

Werkzeugintegrierte Sensorik zur Überwachung von Fertigungsprozessen

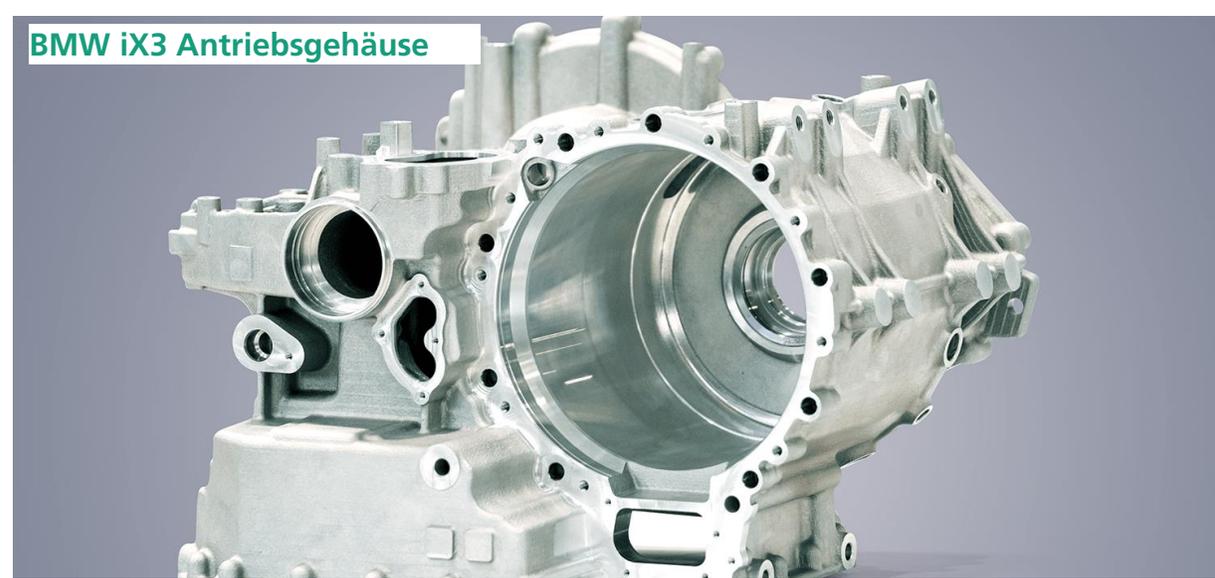
M.Sc. Miguel Panesso (Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU,
Abt. Prozessketten-analyse und -regelung, Dresden)

16.11.2023

Motivation

- Zerspanungsprozessen (Drehen, Fräsen) gehören zu den wichtigsten Fertigungsverfahren
- Überwachung und Kontrolle dieser ist entscheidend für die Steigerung der Qualität und Produktivität
- Schnittkraft als bedeutende Größe zur
 - Verschleißüberwachung
 - Bewertung von Prozessstabilität
- Herausforderungen bei der Schnittkraftmessung
 - Werkzeugsteifigkeit
 - Bauraumbedarf
 - Bandbreite

BMW iX3 Antriebsgehäuse



<https://www.electrive.net/2020/07/15/bmw-werk-steyr-liefert-e-antriebsgehaeuse-fuer-ix3/>

Komplexes Fräs Werkzeug



MAPAL

Motivation

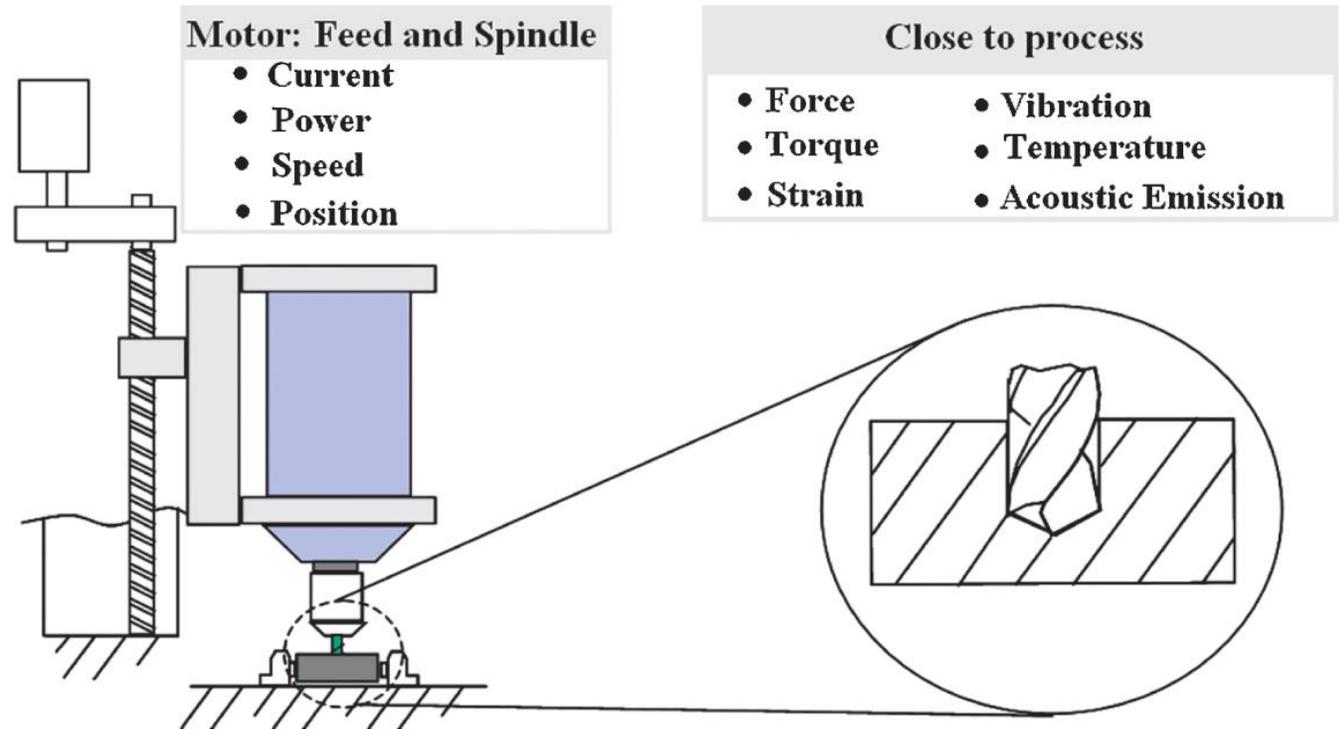
Messbare Größen am Zerspanprozess

Vom Prozess entfernt (Maschinenschwingungen, Wirkleistung aus Antrieben)

- Niedrigere Genauigkeit
- Niedrigere Komplexität

Prozessnah (Werkzeug, Werkstück)

- Hohe Prozesssensitivität
- Beschränkt durch,
 - Zugang zur Messstelle
 - Bauraum
 - Kühlschmiermittel
 - Späne
 - Komplexität, Kosten



Teti, R.; Jemielniak, K.; O'Donnell, G.; Dornfeld, D. (2010):
Advanced monitoring of machining operations.
In: *CIRP Annals* 59 (2), S. 717–739. DOI: 10.1016/j.cirp.2010.05.010

Motivation

Stand der Technik zu werkzeugintegrierten Kraftmesssystemen

Piezoelektrische Dynamometer

Platendynamometer

- Verringerung des Arbeitsbereiches
- Hohe Kosten
- Robust
- Bandbreite der Messung abhängig vom Masse des Werkstücks

Rotierender Dynamometer

- Erste Eigenfrequenz bis 2,2 kHz (Abhängig vom Werkstück)
- Nur für weniger Werkzeugaufnahmen verfügbar

