

Körperschallanalyse zur Überwachung von Präzisions- und Ultrapräzisionsfertigungsverfahren

Christoph SCHÄFER, Christian BRECHER, Christian WENZEL, Andreas MERZ,
Fraunhofer IPT, Aachen

Kurzfassung. Die spanenden Präzisions-(P) und Ultrapräzisionstechnologien (UP) beschäftigen sich mit der Herstellung hochgenauer Werkstücke für die Bereiche Optik, Mikromechanik, Medizintechnik, Werkzeug- und Formenbau und sind damit in vielen Bereichen einer der Treiber für die Entwicklung der Wachstumsmärkte Mikrosystemtechnik und Präzisionsmaschinenbau. Zur Herstellung dieser Präzisionswerkstücke kommen u.a. UP-Dreh-, UP-Fräs- und UP-Bohrprozesse zum Einsatz, durch welche die Werkstücke je nach Zielsetzung konturiert, strukturiert oder hinsichtlich ihrer Oberflächenqualität bearbeitet werden. Das Ziel der UP-Fertigung ist die Bearbeitung mit Formgenauigkeiten unterhalb 1 μm und Oberflächenrauigkeiten kleiner 10 nm Ra. Mit dem zunehmenden Einsatz ultrapräziser Bearbeitungsmaschinen in Serienfertigungen besitzt eine fertigungsbegleitende und qualitätssichernde Prozesskontrolle und Überwachung besondere wirtschaftliche Bedeutung. Eine objektive Qualifizierung oder Kontrolle der UP-Prozessführung ist jedoch mit am Markt verfügbaren Prozessüberwachungssystemen der aktuellen Generationen nicht möglich.

Physikalische Schlüsselgröße ist neben der Prozesskraft der durch den Zerspanvorgang erzeugte Körperschall, der sich je nach Technologie am Werkzeug oder am Werkstück erfassen lässt. Aufgrund der fortgeschrittenen Technologien moderner Sensor- und Signalerfassungstechnologien können die Schallsignale nun hochauflösend über einen weiten Frequenzbereich erfasst und aufgezeichnet werden. Aktuelle Rechnersysteme sind in der Lage, die Signaldaten mit komplexen Analysemethoden zu untersuchen und den Prozess charakterisierende Signifikanzen aus den Spektralbereichen zu isolieren. Dabei kommen neben der klassischen Frequenzanalyse wie der Fast-Fourier-Transformation Signalanalyseverfahren aus den Bereichen der Akustik und Sprachverarbeitung zum Einsatz.

Das vorliegende Skript beschäftigt sich neben den Grundlagen und Anforderungen an die UP-Prozessüberwachung insbesondere mit den Strategien zur Erfassung und Aufzeichnung des Körperschalls sowie der Entwicklung und Anwendung geeigneter Signalanalysemethoden zur Merkmalsextraktion aus den Körperschallsignalen.

Einführung und Problemstellung

Die Technologien der Präzisions-(P) und Ultrapräzisionsfertigungsverfahren (UP) beschäftigen sich mit der Herstellung hochgenauer Werkstücke für die Bereiche Optik, Mikromechanik, Medizintechnik, Werkzeug- und Formenbau und sind damit in vielen Bereichen einer der Treiber für die Entwicklung des Wachstumsmarkts Mikrosystemtechnik. Zur Herstellung dieser Präzisionswerkstücke kommen u.a. Dreh-, Schleif-, Fly-Cutting und Bohrtechnologien zum Einsatz, durch welche die Werkstücke je nach Zielsetzung konturiert, strukturiert oder hinsichtlich ihrer Oberflächenqualität bearbeitet werden. Das Ziel der UP-Bearbeitung sind Bauteile mit Formgenauigkeiten



unterhalb 1 μm und Oberflächenqualitäten kleiner als 10 nm Ra. Die Abbildungen 1 und 2 zeigen beispielhaft zwei solcher UP-bearbeiteten Werkstücke aus den Bereichen Optik und Formenbau.



Bild 1: Freiform-Spiegeloberfläche

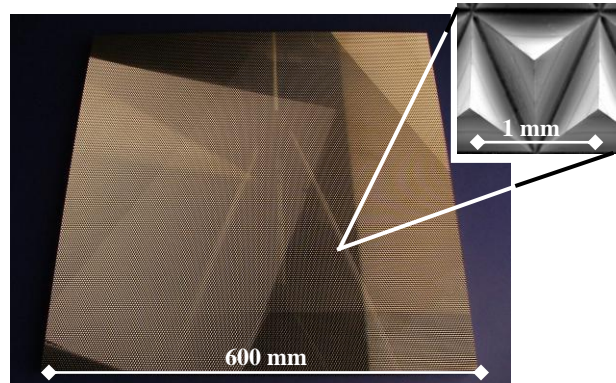


Bild 2: Großflächiger Prägemaster für Display-Reflektoren

Es handelt sich dabei zum einen um eine Freiform-Spiegeloberfläche zur gezielten Reflektion kohärenter Strahlungsquellen (Bild 1). Solche hochgenauen Bauteile werden z.B. in den Bereichen Optik, Medizintechnik und Automobiltechnik benötigt. Gefertigt werden solche Werkstücke am Fraunhofer IPT, z.B. in einem UP-Drehprozess mit überlagerter Fast-Tool-Technologie [1]. Diese Technologie ermöglicht die hochdynamische, drehwinkelabhängige Zustellung des Diamant-Werkzeugs mit höchster Präzision, um die geforderten Form- und Oberflächengenauigkeiten zu erreichen. Bei dem zweiten Bauteil handelt es sich um einen großflächigen, mikrostrukturierten Prägemaster für Reflektoren (Bild 2). Mittels Fly-Cutting Technologie werden in die Werkstückoberfläche trianguläre Pyramidenstrukturen eingearbeitet. Durch die spezifischen Geometrien der Oberflächenstrukturen kann im geprägten Werkstück ein gezieltes Reflektionsverhalten eingestellt werden. Solche Prägemaster können am Fraunhofer IPT auf UP-Sondermaschinen (Bild 3) mit Kantenlängen bis zu 1000 mm gefertigt werden.

