INDUSTRIE 4.0 – ENTWICKLUNG ADAPTIVER BEARBEITUNGSPROZESSE

Fachseminar “Feinbearbeitung”

18. Oktober 2017

Fraunhofer IWU

© Fraunhofer IWU

Gliederung

1. **Industrie 4.0 – Treiber und Herausforderung**
2. Adaptive Bearbeitungsprozesse
3. In-Prozess-Messung der Randzoneneigenschaften
4. In-Prozess-Bewertung des Werkzeugzustandes
5. Regelungskonzept
6. Zusammenfassung

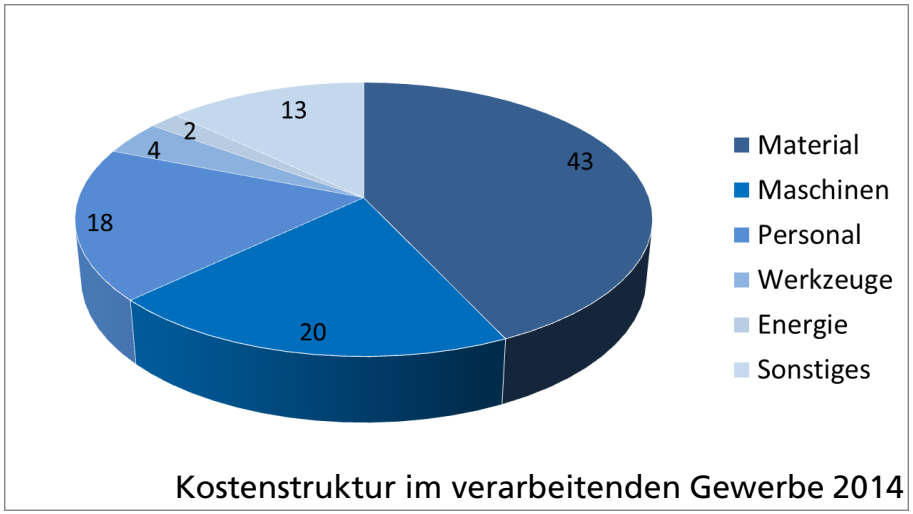
© Fraunhofer IWU

Industrie 4.0 - Treiber und Herausforderung

Kosten / Produktivität

- **Globalisierung** - Zunahme von Wettbewerbern
- **Steigende Kosten**
  - Steigende Tendenz bei Qualitätssicherungs- und Gewährleistungskosten
  - Personalkosten – kontinuierlich steigende Löhne und Gehälter (3,5%)
  - Ausgaben zur Einhaltung von Sicherheits- und Emissionsrichtlinien
  - Energiekosten – EEG-Umlage
- Unternehmen müssen jährlich ca. 4% Kostensenkungen durch Produktivitätszuwachs erzielen, um das aktuelle Profitabilitätsniveau halten zu können

  (The road to 2020 and beyond – Mc Kinsey – Studie 08/2013)



Kostenstruktur im verarbeitenden Gewerbe 2014

=> Steigerung des Zeitspanvolumens

© Fraunhofer IWU

Industrie 4.0 - Treiber und Herausforderung

Digitalisierung

Aktuelle Trends – IuK in der Produktion:

- Zunehmende **Durchdringung** der Produktionstechnik mit modernen Komponenten der **Informations- und Kommunikationstechnik**
- Wachsende Bedeutung der **„Ressource Daten“** zur stetigen Erhöhung der **Fertigungstransparenz**

Was zeichnet die Digitalisierung aus:

- **Vollvernetzung** – vom Sensor bis zum produktionsnahen IT-System
- **Volltransparenz** – Virtuelles Abbild der Produktion
- Intelligente **Informationsgewinnung**
- Einsatz von **Assistenzsystemen**
- Faktor **Mensch als Wissensträger** und kognitiver Problemlöser

© Fraunhofer IWU

Fraunhofer IWU

Industrie 4.0 - Treiber und Herausforderung

Produktion: Bauteil- und Werkstofftrends

Branchen
- Automobil
- Luftfahrt
- Energie
- Werkzeugbau
- Medizintechnik

Spannungsfeld der Fertigung
- Technologische Schnittparameter mit eng begrenztem Optimum
  => **Arbeiten im Grenzbereich**
- Absicherung der Prozessfähigkeit mit Sicherheitsfaktoren
- **Kostendruck**
- **Komponenten der IuK-Technik**

Merkmale
- Geometrie
- Qualität
- Baugröße
- Werkstoffe

⇒ **Entwicklung adaptiver Bearbeitungsprozesse**
⇒ Lückenlose Überwachung, Bewertung und Archivierung von fertigungsrelevanten Daten

Bauteile
- hohl, dünnwandig
- komplexe Geometrie
- Miniaturisierung
- Variantenvielfalt

Qualität ↗

Losgröße ↘

Werkstoffe
- hochfest, inhomogen

↓ schwer zu bearbeiten

© Fraunhofer IWU

Fraunhofer IWU

Gliederung

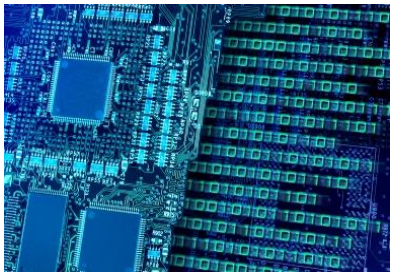
1. Industrie 4.0 – Treiber und Herausforderung
2. **Adaptive Bearbeitungsprozesse**
3. In-Prozess-Messung der Randzoneneigenschaften
4. In-Prozess-Bewertung des Werkzeugzustandes
5. Regelungskonzept
6. Zusammenfassung

© Fraunhofer IWU

Adaptive Bearbeitungsprozesse

Data-Mining-Prozess

Industrial IoT → **Smarte Produktion**



Daten	Informationen	Wissen	Wertschöpfung
BigData	**SmartData**	**Entscheidungen**	**Produktivität**
■ Adaption von Sensoren/Aktoren in Produktionssysteme ■ IT-Lösungen zum verwalten großer Datenmengen	■ Methoden/Analysen ■ Aufgabenbezogene MA-Unterstützung ■ Orts-/Rollenbezogene Informations-bereitstellung	■ Vorschlag konkreter Handlungs-anweisungen ■ Assistenzsysteme ■ Intelligente Prozesse	■ Optimaler Ressourceneinsatz ■ Kostensenkung, Produktions-optimierung
Voraussetzung	**Voraussetzung**	**Voraussetzung**	
Prozesskenntnis	**Informations-filterung**	**Mensch** „kreativer Problemlöser“	

© Fraunhofer IWU

Fraunhofer IWU

Adaptive Bearbeitungsprozesse

Mehrwert durch automatisierte Vernetzung

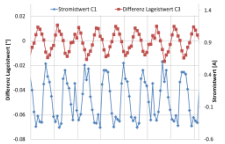
Data-Mining-Prozess

Datenerfassung mit Multisensorsystemen → Big Data

Maschinen-Messsysteme

Beschleunigungs-sensoren

Körperschall-sensoren



Signale aus der Steuerung

Vorverarbeitung: bspw. Datenbereinigung

Transformation: Selektion, Formatanpassung, Diskretisierung

Big Data → Smart Data

Prozessmodell/ -simulation als Basis für:

Ausreißererkennung	Assoziationsanalyse	Klassifizierung
Clusteranalyse	Regressionsanalyse	Korrelationsbildung

Evaluation: Untersuchung und Bewertung von Messergebnissen

Ziel: Kombination von Prozessdaten mit Prozesswissen, Überwachung und Regelung von Fertigungsprozessen

Informationsgehalt

Datenmenge

Bildquellen: Sendix, Kistler

© Fraunhofer IWU

Fraunhofer IWU

Adaptive Bearbeitungsprozesse

Besonderheiten geometrisch unbestimmte Schneide

- **Stochastische Verteilung** der Schleifkörner
- **Veränderung der Schleifkörpertopographie** mit jedem Abrichtprozess
- **Keine identischen Schneidbedingungen** nach dem Abrichten auf Grund von Abrichterverschleiß und Durchmesseränderung des Schleifkörpers
- **Abstumpfungseffekte** durch Verschleiß von Schneiden und Späneeinlagerungen
- **Selbstschärfeffekte** durch Ausbrechen stumpfer Körner und Bildung neuer Schneiden