Systeme auf Basis von Dehnmessstreifen

- Messung von Dehnung führt zur Verringerung der Werkzeugsteifigkeit

Platendynamometer



Rotierender Dynamometer



Pro micron spike



Motivation

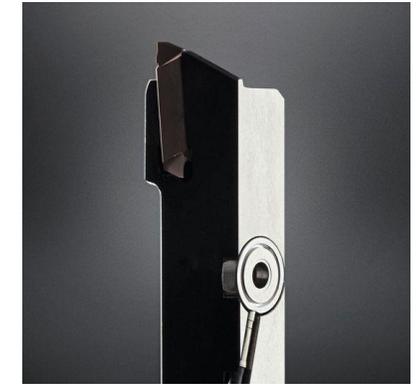
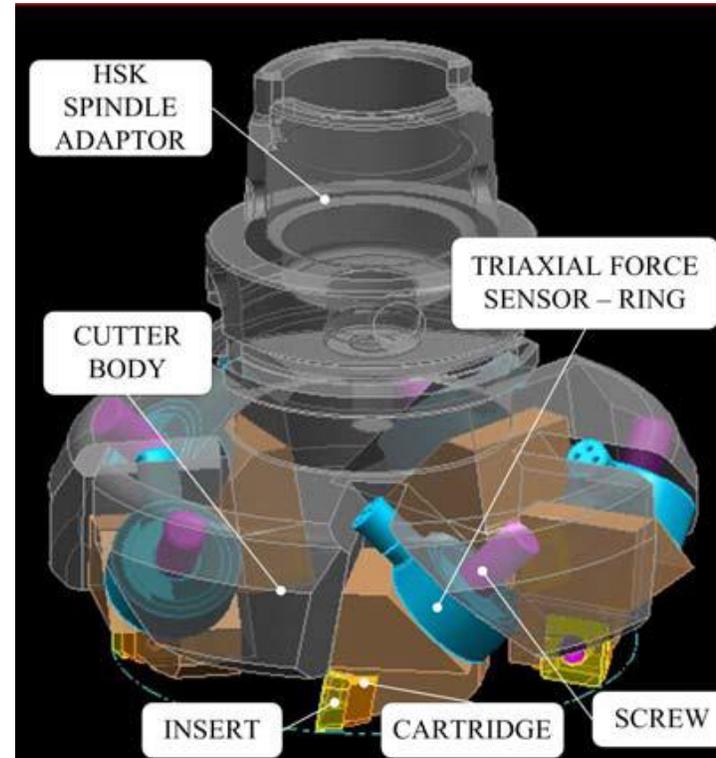
Anforderung an prozessnahen Sensorintegration

Anforderungen

- Minimierung des Bauraums für die Sensorintegration
- Messstelle nah an Werkzeugschneide
- Keine Beeinflussung der Werkzeugsteifigkeit

Weitere Betrachtungen

- Im Idealen Fall: sensorierte Werkzeugschneiden
- Piezoelektrische Dickschichtsensoren zeichnen sich durch
 - Steifigkeit
 - Miniaturisierung
 - Hohe Bandbreite



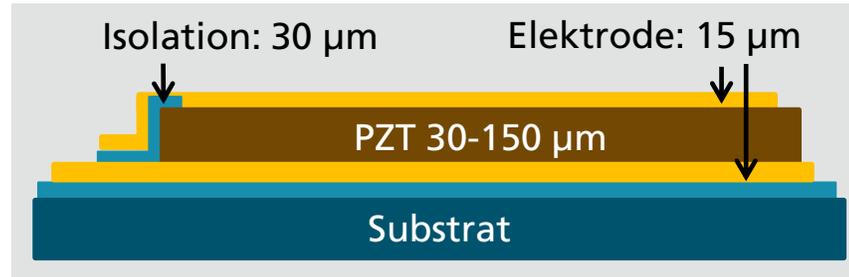
(Kistler GmbH; Horn GmbH)



Klocke, F.; Kuljanic, E.; Veselovac, D.; Sortino, M.; Wirtz, G.; Totis, G.:
Development of an Intelligent Cutter for Face Milling.
In: AMST'08 Advanced Manufacturing Systems and Technology, S. 267–280.

Sensoransatz

Gedruckte piezokeramische Dickschichtsensoren



Piezokeramisches Material

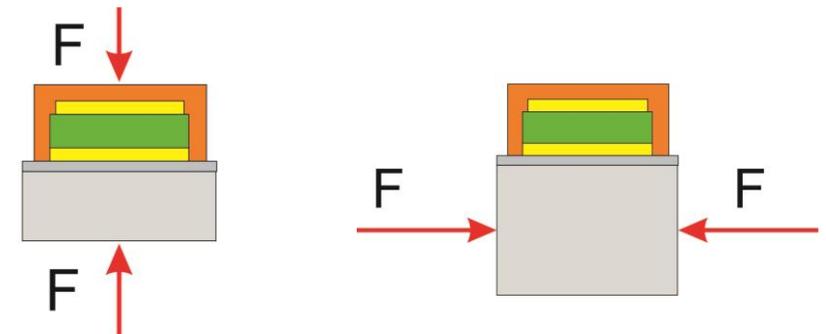
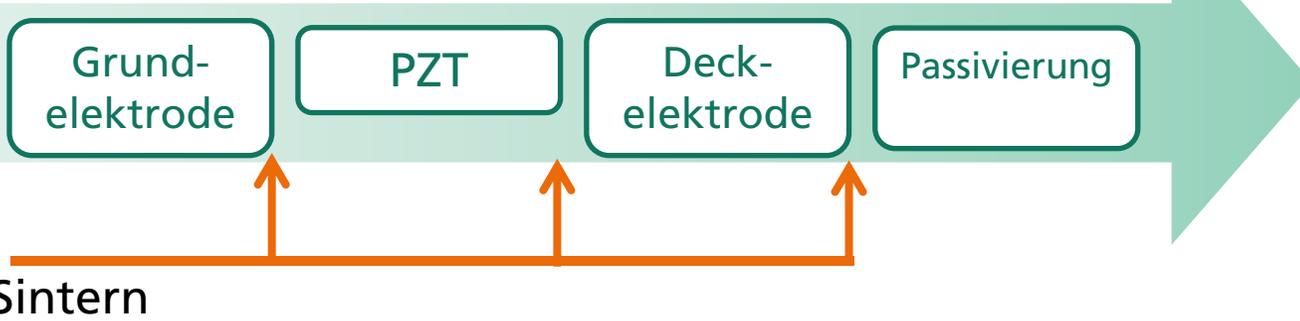
- Blei-Zirkonat-Titanat (PZT)
- Schichtdicke: 30 – 150 µm

Substratmaterial

- Al₂O₃, ZrO₂
- Manche Stähle

Typische Sensitivitäten

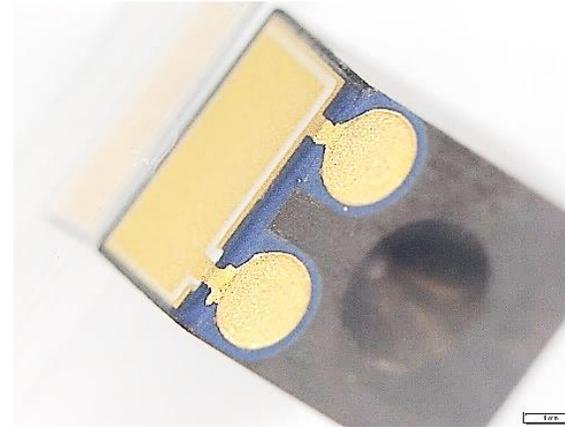
- $d_{33} = 90 \text{ pC/N}$
- $d_{31} = 1\text{-}30 \text{ pC/N}$



Sensoransatz

Siebdruckverfahren

- Etablierte Herstellungsmethode
- Kosteneffektive Produktion
- Bedrucken von komplexen Strukturen
- Hohe Sensitivität
- Miniaturisierung
- Hohe Funktionsdichte



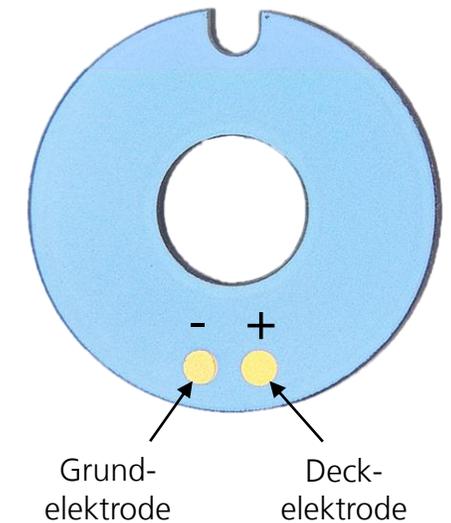
Orthogonale Flächen



Zylindrische Bauteile



Halterung

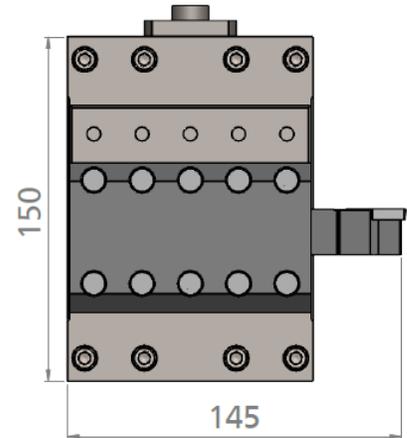
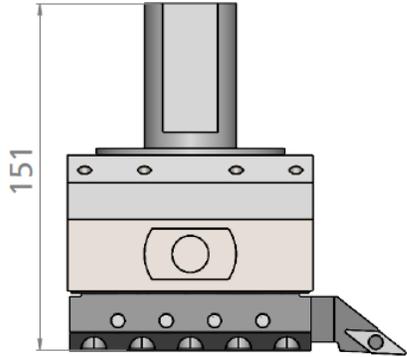


