temp. komp. Regulierungen
- Korrelationen zwischen Kraft- und Vibrometriekurven sind erkennbar
- die Abdrücke auf der Probenoberfläche entstehen größtenteils im 2. Abschnitt des Schleifprozesses (“hinterer Werkzeugbereich”)

3. Aktuelle Untersuchungen und Ergebnisse

Schleifuntersuchungen mit Werkzeug D64 \varnothing 24 mm → Korrelationen zwischen Topographie, Vibrometrie und Prozesskräften



- die Positionen der Topographiestufen und die Wegänderung im Vibrometersignal sind gut korreliert, auch das Kraftsignal zeigt kurze Spitzen an denselben Positionen
- Topographiedaten deuten auf den Zusammenhang mit dem zweiten Schleifabschnitt hin
- Datenoptimierung zur Minimierung eines leichten zeitlichen Versatzes erforderlich

→ Korrelationen zwischen den In-Prozess-Messungen und der resultierenden Oberflächentopographie der Probe wurden für einen Schleifprozess an Glasbauteilen erstmals erfolgreich demonstriert!

3. Aktuelle Untersuchungen und Ergebnisse

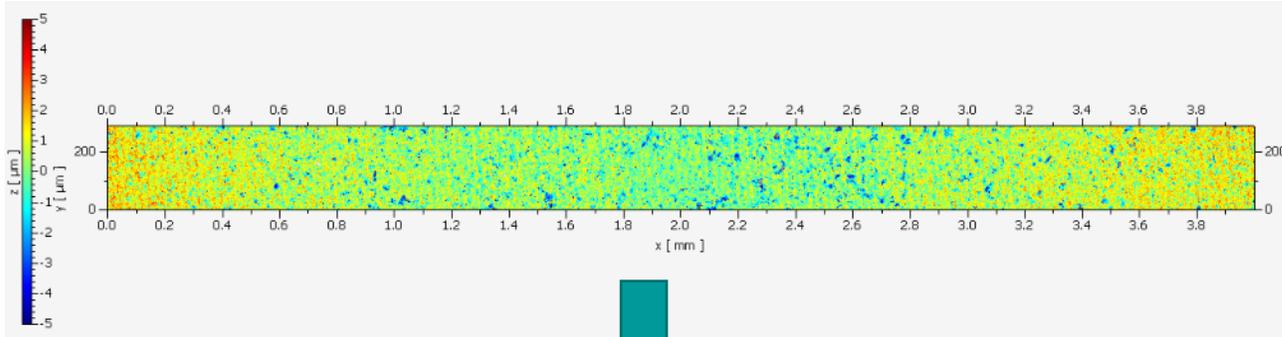
Schleifuntersuchungen mit Werkzeug D64 \varnothing 24 mm → Auswertung statistischer Versuche nach Rauheit, Welligkeit und Kraft

Einflussanalyse		Zur Reduzierung der			
Parameter		Rauheit R_a	Rauheit R_q	Welligkeit W_t	Kraft F
Vorschubgeschwindigkeit	vf	Reduzieren ↓	Reduzieren ↓	stat. nicht signifikant	stat. nicht signifikant
Drehzahl	n	Erhöhen ↑	Erhöhen ↑	Erhöhen ↑	Erhöhen ↑
Zustelltiefe	ap	stat. nicht signifikant	stat. nicht signifikant	Reduzieren ↓	Reduzieren ↓
Ultraschall	US	Abschalten	Abschalten	Abschalten	Einschalten
Innenkühlung	IK	stat. nicht signifikant	stat. nicht signifikant	Einschalten	stat. nicht signifikant
Werkzeugkörnung		Reduzieren ↓	Reduzieren ↓	Reduzieren ↓	Reduzieren ↓
Temperaturkompensation		stat. nicht signifikant	stat. nicht signifikant	stat. nicht signifikant	stat. nicht signifikant