Defizite:

- **Werkzeugzustand** als Haupteinflussgröße auf den Prozess **nicht bekannt**
- **Thermische Randzonenbeeinflussung** erst **nach Prozess bewertbar**

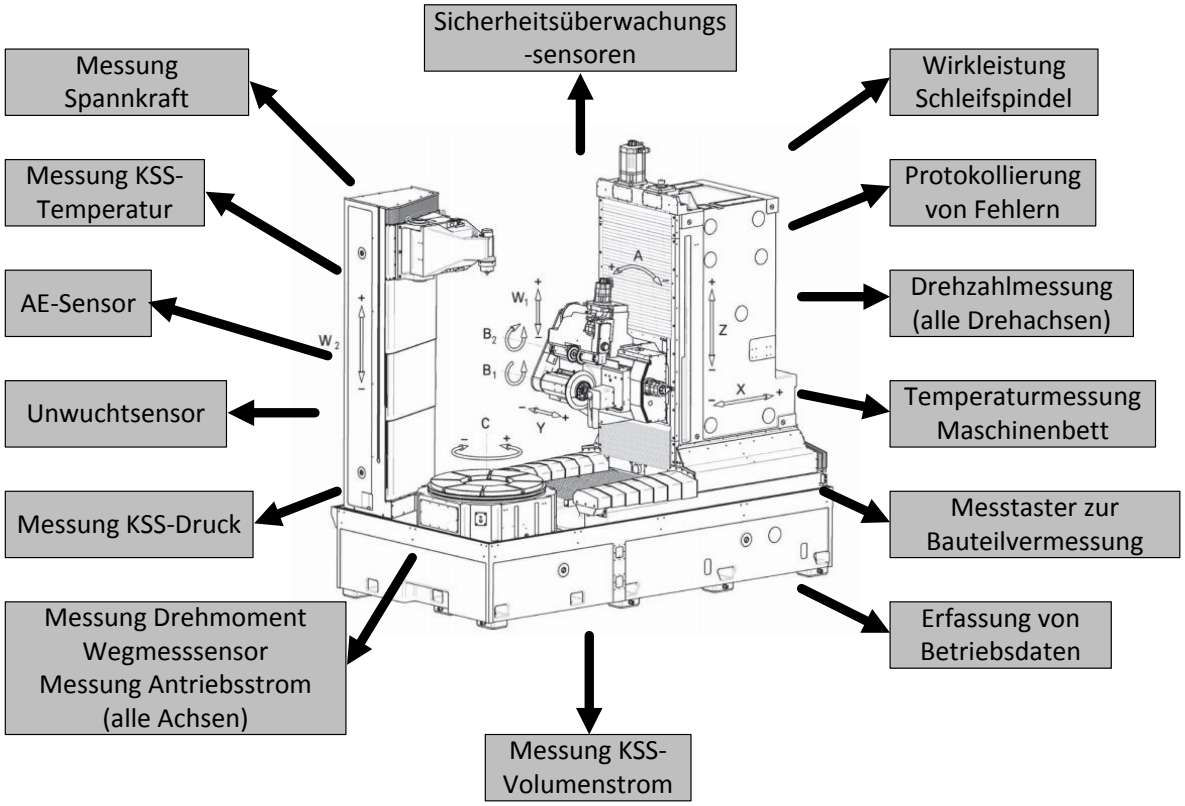
⇨ **Potenzial des Schleifwerkzeuges wird durch große Sicherheitsfaktoren nicht ausgeschöpft**

⇨ **Auf Schwankungen im Prozess wird nicht reagiert**

© Fraunhofer IWU

Adaptive Bearbeitungsprozesse

Sensorik



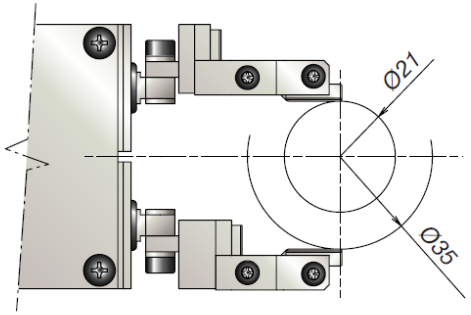
- Zahlreiche Sensoren bereits jetzt vorhanden, werden aber nur in Ausnahmen für Prozessregelung genutzt
- Effektive Nutzung der aufgenommenen Daten nur in Kombination mit Prozesswissen sinnvoll => **Übergang von Datensammlung zur Datennutzung**

Ungelöst: Bewertung Werkzeug und thermische Randzonenbeeinflussung

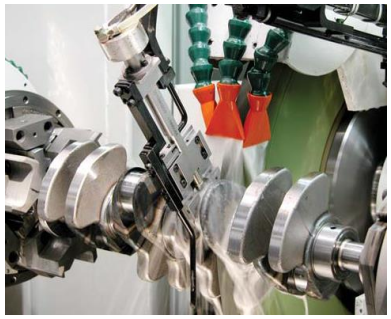
© Fraunhofer IWU

Adaptive Bearbeitungsprozesse

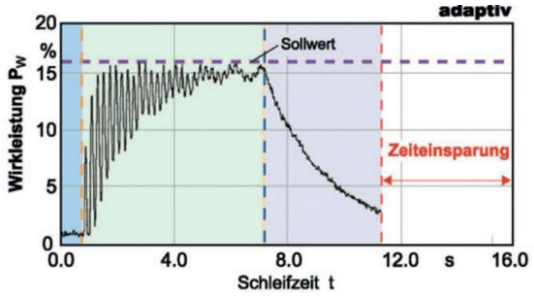
Beispiele für Regelungen mit geometrisch unbestimmter Schneide



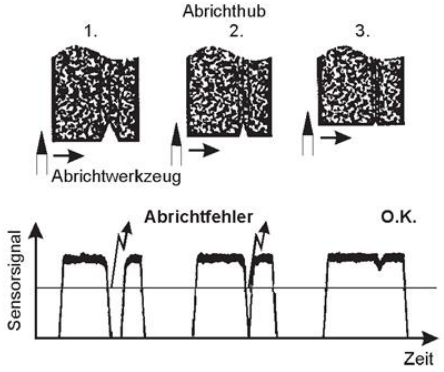
Maßgesteuertes Schleifen In-Prozess (MARPOSS)



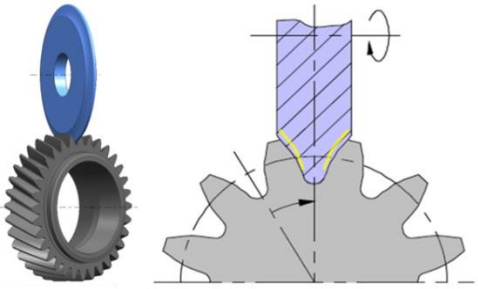
Rundheitsregelung im Prozess (MARPOSS)



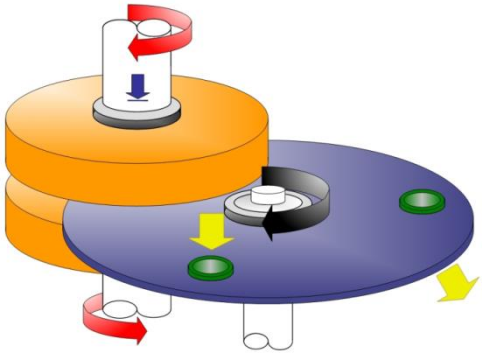
Anschnitterkennung (DITTEL)



Erkennung Abrichtzustand (PROMETEC)



Leistungsgeregeltes Schleifen (KAPP)



Maßgesteuertes Schleifen Post-Prozess (DISKUS)

Aber: Keine direkte Bewertung des Werkzeugzustandes und der Randzonenbeeinflussung und somit Regelung des Fertigungsprozesses

© Fraunhofer IWU

Fraunhofer IWU

Adaptive Bearbeitungsprozesse

Prozessführungsgrößen bei der geometrisch unbestimmter Schneide

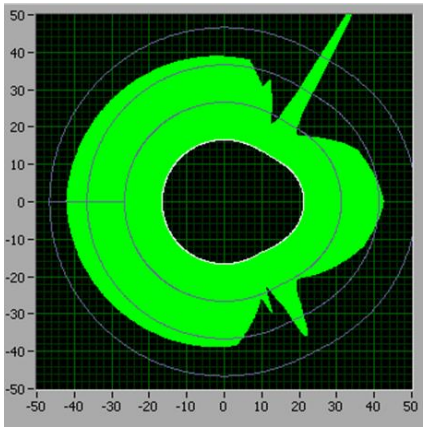
Herausforderung 1:

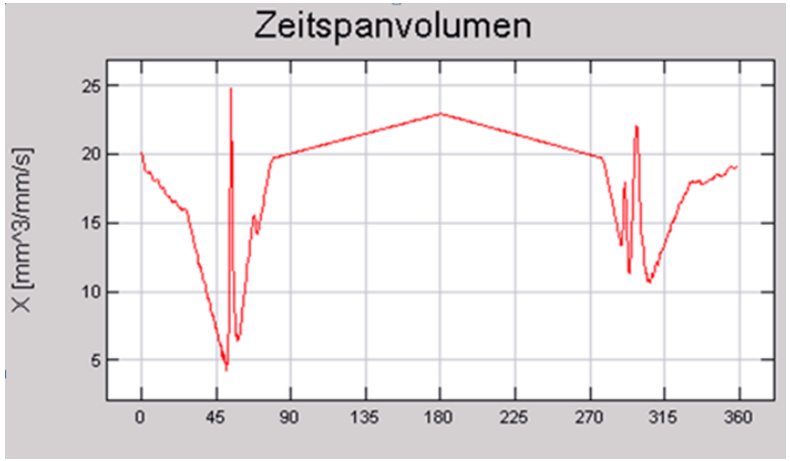
- Konkrete **Anforderungen** an **Randzonenzustand** und **Eigenspannungen** bei schleifbrandgefährdeten Bauteilen
- **Beispiel Nockenwelle**, hohe Schleifbrandgefahr durch ungünstige Kontaktbedingungen und Werkstoffe mit hohem Kohlenstoffgehalt
- **Randzonenschädigung ist prozessbegrenzend** (Anlasszone)

Lösungsansatz:

- **Direkte Bewertung der Randzonen-eigenschaften** im Schleifprozess
- Erfassung durch Messung **Barkhausenrauschen**

Kontaktlänge Nockenform-schleifen





© Fraunhofer IWU

Fraunhofer IWU

Adaptive Bearbeitungsprozesse

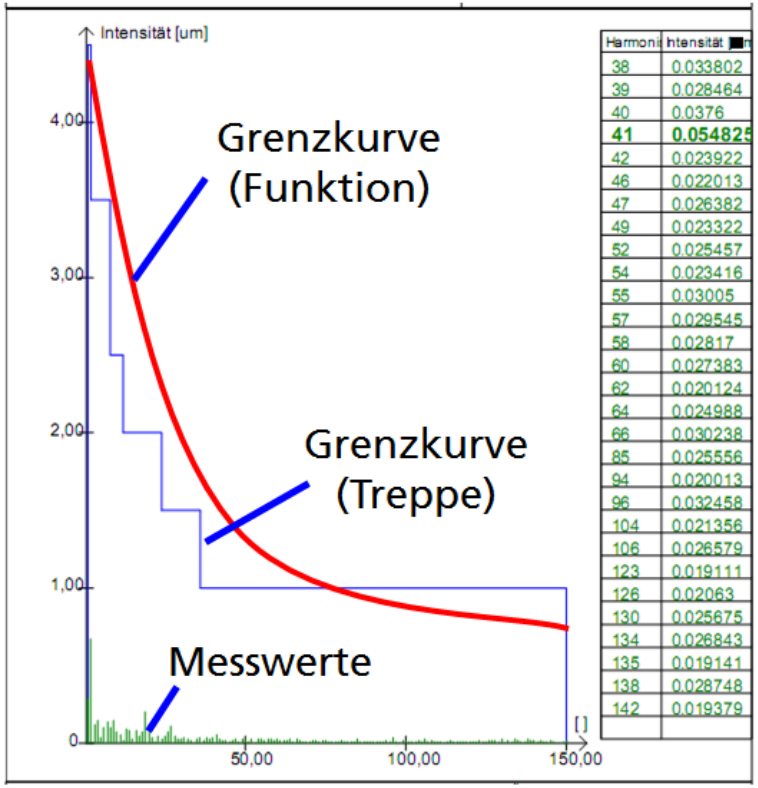
Prozessführungsgrößen bei der geometrisch unbestimmter Schneide

Herausforderung 2:

- Hohe Anforderungen an die Bauteilgenauigkeit und Oberfläche (z.B. Rautiefe und Welligkeit) bei maximaler Produktivität
- **Beispiel Ausgleichswelle**, geringe Schleifbrandgefahr bei hohen Anforderungen an Bauteiloberfläche (FFT-Auswertung der Welligkeit)
- **Genauigkeit ist prozessbegrenzend**

Lösungsansatz:

- **Direkte Bewertung des Werkzeugzustandes** und **Schneidverhaltens** im Schleifprozess
- Erfassung durch **hochfrequenten Körperschall**



Zeichnungsanforderungen (Grenzkurve) und Messwerte FFT-Auswertung Welligkeit

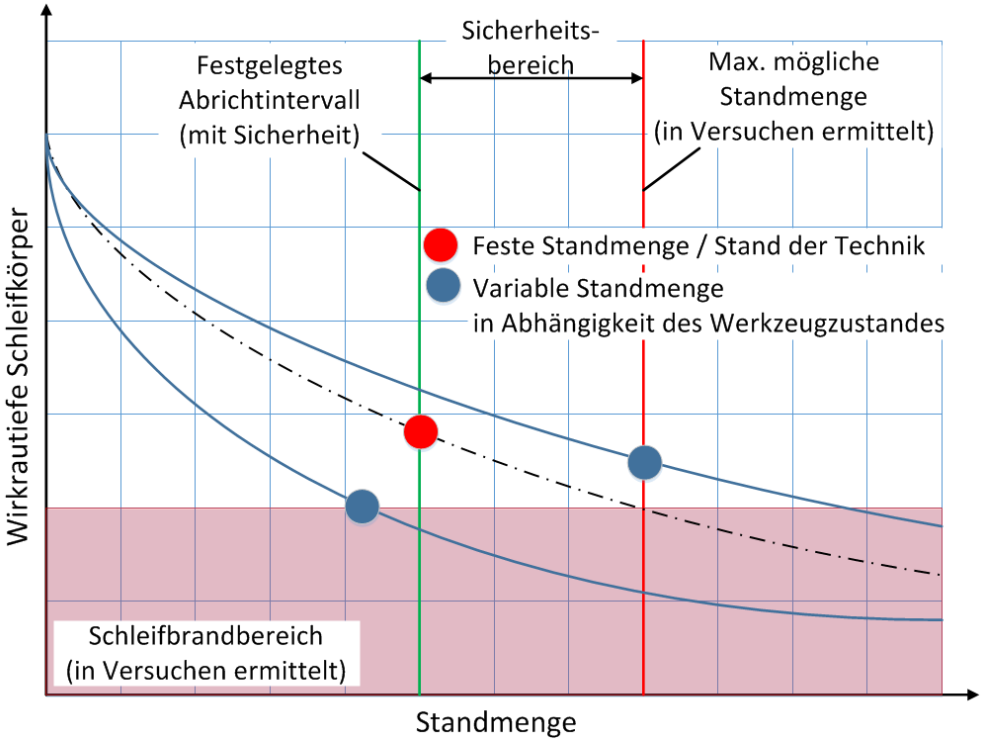
© Fraunhofer IWU

Fraunhofer IWU

Adaptive Bearbeitungsprozesse

Potenziale bei geometrisch unbestimmter Schneide

- **Erhöhte Produktivität** durch Reduzierung von Sicherheitsfaktoren
- **Sinkende Fertigungskosten** durch erhöhte Abrichtstandzahl
- **Verbesserung Qualität** und **Prozessrobustheit** durch Kompensation von Störgrößen
- **Sinkender Prüfaufwand**
- **Reduzierter Ausschussanteil**
- Verbesserte Produktrück-verfolgbarkeit