Freie 2-D Geometrien

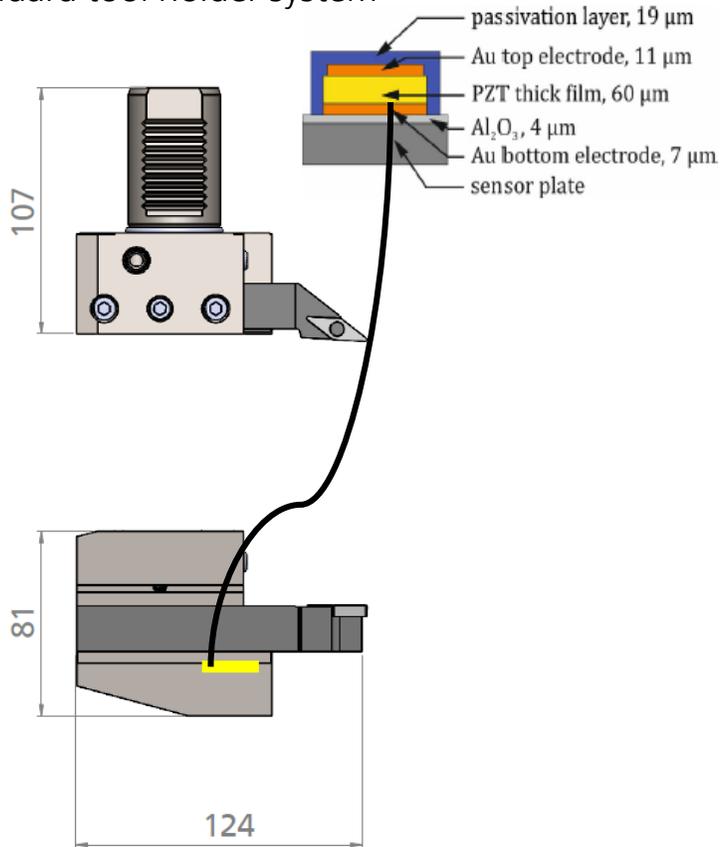
Use-Cases

Sensorischer Drehhalter

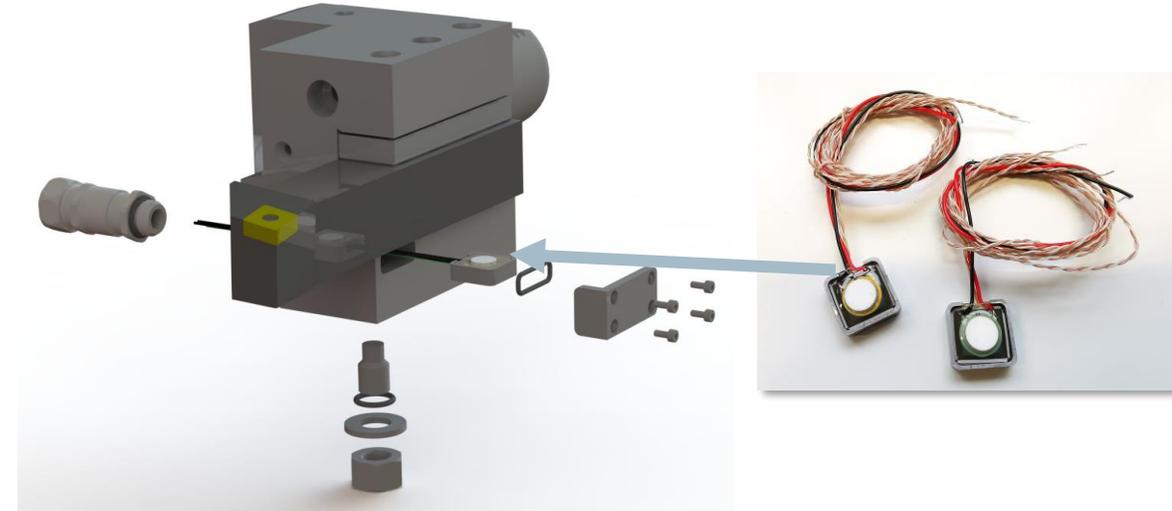
Kistler measuring system



Standard tool holder system



Aufgebauter Prototyp

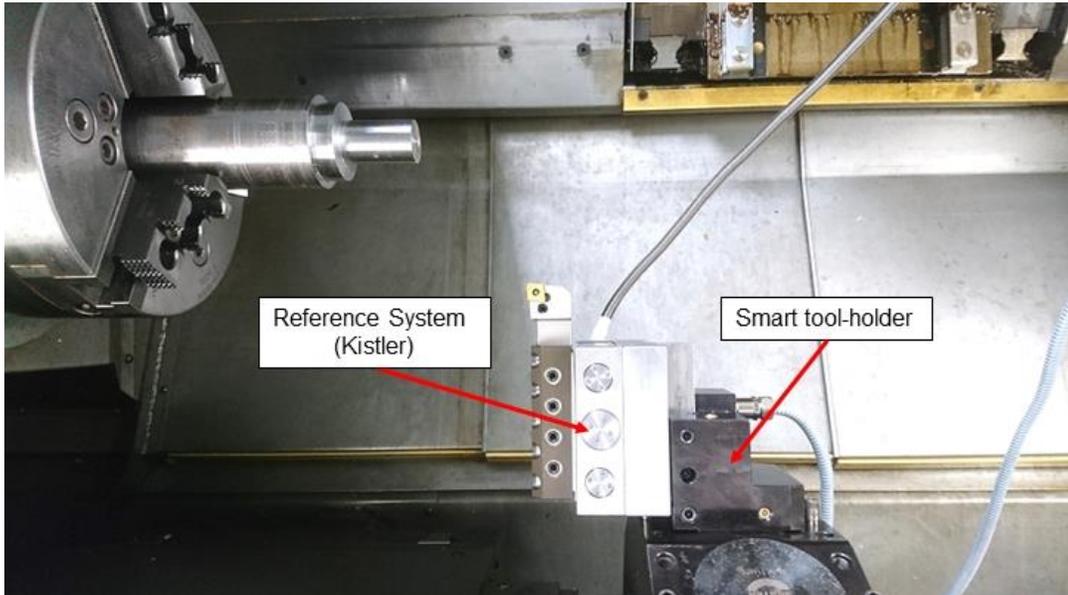


Systemeigenschaft	Dynamometer	PZT-System
Masse in kg	9	2,3
Kosten in Euro	> 70.000	< 3.000
Erste Eigenfrequenz	1 kHz	2 kHz
Bandbreite	0 – 300 Hz	kHz - MHz Bereich
Statischer Kraftanteil	Ja	Nein

Use-Cases: Sensorischer Drehhalter

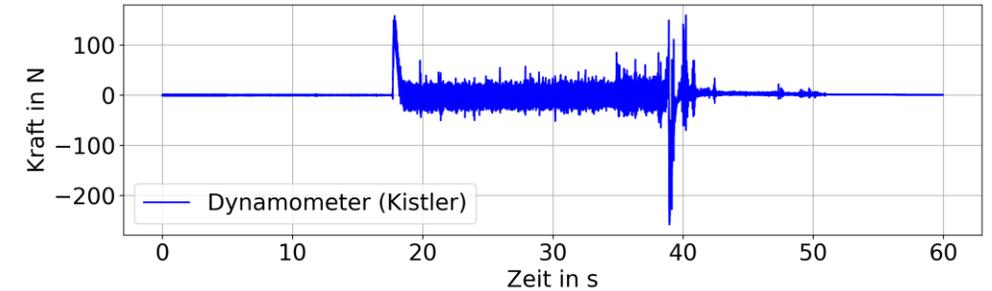
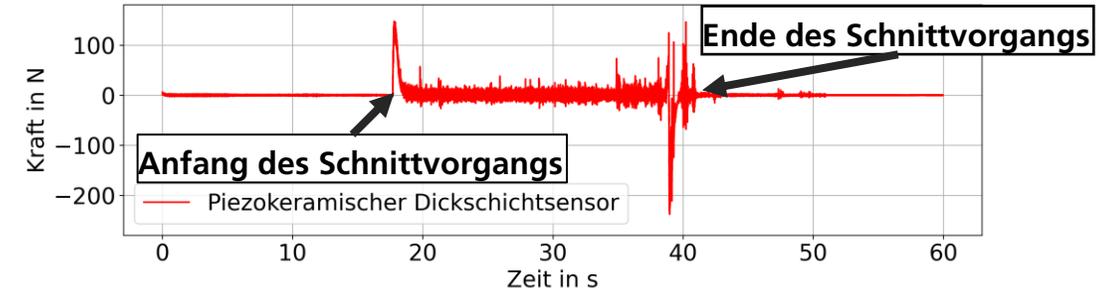
Vergleich mit kommerziellem Dynamometer

