Abschlussbericht KI-Predict

Verbundprojekt:	Verteilte KI für die sensorbasierte Prozess- und Zustandskontrolle
Teilprojekt:	Werkzeugsystem mit integrierter Elektronik für verteilte KI zur sensorbasierten Prozess- und Zustandskontrolle in der Zerspanung
Förderkennzeichen:	16ME0037
Laufzeit	01.03.2020 - 31.12.2023

GFE – Gesellschaft für Fertigungstechnik und Entwicklung e.V. Schmalkalden, 24.06.2024

Dr.-Ing. Reiner Schwäblein
T: +49 3683 6900 43
r.schwaeblein@gfe-net.de

Stefan Marr
T: +49 3683 6900 39
s.marr@gfe-net.de

Inhalt

1. Zielstellung 2
2. Durchgeführte Arbeiten 3
   Arbeitpaket 1: Systemspezifikation 3
   Arbeitspaket 3: Vorbereitung Messkampagne und Prozessintegration 6
   Arbeitspaket 4: Messkampagne 1 9
   Arbeitspaket 7: KI-Algorithmen 10
   Arbeitspaket 9: Messkampagne 2 11
   Arbeitspaket 10: Messkampagne 3 14
3. Zusammenfassung / Fazit 15
4. Veröffentlichungen 16

1. Zielstellung

Das Projekt „KI-Predict“ hatte zum Ziel, ein intelligentes, integriertes Sensorinterface für das Condition Monitoring und die Echtzeit-Prozesskontrolle zu entwickeln sowie in industriellen Anwendungen zu implementieren. Die Gesamtaufgabenstellung umfasste die nachfolgenden Zielstellungen:

1. Entwicklung eines intelligenten Sensorinterfaces:
Es sollten leistungsfähige Hardware- und Softwarekomponenten entwickelt werden, die eine effiziente Datenerfassung und -verarbeitung ermöglichen. Dies umfasste die Entwicklung neuer Hardware-Systeme, welche auf Methoden der KI optimiert waren sowie die Implementierung einer dezentralen Datenverarbeitung einschließlich einer Sensordatenfusion.

2. Integration verschiedener Sensortechnologien:
Präzise und schnelle Sensortechnologien, wie magnetoresistive (MR) Sensorik und Dünnfilm-Sensoren zur Druck- und Kraftmessung, sollten integriert und erweitert werden, um sensornahe Informationen (Sensorsignale) zu extrahieren.

3. Entwicklung von KI-Algorithmen und ML-Methoden:
Es sollten KI-Algorithmen und ML-Methoden entwickelt werden, die eine prädiktive Wartung von Produktionsanlagen und eine verbesserte Überwachung von Industrieprozessen ermöglichen. Dazu gehörte die Entwicklung von Algorithmen zur Merkmalextraktion, Datenfusion und zur prädiktiven Analyse des Anlagenzustands.

4. Anpassung an industrielle Anwendungen:
Die entwickelten Sensorik-, Mikroelektronik- und KI-Lösungen sollten in repräsentativen industriellen Anwendungen implementiert und getestet werden. Unterschiedliche Produktionsprozesse wurden direkt durch die Projektpartner adressiert, wie Lagerüberwachung (Fa. SNR GmbH), spanende Bearbeitung (GFE e.V.) und Umformtechnik (HYDAC GmbH).

5. Validierung und Evaluation: Die Funktionalität und Leistungsfähigkeit der entwickelten Lösungen mussten validiert und evaluiert werden. Dazu gehörten Messkampagnen zur Datenbasisgenerierung für die KI-Algorithmen sowie die Überprüfung der Anwendbarkeit unter industriellen Anforderungen.

Die Gesamtaufgabenstellung zielte darauf ab, die Effizienz, Flexibilität und Autonomie in der Produktion zu steigern, indem fortschrittliche Technologien wie KI und ML genutzt wurden, um eine prädiktive Wartung von Produktionsanlagen zu ermöglichen und die Überwachung von Industrieprozessen zu verbessern. Teilaufgabe der GFE war das permanente Überwachen des Verschleißzustandes bzw. die Ermittlung der Einsatzgrenze von Präzisionswerkzeugen mit geometrisch bestimmter Schneide, um so eine prozesssichere, reproduzierbare zerspanende Bearbeitung bei effizienten Rüstzeiten zu gewährleisten. Zur Umsetzung dieses Vorhabens wurden folgende Arbeitsziele angestrebt:

- Konzept für ein sensorintegriertes Werkzeugsystem zur Ermittlung relevanter Prozessdaten während der Zerspanung
- Umsetzung eines solchen Werkzeugsystems mit Sensorik und Elektronik mit Unterstützung der Projektpartner Sensitec, HYDAC, IIS und Canway in iterativen Schritten
- selbstständiger Einsatz der Hardware und Softwaretoolbox der Projektpartner Canway, IIS und UdS im Versuchsfeld der GFE
- Ermittlung relevanter Zustands-/Verschleiß- und Prozessparameter
- Übertragung der entwickelten Lösung für das sensor- und elektronikintegrierte Werkzeugsystem auf eine weitere Anwendung

2. Durchgeführte Arbeiten

Arbeitspaket 1: Systemspezifikation

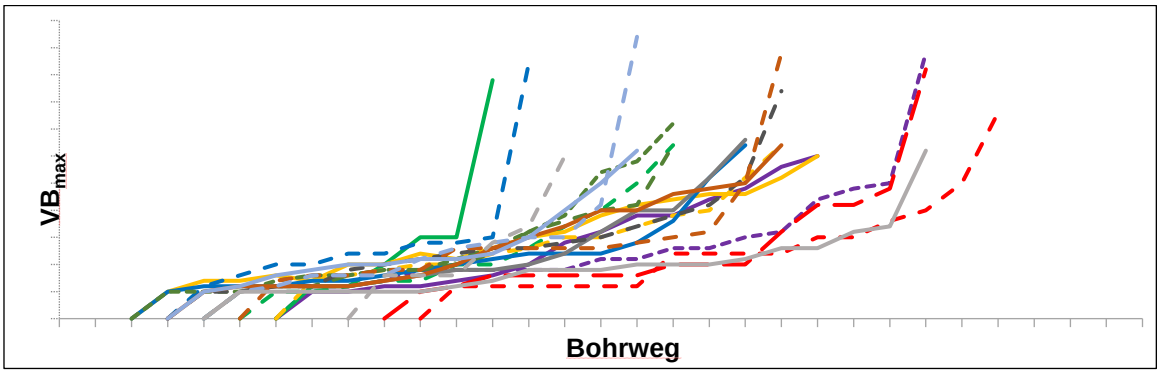
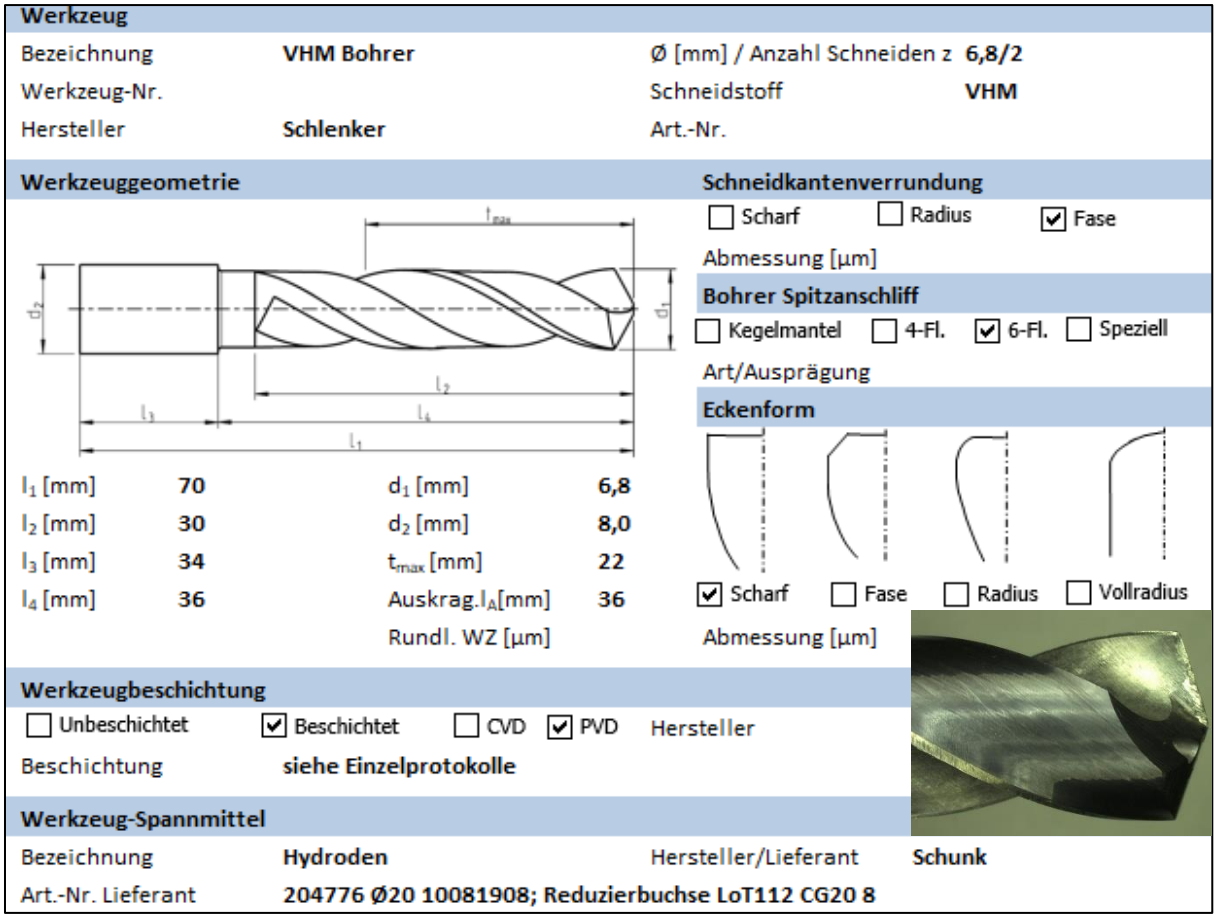