Potenzial Abrichten

© Fraunhofer IWU

Fraunhofer IWU

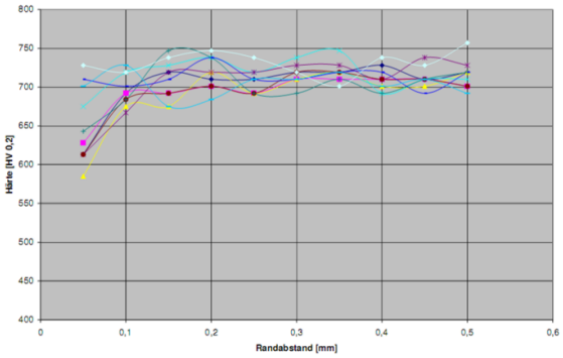
Gliederung

1. Industrie 4.0 – Treiber und Herausforderung
2. Adaptive Bearbeitungsprozesse
3. In-Prozess-Messung der Randzoneneigenschaften
4. In-Prozess-Bewertung des Werkzeugzustandes
5. Regelungskonzept
6. Zusammenfassung

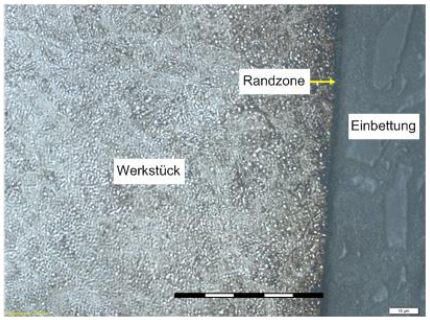
© Fraunhofer IWU

In-Prozess-Messung der Randzoneneigenschaften

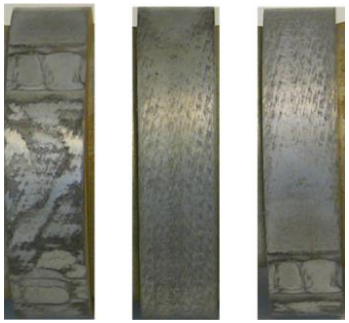
Verfahren zur Schleifbrandmessung



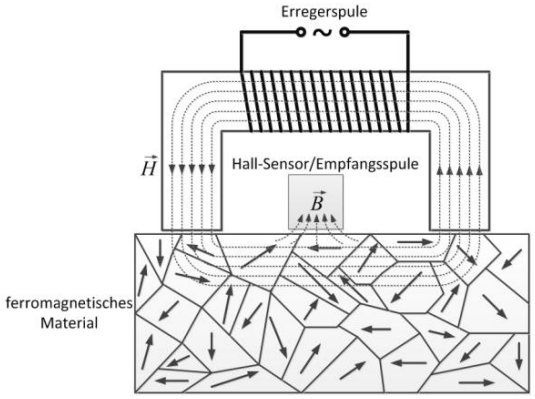
Mikrohärte



Gefügeschliff



Nitalätzen



Barkhausenrauschen

- Zahlreiche Prüfverfahren für Randzonenschädigung verfügbar
- Geeignete Messgröße muss zerstörungsfrei, von der Industrie akzeptiert und in Prozess integrierbar sein
- Barkhausenrauschen prinzipiell geeignet

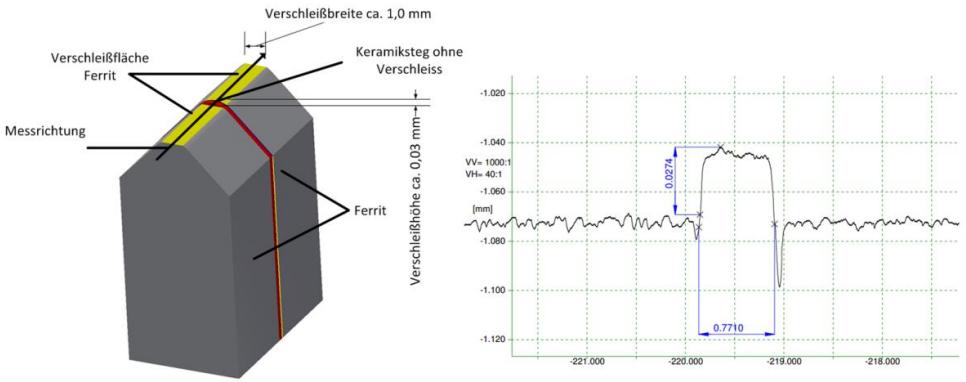
© Fraunhofer IWU

In-Prozess-Messung der Randzoneneigenschaften

Barkhausenrauschen mit Magnetisierungsspannung

- Auswertung Maximalwert und Quotient Maximalwert/Minimalwert
- **Eichung** an Referenzteilen **erforderlich**
- Bei vielen Anwendungen als **Postprozessmessung** Stand der Technik
- Messung erfolgt oft mehrere Stunden nach dem Schleifprozess
- **In-Prozess-Messung auf Grund von Verschleißproblemen** und daraus resultierenden Bauteil-beschädigungen derzeit **nicht möglich**

Messgerät Rollscan 350 (Stresstech)



Verschleißausbildung am Sensor

© Fraunhofer IWU

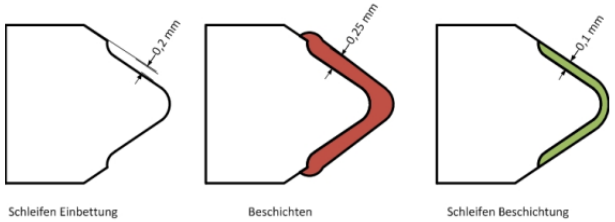
Fraunhofer IWU

In-Prozess-Messung der Randzoneneigenschaften

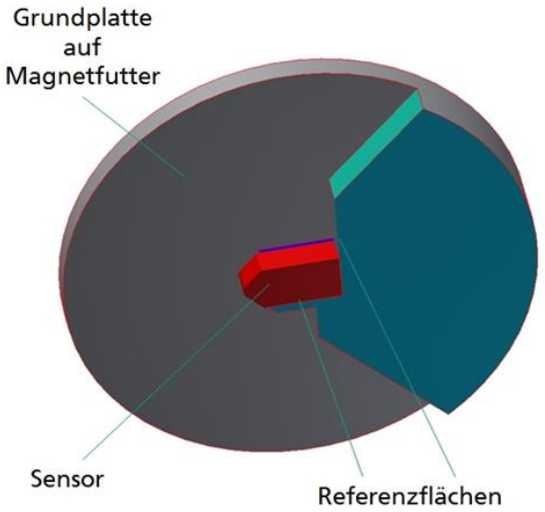
Verschleißschutz von Sensoren

Voraussetzung für In-Prozess-Messung

- Entwicklung von verschleißarmen Sensoren im Rahmen eines Industrieprojektes
- Einsatz von **Keramik-Dickschichten** mit ca. 0,1 mm Dicke
- **Funktion** des Sensors mit Schicht **nachgewiesen**
- **Minimaler Verlust** an Signalstärke (durch Verstärkung kompensierbar)



Definierter Schichtbereich durch Einbettung



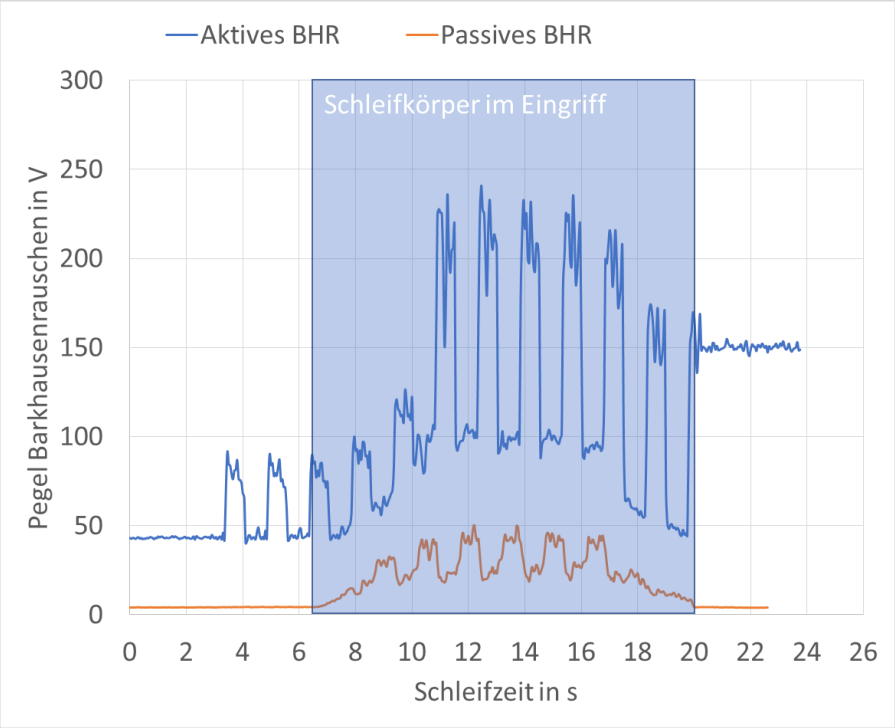
Spannvorrichtung zum Schleifen des Sensors mit definierter Spannlage