Drehversuch (Längsdrehen)

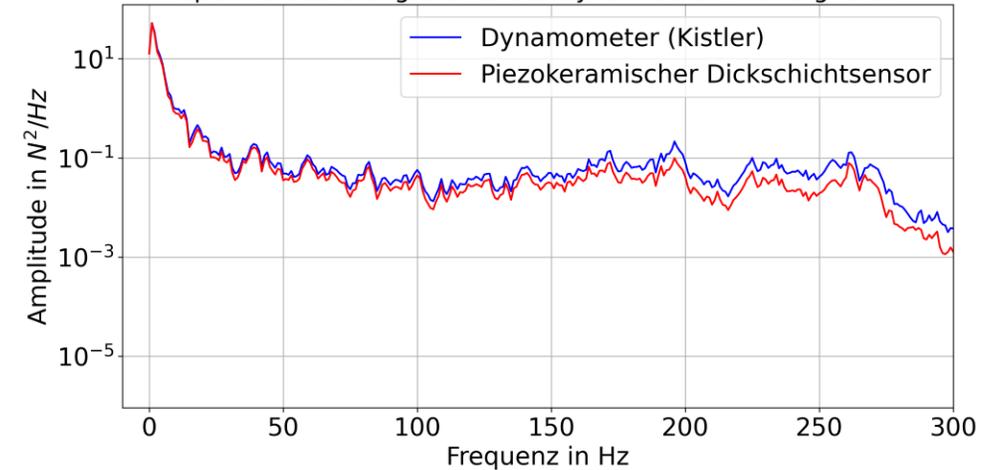


- Schnitttiefe $A_p = 1$ mm
- Vorschub $f = 0,1$ mm/U
- Schnittgeschwindigkeit $V_C = 120$ m/min
- Werkstückwerkstoff: Vergütungsstahl (42CrMo4)
- Werkzeugwerkstoff: VHM Hartmetall
- Enddurchmesser = 30 mm

Dynamischer Anteil der Schnittkraft



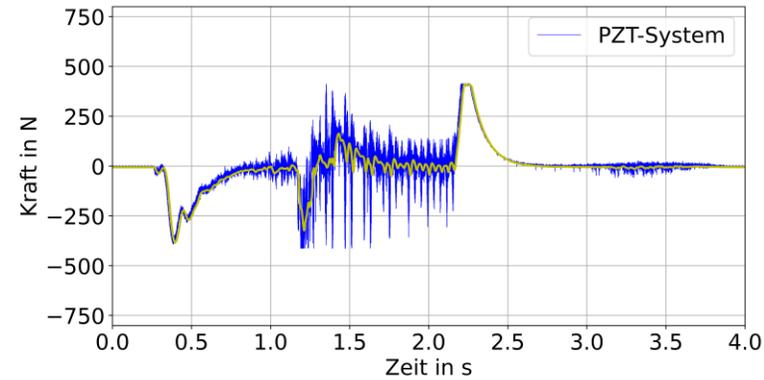
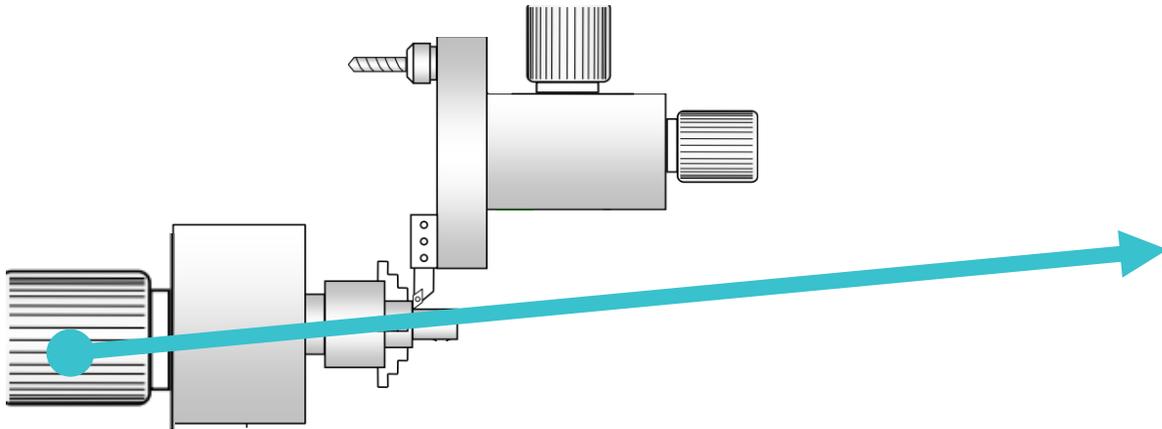
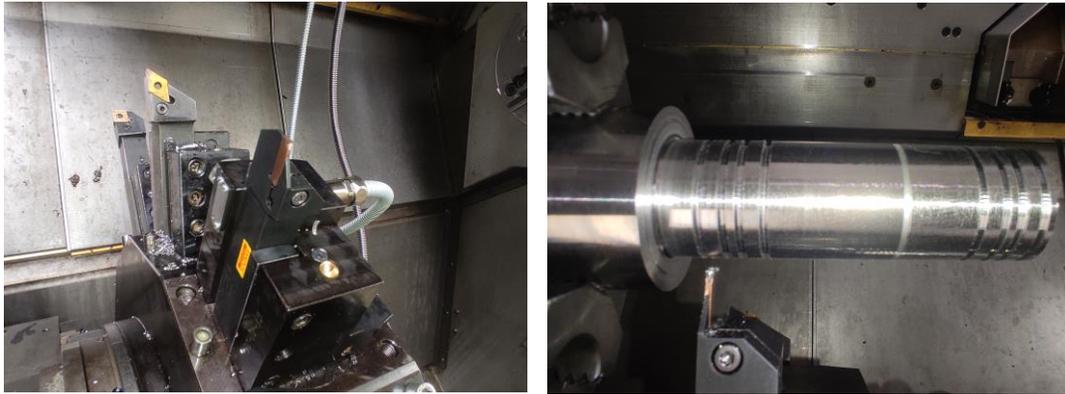
Spektrale Leistungsdichte aus dynamischen Kraftsignalen