Abbildung 1 Eckenverschleiß/ Verschleißmarkenbreite VB_{max} über Bohrweg bei Variation des Werkzeugbeschichtung

Im Arbeitspaket Systemspezifikation wurde ein Bohrprozess als relevanter Zerspanungsprozess ausgewählt, bei dem die Streubreite des maximalen verschleißbedingten Bohrweges sehr hoch ist. U Dieses Driften sollte mit den neuen Methoden eingehend untersucht werden. Für einen Standard-Bohrer (Werkzeugdaten siehe Abbildung 2) bei dem nur die Beschichtung variiert wurde zeigt die Abbildung 1 qualitativ den Verlauf der großen Streubreite des Werkzeugverschleißes (Verschleißmarkenbreite) über den Bohrweg.
Die Absolutwerte sind nicht entscheidend und wurden deshalb nicht dargestellt.



Werkzeug

Bezeichnung	**VHM Bohrer**	Ø [mm] / Anzahl Schneiden z	**6,8/2**
Werkzeug-Nr.		Schneidstoff	**VHM**
Hersteller	**Schlenker**	Art.-Nr.	

Werkzeuggeometrie

l_1 [mm]	**70**	d_1 [mm]	**6,8**
l_2 [mm]	**30**	d_2 [mm]	**8,0**
l_3 [mm]	**34**	t_{max} [mm]	**22**
l_4 [mm]	**36**	Auskrag.l_A[mm]	**36**
		Rundl. WZ [µm]	

Schneidkantenverrundung

☐ Scharf ☐ Radius ☑ Fase

Abmessung [µm]

Bohrer Spitzanschliff

☐ Kegelmantel ☐ 4-Fl. ☑ 6-Fl. ☐ Speziell

Art/Ausprägung

Eckenform

☑ Scharf ☐ Fase ☐ Radius ☐ Vollradius

Abmessung [µm]

Werkzeugbeschichtung

☐ Unbeschichtet ☑ Beschichtet ☐ CVD ☑ PVD Hersteller

Beschichtung **siehe Einzelprotokolle**

Werkzeug-Spannmittel

Bezeichnung	**Hydroden**	Hersteller/Lieferant	**Schunk**
Art.-Nr. Lieferant	**204776 Ø20 10081908; Reduzierbuchse LoT112 CG20 8**		

Abbildung 2 Werkzeugdaten Bohrer

Es wurde auf einer systematischen Prozessanalyse des Anwendungsszenarios Bohren aufgebaut, um die Einfluss- und Störgrößen der Zustands- und Prozessüberwachung zu ermitteln. Hierzu wurden drei Messkampagnen geplant und das Design of Experiment (DoE) definiert, um die Verschleißprozesse am Werkzeug innerhalb des zur Verfügung stehenden Zeitraums sinnvoll zu beobachten.

Ziel war es, eine umfassende Datenbasis zur Entwicklung und Erprobung von KI-Algorithmen zu generieren. Dabei wurden u. a. auch die Ergebnisse und Erfahrungen aus vorangegangenen Projekten mit sensor- und elektronikintegrierten Systemen (z. B. von Präzisions-Feinbohrwerkzeugen) herangezogen. Zudem nutzten wir bereits bestehende Sensorlösungen des Projektpartners HYDAC, sowie kommerzielle Sensoren und die angepasste modulare Sensorplattform, die im Forschungsprojekt "Modulare Sensorsysteme für Echtzeit-Prozesssteuerung und smarte Zustandsbewertung" (MoSeS-Pro) entwickelt wurde, um eine leistungsfähige Datenerfassung und -speicherung auch für große Datenmengen sicherzustellen.

Bei der Auswahl der Sensoren lag der Fokus darauf, sicherzustellen, dass einerseits eine sinnvolle Breite hinsichtlich der Sensorprinzipien, Systemkomplexität und Anwendung erreicht und andererseits jedoch die Anforderungen an das Sensorinterface sinnvoll integriert werden kann. Dazu wurden die zu erfassenden Messwerte und Prozessdaten spezifiziert und daraus die erforderlichen Messsysteme für die erste Messkampagne abgeleitet (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1 Sensorik für Messkampagne 1

Messposition	**Messgröße**	**Sensor**	
Maschine, PLC	Drehmoment	in Maschine	
Maschine, PLC	Drehzahl	in Maschine	
Werkzeug	Kühlmitteldruck	HPI 700-G-0750-006	
Werkzeughalter	Drehmoment	Kistler Dynamometer	Ladungsverstärker 5167A
Werkzeughalter	Vorschub / axiale Kraft	Kistler Dynamometer	
Werkzeughalter	Biegung / radiale Kräfte	Kistler Dynamometer	
Werkzeughalter	Körperschall / Schwingungen	Beschleunigungssensor Kistler 8766A100CBP5	Ladungsverstärker 5134B

Zunächst wurden die maschinenseitig zur Verfügung stehende Sensoren sowie bereits erprobte Messtechnik verwendet, um möglichst schnell zu einer umfangreichen Datenbasis zu gelangen. Bei den verwendeten Sensoren der Fa. Kistler wurden jeweils Ladungsverstärker eingesetzt (siehe Tabelle 1 und Abbildung 4), um den Aufwand für die Anbindung der Sensorik kann die Auswerteelektronik gering zu halten.

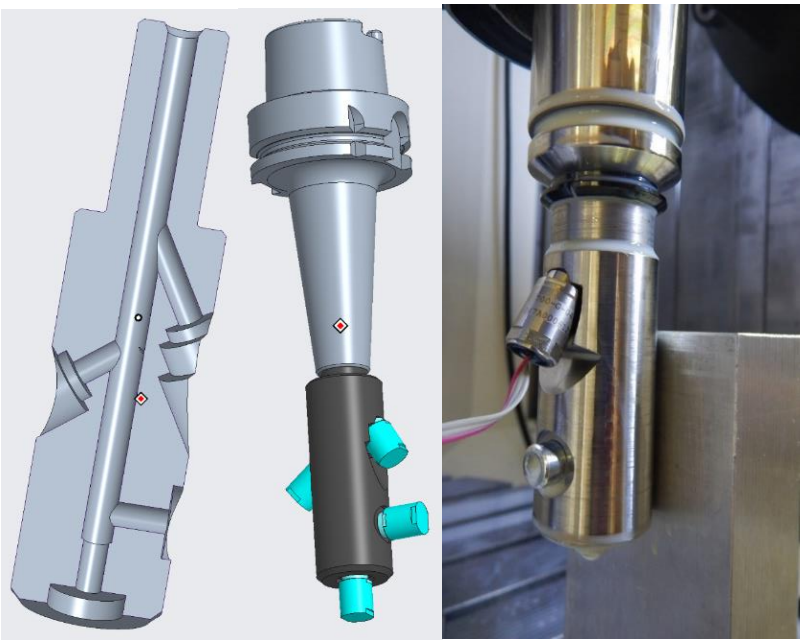


Abbildung 3 KSS-Verteiler (CAD-Modell und realer Aufbau)

Für Vorversuche wurde u. a. ein werkzeugspezifischer Kühlschmierstoff-Verteiler (KSS-Verteiler) konstruiert und hergestellt (siehe Abbildung 3), um eine geeignete Einbausituation für den Drucksensor zur Überwachung des Kühlschmiermitteldrucks zu finden. Es wurden Anschlüsse für den Sensor in verschiedenen Winkeln zum Kühlschmierstoffkanal eingebracht und der Drucksensor an den verschiedenen Positionen mit unterschiedlichen Abständen von KSS-Austritt zum Werkstück bewegt. Dabei konnten gute Ergebnisse erzielt werden, bei denen deutliche, reproduzierbare Sensorsignale bei verschiedenen Positionen des KSS-Verteilers zum Bauteil gemessen werden konnten.