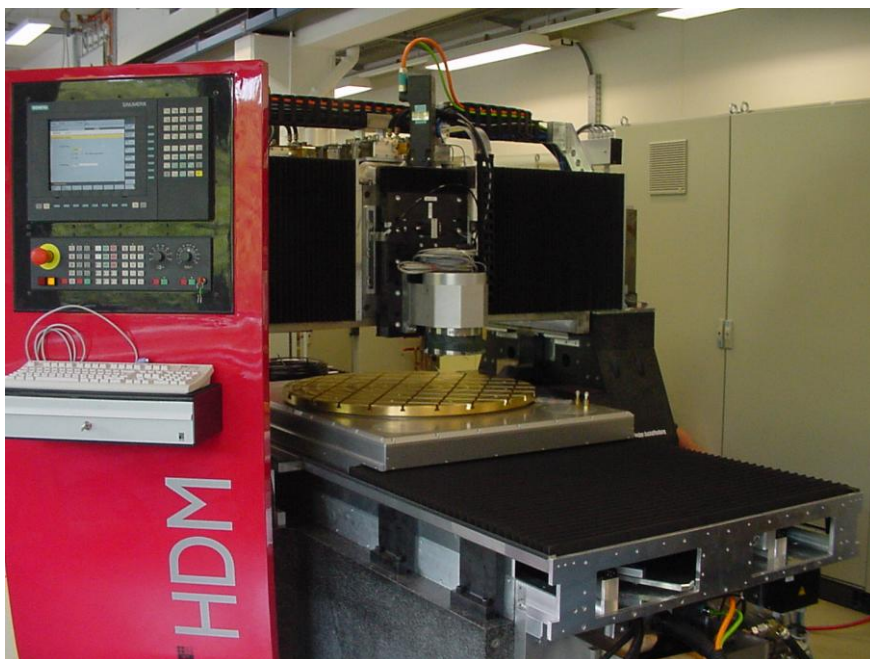


Bild 3: Sondermaschine zur großflächigen Ultrapräzisionszerspanung

Die Bearbeitungsdauer solcher hochgenauen Werkstücke erreicht je nach Größe und Strukturkomplexität bis zu 15 Tage. Die Gründe hierfür sind neben dem eigentlichen Bearbeitungsvorgang (ca. 2/3 der Gesamtzeit) Wartungsarbeiten an der Maschine sowie Arbeiten zum Einrichten und geometrischen Ausrichten des Werkzeugs. Einen wesentlichen Faktor der Nebenzeiten stellt außerdem die Kontrolle des Werkzeugs auf Verschleiß und Beschädigung dar. Nur bei regelmäßigen und aufwendigen Prüfungen des Werkzeugzustands lassen sich Oberflächenqualitäten mit Rauheitswerten im Bereich $Ra < 5 \text{ nm}$ und Formgenauigkeiten bis zu $0,1 \text{ } \mu\text{m} / 100 \text{ mm}$ erzielen.

Im Gegensatz zu konventionellen Bearbeitungsverfahren zeichnet sich die UP-Bearbeitung durch kleine Prozessparameter wie geringe Zustellungen und Abtragsraten, kleine Spanquerschnitte sowie minimale Prozesskräfte aus. Diese für den Spannungsvorgang charakteristischen Größen sind messtechnisch nur schwer erfassbar. Die objektive Qualifizierung oder fertigungsbegleitende Kontrolle der UP-Prozessführung ist mit am Markt verfügbaren Prozessüberwachungssystemen der aktuellen Generation und deren Analysemethodik nicht möglich. Gründe hierfür sind die nicht ausreichend empfindlich ausgelegten Sensoren, die auf konventionelle Bearbeitungsverfahren ausgelegten, indifferenten Signalanalysemethoden sowie Systemplattformen, deren Hardware auf diese Analysemethoden zugeschnitten und damit in ihrer Leistungsfähigkeit begrenzt ist. Ebenso wie in den Bereichen der konventionellen Fertigungsverfahren ist jedoch auch in den UP-Fertigungstechnologien eine qualifizierte und sichere Prozesskontrolle und Prozessüberwachung notwendige Voraussetzung für die automatisierte Produktion und ein effizientes Qualitätsmanagement. Erst mit der Bereitstellung zuverlässiger und wirksamer Analyse- und Überwachungsstrategien lassen sich in der Serienfertigung die Produktqualität steigern, Nebenzeiten verkürzen und Produktionskosten senken. Eine fertigungsbegleitende und gesicherte Erfassung des Zustands der im Einsatz befindlichen Werkzeuge kann daher helfen, Kosten zu sparen, höhere Bauteilqualitäten zu erzielen und ist deshalb von Werkzeugherstellern, Maschinenbauern und Anwendern gleichermaßen gewünscht.

Stand der Technik aktueller Prozessüberwachungssysteme

Funktionsweise

In der konventionellen Fertigung von Werkstücken werden Prozessüberwachungssysteme bereits erfolgreich eingesetzt. Kommerziell erhältliche Systeme überwachen die Prozesse überwiegend durch die Aufnahme prozessrelevanter Messgrößen wie Körperschall- und Kraftkomponenten [2], [3], [4]. Dabei kommen Sensormodule zum Einsatz, welche die physikalischen Größen an Werkzeugschaft oder Spindelgrundkörper erfassen, wandeln und die elektrischen Signale an eine Auswerteeinheit weiterleiten. Eine kreuzkorrelierte Auswertung zusätzlicher physikalischer Größen wie z.B. Weg, Geschwindigkeit, Beschleunigung und Temperatur ist bei den bisherigen Prozessüberwachungssystemen zurzeit nicht vorgesehen, soll jedoch zukünftig angewendet werden. Bei Voruntersuchungen im Rahmen des durch das BMWA sowie der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke e.V.“ geförderten und durch die Forschungsgemeinschaft für Ultrapräzisionstechnik UPT e.V. durchgeführten Forschungsvorhabens 13299 N/1 wurden die Einsatzmöglichkeiten einer Auswahl markttypischer Prozessüberwachungssysteme an Ultrapräzisionsmaschinen des Fraunhofer IPT überprüft [5]. Primäres Auswahlkriterium war dabei, dass auf Grund der technischen Spezifikationen der Systeme eine Integration in UP-Werkzeugmaschinen möglich ist. Auf

Grund der durchgeführten Marktanalyse wurden hierfür folgende Überwachungssysteme ausgewählt:

- **Provis 2 / RT**
Fa. PROMETEC GmbH
Prozessüberwachungssystem mit 2-Kanal-Kraftmessung
- **M5000 / AE 4100-1**
Fa. Dittel GmbH
Prozessüberwachungssystem mit 2-Kanal-Körperschallmessung
- **CTM**
Fa. ARTIS mbH
Prozessüberwachungssystem mit gemischter Sensorsignalerfassung, bestehend aus 1-Kanal-Körperschallmessung und 1-Kanal-Kraftmessung

Die Systeme wurden in einer UP-Bearbeitungsmaschine des Typs MSG 325 der Firma Pneumo Precision eingesetzt und anhand verschiedener ultrapräziser Fertigungsprozesse auf ihre Überwachungsleistungen hin untersucht. Das grundsätzliche Funktionsprinzip der Überwachungssysteme ist bei allen drei Geräten ähnlich: Sensoren (Kraft, Körperschall) erfassen die physikalischen Größen und wandeln sie in elektrische Signale. Diese werden mit Hilfe geschirmter Leitungen an die Auswerteeinheiten übertragen, wo sie durch eine analoge Signalverarbeitung ausgewertet werden.

Während die Systeme der Firmen Dittel und Artis als Stand-Alone Einheiten ausgelegt sind, besteht die Auswerteeinheit der Firma Prometec aus einer PC-Einsteckkarte, die zum Betrieb einen Industrie-PC benötigt. Auf diesem werden dem Benutzer die aufgenommenen Sensorsignale grafisch ausgegeben. Diese Option besteht bei den beiden anderen Systemen durch den Einsatz zusätzlicher Verbindungskabel ebenfalls. Für den Betrieb der Systeme unter Produktionsbedingungen stellen diese digitale Schnittstellen bereit, mit denen binäre Alarmsignale an die Maschinensteuerung weitergegeben werden können (z.B. Not-Aus).

Zur Applizierung der unterschiedlichen Sensortypen wurde ein Werkzeughalter entwickelt, der die Integration der Kraft- bzw. AE-Sensorik unter Beibehaltung der für die UP-Bearbeitung notwendigen strukturellen Maschineneigenschaften ermöglicht.

Während der Versuchsdurchführungen stellte sich heraus, dass die bei diesen Systemen zum Einsatz kommenden Sensoren in ihrer derzeitigen Bauform und Größe nicht oder nur unzureichend nahe an der Signalquelle appliziert werden können. Die Systeme können die beschriebenen kleinen Störgrößen bzw. geringen Abweichungen der Regelparameter von den Sollwertvorgaben daher gar nicht oder nur bedingt erfassen.