© Fraunhofer IWU

Fraunhofer IWU

In-Prozess-Messung der Randzoneneigenschaften

Test des Sensors - Signalverhalten



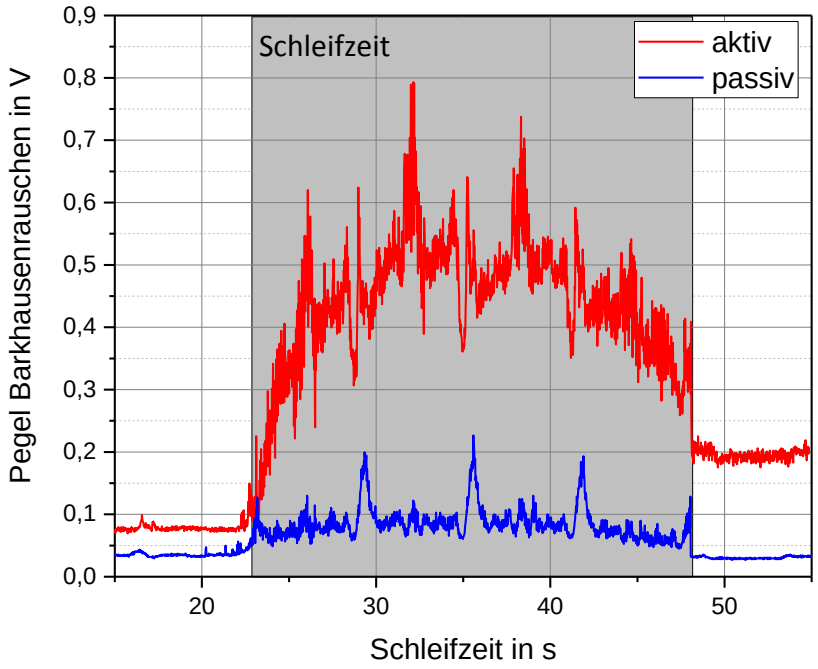
Aktives BHR und passives BHR im Schleifprozess an einem Dummybauteil 100Cr6 (Umfang ca. 180 Grad gehärtet auf 62 HRC)

- Versuche mit Magnetisierungs-spannung (aktives BHR) zeigen im Schleifprozess (z.B. Nockenwellen) **Störpegel nach dem Werkzeugkontakt**
  - Ursache (Nachweis offen): Induzierung einer Störspannung durch prozess-angeregte Mikroschwingungen - masseabhängig)

© Fraunhofer IWU

In-Prozess-Messung der Randzoneneigenschaften

Test des Sensors - Signalverhalten



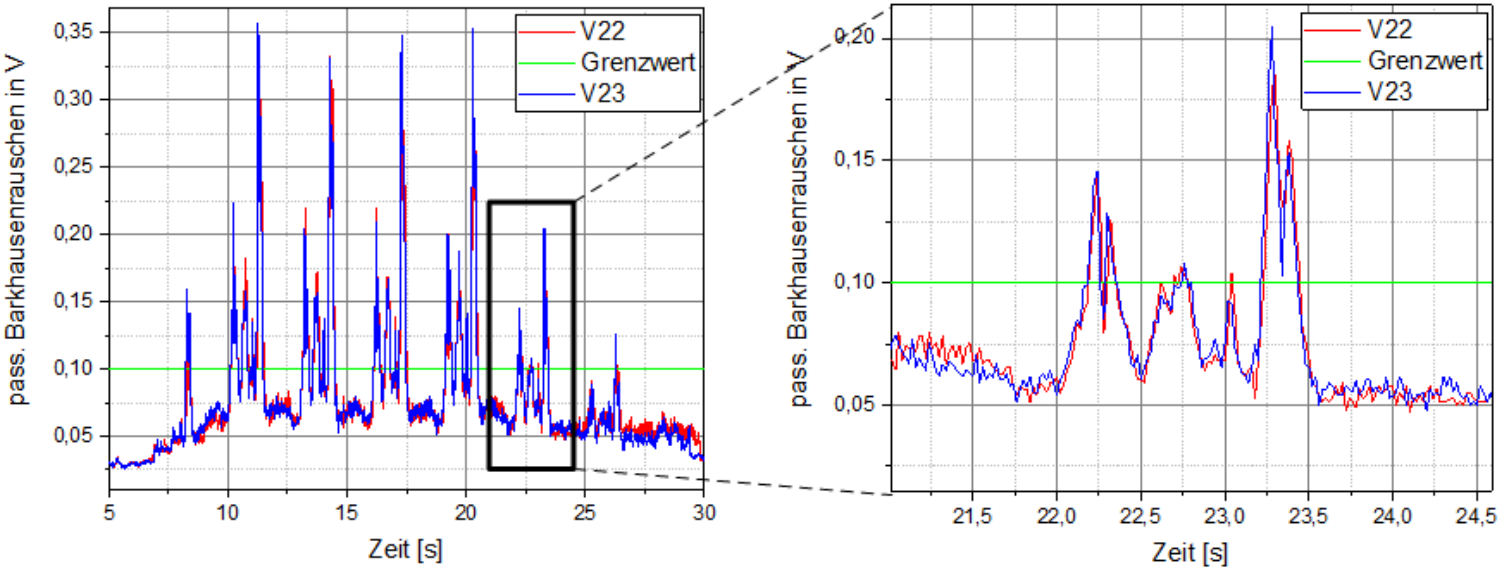
Aktives BHR und passives BHR im Schleifprozess an einem Dummybauteil 100Cr6

- Versuche mit Magnetisierungs-spannung (aktives BHR) zeigen im Schleifprozess (z.B. Nockenwellen) **Störpegel nach dem Werkzeugkontakt**
  - Ursache (Nachweis offen): Induzierung einer Störspannung durch prozess-angeregte Mikroschwingungen - masseabhängig)
  - => **Erkennung** von **Schleifbrand** an Realbauteilen **nicht** prozesssicher **möglich**
- Versuche ohne Magnetisierungs-spannung (passives BHR) ermöglichen Schleifbrand-erkennung im Prozess

© Fraunhofer IWU

In-Prozess-Messung der Randzoneneigenschaften

Potenzial passives BHR



Nachweis der Reproduzierbarkeit des passiven Barkhausenrauschens

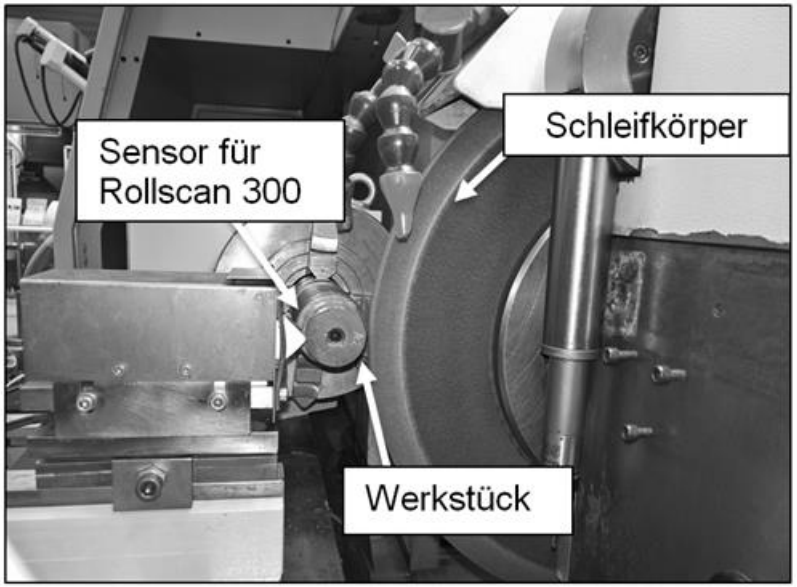
Vorteile passives BHR:

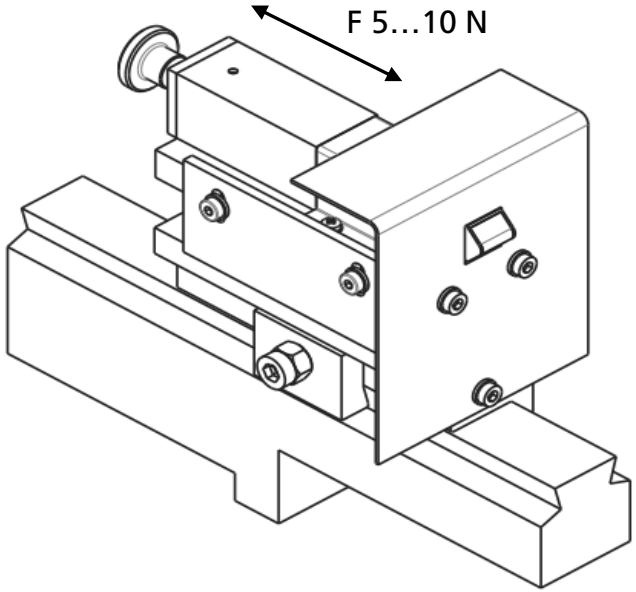
- **Vereinfachter Sensoraufbau** ohne Magnetisierungsspule
- Messung mit und ohne Luftspalt möglich
- **Messung im Prozess** an Nockenwellen **realisierbar**

© Fraunhofer IWU

In-Prozess-Messung der Randzoneneigenschaften

Maschinenintegration





- Messung gegenüber Schleifstelle, dadurch Phasenverschiebung um 180 Grad
- Nachführung Aufmaß und Unrundkontur bei konstanter Anlagekraft erforderlich
- Schutz vor KSS und Späne notwendig

Fazit: Maschinenintegration technisch möglich

© Fraunhofer IWU

Gliederung

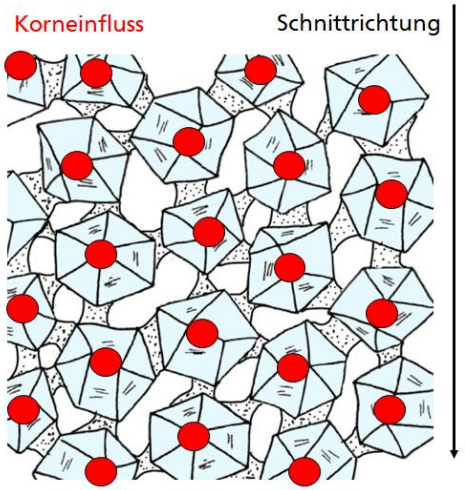
1. Industrie 4.0 – Treiber und Herausforderung
2. Adaptive Bearbeitungsprozesse
3. In-Prozess-Messung der Randzoneneigenschaften
4. **In-Prozess-Bewertung des Werkzeugzustandes**
5. Regelungskonzept
6. Zusammenfassung

© Fraunhofer IWU

In-Prozess-Bewertung des Werkzeugzustandes

Technischer Lösungsansatz

- **Bewertung** der **Werkzeugtopgraphie** und damit des Schneidverhaltens in der Kontaktzone
- Dynamikabschätzung: Schnittgeschwindigkeit 100 m/s
  Körnung Schleifscheibe 150 mesh
  - rund 1 Mio. Impulse pro Sekunde bei mittleren Kornabstand von 0,1 mm
  - Erhöhung der Impulsrate durch stochastische Verteilung der Körner
  - Hochfrequente Abtastung notwendig =>10 Mio. Impulse/s mit mindestens 20 Mio. Samples/s
- **Konventionelle Sensorsignale** (z.B. Spindelleistung) auf Grund der Trägheit **ungeeignet**
- Verfügbare AE-Systeme sind ausgelegt für Anschnitt- oder Kollisionsüberwachung
  → z.B. System der Fa. Nordmann mit 1.000 Samples/s

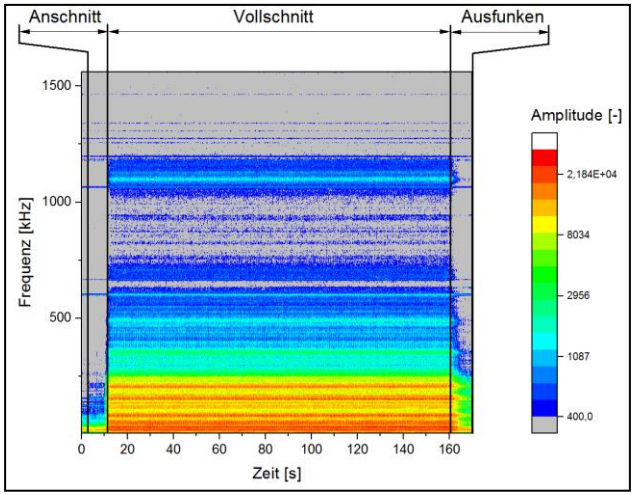


© Fraunhofer IWU

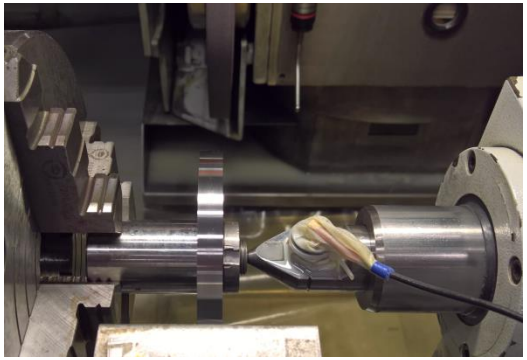
In-Prozess-Bewertung des Werkzeugzustandes

Messprinzip und Sensorpositionierung

- Neue Generation von AE-Systemen verfügbar
  - Körperschallmessung mit 4 Kanäle zu je 25 Mio. Samples/s
  - **Frequenzanalyse in Echtzeit** → Abstand Spektrum zu Spektrum von rund 40 µs
  - Generierung eines 3D-Prozessabbildes
  - Darstellung spezifischer Frequenzanteile
- **Positionierung des Piezosensors** so nah wie möglich **am Entstehungsort des Körperschalls**
  - Drehendes Werkzeug und Werkstück als Herausforderung
  - **Eine Lösung**: Sensor auf Zentrierspitze => direkter Kontakt zum Werkstück



3D Prozessabbild Einstechschleifen



Sensorpositionierung

© Fraunhofer IWU

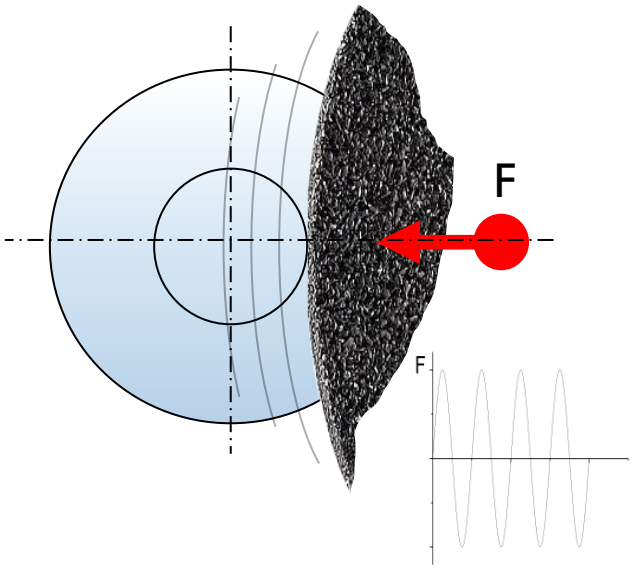
Fraunhofer IWU

In-Prozess-Bewertung des Werkzeugzustandes

Bewertung Werkzeugunwucht

- **Untersuchungsgegenstand**
  - Analyse des Einflusses der Werkzeugunwucht auf das Körperschallsignal
- **Annahmen**
  - Sinusförmiger Krafteinfluss durch Werkzeugunwucht
  - Dominanz der Frequenz der Werkzeugdrehzahl
- **Versuchsparameter**
  - Werkstück: Ø 100 mm x 10 mm Breite
  - Werkstoff: 100Cr6 vergütet auf 56 HRC
  - Schnittgeschwindigkeit