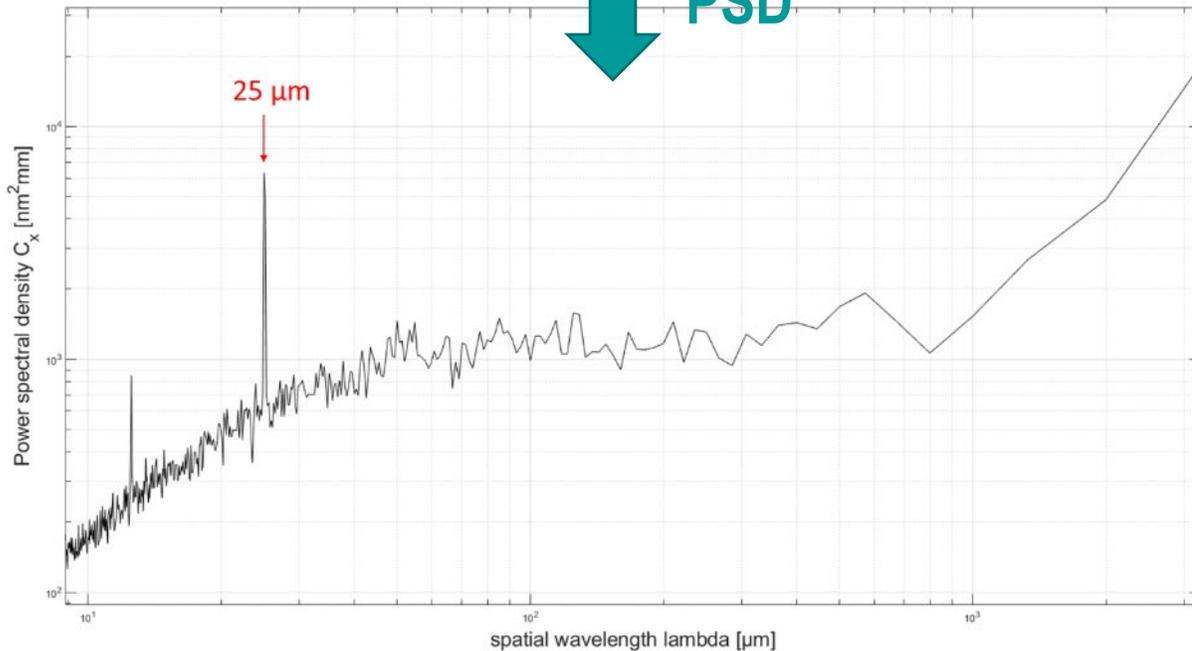
- erste Aussagen über einzelne Parametereinflüsse konnten getroffen werden
- Analyse der Vibrometrie- und periodischen Topographiedaten steht noch aus
- Ausgangspunkt für weitere Versuchsdurchläufe mit angepassten Parametergrenzen

3. Aktuelle Untersuchungen und Ergebnisse

Schleifuntersuchungen mit Werkzeug D64 \varnothing 24 mm \rightarrow Auswertungsvariante bzgl. periodischer Oberflächenstrukturen