Bild 4 zeigt den Prozessraum der UP-Bearbeitungsmaschine MSG 325. Zu erkennen sind der Werkzeughalter, die aerostatisch gelagerte Werkstückspindel und eine Überwachungskamera. Für die Stirnbearbeitung des Werkstücks in optischer Qualität ist im Halter ein Diamantwerkzeug mit kleinem Radius eingespannt. Auf der Spannvorrichtung ist der montierte AE-Sensor zu sehen, mit dem während des laufenden Prozesses die durch den Spanvorgang erzeugten Körperschallsignale aufgezeichnet werden.

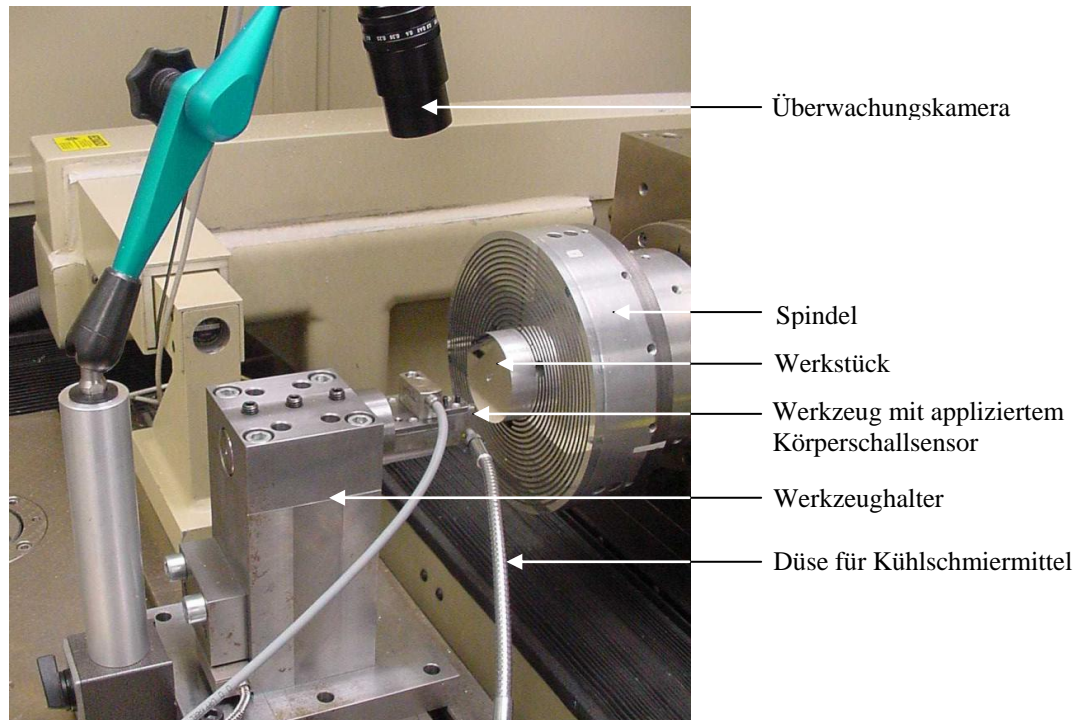


Bild 4: Prozessraum der UP-Bearbeitungsmaschine
Pneumo MSG 325 mit appliziertem AE-Sensor

Die Auswertung der Messgrößen erfolgt in den Zentralmodulen der jeweiligen Überwachungssysteme. Diese geben die Amplituden der Kraftsignale zeitkontinuierlich über der Prozesszeit aus. Die Signale der Körperschallsensorik werden durch eine je nach Systemhersteller unterschiedliche analoge Signalverarbeitung gefiltert. Dabei werden die Signalamplituden über vier wählbare Frequenzbereiche (Bandpässe) analog integriert und in einem Intensitätswert (RMS) zusammengefasst. Dieser wird dann ebenfalls über der Prozesszeit auf dem Monitor dargestellt. Über- oder unterschreiten die Signalamplituden einen festgelegten Grenzwert, melden die Systeme einen Fehler. Beispielhaft ist in Bild 5 der AE-Signalverlauf einer UP-Stirnbearbeitung gezeigt, wie ihn die Systeme typischerweise anzeigen.

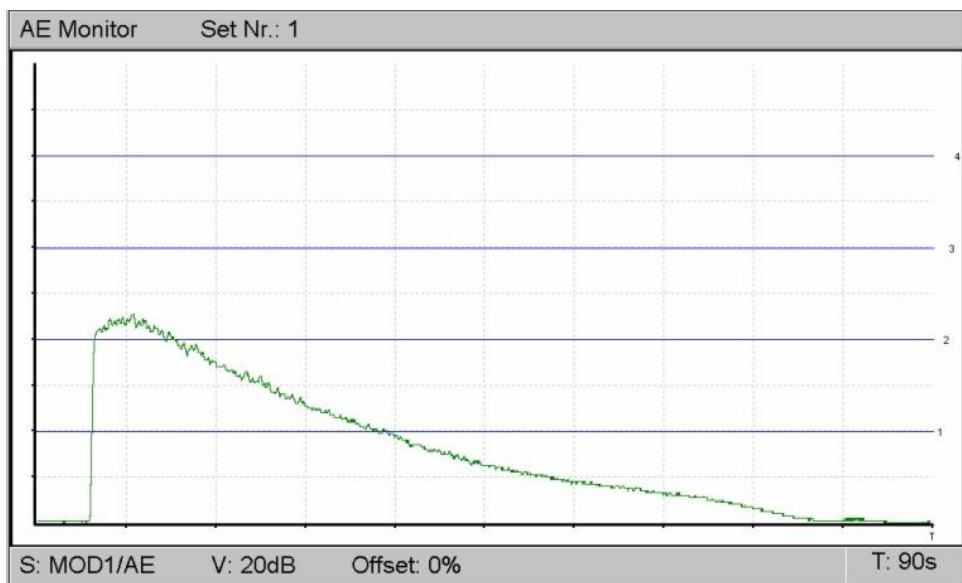


Bild 5: Verlauf des Körperschallintensitätswerts während der UP-Fertigung eines Aluminium-Spiegels

Zu erkennen ist der Intensitätsverlauf des AE-Signals über der Prozessdauer, aufgenommen mit der zum System gehörigen AE-Sensorhardware. Gefertigt wurde in einem Plandrehprozess ein zylindrisches Aluminiumwerkstück mit optischer Oberfläche. Während der höheren Schnittgeschwindigkeiten am Außenrand der Bearbeitungsfläche ergibt die Signalauswertung ein hohes RMS-Signal, das im Verlauf des Bearbeitungsprozesses zur Mitte der rotationssymmetrischen Bearbeitungsfläche hin abfällt. Die mit 1 bis 4 beschrifteten horizontalen Linien markieren die angesprochenen Grenzwerte, bei deren Überschreitung das System einen Alarm ausgeben kann.

Grenzen des UP-Einsatzes aktueller Überwachungssysteme

Diese Art der AE-Signalanalyse gestattet anhand einer Grenzwertbetrachtung zwar die Detektion grundsätzlicher Prozesszustände, so z.B. fehlendes Werkzeug oder Prozess: Ein/ Aus. Eine Interpretation hinsichtlich der oben erwähnten, wünschenswerten Überwachungsparameter wie Werkzeugverschleiß, Prozesszustand, Verlauf oder Qualität ist durch eine derartige Signalanalyse und Ergebnisdarstellung bei UP-Zerspanung jedoch nicht möglich. Die in [5] identifizierten und nachfolgend zusammengefassten Schwachstellen der Systeme verhindern eine effektive und gesicherte Prozessfassung und somit den effektiven Einsatz dieser Systeme in Fertigungsverfahren der Ultrapräzisionstechnologie.