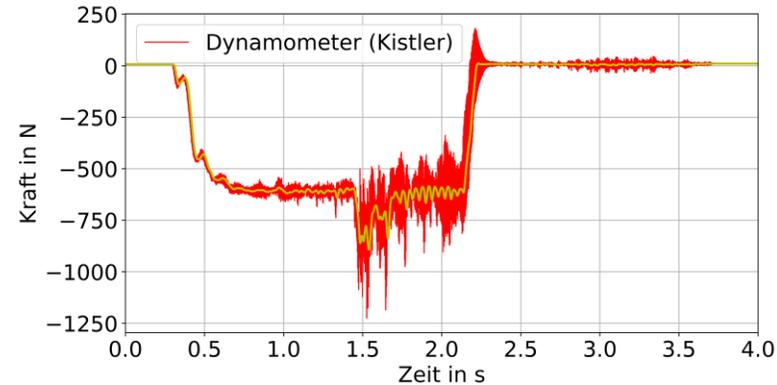
Use-Cases: Sensorischer Drehhalter

Vergleich mit Antriebsdaten

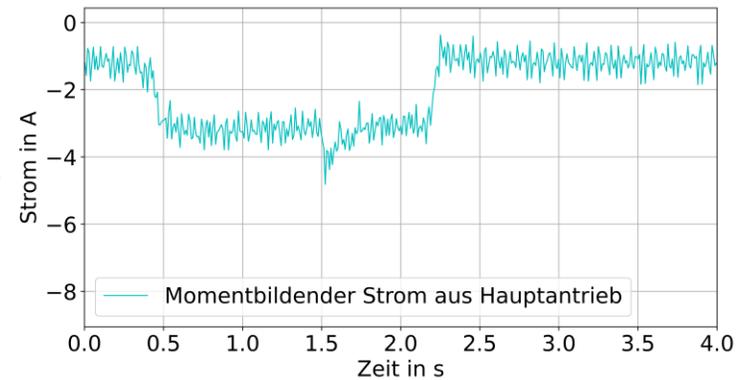
Abstechen



➔ Nur dynamischer Signalanteil



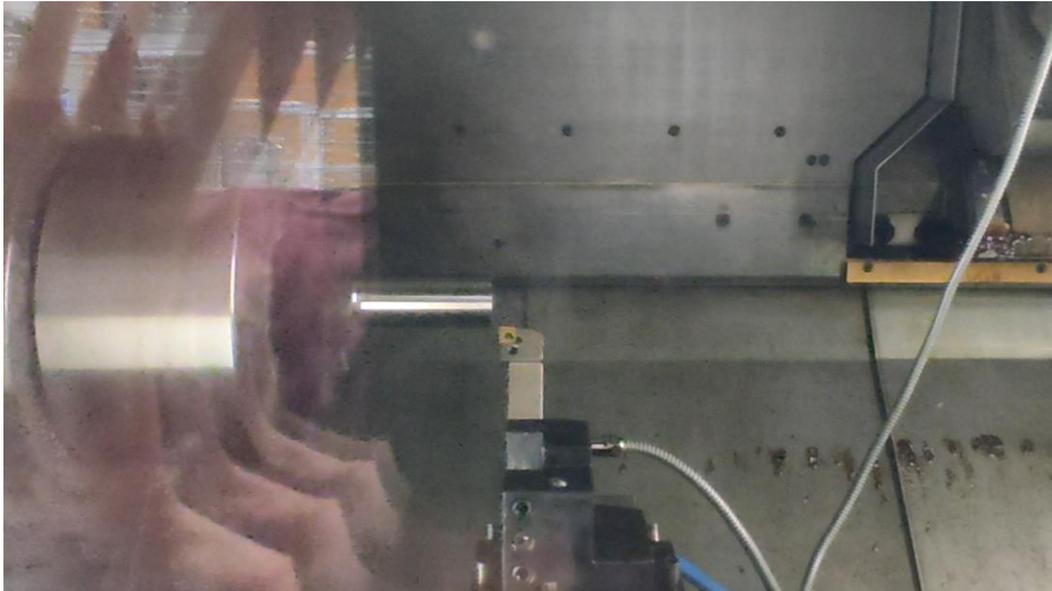
➔ Statischer und dynamischer Signalanteil



Sensorierte Werkzeuge sind deutlich **empfindlicher** als Wirkleistungsmessung aus den Haupt- und Nebenantrieben

Use-Cases: Sensorischer Drehhalter

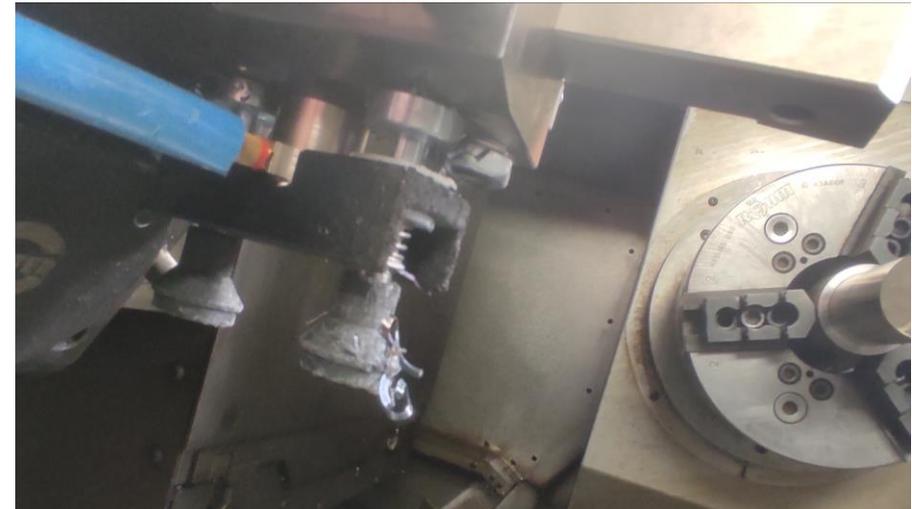
Vergleich zwischen Referenzsensor (Fa. Vallen) und gedrucktem PZT



- Schnittiefe $A_p = 1 \text{ mm}$
- Vorschub $f = 0,1 \text{ mm/U}$
- Schnittgeschwindigkeit $V_C = 120 \text{ m/min}$
- Werkstückwerkstoff: Vergütungsstahl (42CrMo4)
- Werkzeugwerkstoff: VHM Hartmetall
- Enddurchmesser = 30 mm

Versuchsmethoden

- Messkette für dynamische Messungen (1 kHz bis 250 kHz)
- Vergleich mit AE-Sensor der Fa. Vallen
- Ausnutzung der Wendeschneidplatte bis Ausbruch



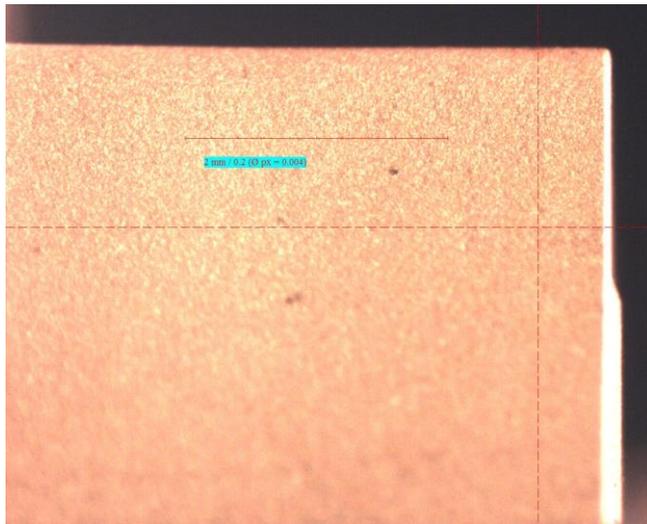
Use-Cases: Sensorischer Drehhalter

Analyse von Signalmerkmalen im Schallemissionen-Frequenzbereich

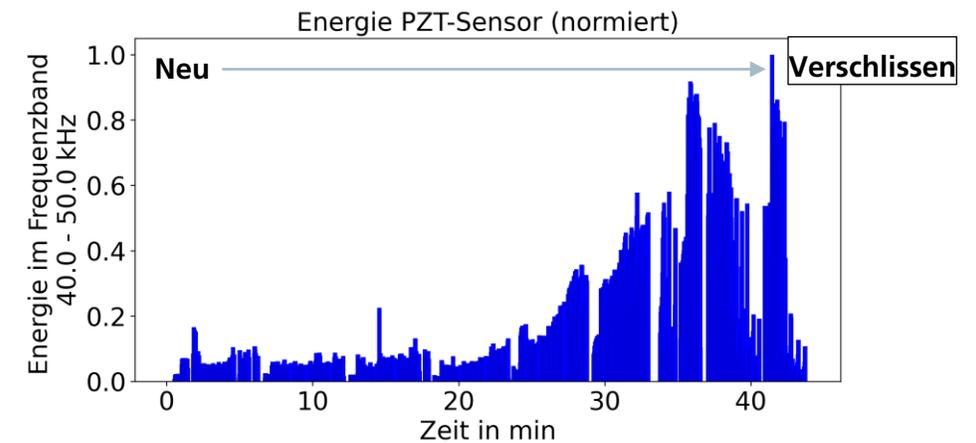
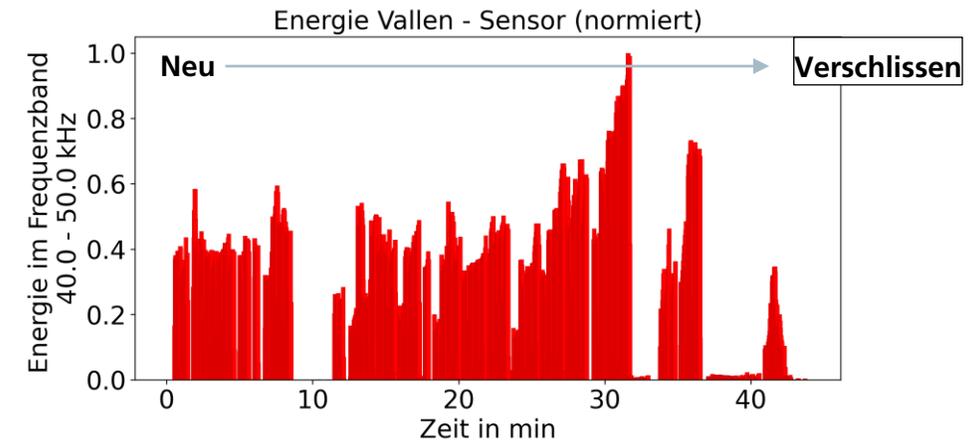
Versuchsmethode