    v_c = 35 m/s (1.514 min^{-1})
  - Bauteildrehzahl n_w = 80 min^{-1}



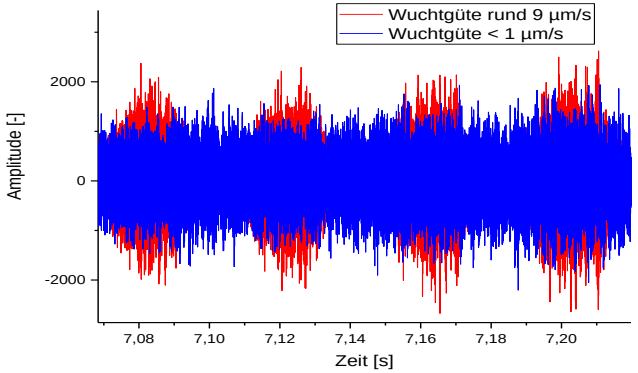
© Fraunhofer IWU

Fraunhofer IWU

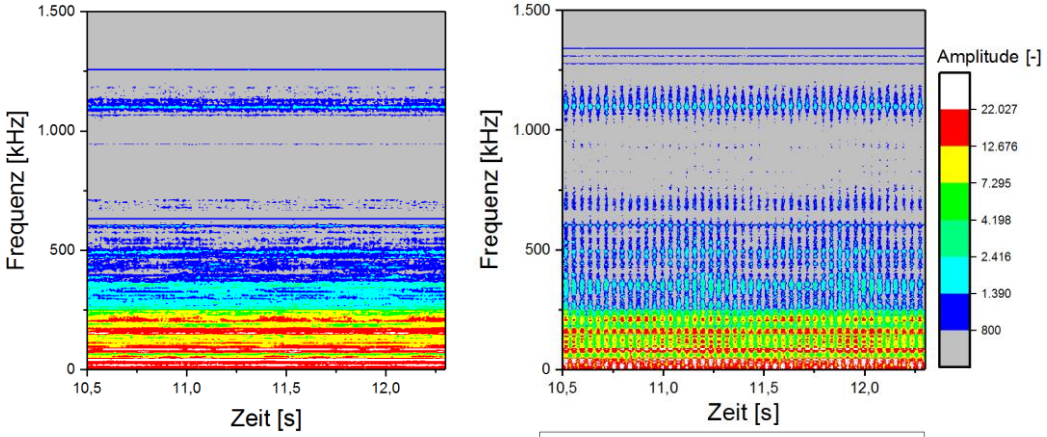
In-Prozess-Bewertung des Werkzeugzustandes

Ergebnisse und Korrelationen

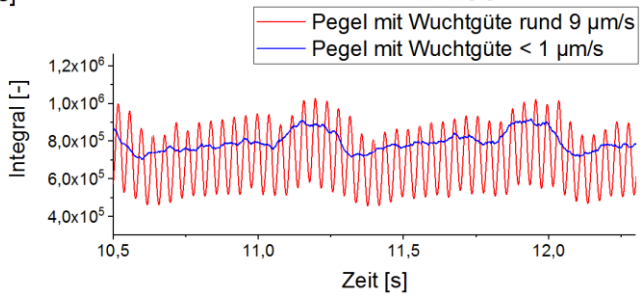
- Unwucht bildet sich im Körperschallsignal ab



- **Prozessabbild** mit **Auffälligkeiten**



- Integral pro Spektrum → Zusammenfassung der Spektralwerte
- Werteverlauf des **Integrals zeigt deutlichen sinusförmigen Verlauf** bei Wuchtgüte von rund 9 µm/s

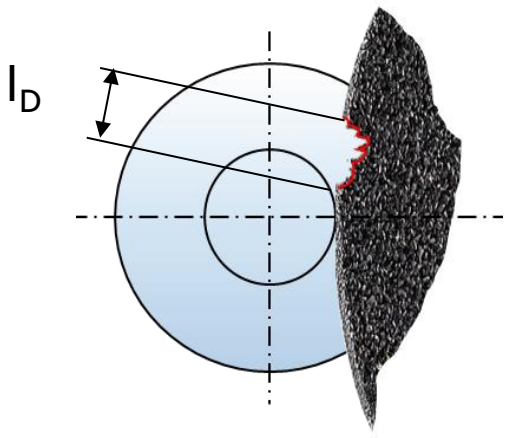


© Fraunhofer IWU

In-Prozess-Bewertung des Werkzeugzustandes

Bewertung Werkzeugzustand

- **Untersuchungsgegenstand**
  - Analyse des Einflusses eines Werkzeugdefektes auf das Körperschallsignal
- **Annahmen**
  - kurzzeitiges Einbrechen des Kraftverlaufes
  - Impuls bei Wiedereintritt des Werkzeuges
- **Versuchsparameter**
  - Analog wie bei Unwucht
  - Werkzeugdefekte über gesamte Breite der Schleifscheibe
  - Defektlängen l_D [2, 4, 6, 8] mm



© Fraunhofer IWU

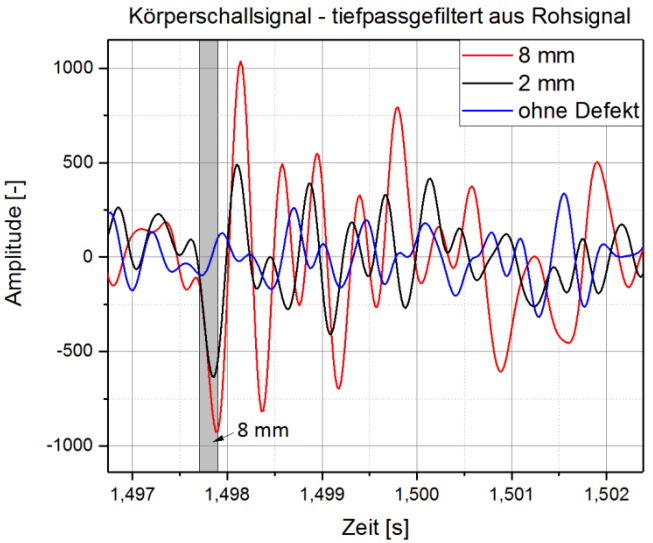
In-Prozess-Bewertung des Werkzeugzustandes

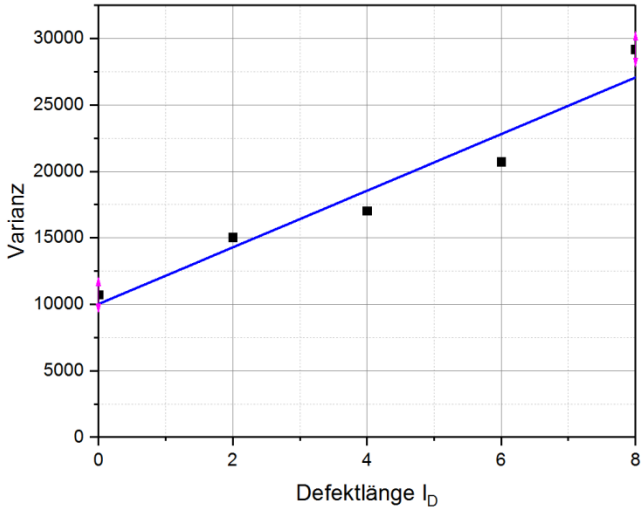
Ergebnisse und Korrelationen

- Filterung des Rohsignals mittels Tiefpassfilter (f_g = 4 kHz) → deutliche Signaldifferenzen
- **Amplitudenerhöhung des Körperschall-signals** durch den Krafteinfluss der Defektstellen
- Differenzierung der Einflüsse durch statistische **Auswertung der Varianz** (mittlere quadratische Abweichung vom arithmetischen Mittelwert)

$$s^2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2$$

- **Werkzeugdefekte sind detektier- und differenzierbar**
- **Aktuell:** Übertragung des Mess- und Auswertungsprinzips zur Bewertung des Schneidverhaltens und Werkzeugverschleißes
- **Vision:** Ableitung von Korrelationen zu Bauteileigenschaften