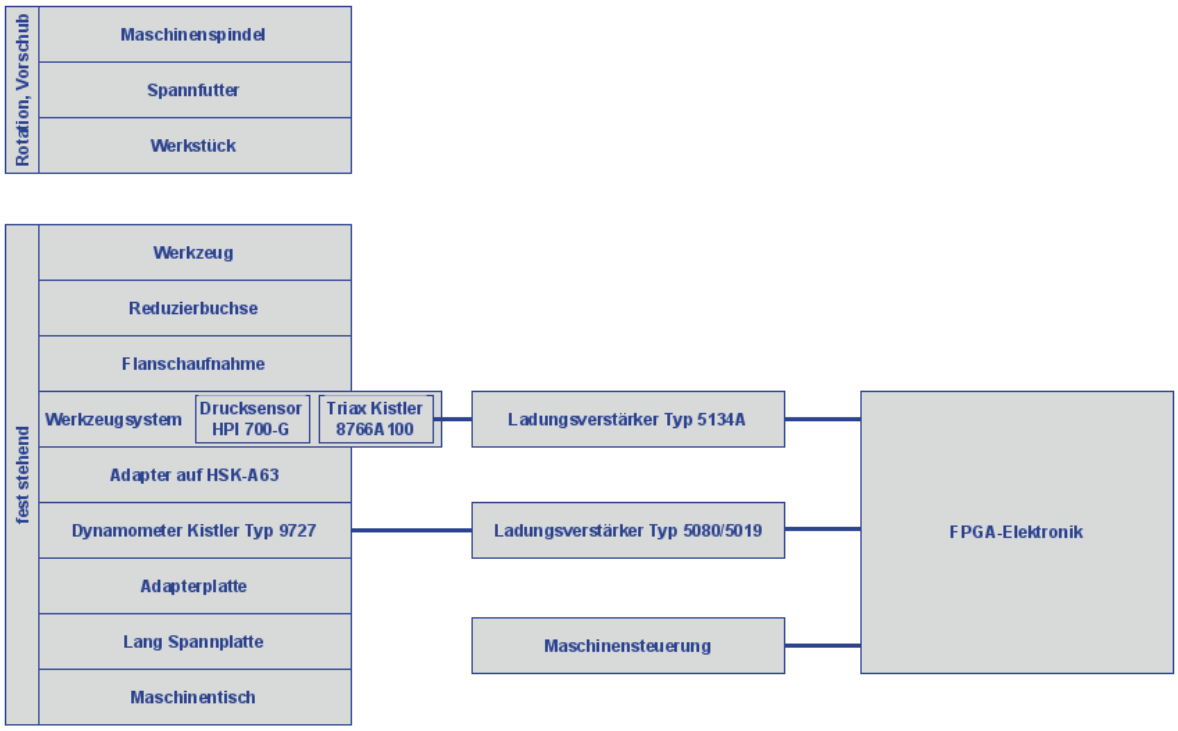


Abbildung 4 Messaufbau für Zerspanungsversuche in Messkampagne 1

In enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern unterstützte die GFE Schmalkalden die Konzepterstellung zur Integration der Sensorsysteme in den Zerspanungsprozess (siehe Abbildung 4), sowie die Definition der Schnittstellen zwischen Sensoren und Datenerfassung einerseits und Datenerfassung und Prozesssteuerung / ERP-System andererseits. Für die Schnittstellen zwischen Sensorsystemen und Auswertelektronik/Sensorplattform wurden einheitlich analoge Signale gewählt. So konnten Vorfilterungen der hochfrequenten Signale vermieden werden, die evtl. Signalanteile bzw. signifikante Ereignisse aus dem Zerspanungsprozess herausgefiltert hätten. Zudem konnten somit die Ladungsverstärker für die Kistler-Sensoren eingesetzt werden und damit wiederum die Anbindung dieser Sensoren an die Elektronik für die erste Messkampagne wesentlich vereinfacht werden.

Arbeitspaket 3: Vorbereitung Messkampagne und Prozessintegration

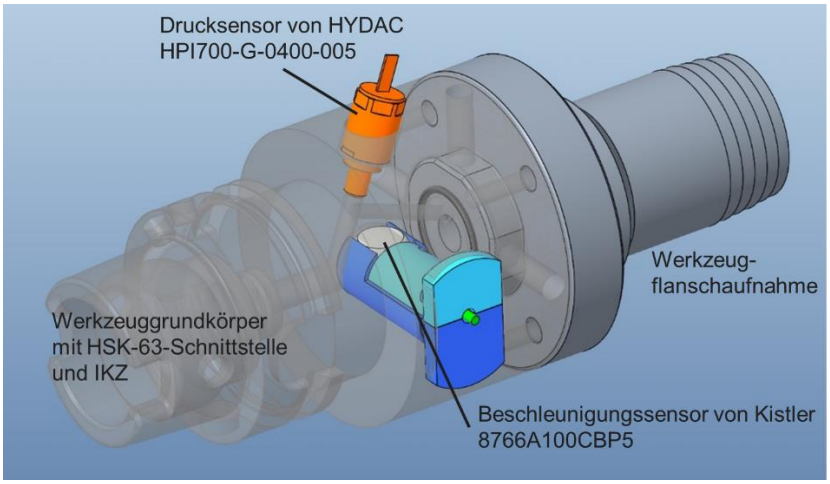


Abbildung 5 CAD-Modell des modularen sensorintegrierten Werkzeugsystems für Messkampagne 1

In diesem Arbeitspaket zur Vorbereitung der Messkampagne 1 und der Prozessintegration wurde das Konzept aus Arbeitspaket 1 für die Anwendung im Bohrprozess durch die GFE umgesetzt. Dazu wurde die Auslegung und Konstruktion des in Arbeitspaket 1 spezifizierten Werkzeugsystems (siehe Abbildung 5), sowie die Fertigung, Herstellung und Montage der dazu notwendigen Komponenten durchgeführt. Für die Herstellung des Systems wurden additive sowie subtraktive Fertigungsverfahren angewendet. Der GFE stehen aktuell zwei moderne Anlage für das LPBF Verfahrenzur Verfügung (siehe Abbildung 6).

Abbildung 6 Hybride Fertigungstechnologie (links viergeteilte Vorrichtung für den additiven Druck aufbauend auf einem HSK-Rohling, im Hintergrund die Maschine Lasertec 30 SLM für die additive Fertigung, rechts mit HSK-Rohlingen bestückte Vorrichtung im Bearbeitungsraum der Maschine)

Für die additive Fertigung von Werkzeuggrundkörpern wurde ein entsprechendes Spannsystem für die HSK-Rohlinge entwickelt (siehe Abbildung 6). Um den Gesamtprozess effizient ablaufen zu lassen, wurde direkt auf subtraktiv hergestellte Halbzeuge (modifizierte HSK 63-Rohlinge) additiv gefertigt (hybride Fertigungstechnologie). Die funktionswichtigen Flächen wurden nach dem additiven Prozess zerspanend nachbearbeitet.

Daneben wurden auch sehr kostengünstig 3D- Kunststoffbauteile additiv hergestellt. Diese Kunststoffteile wurden z. B. zur Kapselung und zum Schutz der Elektronik vor den Umgebungsbedingungen der Bearbeitungsmaschinen (Kühlmittel, Späneflug, usw.) benötigt. Im Bearbeitungszeitraum konnte die GFE die Expertise auch in diesem Bereich erweitern.

Die Sensorik und die Elektronik wurde in das GFE- spezifische Werkzeugsystem integriert sowie das gesamte Werkzeugsystem mit der notwendigen Mess- und Rechentechnik in und außerhalb des Bearbeitungszentrums (BAZ, siehe Abbildung 7) verbunden.

Abbildung 7 Bearbeitungszentrum DMU Ultrasonic 125 Duoblock im Versuchsfeld der GFE (links) mit IO-Box für den Anschluss von digitalen und analogen Signale als Ein- und Ausgänge (rechts)

Dazu entstand an der Versuchsmaschine DMU Ultrasonic 125 Duoblock eine IO-Box für digitale und analoge Ein- und Ausgänge (siehe Abbildung 7). Über die analogen Ausgänge konnten das Drehmoment und die Drehzahl der Maschine abgegriffen werden. Dabei wurde der Drehmomentbereich bzw. der Drehzahlbereich der durch die Spannungsdifferenz von 10 Volt am analogen Ausgang abgebildet werden kann, in der Maschinensteuerung auf die Anwendung abgestimmt. Dies ermöglichte eine ausreichend hohe Auflösung von Drehmoment und Drehzahl. Die digitalen Ausgänge dienten als Trigger für die Kontrolle und Synchronisierung des Versuchsablaufs, die mit M-Befehlen über das NC-Programm die Datenaufzeichnung und Datenspeicherung steuern.