Sensorik

Größe und Bauform der aktuellen Sensoren verhindern die Montage nahe der Signalquelle. Bei der Aufnahme des Körperschalls ist es jedoch von entscheidender Bedeutung, die Anzahl der Grenzflächen unterschiedlicher Materialien zwischen Signalquelle (Werkzeugschneide) und Signalsenke (Sensor) zu minimieren und durch optimales Design von Werkzeughalter und Schneidplatte Interferenzerscheinungen und Dämpfungen des Körperschalls vorzubeugen.

Signalwandlung und Systemhardware

Bei allen betrachteten Überwachungssystemen ist zu erkennen, dass die Systemhardware der Signalwandlung und der Signalverarbeitung für den Einsatz in konventionellen Fertigungsverfahren konzipiert worden ist. Die Parameter der Signalwandlung sind überwiegend fest vorgegeben und auf die spezielle Auswertemethodik des jeweiligen Einsatzbereiches zugeschnitten. Die Fähigkeiten der arithmetischen Zentraleinheiten sind ebenfalls auf die spezifische Funktionalität (Kraftverläufe, Bestimmung eines AE-Intensitätswerts) zugeschnitten und bieten für rechenintensive alternative Algorithmenkonzepte, wie sie nachfolgend vorgeschlagen werden, keine Leistungsreserven.

Auswertemethodik und Algorithmik

Die in den Systemen eingesetzte Auswertemethodik ist zur Identifikation des Werkzeugzustands und der Charakterisierung eines Präzisions- bzw. Ultrapräzisionsprozesses unzureichend, da die entscheidenden Signaländerungen durch die eingesetzten Filtermethoden verloren gehen und im RMS-Verlauf des Körperschallsignals nicht identifiziert werden können. Mit den in den Überwachungssystemen bisher eingesetzten Algorithmen können daher keine Rückschlüsse auf den Ursprung und die Bedeutung eines Störsignals sowie der korrespondierenden Prozessparameter gezogen werden.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die aktuell erhältlichen Prozessüberwachungssysteme aus den genannten Gründen in der UP-Fertigungstechnologie nicht einsetzbar sind.

Für die Realisierung einer leistungsfähigen Prozessüberwachung von UP-Bearbeitungsverfahren müssen daher neue Hardwarekonzepte zum Einsatz kommen und leistungsfähige Analysemethoden entwickelt werden.

Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Umsetzung eines UP-geeigneten Prozessüberwachungssystems

Im Rahmen des vom BMWI geförderten und durch den VDIVDE-IT betreuten InnoNet-Forschungsprojekts IN-5070 „UPControl“ erarbeiten das Fraunhofer IPT und das Institut für Technische Akustik der RWTH Aachen (ITA) in Kooperation mit einem Industrie-Konsortium [6] Lösungskonzepte zur prototypischen Realisierung eines UP-geeigneten Überwachungssystems. Neben der optimierten Erfassung der durch den Zerspanungsprozess erzeugten Körperschallsignale stehen dabei die Entwicklung einer geeigneten Signalverarbeitungsplattform sowie Methoden leistungsfähiger Signalanalysen im Entwicklungsfokus.

Lösungsansatz und Konzept zur technischen Umsetzung

Da die Überwachungssysteme der bisherigen Generationen keine digitale Signalverarbeitung vorsehen, muss ein neues Systemkonzept entwickelt werden. Nachfolgend sind die hierfür notwendigen Randbedingungen gelistet:

- Analoge Vorverarbeitung der Messsignale auf Basis der aktuellen Gerätegeneration „AE6000“ des Projektpartners Walter Dittel GmbH
- 2-kanalige A/D-Umsetzer mit 5 MS/s Abtastrate und 16 Bit Auflösung
- Flexible digitale Filterung der Messdaten
- Hardwareunterstützte Erzeugung von Frequenzspektren durch FFT / STFT in Echtzeit
- Signalanalyse, Steuerung und Auswertung durch einen Mikroprozessor

Die Systemplattform

Unabhängig von diesen Randbedingungen steht die Forderung, ein rekonfigurierbares System zu entwickeln, dessen Softwarekern als Serientyp durch den Servicetechniker beim Endkunden konfigurier- und aktualisierbar ist.

Die 2-kanalige Digitalisierung der Messsignale (Körperschall) wird durch einen A/D-Umsetzer des Typs ADS1605 bzw. ADS1606 der Firma Texas Instruments realisiert. Die übrigen Forderungen lassen sich flexibel durch ein FPGA-basiertes System realisieren.

FPGAs sind digitale frei programmierbare Logik-Bausteine, die über externe Speicherbausteine konfiguriert werden können. Für die in der Entwicklung befindliche Systemplattform wurde der Hersteller ALTERA mit dem FPGA-Produkt CYCLONE II ausgewählt. Für dieses Bauteil ist vom Hersteller eine Hard- und Softwareentwicklungsumgebung zu beziehen, die die prototypische Realisierung vereinfacht. (Bild 6) zeigt die Hardware des Entwicklungskits, die im Wesentlichen aus der Hauptplatine mit dem eigentlichen FPGA-Chip „Cyclone II“, den FLASH-Speichern, zusätzlichen Kontrollerbausteinen und IO-Baugruppen sowie den notwendigen Interfaces zur Peripherieanbindung besteht. Über ein angeschlossenes, 2-zeiliges LCD-Display lassen sich Statusmeldungen und Daten ausgeben, die eigentliche Systemkommunikation mit einem Industrie-PC findet über die serienmäßige Ethernet-Schnittstelle statt. Auf dem nicht abgebildeten Industrie-PC ist die FPGA-Entwicklungsumgebung von ALTERA installiert, mit der die oben erläuterte Entwicklung der „virtuellen Hardware“ sowie die Betriebssystem- und Programm-

funktionalitäten entwickelt werden. Das Hochladen fertiger Software-Codes sowie die Debug-Schnittstelle sind über ein JTAG-Interface mit USB-Anschluss realisiert.

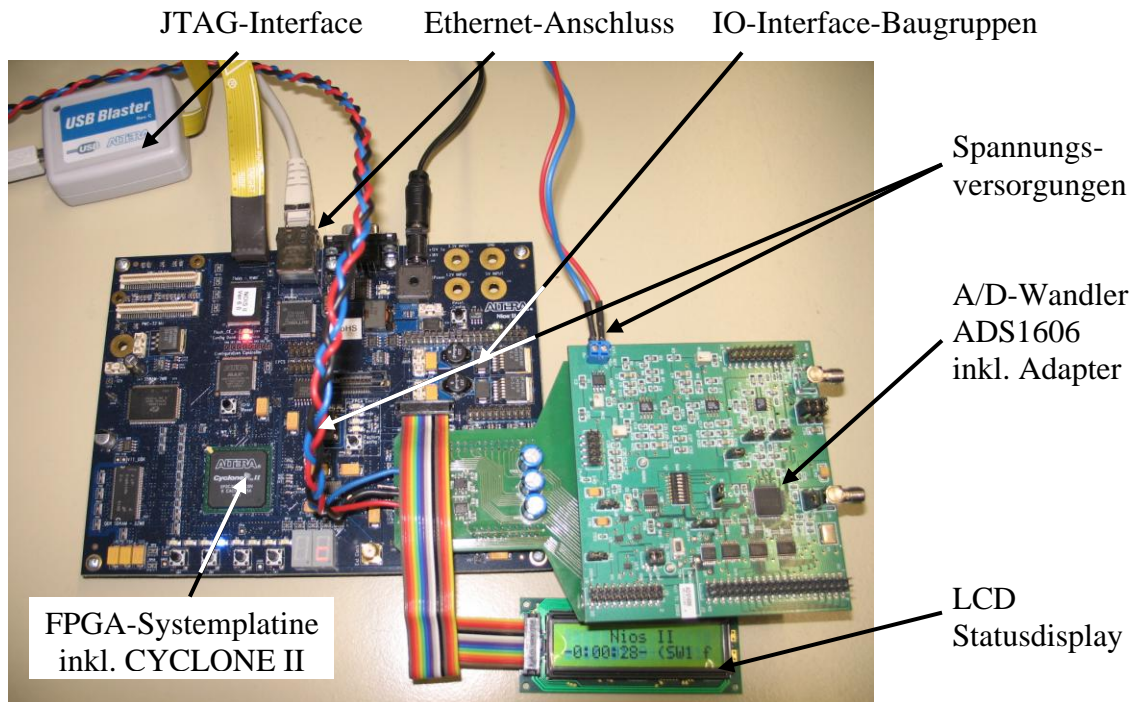


Bild 6: Hardware der FPGA-Entwicklungsumgebung mit appliziertem A/D-Umsetzer ADS1605

