

## **Projektbeschreibung „DrehSens“**

Gedruckte piezoelektrische Dickschichtsensoren bieten eine innovative Möglichkeit zur hochauflösenden Kraftmessung in technischen Anwendungen, insbesondere in Strukturen mit geringer Nachgiebigkeit. Sie zeichnen sich durch eine hohe Sensitivität und Flexibilität in der Gestaltung aus, wodurch sie an vielfältige Anforderungen angepasst werden können. Insbesondere für die Integration in Zerspanwerkzeuge bieten sich vielversprechende Einsatzmöglichkeiten, da die präzise Messung von Prozesskräften eine detaillierte Analyse und Steuerung von Fertigungsprozessen ermöglicht. Im Rahmen des Leistungszentrums-Projekts „Werkzeugintegrierte Plug&Play-Sensoren zur Prozessüberwachung“ (3. Förderphase) wurde ein erstes Konzept entwickelt, um die Machbarkeit der Integration solcher Sensoren in den Drehprozess zu untersuchen. Auf diesen Ergebnissen aufbauend, wurde das Konzept in der 4. Förderphase, im Projekt „DrehSens“, weiterentwickelt. Ziel der Arbeiten war die Optimierung der Materialzusammensetzung der Sensoren, die Entwicklung eines verbesserten Integrationskonzepts für Drehhalter und die Untersuchung des Einsatzes in verschiedenen Prozessüberwachungsszenarien.

Die Entwicklungen zur Materialzusammensetzung der piezokeramischen Sensoren aus Blei-Zirkonat-Titanat (PZT) konzentrierten sich auf die Verbesserung ihrer Sensitivität und Robustheit. Als Herstellungsmethode der Sensoren wurde ein Siebdruckverfahren zur Anbringung des Schichtsystems, bestehend aus Isolierung, Elektroden und piezoelektrischem Material, gewählt. Die gedruckten Schichten werden sukzessive gesintert, und der resultierende Zusammenbau wird gepolt. Verschiedene piezokeramischen Pulvern und Substratmaterialen wurden untersucht, um eine optimale Leistung zu erzielen, insbesondere in Bezug auf die Sensitivität zum Einsatz als Kraftsensoren. Ergänzend wurden Schutzmaßnahmen wie Passivierungsschichten und gekapselte Sensoraufbauten getestet, um die mechanische Stabilität und die Beständigkeit der Sensoren unter Einsatzbedingungen am Zerspanprozess sicherzustellen. Zur Charakterisierung der verschiedenen Sensorvarianten wurden zahlreiche Proben mit unterschiedlichen Zusammensetzungen hergestellt. Zudem kamen unterschiedliche Stahlsorten als Substratmaterial zum Einsatz. Für die Untersuchungen wurden Schichtsysteme mit und ohne Passivierungsschicht gedruckt. Die hergestellten Proben wurden mechanisch und thermisch charakterisiert, um Aspekte wie den thermischen Einfluss, die Hysterese und das Signalrauschen im Hinblick auf ihre Anwendung im Drehprozess bewerten zu können.

Die Integration der Sensoren in Drehhalter erfordert eine Analyse und Optimierung zahlreicher Parameter. Mithilfe numerischer Simulationen wurde der optimale Einbauort der Sensoren ermittelt. Dabei wurden die zulässigen maximalen mechanische Spannungen, die Empfindlichkeit bezogen auf die Erfassung der Schnittkraft, die Vorspannung der Sensoren sowie die Temperaturentwicklung während des Zerspanens berücksichtigt. Konstruktive Maßnahmen wurden entwickelt, um die Sensoren vor äußeren Einflüssen wie Spänen und Kühlschmierstoffen zu schützen. Gleichzeitig wurde ein Konzept zur elektrischen Anbindung der Sensoren ausgearbeitet, das eine zuverlässige Datenerfassung und Signalübertragung ermöglicht. Diese Maßnahmen bilden die Grundlage für die präzise und stabile Integration der Sensorik in den Drehhalter. Der entwickelte Prototyp wurde anhand von Messtechnischen Untersuchungen unter Laborbedingungen vor dem Einsatz am Drehprozess charakterisiert. Unter diesen erfolgten die statische Kalibrierung an einer Universalprüfmaschine als auch die Untersuchung der dynamischen Eigenschaften

durch Impulshammertests. In einem weiteren Schritt wurde das System mechanischen und thermischen Belastungen ausgesetzt, um die Grenzfrequenz zu bestimmen, bei der niederfrequente Temperatureffekte, die während des Drehprozesses auftreten, aus dem Signal herausgefiltert werden.