- Neue Wendeschneidplatte bis kurz vor dem Ausbrechen ausgenutzt
- Qualitative Analyse von Merkmal im Frequenzband 40 bis 50 kHz mit steigendem Verschleiß

Neu

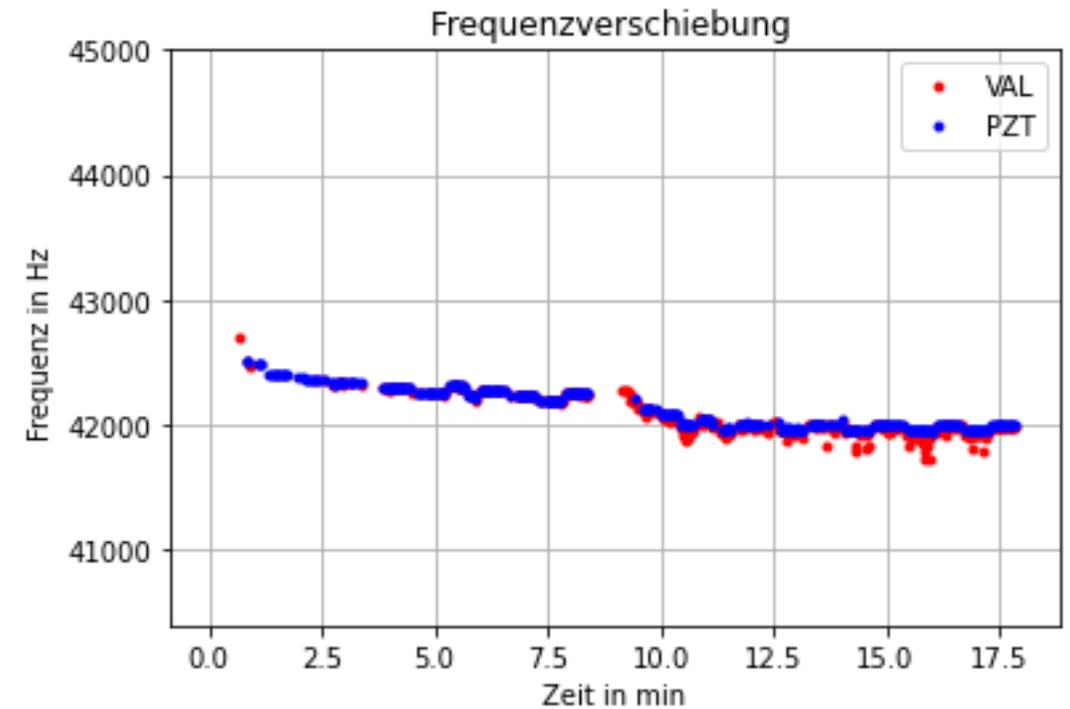
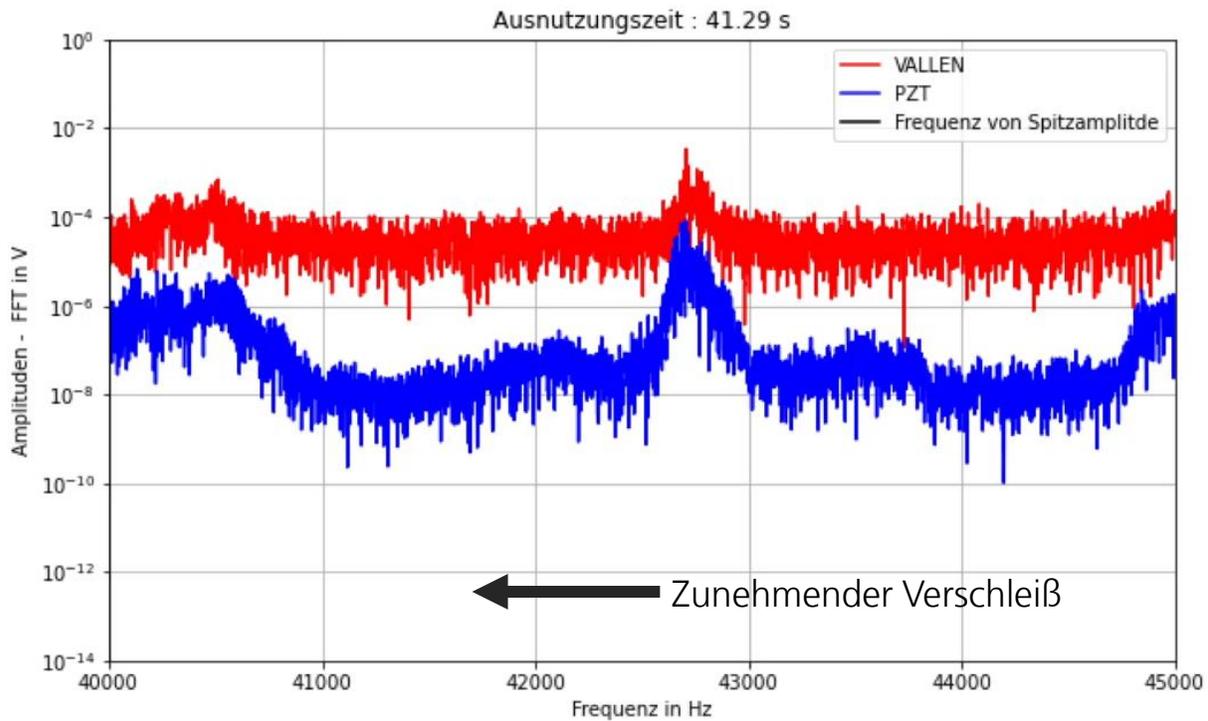


Verschlissen



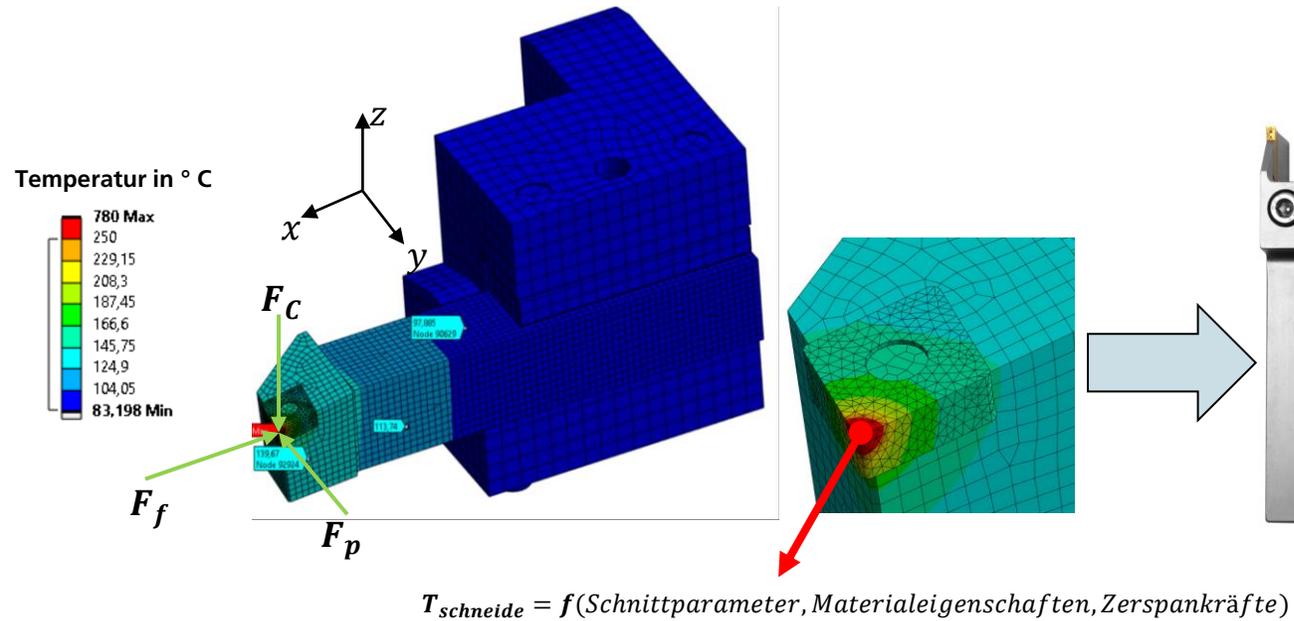
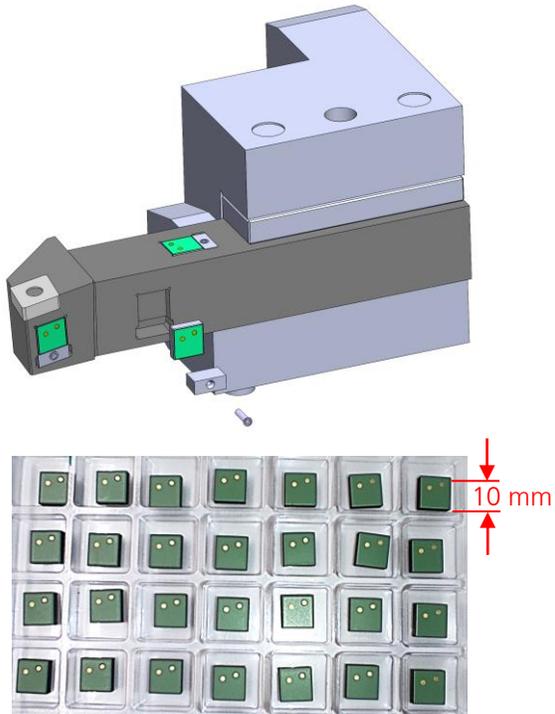
Use-Cases: Sensorischer Drehhalter