Bei der Datenauswertung stellte sich heraus, dass die analogen Daten für Drehmoment und Drehzahl aus der Maschine nicht zur weiteren Nutzung geeignet waren, da sie in der Maschinensteuerung zu langsam vorverarbeitet werden.

Parallel wurden bei der GFE unidirektionale Datenschnittstellen für die Integration der Systeme in die ausgewählten Prozesse zum Auslesen relevanter Prozessdaten durch die Projektpartner bereitgestellt. Die zur Verfügung gestellte Elektronik entstand auf der Basis der Ergebnisse vom Forschungsprojekt “MoSeS-Pro“. Für die erwarteten Datenmengen gemäß Sensorumfang, Abtastrate und erwarteter Versuchslaufzeiten wurden geeignete Speichersysteme durch die Projektpartner bereitgestellt. Für die Anbindung bzw. Adaption der Sensorik an die Datenschnittstelle der Projektpartner wurden von der GFE entsprechende Leiterplatten designt. Dabei wurde ein modulares Design mit Aufsteckplatinen mit verschiedenen Funktionen entwickelt, um die Wiederverwertbarkeit zu erhöhen. Die Integration in die

Versuchsmaschine bzw. in das NC-Programm des Bohrprozesses erfolgte durch die Maschinenbediener.

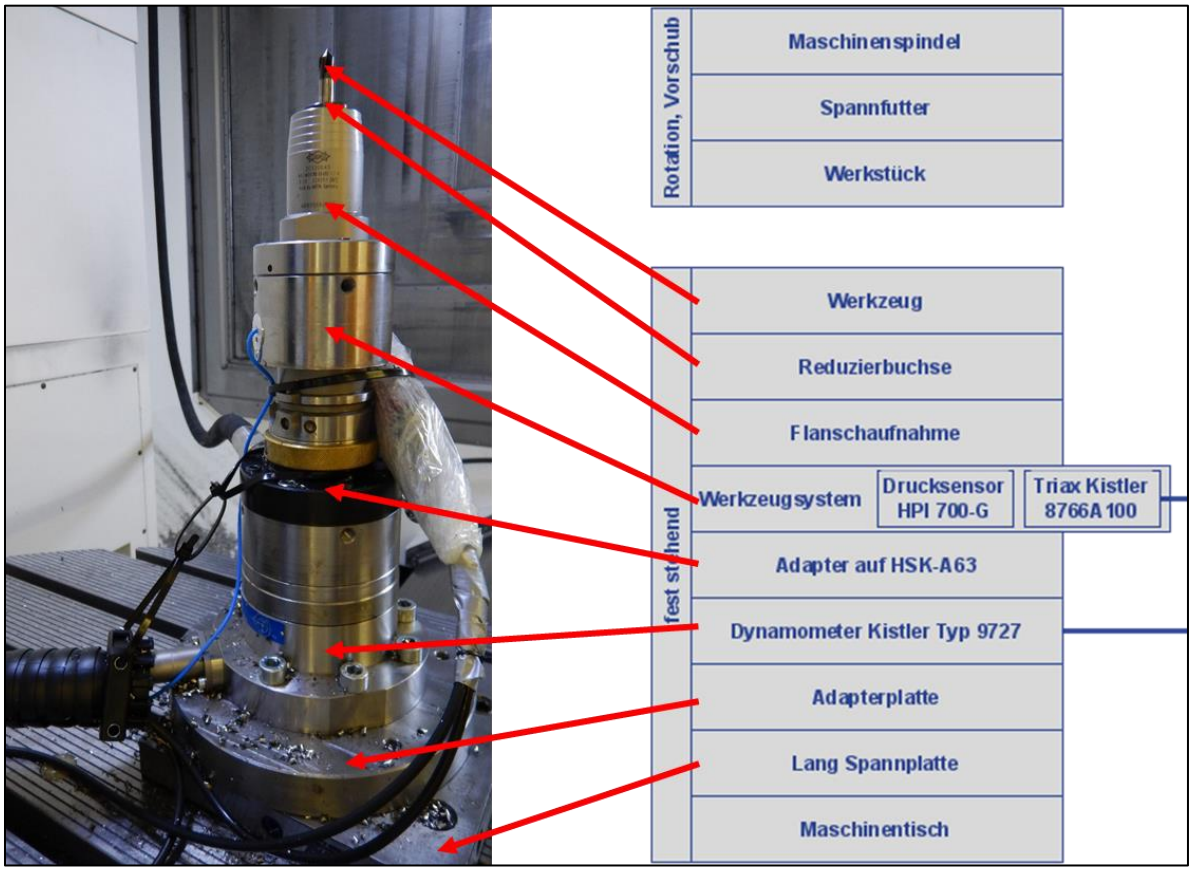


Abbildung 8 Zusammenbau Werkzeugsystem in Versuchsmaschine

Abbildung 8 zeigt den Zusammenbau des Werkzeugsystems in der Versuchsmaschine. Dieser Aufbau wurde für die Messbohrungen verwendet. Um die Signale mit den hohen Datenraten sicher übertragen zu können, wurden konsequent kabelgebundene Verbindungen verwendet. Dadurch wurde für die Messbohrungen auf einen nicht rotierenden Aufbau des Werkzeugs auf dem Maschinentisch und ein rotierendes Werkstück in der Spindel zurückgegriffen. Die Integration des Kühlschmierstoffs (KSS) erfolgte über eine extra gefertigte Adapterplatte mit entsprechendem Anschluss. Werkzeugseitig wurde eine Spannhülse mit peripherer KSS-Zufuhr verwendet. Um am Werkzeug den Verschleiß zu generieren, wurde ein klassischer Aufbau gewählt, bei dem das Bohrwerkzeug mit der Spindel rotiert und das Werkstück auf dem Maschinentisch aufgespannt ist. Dieses Vorgehen war die praktikabelste Lösung, um die Daten in entsprechender Qualität aufzeichnen zu können, auch wenn dadurch der Aufwand für die Versuchsdurchführung sehr hoch war.

Arbeitspaket 4: Messkampagne 1

Es wurden an der in Arbeitspaket 1 spezifizierten Anlage und dem Prozess mit dem in Arbeitspaket 3 vorbereiteten sensorintegrierten Werkzeugsystem und den bereitgestellten Datenerfassungs-systemen die zuvor definierten Versuche bzw. Messreihen zur Erfassung einer umfangreichen und breitbandigen Datenbasis nach dem geplanten Ablauf (DoE) durchgeführt

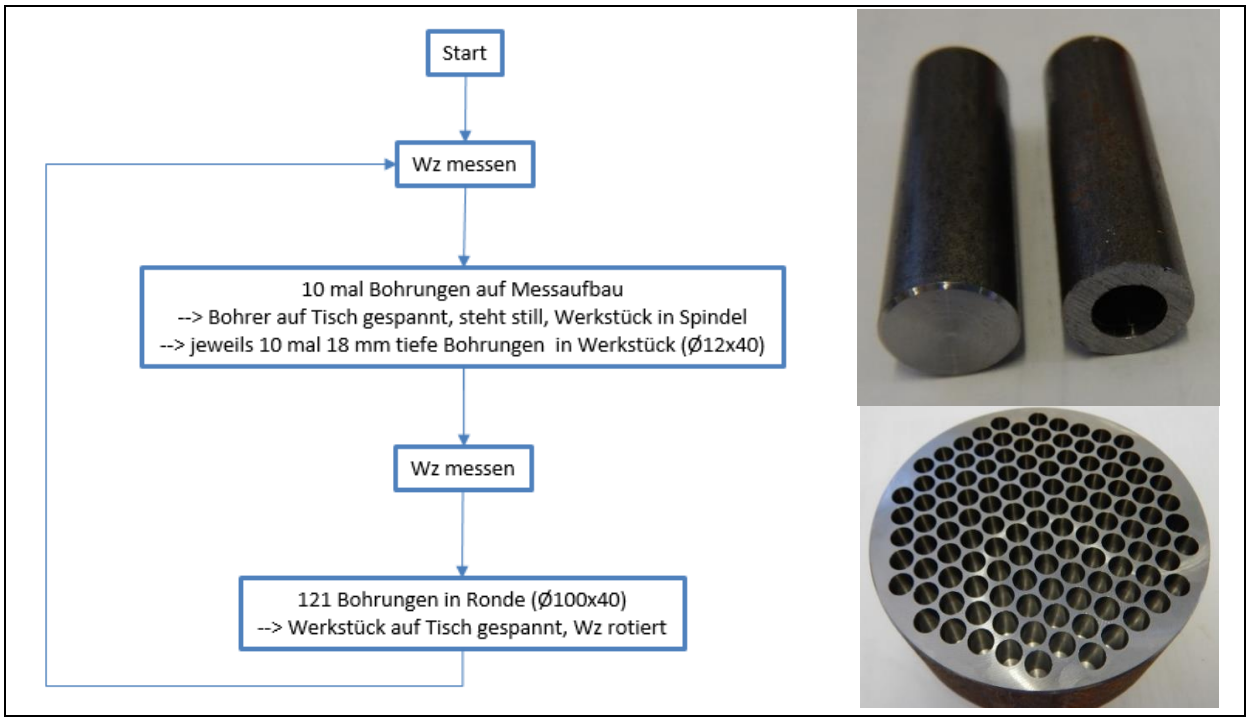


Abbildung 9 Versuchsablauf mit Abbruchkriterium von einer Verschleißmarkenbreite größer 0,3 mm (links), Werkstücke mit Messbohrungen (rechts oben), Werkstückronde mit Bohrungen um „Verschleiß zu generieren" (rechts unten)