Die Leistungsfähigkeit des entwickelten sensorischen Drehhalters wurde in umfassenden Zerspanversuchen unter realen Bedingungen getestet. Diese basierten auf relevanten Anwendungsszenarien, wie der Überwachung des Werkzeugverschleißes und der Materialhärte des Werkstücks. Der Fokus lag dabei auf der Analyse der Messsignale im Zeit- und Frequenzbereich, die mit den Signalen herkömmlicher Sensoren, wie Kraftdynamometern, Schallemissionssensoren und Wirkleistungssensoren, verglichen wurden. Dabei zeigten die piezokeramischen Sensoren die Fähigkeit, hochfrequente, verschleißkorrelierende Signale mit einer Bandbreite von 100 Hz bis 100 kHz zu erfassen. Ein weiteres Anwendungsszenario umfasste die Detektion von Härteunterschieden in inhomogen gehärteten Werkstücken. Hierbei konnte die Sensorik selbst bei geringen Schnitttiefen Härteunterschiede sicher identifizieren. Diese Fähigkeit stellt eine wichtige Ergänzung zu bestehenden Methoden dar, da konventionelle Wirkleistungssensoren in Bearbeitungszentren diese Unterschiede nicht detektieren können. Im Vergleich zu parallel eingesetzten herkömmlichen Schallemissionssensoren wird der Vorteil der kompakten Integration deutlich, da eine Integration dieser Sensoren in den Drehhalter aufgrund ihrer Baugröße erschwert wird. Eine Befestigung außerhalb des Drehhalters stellt eine Herausforderung hinsichtlich der Robustheit und Reproduzierbarkeit der erfassten Signale dar, insbesondere gegenüber Störfaktoren wie Späne und Kühlschmierstoff.

Aufbauend auf den aktuellen Entwicklungsstand und hinsichtlich einer Verwertung in der Serienfertigung, sollen künftige Arbeiten auf die Integration des sensorischen Drehhalters im Rahmen eines Prozessüberwachungssystems abzielen. Dies beinhaltet die Anbindung an eine industriellen Lösung zur Prozessüberwachung. Ein weiterer Entwicklungsschritt ist die Eliminierung von Kabeln durch die Integration von Signalauswerteargorithmen in eine Recheneinheit direkt am Werkzeugrevolver. Dies erfordert die Entwicklung einer drahtlosen Lösung zur Signalübertragung, um die Flexibilität und Akzeptanz des Systems zu erhöhen. Hierzu soll der Kompromiss zwischen Abtastrate, Algorithmik zur Merkmalsableitung, Rechenleistung und Energiebedarf der drahtlosen Elektronik berücksichtigt werden. Darüber hinaus wird die Erweiterung der Datenbasis für die untersuchten Anwendungsszenarien, insbesondere zur Überwachung von Werkzeugverschleiß und zur Detektion von Härteunterschieden, von zentraler Bedeutung sein. Diese umfassendere Datengrundlage wird dazu beitragen, datengetriebene Prozessmodelle zu erstellen, die auf modernen KI-Methoden basieren.

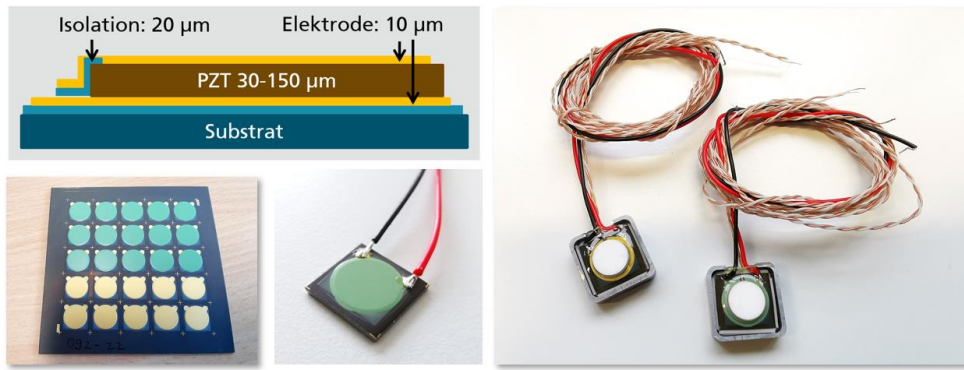


Abbildung 1. Beispiel von Probesensoren mit und ohne Passivierung (links). Einkapselung der Sensoren zur Integration im Drehhalter (rechts)