Körperschall Signalaufnehmer

Ziel ist es zunächst, Körperschallsignale während der spannenden Bearbeitungsvorgänge in Präzisions- und Ultrapräzisionsmaschinen mit unterschiedlichen Sensortypen zu erfassen und inhaltlich hinsichtlich enthaltener Signifikanzmerkmale zu bewerten. Damit im späteren Produktionseinsatz Maschinen- und Prozesszustände sowie Werkzeugverschleiß sicher identifizierbar werden, müssen die Messsignale einen ausreichenden Informationsgehalt besitzen. Im Rahmen der Versuchsdurchführungen wird untersucht, ob und in welcher Form dieser Informationsgehalt in den Körperschallsignalen enthalten ist und welche messtechnischen Randbedingungen zur Erfassung notwendig sind. Aufgrund der bisher unbekanntenen Anforderungen an die messtechnische Ausrüstung (Sensoren, Filter, Wandler, Speicher) wurden zu Beginn des ersten Berichtszeitraums Markt- und Herstellerrecherchen durchgeführt, um einen Überblick über die Leistungsgrenzen des aktuellen Stands der Technik zu gewinnen. Es stellt sich heraus, dass aktuell Körperschallmesssysteme am Markt verfügbar sind, die mit unterschiedlichen Sensortypen den Spektralbereich bis 2 MHz abdecken (z.B. Physical Acoustics) [8]. In Bild 7 sind die Sensoren dieses Systems auf der linken Seite dargestellt.

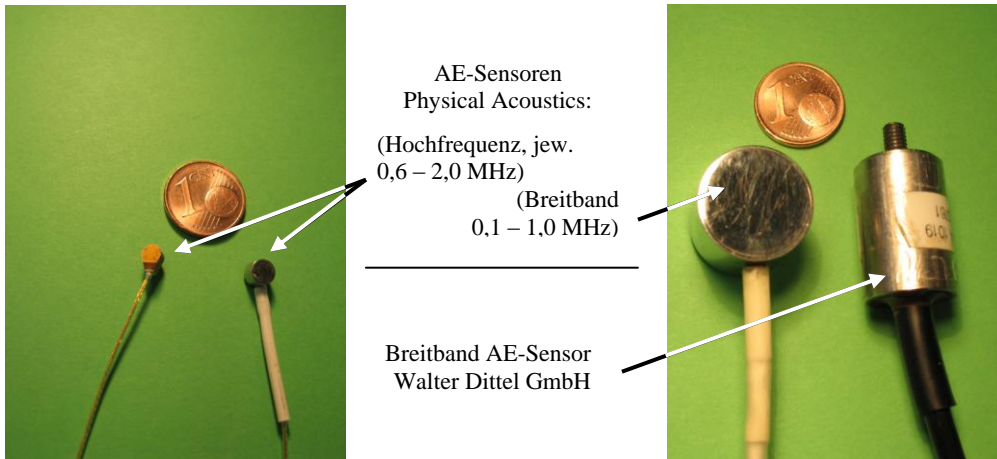


Bild 7: Körperschallsensoren des Laborsystemherstellers Physical Acoustics sowie des Überwachungssystemherstellers Walter Dittel GmbH

Parallel dazu wurde vom Projektpartner Walter Dittel GmbH ein konventionelles Prozessüberwachungssystem des Typs AE6000 bereit gestellt. Dieses System verfügt über die klassische analoge Signalverarbeitungskette und gestattet den Anschluss der konventionellen Körperschallsensoren aus dem Bereich der Prozessüberwachung (vgl. Bild 7 rechts). Neben den üblichen Filter- und Überwachungsmethoden stellt dieses System jedoch zusätzlich einen qualitativ hochwertigen Analogausgang bereit, an dem sich das ungefilterte und verstärkte Messsignal des AE-Sensors abgreifen lässt. Das so analog vorverarbeitete Körperschallsignal wurde mit einer am Fraunhofer IPT entwickelten DSP-basierten Messeinheit hoch aufgelöst digitalisiert und aufgezeichnet.

Versuchsdurchführungen zur Identifikation charakteristischer Prozessmerkmale bei Präzisionsdrehprozessen

Bereits im ersten Halbjahr des Projekts konnten erste Versuche zur Aufzeichnung und Analyse des Körperschallsignals durchgeführt werden. Die Versuche wurden an einem Präzisionsbearbeitungszentrum TNC des Projektpartners Carl Benzinger GmbH durchgeführt (Bild 8).



Bild 8: Präzisionsbearbeitungszentrum TNC von Carl Benzinger GmbH

Die Abbildung zeigt das Maschinensystem sowie den geöffneten Arbeitsraum mit applizierten Körperschallsensoren, dem Werkstück sowie dem Werkzeug. Im Vordergrund befindet sich ein Laservibrometer des Projektpartners ITA. Mit Hilfe dieses Messsystems wurden die Oberflächenschwingungen der Werkzeugschneide aufgezeichnet, um diese mit den Signalen des Körperschallsensors vergleichen zu können.

Der Musterprozess

Als Musterprozess wurde die spanende Mantelbearbeitung eines zylindrischen Werkstücks gewählt. Dabei werden unterschiedliche Werkstückmaterialien (Aluminium, Messing, Stahl) mit Hartmetallschneidplatten bearbeitet. Bild 9 zeigt den Prozessablauf anhand eines diskreten Konturprofils der Drehbearbeitung.

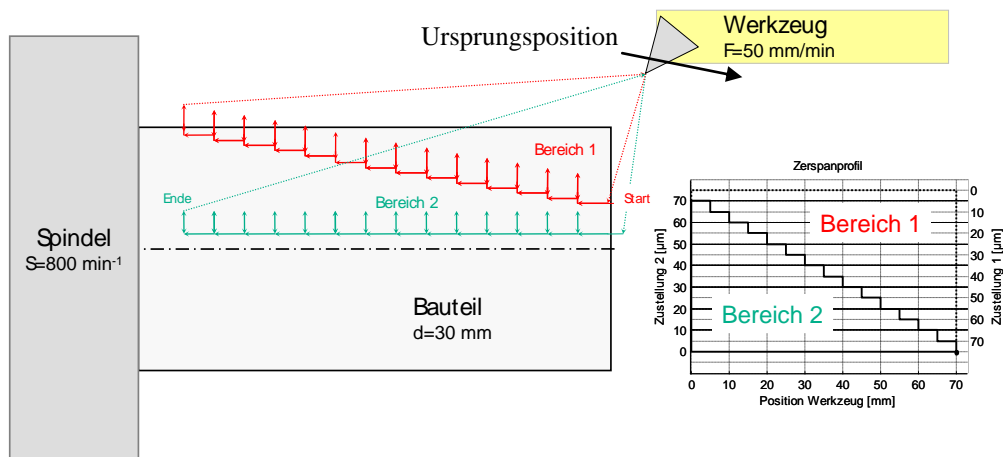


Bild 9: Konturprofil der Präzisionsdrehbearbeitung

Ein Versuchsdurchlauf beginnt zunächst mit der Herstellung einer definierten Manteloberfläche. Hierzu wird die Bauteiloberfläche mehrfach mit konstanter Zustellung von $30 \mu\text{m}$ plan gedreht, bis eventuell vorhandene Stufen oder Fehlstellen auf der Bauteiloberfläche entfernt sind und die Mantelfläche bezogen auf die Spindelachse rund ist. Die folgende Versuchsbearbeitung führt daraufhin das in Bild 9 dargestellte doppel-symmetrische Stufenprofil durch.