In Abbildung 9 ist der Versuchsablauf dargestellt. Es wurden abwechselnd zehn Testbohrungen und 121 Verschleißbohrungen durchgeführt und das Werkzeug anschließend optisch vermessen. Dieser Ablauf wurde für jeden Bohrer so lange wiederholt, bis der Bohrer die Verschleißmarkenbreite von 0,3 mm überschritten hat. Außerdem sind in Abbildung 9 zu sehen:

- zum einen die kleinen Werkstücke, die für die Messbohrungen mit Spannzangen an der Maschinenspindel eingespannt wurden (einmal ohne Bohrung und einmal mit Bohrung)
- und zum anderen die großen Werkstückronden mit 121 Bohrungen pro Seite, die zur Verschleißgenerierung eingesetzt wurden und auf dem Maschinentisch aufgespannt wurden.

Es wurde darauf geachtet, dass neben den Sensorrohdaten und -merkmalen auch annotierte Daten zu Maschinen- und Prozesszuständen (Verschleiß, Störungen, Oberflächeneigenschaften der Bohrung etc.) erhoben und dokumentiert wurden, um auf dieser Basis Methoden des überwachten ML zu erproben und ergänzend mit unüberwachten Methoden zu vergleichen.
Besonders wichtig war dabei die Überwachung des Werkzeugverschleißes, der mittels optischer Messtechnik bestimmt wurde (siehe Abbildung 10). Die Dokumentation wurde in regelmäßigen Abständen zwischen den einzelnen Zerspanversuchen durchgeführt, um die Entstehung und Entwicklung der verschiedenen Verschleißmerkmale (z.B. normaler Verschleiß, Ausbrüche an der Schneidkante/Schneidecke, Aufbauschneide, …) beurteilen zu können. Weiterhin wurde die Bauteilqualität anhand der Oberflächenrauheit an der Bohrungswandung durchgehend überwacht.

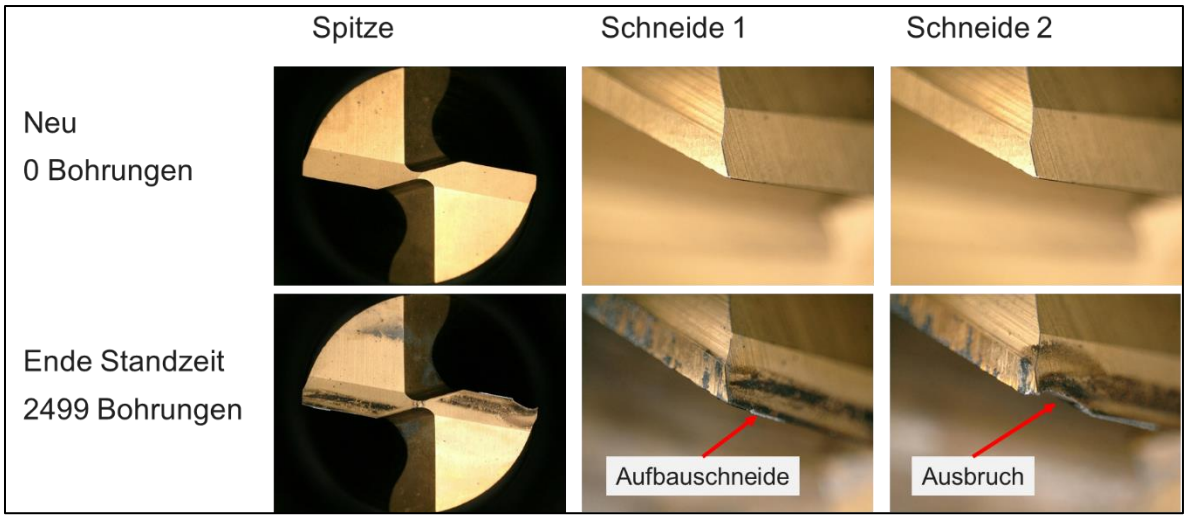


Abbildung 10 Verschleiß des Bohrers an einem Beispiel (Werkzeug 10)

In Abbildung 10 sind beispielhaft die Verschleißbilder eines Bohrers dargestellt, anhand derer die Verschleißmarkenbreite bestimmt wurde.

Durch den Wechsel des Werkzeugs zwischen dem Messaufbau (siehe Abbildung 8) und dem Aufbau zur Generierung des Verschleißes und den Messungen an Werkzeug und Werkstücken war der Versuchsablauf (siehe Abbildung 9) recht aufwändig und damit auch der zeitliche Aufwand für die gesamte Versuchsdurchführung sehr hoch.

Arbeitspaket 7: KI-Algorithmen

Bei den KI-Algorithmen unterstützte die GFE die UdS bei der Zusammenstellung einer modularen Softwaretoolbox für Merkmalsextraktion, -selektion, Novelty Detection, Klassifikation und Regression zur Offline-Datenanalyse. Die Unterstützung erfolgte bei der Datenverarbeitung mit Blick auf zerspanungsspezifische Eigenschaften und Merkmale der in Arbeitspaket 3 generierten Datenbasis. Die GFE nahm an dem vom Projektpartner UdS organisierten KI-Workshop teil, bei dem die Grundlagen des maschinellen Lernens erläutert wurden. Dabei gab es eine Einführung in eine automatisierte Algorithmen-Toolbox und eine grafische Nutzeroberfläche, mit der Testdaten analysiert werden konnten.

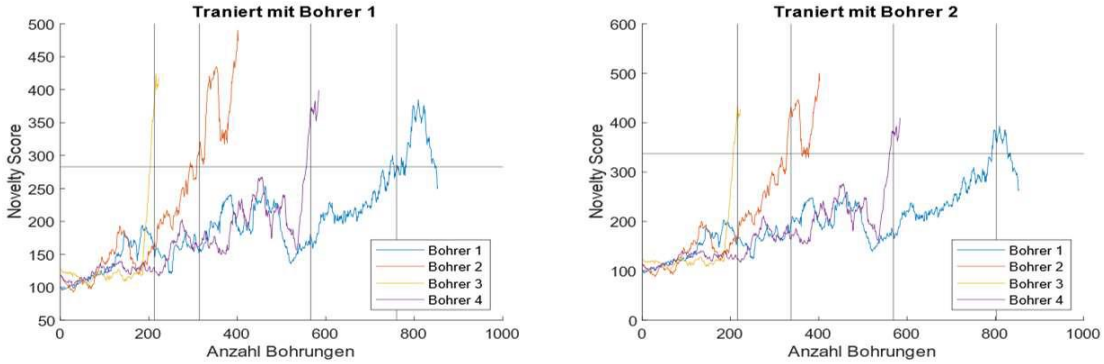


Abbildung 11 Ergebnisse der Offline-Auswertung der in Arbeitspkaet 3 generierten Daten [Quelle UdS]

In Abbildung 11 sind die Ergebnisse der UdS aus den Offline-Auswertungen der in Messkampagne 1 generierten Daten dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass die Anzahl der Bohrungen auf der x-Achse nur den Testbohrungen entspricht, die im Messaufbau (Abbildung 8) gebohrt wurden. Die Anzahl der gesamten Bohrungen ist um den Faktor 13,1 höher ($\frac{121+10}{10} = 13{,}1$, wegen 121 Bohrungen zur Verschleißgenerierung und 10 Messbohrungen).

Im Ergebnis der Offline-Datenanalyse konnten Verschleißerscheinungen frühzeitig erkannt werden (siehe Abbildung 11). Der Verschleiß war zwischen 80 - 95 % vor Ausfall detektierbar. Alle Bohrer benötigten dazu einige Charakterisierungsbohrungen (1000 - 2000 Bohrungen). Die verwendeten Methoden sind geeignet, um auch in einem FPGA umgesetzt zu werden.

Außerdem erfolgte die Schulung der Projektpartner durch die UdS zum Technologietransfer mit Ziel der eigenständigen Nutzung der Algorithmen auch über das Projekt hinaus. Dabei wurden die Mitarbeiter der GFE eingewiesen in die Nutzung der Software zum Upload von ML-Modellen auf die FPGA-Elektronik zur Online-Datenanalyse, die durch die Projektpartner zur Verfügung gestellt wurden.