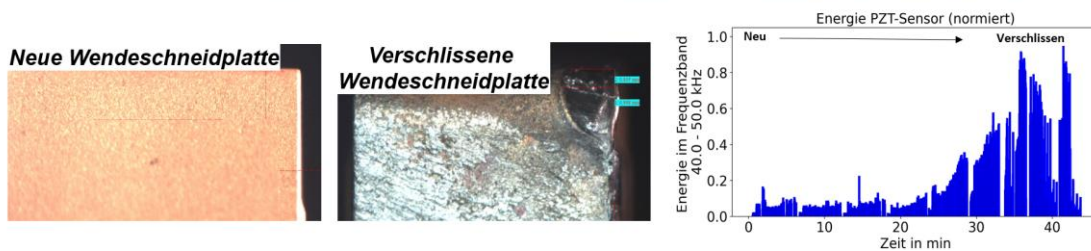
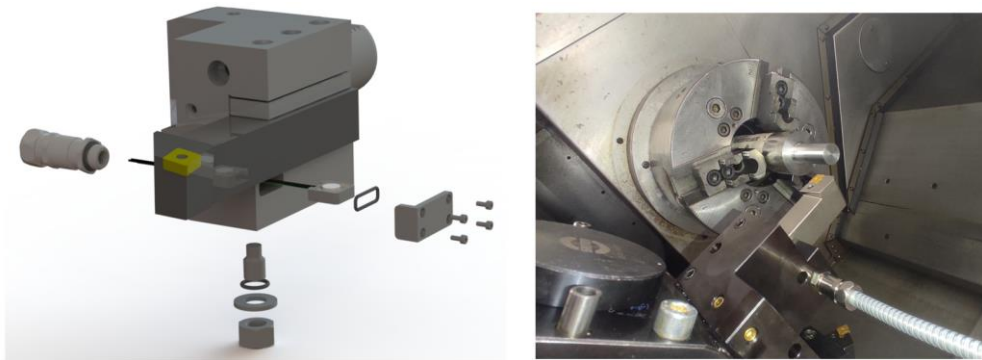
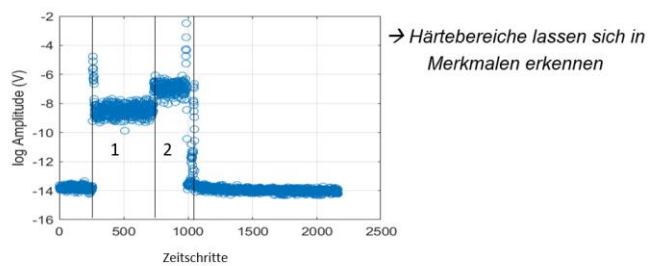
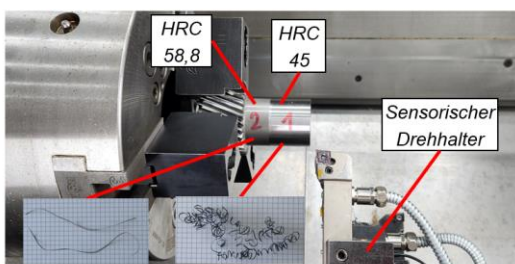


Abbildung 2. Integrationskonzept im Drehhalter und verschleißkorrelierende Merkmale aus Standzeitversuchen



Technologieparameter	
$a_p$	= 0,25 mm
$f$	= 0,2 mm
$V_c$	= 150 mm/min
$n$	= 1137 min <sup>-1</sup>

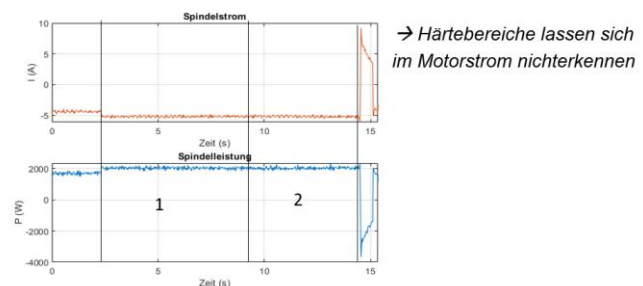


Abbildung 3. Technologieversuche zur Detektion von Härtebereiche im Werkstück durch die eingesetzte Sensorik