Dabei wird in einem ersten Durchlauf (Bereich 1) die Zustellung im Verlaufe des axialen Vorschubs (50 mm/min) von anfänglich $70 \mu\text{m}$ um $5 \mu\text{m}$ pro Stufe verringert. Zwischen jeder Stufe fährt das Werkzeug in radialer Richtung aus dem Werkstück heraus. Dies dient der späteren Stufenidentifikation im Messsignal. Nach dem Ende des ersten Durchlaufes fährt das Werkzeug in die Ursprungsposition und beginnt mit dem zweiten Bearbeitungsdurchlauf (Bereich 2). Dabei wird die Mantelfläche mit einer konstanten Zustellung von $75 \mu\text{m}$, bezogen auf den ursprünglichen Bauteildurchmesser, plan gedreht. Symmetrisch zum ersten Durchlauf wird das Werkzeug zur Identifikation der Stufen jeweils nach 5 mm (entspricht einer Stufenbreite) aus dem Werkstückeingriff herausgehoben.

Zur Untersuchung des prozessabhängigen Körperschallverhaltens wird das Messsignal während der gesamten Bearbeitungszeit aufgezeichnet. Durch diese Vorgehensweise können in jedem Versuchsdurchgang mehrere Zustellungen systematisch erfasst und verglichen werden.

Ergebnisse der Körperschallmessungen

Bei jedem Versuchsdurchlauf ergibt sich aufgrund der hohen Auflösung und Abtastrate des Messsystems ein Wavestream, dessen Dateigröße im Bereich mehrerer hundert MByte liegt. Das Datenhandling und die weiteren Berechnungen erfolgen daher auf einem Hochleistungs-Serversystem des Fraunhofer IPT unter der Softwareumgebung Matlab. Dieses Rechnersystem besitzt zwei Intel Doppelkern-XEON-Prozessoren und 2,5 GByte Arbeitsspeicher.

Für die Datenauswertung wurden unter der Entwicklungsumgebung Matlab mehrere Algorithmen entwickelt, die teilautomatisiert ablaufen: Die binären Rohdaten des Zeitsignals werden zunächst in ein unter Matlab handhabbares Dateiformat konvertiert und normiert. Ein speziell angepasster STFT-Algorithmus unterteilt den Gesamtstream in einzelne Zeitabschnitte, transformiert diese in den Frequenzbereich und mittelt die Ergebniskoeffizienten mehrerer aufeinander folgender Fouriertransformationen. Durch dieses Verfahren ist eine Reduktion der Gesamtdaten erzielbar, die die weitere Spektralanalyse in vertretbarem Zeitaufwand ermöglicht.

Für einen qualitativen Überblick wurden die Spektrallinien über den Prozessverlauf als 3-D und 2-D Plots graphisch dargestellt (vgl. Bilder 10 und 11).