Arbeitspaket 9: Messkampagne 2

In diesem Arbeitspaket wurde das in Arbeitspaket 3 umgesetzte sensorintegrierte Werkzeugsystem an die 1. Sensorgeneration (Arbeitspaket 5) und das Sensorinterface ASIC V1 (Arbeitspaket 6) angepasst.

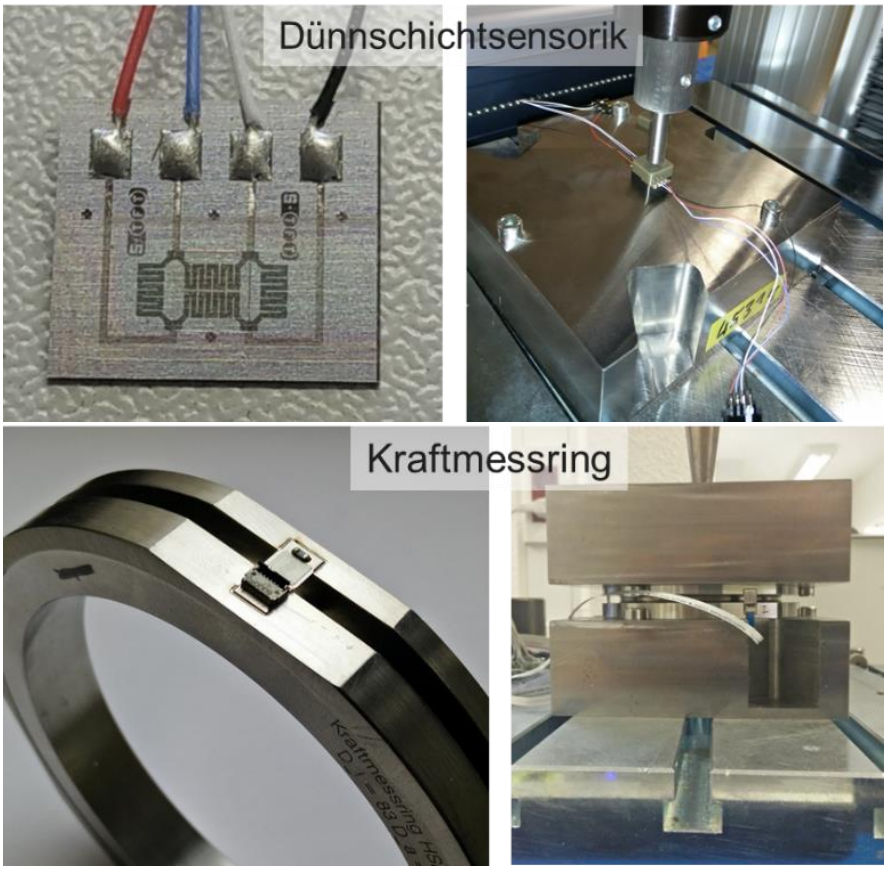


Abbildung 12 Voruntersuchungen mit Kraftsensorik für Messkampagne 2 und 3
oben: Dünnschichtsensorik im Test auf Zug-Druck-Maschine, unten: DMS-Sensorik auf einem Kraftmessring

Dafür erfolgen Voruntersuchungen mit verschiedener Kraftsensorik (drucksensitive Dünnschichtsensorik und DMS auf Basis von Dünnschichttechnologie, siehe Abbildung 12) von der Fa. Siegert-TFT, wobei es regelmäßigen Austausch zum Aufbau der Sensoren und den verschiedenen Möglichkeiten der Aufbau- und Verbindungstechnik gab.

Der Grundkörper wurde für den Einsatz von DMS-Sensoren (SGU-Sensoren der Fa. Siegert-TFT) zur Messung der Biegekräfte ausgelegt (siehe Abbildung 13). Dazu wurde auf Basis der in Messkampagne 1 ermittelten Kraftdaten entsprechend den Ergebnissen aus den Voruntersuchungen (Abbildung 12) eine umlaufende Nut eingebracht, sodass eine Verformung durch Biegekräfte in einer Größe entstehen kann, die durch die DMS-Sensorik aufgenommen werden kann.

Für das neu ausgelegte Werkzeugsystem erfolgte die konstruktive Auslegung und Anpassung an die neuen Komponenten sowie die Herstellung des angepassten Werkzeugsystems und dessen Implementierung in das BAZ.

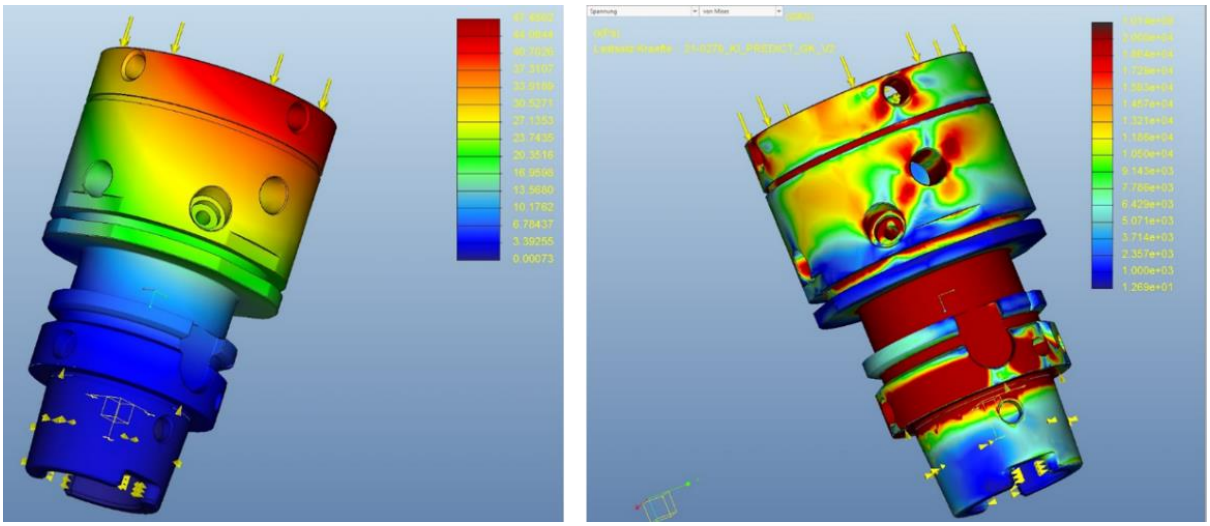


Abbildung 13 Auslegung Grundkörper des Werkzeugsystems mittels FEM für den Einsatz von Siegert-TFT SGU-Sensoren zur Messung der Biegung (links Verschiebung in µm und rechts von Mises-Spannung)

Die Biegekräfte lieferten in den Untersuchungen während der Messkampagne 1 die besten Daten und letztlich auch die Ergebnisse in der Datenauswertung, so dass eine gute Verschleißvorhersage erfolgen konnte. Die recht teuren dreiachsigen Schwingungssensoren von der Fa. Kistler aus Messkampagne 1 wurden durch zwei preisgünstige einachsige Sensoren ADXL1005 ersetzt, die um 90 Grad versetzt montiert wurden, um die beiden relevanten Schwingungskomponenten zu messen.

Anschließend wurden gemäß der Spezifikation und Versuchsplanung, sowie auf Basis der Erkenntnisse aus Messkampagne 1, neue Zerspanungsversuche durchgeführt. Dabei wurden wiederum analog zu Messkampagne 1 unterschiedliche Verschleiß- und Prozessparameter erfasst, welche mit den Daten aus der Steuerungsebene verknüpft wurden. Zum ersten Mal erfolgte eine Online-Auswertung der Datenströme mit den im FPGA-Board implementierten KI-Methoden.