Analyse von Signalmerkmalen im Schallemissionen-Bereich



Use-Cases: Sensorischer Drehhalter

Nächsteschritte: Methodik zur Systemauslegung bei generischen Prozess



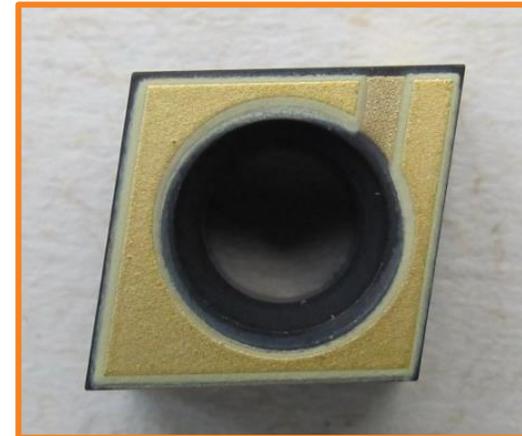
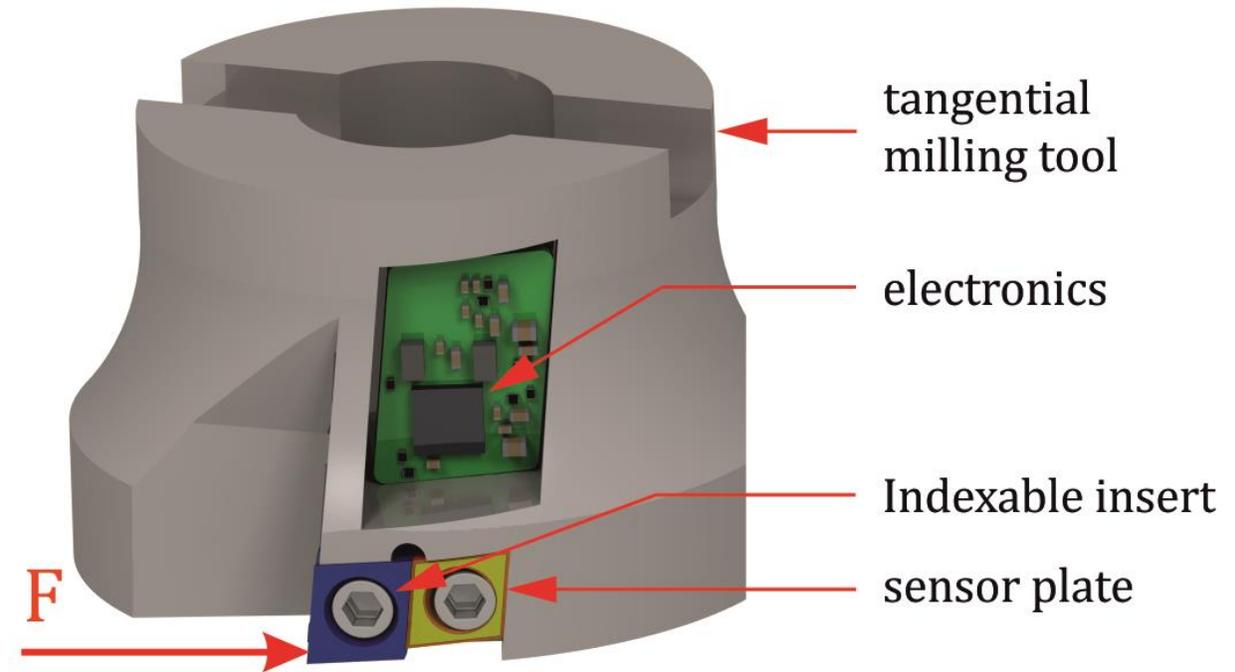
Ziel: Erhöhung der Sensitivität durch prozessnahe Sensorintegration

- Thermische und mechanische Grenzen des Sensors
- Prozessart (Schruppen, Schlichten)
- Materialeigenschaften des Werkzeugs
- Materialeigenschaften des Werkstücks
- Zulässigem Parameterraum
- Werkzeuggeometrie

Use-Cases: Fräswerkzeug

Übersicht

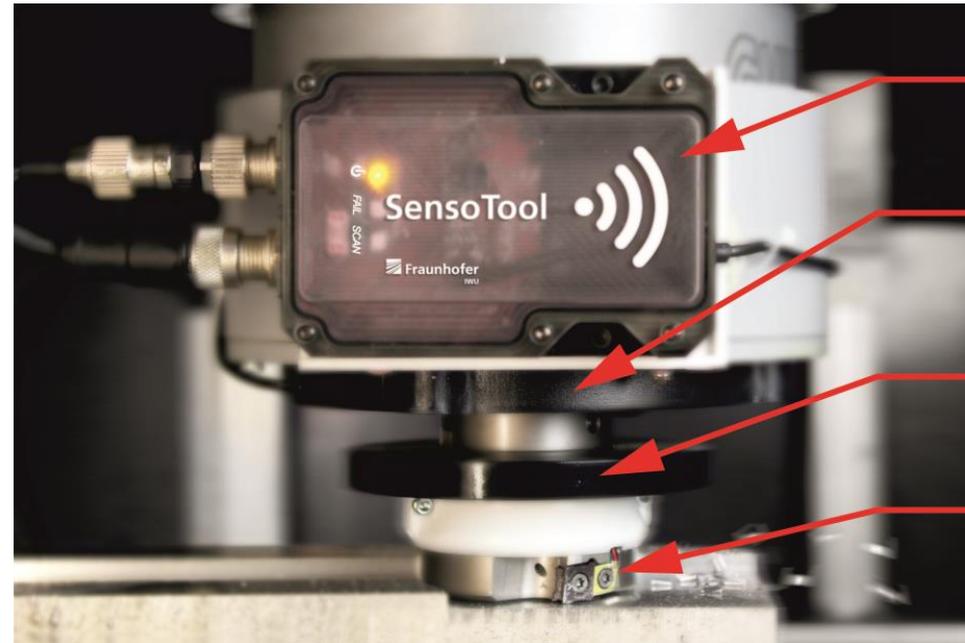
- Vorspannung von Sensorplatte hinter der Wendeschneidplatte
- Ziel: Erprobung, Integration und Validierung sämtliche Schichtaufbauten am Fräsprozess
- Vereinfachter Aufbau und Ersatz des Sensors
- Elektronik zur Datenvorverarbeitung und Übertragung im Werkzeug vergossen
- Drahtlose Datenübertragung