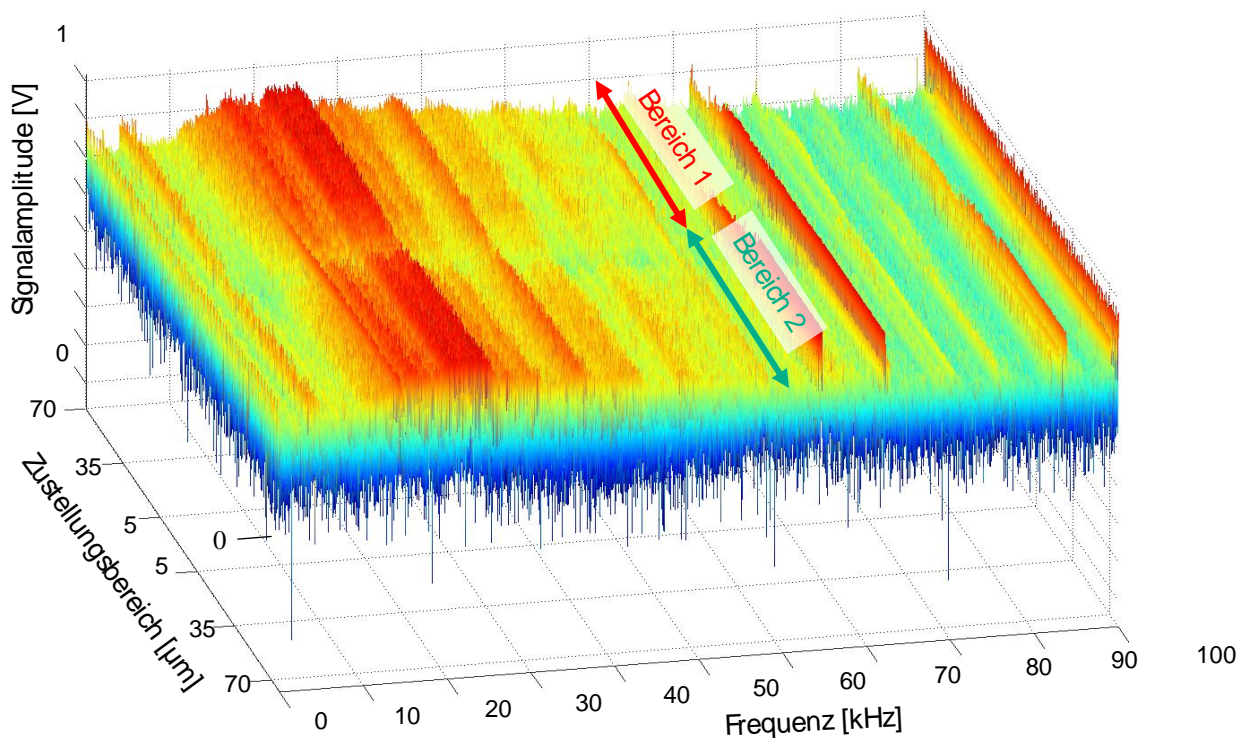


Bild 10: 3-D-Spektralplot eines Bearbeitungsversuchs

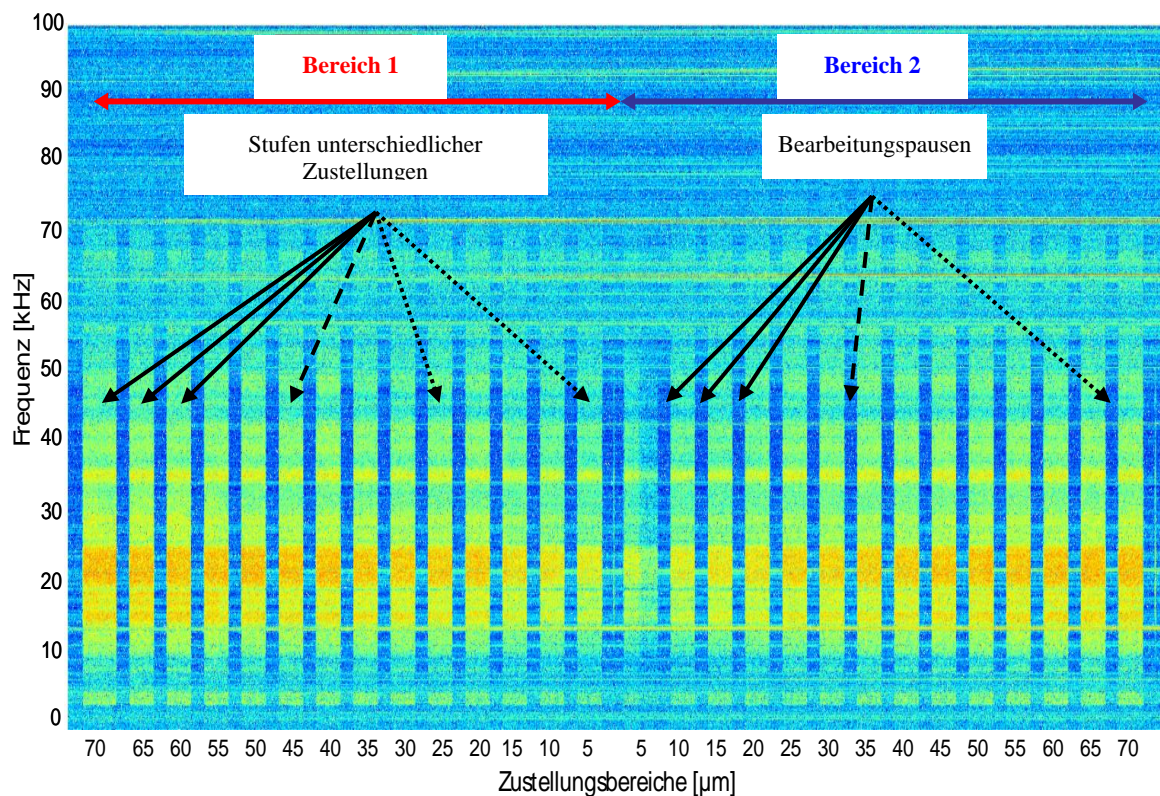


Bild 11: 2-D-Spektralplot eines Bearbeitungsversuchs

Beide Spektrogramme zeigen die Ergebnisse eines identischen Versuchsdurchlaufs mit den oben erläuterten Prozessbereichen 1 und 2. Die Körperschallaufnahme wurde mit der dargelegten Messeinrichtung und den AE-Sensoren der Walter Dittel GmbH durchgeführt. Während in Bild 10 eine schräge Frontansicht des zeitlichen Spektralverlaufs die qualitative Änderung der Frequenzamplituden betont, können durch die senkrechte Draufsicht auf die Spektralkarte in Bild 11 die einzelnen Prozess-(Zeit-)abschnitte eindeutiger identifiziert werden. In beiden Darstellungen ist zu erkennen, dass sich die Amplituden des Spektralbereichs zwischen 10 kHz und 40 kHz deutlich vom Hintergrundrauschen abheben. Dieses ist jedoch nur während des spanenden Werkzeugeingriffs der Fall, was in Bild 11 (blauen Streifen zwischen den einzelnen Zustellungsbereichen) besonders deutlich wird. Weniger deutlich sichtbar, jedoch bei numerischer Betrachtung der Amplitudenwerte offensichtlich, ist die Tatsache, dass sich die Intensitäten der innerhalb des signifikanten Spektralbereichs befindlichen Frequenzanteile mit abnehmender Zustellung verringern. Dies ist durch die den Amplituden proportionale Farbgebung hervorgehoben. Oberhalb von 70 kHz sind mit diesem Sensortyp keine Frequenzanteile zu identifizieren, die sich dem Spannungsvorgang zuordnen lassen. Die in der oberen Spektralhälfte erkennbaren sehr schmalen Bänder ziehen sich durch den kompletten Prozesszeitraum und sind offensichtlich durch EMV-Beeinflussung verursacht. Weitere Informationen und eine detaillierte Zusammenfassung der Ergebnisse finden sich in [8].

Konzeption geeigneter Messsignalerfassungsmethoden sowie Methoden zur digitalen Signalanalyse

Für die im Zielsystem einzusetzende teilautomatisierte Signifikanzisolierung und Merkmalerkennung wurde am Fraunhofer IPT in den vergangenen Monaten ein Konzept

erarbeitet, welches das grundsätzliche Funktionsgerüst der Signalverarbeitung darstellt (Bild 12).