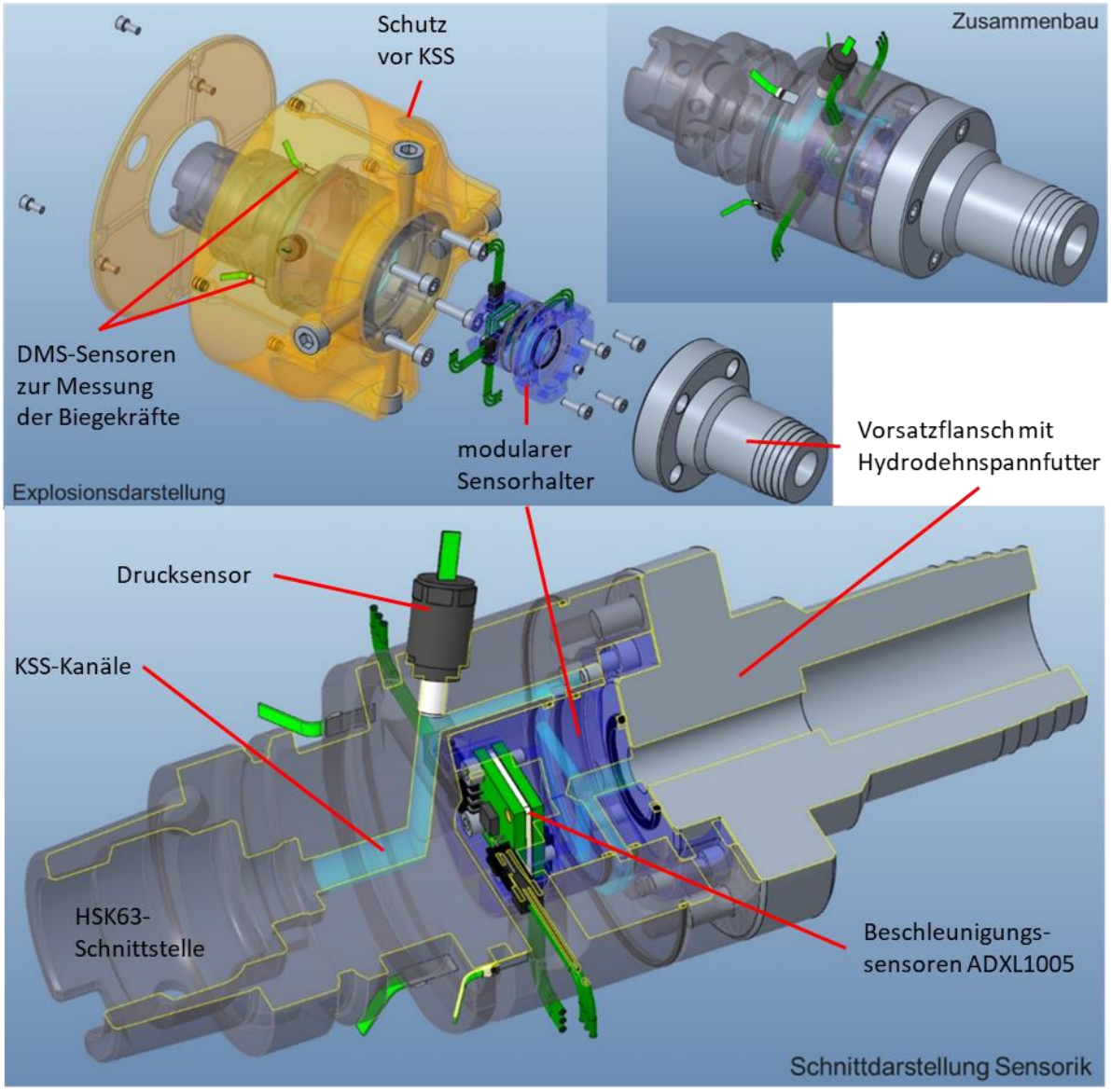


Abbildung 14 CAD-Modell des Werkzeugsystems für Messkampagne 2
oben: Explosionsdarstellung und Zusammenbau
unten: Schnittdarstellung mit Blick auf die Anordnung der integrierten Sensorik

Arbeitspaket 10: Messkampagne 3

Auf Basis des im Projekt entwickelten sensorintegrierten Werkzeugsystems mit dem Sensorinterface (ASIC) erfolgte die Übertragung der Lösung auf eine weitere Anwendung, die aus Zeitgründen im Versuchsfeld der GFE durchgeführt wurden. Die Implementierung erfolgte in der gleichen Maschine, auf der auch die Messkampagnen 1 und 2 durchgeführt wurden. Dafür waren entsprechende Anpassungen des Prozesses auf die neue Anwendung notwendig. Es wurde wieder ein Schaftbohrwerkzeug (VHM-Bohrer) aber mit anderer Geometrie und Beschichtung verwendet. Außerdem wurden die Prozessparameter dem Bohrer entsprechend angepasst.

Es erfolgte eine Analyse und Evaluierung der Übertragbarkeit auf den neuen Prozess, sowie der Werkzeug-/Werkstückqualitätsüberwachung durch das entwickelte Werkzeugsystem.

Es konnte gezeigt werden, dass die Extraktion der Merkmale möglich ist und sie an das ERP-System übertragen werden können. Vom Projektpartner Canway konnte gezeigt werden, dass die Berechnung der Merkmale in einem Zeitfenstermöglich ist, welches klein genug ist, um auch auf den ASICs ausgeführt zu werden.

Zur Auswertung wurden die gleichen Algorithmen verwendet, wie bei der vorigen Messkampagne, lediglich die geänderten Prozessparameter mussten mitberücksichtigt werden. Trotz zweier Ausreißer am Beginn der Versuchsreihe konnte mit dem gleichen Verfahren eine Novelty bei 60 bis 70 Prozent der Lebensdauer detektiert werden (bzw. bei 95 Prozent mit den Daten des SPIKE-Messsystems). Die Ausreißer am Beginn der Versuchsreihe konnten mit ersten Ausbrüchen an der Werkzeugschneide in Verbindung gebracht werden. Auch in den Daten des - ergänzend zum Anwendung gekommenen - SPIKE-Messsystems wurden zu Beginn der Messreihe deutliche Änderungen detektiert, die mit den Ausreißern zusammenhängen.

Somit konnte gezeigt werden, dass die verwendeten KI-Methoden bei verschiedenen Bohrern und Prozessparametern eingesetzt werden können, um den Verschleißzustand zu bestimmen.

3. Zusammenfassung/Fazit

In diesem Teilprojekt übernahm die GFE die Umsetzung und Anwendung der oben Beschriebenen Zielstellung für die Anwendung des Zerspanungsprozesses. Die Hauptaufgaben der GFE umfassen:

Knowhow-Träger im Bereich Fertigungs-, Werkzeug- und Zerspanungstechnologie: Die GFE brachte umfassendes Fachwissen und langjährige Erfahrung im Bereich Fertigungstechnologie ein. Sie war verantwortlich für die Anwendung des Zerspanungsprozesses im Rahmen des Projektes.

Anforderungsanalyse und Spezifikation: In enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern führte die GFE eine detaillierte Anforderungsanalyse der Zerspanungsanwendung durch. Auf Basis dieser Analyse wurden die Spezifikationen für die zu entwickelnde Sensorik, Sensorinterfaces und ASIC-Technologie festgelegt.

Entwicklung des Werkzeugsystems und Integration von Sensorik und Elektronik: Die GFE war für die Entwicklung eines speziellen Werkzeugsystems verantwortlich, das die Erfassung von relevanten Prozessdaten während des Zerspanungsprozesses ermöglichte. Dabei erfolgte die Integration der erforderlichen Sensorik und Elektronik in das Werkzeugsystem.

Datenbasisgenerierung für die Entwicklung der KI-Algorithmen: Durch die Durchführung von Messkampagnen generierte die GFE eine umfassende Datenbasis für die Entwicklung der KI-Algorithmen. Diese Daten dienten als Grundlage für die Entwicklung von effektiven und präzisen Algorithmen zur Zustandsüberwachung und Prozesskontrolle.

Unterstützung bei der Untersuchung der KI-Algorithmen: Die GFE unterstützte aktiv bei der Untersuchung und Bewertung der KI-Algorithmen. Dabei lag der Fokus auf der Datenanalyse, Merkmalsauswahl und dem Umgang mit den zu entwickelnden Software-Tools für die Implementierung der Algorithmen.

Vorbereitung und Durchführung der Messkampagnen: Die GFE war für die sorgfältige Vorbereitung und Durchführung der Messkampagnen verantwortlich, um die Funktionalität und Leistungsfähigkeit der entwickelten Sensorsysteme zu evaluieren und zu validieren.

Übertragung der Anwendung auf eine weitere Anwendung: Die GFE konnte Anpassungen des Werkzeugsystems und des Zerspanungsprozesses vornehmen und damit Vorbereitungen treffen, um die Anwendung auf einen weiteren Zerspanungsprozess zu übertragen.

Insgesamt konnten alle Arbeitsziele erreicht werden. Die GFE trug maßgeblich zur erfolgreichen Umsetzung des Verbundprojektes bei, indem sie ihr umfangreiches Fachwissen, ihre Expertise und ihre praktischen Fähigkeiten einbrachte und eng mit den anderen Projektpartnern zusammenarbeitete.