Use-Cases: Fräswerkzeug

Systemintegration

- Auflösung 12 Bit
- Maximale Schnittkraft= 3,5 kN
- Abtastrate = 960 Hz
- Datenübertagung durch RFID
- Kombinierte Energie- und Datenübertragung
- Bandbreite (1kHz)
- Reichweite 15 mm



gateway

spindle
antenna

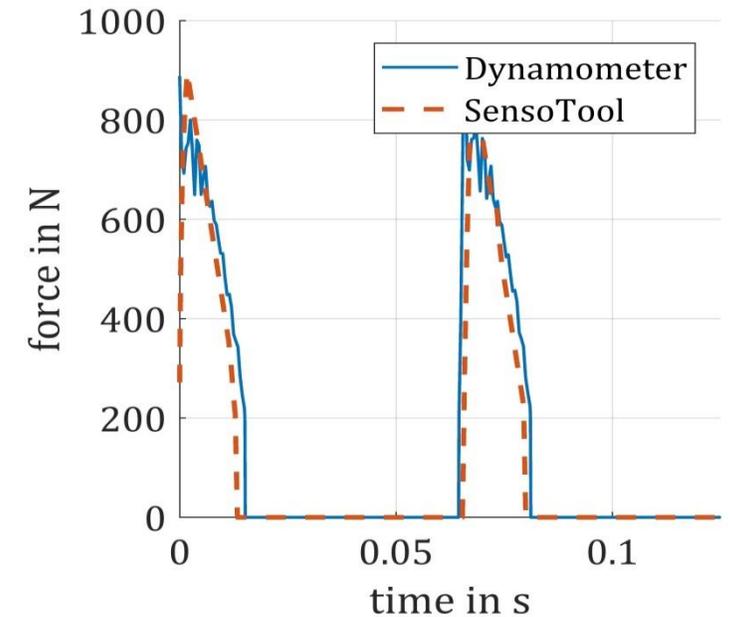
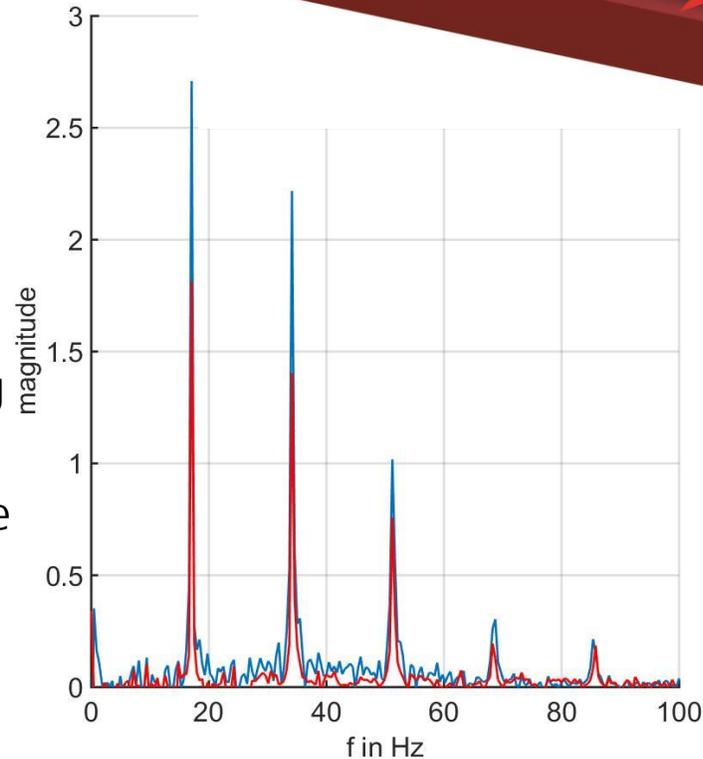
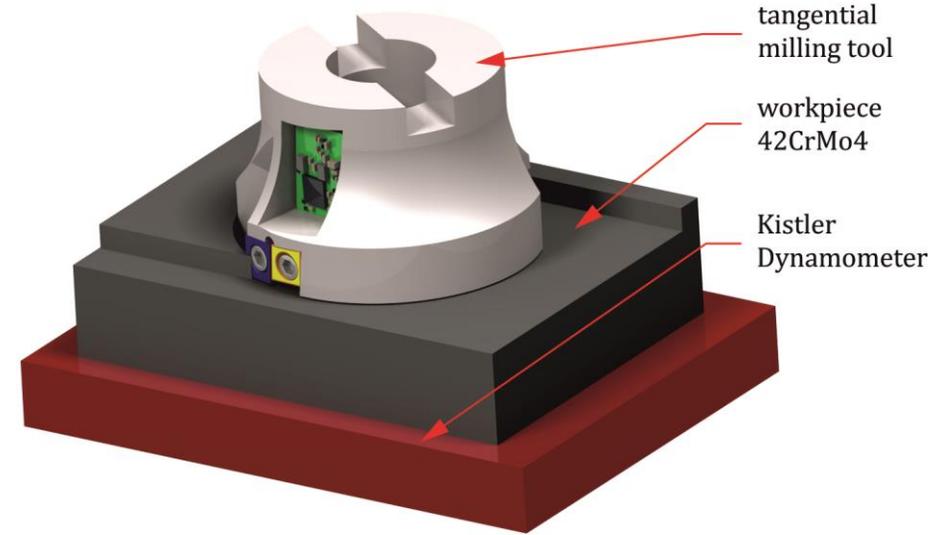
tool
antenna

sensor

Use-Cases: Fräswerkzeug

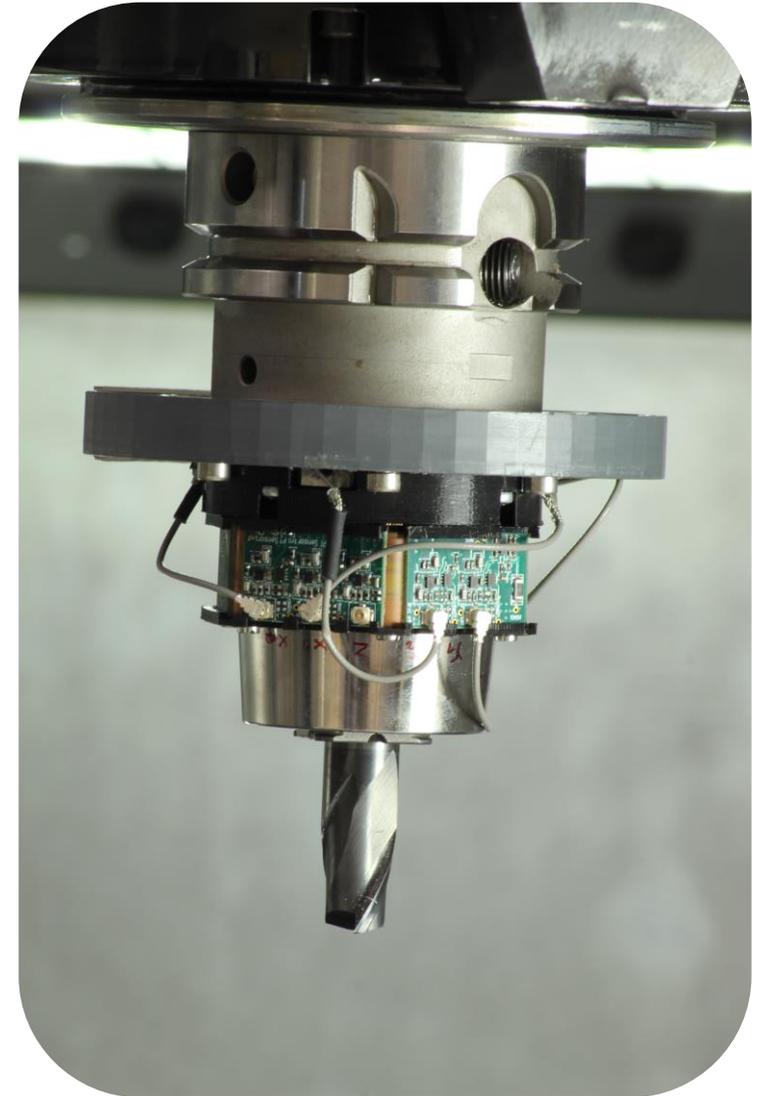
Erprobung

- Bandbreite Dynamometer < 1,8 kHz
- Senso Tool Bandbreite (mechanisch):
 - Bandbreite PZT-Sensor > 10 kHz
 - Bandbreite im Werkzeug < 10 kHz
 - < 480 Hz aufgrund von Aliasing / Filterung
 - Frequenz des Filters beschränkt erreichbare Bandbreite



Fazit und Ausblick

- PZT-Dickschichtsensoren geeignet für die Entwicklung von hochintegrierten Messsystemen in Zerspanungswerkzeugen
- Erhöhung der nutzbaren Bandbreite des Kraftsignals durch hohe Steifigkeit der Systeme
- Proof-of-Concept in der Dreh- und Fräsbearbeitung
- Künftige Arbeiten fokussieren auf nutzen der Daten zur Prozessanalyse – und Regelung



Danke für Ihre Aufmerksamkeit !

Miguel Panesso
Business Unit Adaptive Process Chains
Tel. +49 351 4772-2435
miguel.antonio.panesso.perez@iwu.fraunhofer.de

Fraunhofer Institute for Machine Tools and Forming Technology IWU
Nöthnitzer Straße 44
01187 Dresden
www.iwu.fraunhofer.de

Dr Sylvia Gebhardt
Multifunctional Materials and Components
Tel. +49 351 2553-7694
sylvia.gebhardt@ikts.fraunhofer.de

Fraunhofer IKTS
Winterbergstr. 28
01277 Dresden
www.ikts.fraunhofer.de