PSD



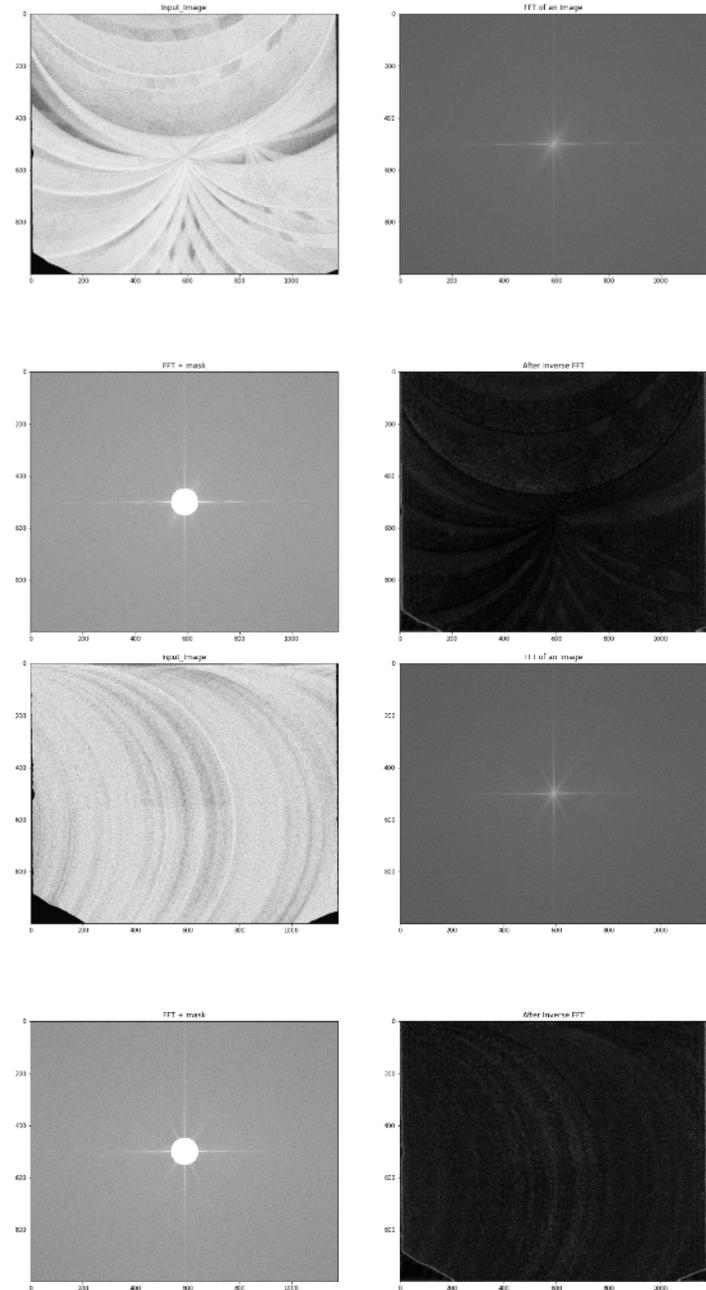
PSD-Funktion und zugehörige Topographie-Messung (TMS-1400 20x-Objektiv)

- Nutzung der Power Spectral Density (PSD)-Funktion zur Bestimmung von periodischen Oberflächenabweichungen \rightarrow dargestellt durch deutliche Spitzen bei bestimmten räumlichen Wellenlängen/Frequenzen
- **Schwerpunkt für weitere Untersuchungen: Nutzung von PSD zur Suche nach Ursachen für periodische Strukturen**
- Beispiel: dargestellte Probe wurde geschliffen mit Vorschub $v_f = 200$ mm/min und einer Spindeldrehzahl $n = 8000$ 1/min
 $\rightarrow 200$ mm/min / 8000 1/min = 25 μ m

3. Aktuelle Untersuchungen und Ergebnisse

Datenauswertung mit machine learning & KI

- Entwicklung mehrerer Screeningtests unter Nutzung von „ANOVA“ (ANalysis Of Variance) und „Definitve Screening Design“ durch Partnerfirma Batix Software GmbH
- virtuelle Datenauswertung der Topographien und Ableitung statistisch signifikanter Schleifparameter
- Entwicklung weiterer Versuchspläne auf Grundlage der Ergebnisse
- hohe Datenfülle zum Anlernen der KI mit Informationen zu Schleifparametern, Vibrometerdaten und resultierenden Oberflächenqualitäten
- **Ziel:** KI-gestützte Vorhersage von Schleifergebnissen und Unterstützung bei der Schleifparameterwahl zur Generierung von Bauteilen mit hohen Oberflächenqualitäten



Schleifbildanalyse (FFT) in Python-Software

4. Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

- Informationen über das grundsätzliche Schwingungsverhalten der eingesetzten CNC-Schleifmaschine konnten gewonnen werden
- synchronisierte In-Prozess-Messungen von Schleifkräften und kleineren Maschinenbewegungen/-schwingungen wurden durchgeführt
- erstmals wurden Zusammenhänge zwischen den In-Prozess-Messungen und der resultierenden Oberflächentopographie der Bauteile erfolgreich nachgewiesen
- erste Einflussanalysen zur Wirkung verschiedener Schleifparameter auf Rauheit, Welligkeit und Kraft wurden durchgeführt
- erste Zusammenhänge konnten auch im Bereich der periodischen Strukturen festgestellt werden → bei einigen Proben entstehen diese durch eine negative Wechselwirkung von Vorschub und Drehzahl