4. Veröffentlichungen

- R. Schwäblein, S. Marr: „Werkzeugsystem mit integrierter Elektronik für verteilte KI zur sensorbasierten Prozess- und Zustandskontrolle in der Zerspanung“, in Jahresbericht 2023, GFE - Gesellschaft für Fertigungstechnik und Entwicklung Schmalkalden e.V., 2024.
- D. Garten, W. Kattanek: "KI-Anwendungen für KMU - Technologien, Einsatzfelder und Beispiele“, Vortrag, IHK Erfurt, 19.02.2024.
- S. Marr: Poster und Präsentation im Versuchsfeld der GFE, 15. Schmalkalder Werkzeugtagung, Schmalkalden, 09.11.2023.
- D. Garten, W. Kattanek: „Künstliche Intelligenz heute und morgen“, Vortrag, VR-Bank Gera, 04.05.2023.
- R. Schwäblein, S. Marr: „Werkzeugsystem mit integrierter Elektronik für verteilte KI zur sensorbasierten Prozess- und Zustandskontrolle in der Zerspanung“, in Jahresbericht 2022, GFE - Gesellschaft für Fertigungstechnik und Entwicklung Schmalkalden e.V., 2023.
- S. Marr: „Vorausschauende KI-basierte Qualitätsüberwachung und Prozessregelung KI-Predict“, 2. Innovationsforum Präzisionswerkzeuge, GFE Schmalkalden e.V.; VDMA Präzisionswerkzeuge. Schmalkalden, 22.11.2022.
- R. Schwäblein: „Einführung in die Künstliche Intelligenz (KI) anhand industrieller Anwendungsbeispiele“, Deutsche Gesellschaft für Qualität - DGQ Regionalkreis Suhl / Ilmenau, Schmalkalden, 30.06. 2022
- R. Schwäblein, S. Marr: „Werkzeugsystem mit integrierter Elektronik für verteilte KI zur sensorbasierten Prozess- und Zustandskontrolle in der Zerspanung“, in Jahresbericht 2021, GFE - Gesellschaft für Fertigungstechnik und Entwicklung Schmalkalden e.V., 2022.

Abschlussbericht KI-Predict (Kurzbericht)

Das Projekt KI-Predict zielte auf die Entwicklung eines intelligenten und integrierten Sensorinterface für Condition Monitoring verbunden mit einer Echtzeit-Prozesskontrolle incl. der Implementierung in industrielle Anwendungen. Dabei wurden fortschrittliche Technologien wie Künstliche Intelligenz (KI) und maschinelles Lernen (ML) eingesetzt, um die Effizienz, Flexibilität und Autonomie in der Produktion signifikant zu steigern. Die Projektarbeit umfasste die Entwicklung leistungsfähiger Hardware- und Softwarekomponenten zur effizienten Datenerfassung und -verarbeitung, die Integration verschiedener Sensortechnologien, die Entwicklung von KI-Algorithmen und ML-Methoden sowie die Anpassung dieser Lösungen an verschiedene industrielle Anwendungen. Die GFE-Gesellschaft für Fertigungstechnik und Entwicklung Schmalkalden e.V. war mit ihrem Teilprojekt für die industrielle Anwendung der Technologien im Bereich der Zerspanung (mit einem sensorintegrierten Werkzeugsystem) verantwortlich.

Im Rahmen der Systemspezifikation lag der erste Schritt in der Auswahl eines relevanten Zerspanungsprozesses, wobei die Wahl auf das Bohren fiel. Es folgte eine systematische Prozessanalyse, welche die Grundlage für die Definition von drei Messkampagnen sowie die Spezifikation der zu erfassenden Messwerte und Prozessdaten bildete. In diesem Stadium wurden auch Vorversuche zur Einbausituation von Drucksensoren durchgeführt, um deren Integration in den Zerspanungsprozess optimal zu gestalten.

Im Anschluss wurde eine erste Messkampagne vorbereitet und die Prozessintegration durchgeführt. Hier wurde das Konzept für den Bohrprozess in die Praxis umgesetzt, indem das Werkzeugsystem konstruiert, gefertigt und montiert wurde. Dabei kamen additive Fertigungstechnologien zum Einsatz, um den hohen Anforderungen an die Integration von zerspanungsspezifischen Eigenschaften (wie z.B. Kühlschmiermittel-Kanälen, hohe mechanische Belastbarkeit) und entsprechender Sensorik in einem modularen Werkzeugsystem gerecht werden zu können. Die Integration der Sensorik und Elektronik in das Werkzeugsystem ermöglichte die nahtlose Datenerfassung und -verarbeitung. Das Werkzeugsystem wurde anschließend in ein Bearbeitungszentrum im Versuchsfeld der GFE implementiert und Datenschnittstellen sowie Speichersysteme für die Datenerfassung und Prozessüberwachung eingerichtet sowie das DoE (Design of Experiment) festgelegt. Im Rahmen der ersten Messkampagne erfolgte eine umfangreiche Datenerfassung, so dass sowohl der Werkzeugverschleiß als auch die Bauteilqualität kontinuierlich überwacht und dokumentiert werden konnte. Dabei wurden zum einem Messbohrungen mit stehenden Werkzeugsystem und rotierenden Werkstücken und zum anderen eine Technologie mit stehenden Werkstücken aber rotierendem Werkzeug für einen provozierten Verschleiß durchgeführt. Der Werkzeugverschleiß wurde optisch Vermessen und die Rauheit der Bohrungsoberfläche dokumentiert. Diese Phase erwies sich als sehr zeitaufwendig, da das Werkzeug zwischen dem Messaufbau und der Verschleißgenerierung häufig gewechselt werden musste. Die erste Messkampagne lieferte wertvolle Erkenntnisse und Daten für die Weiterentwicklung der Algorithmen.

Auf Basis der generierten Daten wurden die KI-Algorithmen durch einen Projektpartner entwickelt und eine modulare Softwaretoolbox für die Offline-Datenanalyse zusammengestellt. Diese Toolbox ermöglichte es den Projektpartnern, die Algorithmen und Technologien eigenständig zu nutzen und in ihre bestehenden Prozesse zu integrieren. Die enge Zusammenarbeit der Projektpartner stellte sicher, dass das erlangte Wissen und die entwickelten Technologien effektiv angewendet werden konnten.

Nach der Datenauswertung und Entwicklung der Algorithmen wurde eine zweite Messkampagne durchgeführt. Das Werkzeugsystem wurde angepasst, und es wurden neue Sensorgenerationen integriert. Diese Phase umfasste auch die Durchführung neuer Zerspanungsversuche, bei denen die

Datenströme erstmals online ausgewertet wurden. Die Echtzeit-Datenanalyse ermöglichte eine sofortige Prozessüberwachung und -anpassung, was die Effizienz weiter steigerte.

In einer dritten Messkampagne wurde die entwickelte Lösung auf eine weitere industrielle Anwendung übertragen. Es wurde auf ein anderes Bohrwerkzeug gewechselt und die Prozessparameter wurden entsprechend angepasst, um die Übertragbarkeit und Anwendbarkeit der entwickelten Methoden auf den neuen Prozess zu analysieren und zu evaluieren. Diese Phase demonstrierte die Vielseitigkeit der entwickelten Technologien, ihre Anpassungsfähigkeit an verschiedene industrielle Anforderungen und die Vorteile des modularen Aufbaus des sensorintegrierten Werkzeugsystems.

Das Projekt führte zur erfolgreichen Entwicklung und Integration eines sensorintegrierten Werkzeugsystems für die Zustands- und Prozessüberwachung im Zerspanungsprozess. Effiziente KI-Algorithmen zur prädiktiven Wartung und Überwachung von Zerspanungsprozessen wurden entwickelt und implementiert. Umfangreiche Datenmengen wurden generiert, um die Entwicklung und Erprobung von ML-Methoden zu unterstützen. Die Übertragbarkeit der entwickelten Methoden auf verschiedene industrielle Anwendungen konnte nachgewiesen werden.

Der nachhaltige Nutzen sowie die konkreten Anwendungsmöglichkeiten des Projektes umfassen die prädiktive Wartung, welche Produktionsausfälle reduzieren und Wartungsintervalle optimieren kann, was wiederum zu einer erhöhten Effizienz und Kosteneinsparung führt. Die Prozessüberwachung und Qualitätskontrolle wurde durch präzise und schnelle Sensortechnologien erheblich verbessert. Die entwickelten Lösungen sind an verschiedene industrielle Anwendungen und Prozesse anpassbar und bieten vielseitige Anwendungsmöglichkeiten. Zudem wurden die Projektpartner geschult und auf den eigenständigen Einsatz der entwickelten Technologien vorbereitet, was den Technologietransfer fördert und die Anwendung über das Projekt hinaus sichert.

Insgesamt hat das Projekt KI-Predict gezeigt, dass durch den Einsatz intelligenter Sensortechnologien und KI-Methoden erhebliche Verbesserungen in der industriellen Produktion erzielt werden können. Die entwickelten Lösungen bieten vielseitige Anwendungsmöglichkeiten und tragen zur Steigerung der Effizienz und Flexibilität in der Produktion bei. Durch die intensive Zusammenarbeit und den erfolgreichen Wissenstransfer sind die Projektpartner in der Lage, die entwickelten Technologien überwiegend eigenständig weiterzuentwickeln und in ihren jeweiligen Industrien anzuwenden.