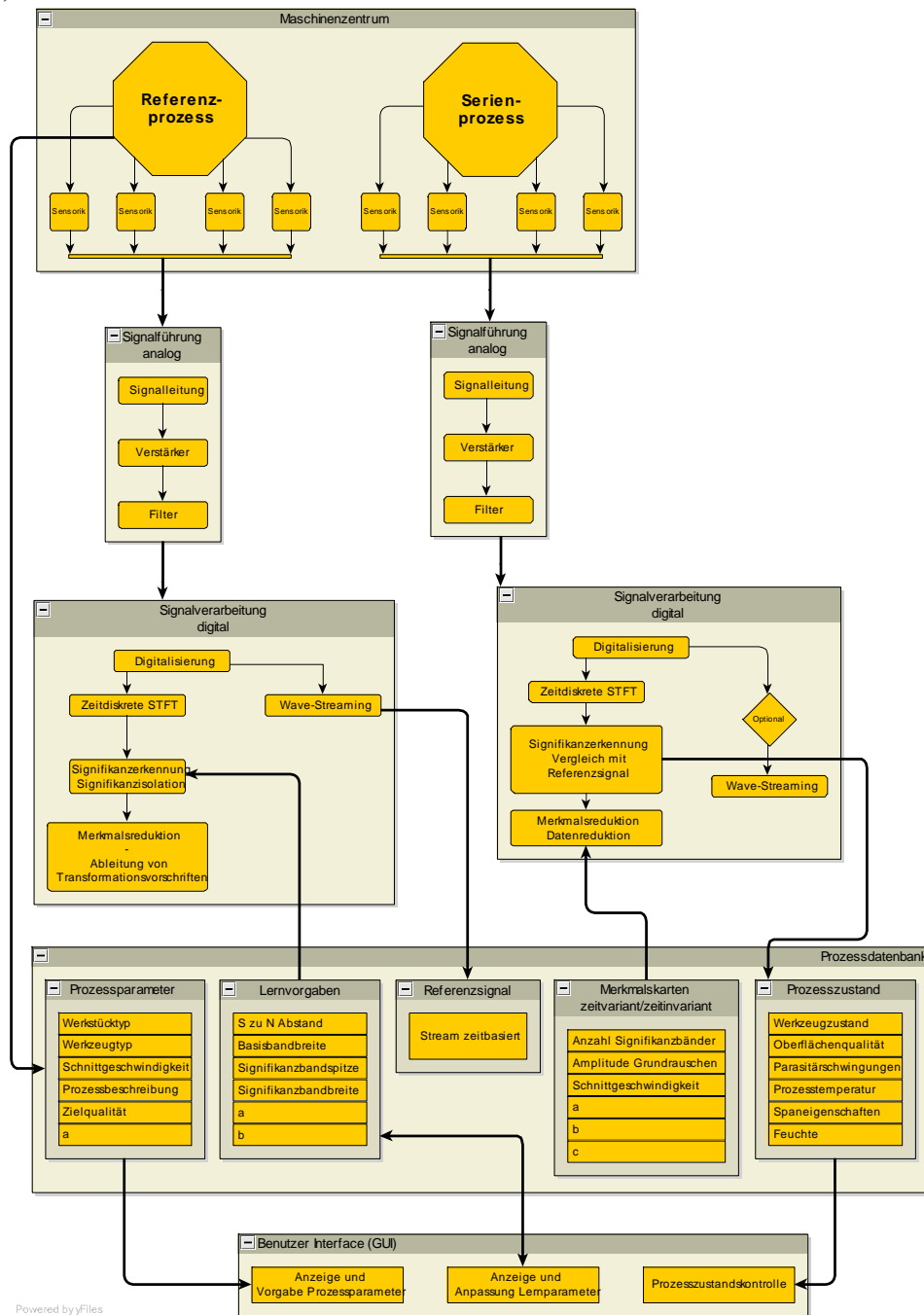


Bild 12: Systemkonzept der Messsignalverarbeitung

Das Konzept sieht eine Trennung der Signalverarbeitungsketten für den Referenzprozess und den Serienprozess der zu überwachenden Zielbearbeitung vor. Beiden Ketten gemeinsam ist eine identische analoge Vorverarbeitung der Messsignale. Das Konzept ist von der Art der den Messgrößen zugrunde liegenden physikalischen Größen (Körperschall, Prozesskraft) unabhängig, sofern diese zeitbasierte Größen sind.

Referenzprozess

Nach Filterung und Verstärkung der Messsignale werden diese zunächst digitalisiert und in einer Vorstufe normiert. Der nun vorliegende Wavestream wird für spätere Referenzzwecke in einer Datenbasis abgelegt. Im Gegensatz zu den bisherigen

Labormessungen der Grundlagenversuche, bei denen die möglichst breitbandige Erfassung und Analyse der Körperschallsignale im Mittelpunkt steht, können aus wirtschaftlichen Gründen auf der Zielplattform des Überwachungssystems nur begrenzte Datenmengen in vertretbarer Geschwindigkeit verarbeitet werden. Es kommt daher bei der auf die Digitalisierung folgenden Signalverarbeitung auf eine möglichst intelligente und effiziente Datenreduktion an. Aufgrund der dennoch zu erwartenden Rechenzeiten zur Bestimmung von Merkmalskarten ist für die Verarbeitung des Referenzprozesses von einer Offline-Bearbeitung auszugehen.

Zunächst werden einzelne Zeitschlitze des zeitkontinuierlichen Messsignals mittels STFT in den Frequenzbereich überführt. Lernvorgaben, die in der gemeinsamen Datenbasis hinterlegt sind, identifizieren in den Spektren Stütz- und Eckwerte, mit denen Frequenzbänder nach Ort und Ausprägung isoliert werden. Durch dieses Vorgehen kann die Datenmenge pro Signifikanzmerkmal drastisch reduziert werden. Zusammen mit den jeweils angewandten Transformationsvorschriften und Prozesszeitangaben werden die so gewonnenen Merkmalskarten für den Referenzbearbeitungsprozess in der Datenbank hinterlegt.

Serienprozess

Zur Überwachung der Serienbearbeitungen muss die Signalverarbeitung bis zur Digitalisierung identisch zum Referenzprozess erfolgen, um entsprechend referenzierbare Messsignale zu erhalten. Die Zeitangaben und Transformationsvorschriften zur Bildung von STFT sowie der Merkmalskarten des aktuellen Messsignals werden aus der Prozessdatenbank extrahiert und dem Signalprozessor zugeführt. Die errechneten Signifikanzwerte des aktuellen Messsignals werden mit den in der Datenbank hinterlegten Referenzwerten verglichen. Einstellbare Toleranzfelder dienen hierbei der Entscheidungsfindung.

Ergebnisausgabe

Das Ergebnis der Entscheidungsfindung und des Prozesszustands wird sowohl dem Maschinenbediener auf einer Anzeige dargestellt als auch der Steuerung der Bearbeitungsmaschine (via Profibus) sowie der Prozessdatenbank (systemimmanent) bereitgestellt. Neben der Protokollierung des Prozessverlaufs wird somit auch eine unmittelbare und angepasste Reaktion der Maschinensteuerung auf kritische Prozesszustände möglich (Vorschub, Schnittgeschwindigkeit, Prozessabbruch).

Zusammenfassung

Die Überwachung von Fertigungsvorgängen der Präzisions- und Ultrapräzisionszerspanung ist aktuell erfahrungsbasiert und durch den Maschinenbediener subjektiv beeinflusst. Aktuelle Überwachungssysteme sind aufgrund ihrer Ausrichtung für den Einsatz in konventionellen Bearbeitungstechnologien hinsichtlich der Signalwandlung und Verarbeitung für den UP-Einsatz ungeeignet.

Am Fraunhofer IPT werden derzeit Methoden zur optimierten Erfassung und Analyse des durch den Zerspanungsvorgang in Werkstück und Werkzeug induzierten Körperschallsignals erarbeitet. Hierzu werden moderne Sensoren und digitale Signalverarbeitungssysteme optimiert und hinsichtlich ihres Einsatzes in den Ultrapräzisionstechnologien angepasst.

Die Entwicklung leistungsfähiger Signalanalysen zur Signifikanzisolation ermöglicht die Identifikation von Prozesszuständen und Werkzeugverschleiß in den Körperschallsignalen. Durch die echtzeitnahe Ableitung von Merkmalskarten aus dem Spektralverhalten und deren kontinuierlichem Abgleich mit Referenzkarten können Zerspanungsvorgänge der UP-Techniken in-situ überwacht und qualifiziert werden.

Hierdurch können deutliche Einsparungen bei den Nebenzeiten der teilweise bis zu mehreren Wochen dauernden Fertigungsvorgänge erreicht und qualitätssichernde Maßnahmen bereits während der Bearbeitung realisiert werden.

Referenzen

- [1] Fischer, S.: Fertigungssysteme zur spanenden Herstellung von Mikrostrukturen, Dissertation, Aachen, Shaker Verlag, 2000
- [2] Meding, M.: Anwendung der Schallemissionsanalyse bei der Ultrapräzisionsbearbeitung, Zeitschriftenaufsatz, Industrie Diamanten Rundschau, 1995
- [3] Ackermann, E.: Verschleißuntersuchungen an Diamantwerkzeugen für die Ultrapräzisionszerspanung mit definierter Schneide, Diplomarbeit, RWTH-Aachen, 2002
- [4] Dornfeld, D.: Process Monitoring and Control for Precision Manufacturing, Zeitschriftenaufsatz, Production Engineering, Research and Development, 1999
- [5] Brecher, C.; Schäfer, C.: Untersuchung und Verbesserung der Einsatzmöglichkeiten von Werkzeug- und Prozessüberwachungssystemen in der Präzisions- und Ultrapräzisionstechnik, Abschlussbericht zum AIF-Forschungsvorhaben 13299 N/1, Fraunhofer IPT, 2004
- [6] Konsortium InnoNet-Vorhaben IN_5070 „UPControl“: Fraunhofer-Institut für Produktionstechnologie IPT, Lehrstuhl und Institut für Technische Akustik der RWTH Aachen, Walter Dittel GmbH, ERAS GmbH, Micro-Epsilon GmbH & Co. KG, Diamant-Werkzeug GmbH, Johann Modler GmbH, Carl Benzinger GmbH, LT-Ultra Precision Technology GmbH
- [7] Physical Acoustics B.V, Nieuw-Matheneserstraat 39-41, 3029 AV Rotterdam, <http://www.d-pac.com>
- [8] Brecher, C.; Schäfer, C.: Entwicklung eines Prozessüberwachungssystems für die Prozesse der Präzisions- und Ultrapräzisionsfertigung, Zwischenbericht zum InnoNet-Forschungsvorhaben IN-5070, Fraunhofer IPT, 2007