4. Zusammenfassung und Ausblick

Ausblick auf anstehende Untersuchungen

- Durchführung und Auswertung weiterer Schleifversuche mit Variation bestimmter Schleifparameter unter Verwendung des aktuellen, optimierten Versuchsaufbaus → Fokus auf die Beobachtung der Vibrometriedaten und der (periodischen) Topographiekomponenten (PSD)
- Hochfrequenz-Vibrometermessung direkt am geschliffenen Werkstück
- Variation von Schleifkinematik und Werkzeuggeometrien

- darüber hinaus: die Daten werden in eine speziell programmierte KI eingespeist, die auf der Grundlage der aufgenommenen Schleifparameter und der zugehörigen Oberflächendaten optimale Parameter für zukünftige Schleifbearbeitungen vorschlägt

Vielen Dank!

Kontakt:

Sebastian Henkel, M.Eng.

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

E-Mail: sebastian.henkel@eah-jena.de

Tel.: +49 3641 205 785

Web: www.ag-bliedtner.de

Kontakt:

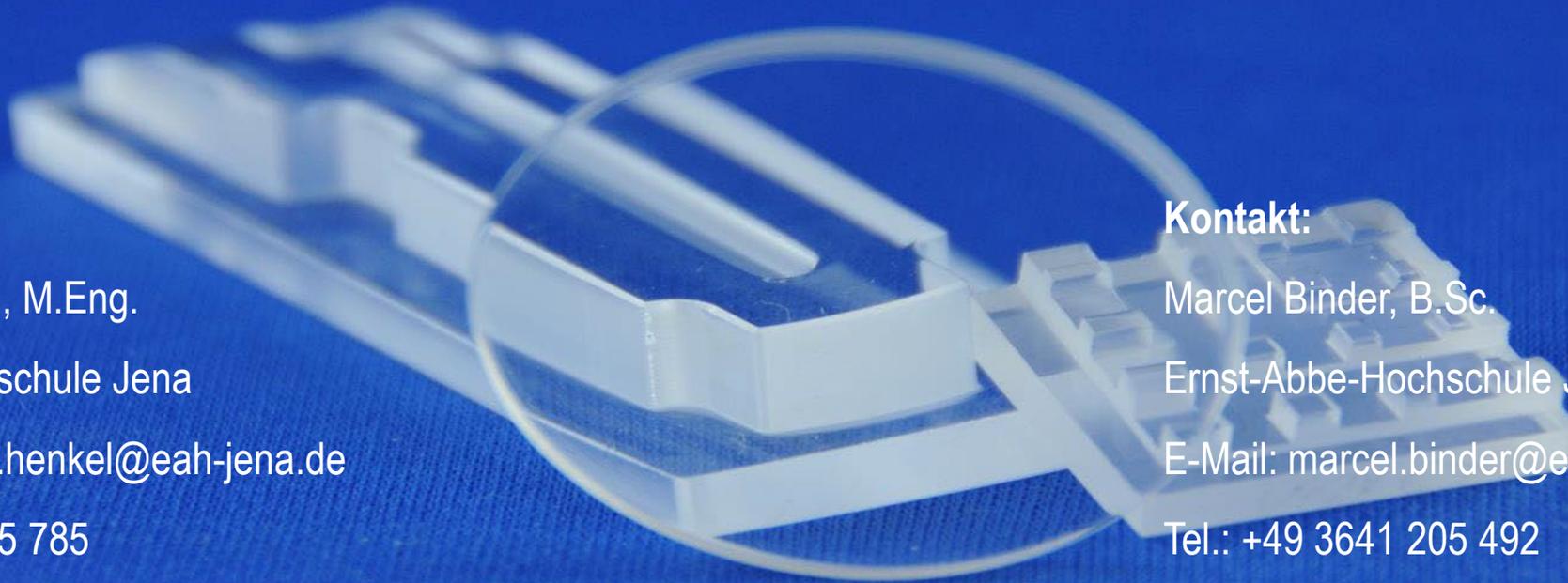
Marcel Binder, B.Sc.

Ernst-Abbe-Hochschule Jena

E-Mail: marcel.binder@eah-jena.de

Tel.: +49 3641 205 492

Web: www.ag-bliedtner.de



Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz im Förderprogramm ZIM (Förderkennzeichen: KK5091604KT1, Projekt "VibroKI").