© Fraunhofer IWU

Fraunhofer IWU

Gliederung

1. Industrie 4.0 – Treiber und Herausforderung
2. Adaptive Bearbeitungsprozesse
3. In-Prozess-Messung der Randzoneneigenschaften
4. In-Prozess-Bewertung des Werkzeugzustandes
5. **Regelungskonzept**
6. Zusammenfassung

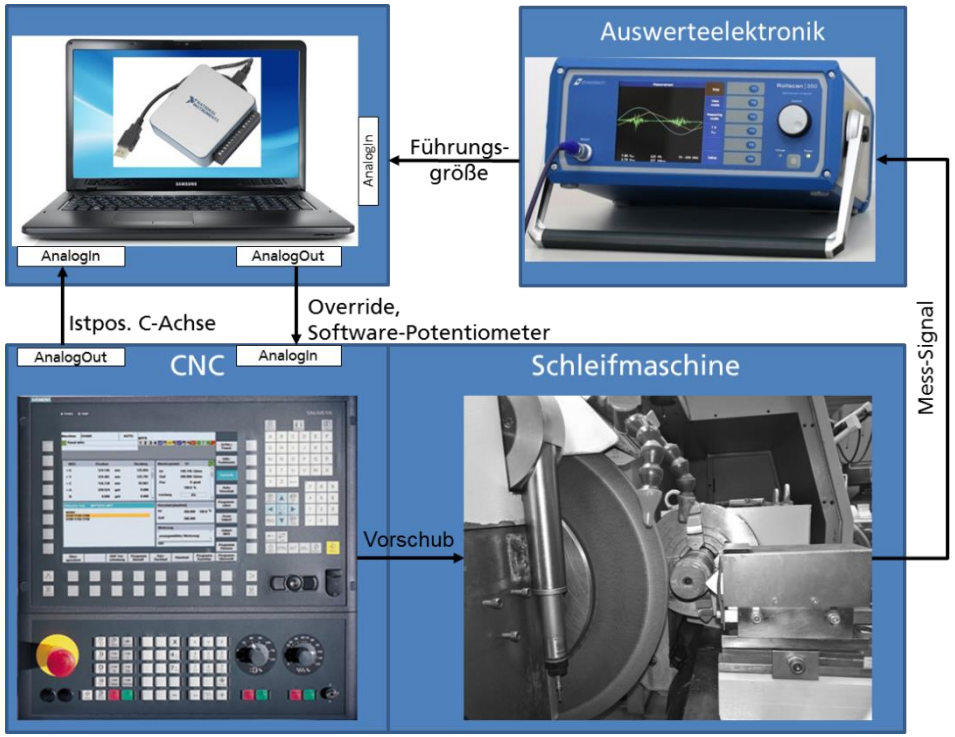
© Fraunhofer IWU

Regelungskonzept

Steuerungsintegration

- Umsetzung und Visualisierung mit LabView-Anwendung auf **externem PC**
- Einsatz von PI-Reglern, weitere Regelungstypen möglich
- Führungsgröße als Analogeingang
- Stellgröße als Analogausgang
  => wirkt direkt auf Override
  (Vorschub und Drehzahl)

- **Vorteile**
  - Geringer Aufwand
  - Universell einsetzbar
- **Nachteil**
  - PLC-Taktzeit (20 ms)

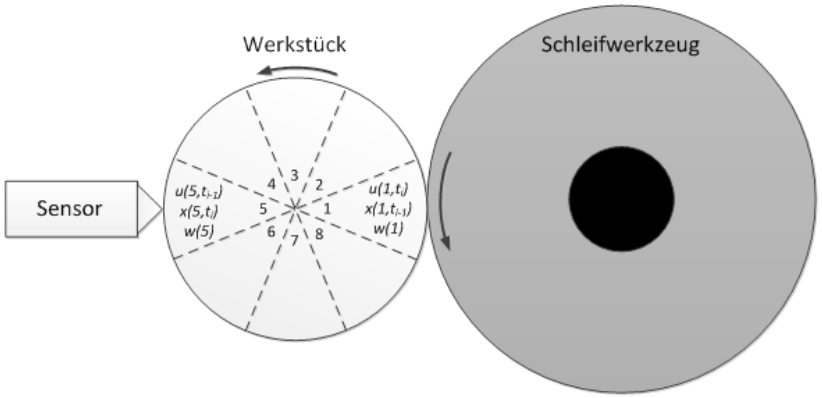


Regelungskonzept

© Fraunhofer IWU

Regelungskonzept

Prinzip für Barkhausenrauschen (Phasenverschiebung)



$$u_{int}(n,t_i) = u_{int}(n,t_{i-1}) + K_{int} \cdot \left(w(n) - x(n,t_i)\right)$$

$$u_{prop}(n,t_i) = K_{prop} \cdot \left(w(n) - x(n,t_i)\right)$$

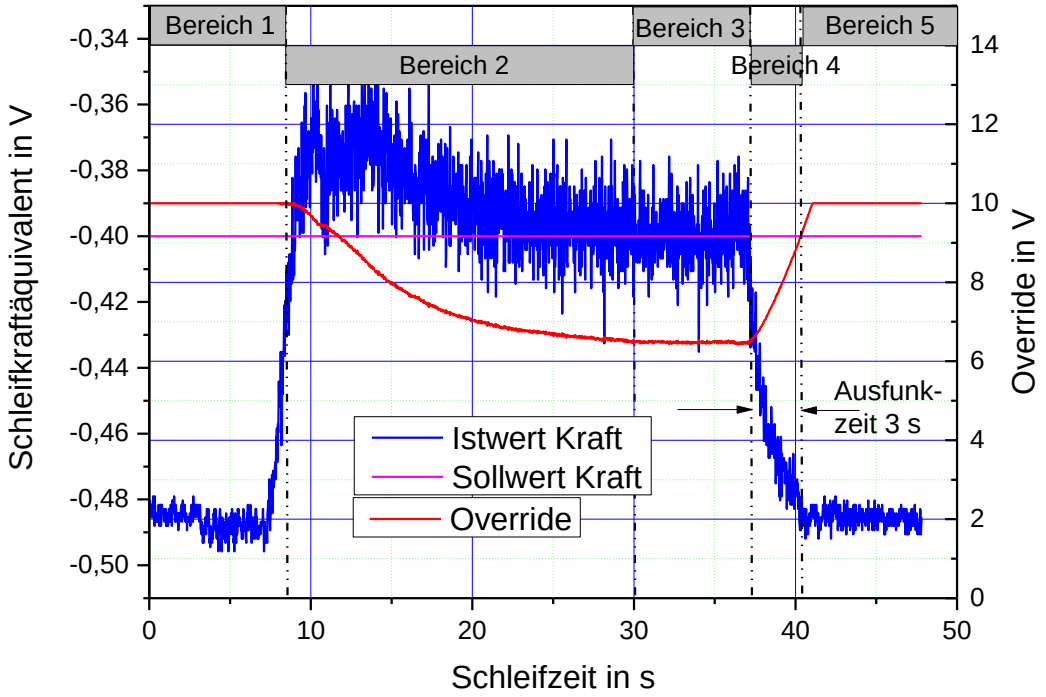
$$u(n,t_i) = u_{int}(n,t_i) + u_{prop}(n,t_i)$$

- **Segmentierung des Werkstückes** in gleiche Bereiche mit variabler Größe
- Jedem Segment kann ein separater PI-Regler zugewiesen werden
- Jedes Segment entspricht einem Ringpufferelement, das die letzten Reglervariablen speichert.
- Der **Vorschubsollwert** wird an der Messposition vom jeweiligen PI-Regler **errechnet und winkelversetzt** (Phasenverschiebung) **ausgegeben**
- Der Vorschubsollwert und I-Anteil der ersten Werkstückumdrehung wird mit 100% als Startwert initialisiert

© Fraunhofer IWU

Regelungskonzept

Funktionsnachweis mit Schleifkraft als Führungsgröße



Bereiche

1 – Anfunken

2 – Regelung aktiv, Sollwert noch nicht erreicht

3 – Sollwert erreicht

4 – Ausfunken

5 - Spindelrückzug

=> **Adaption der Regelung auf Barkhausenrauschen und hochfrequenten Körperschall als Führungsgrößen realisierbar**

© Fraunhofer IWU

Fraunhofer IWU

Gliederung

1. Industrie 4.0 – Treiber und Herausforderung
2. Adaptive Bearbeitungsprozesse
3. In-Prozess-Messung der Randzoneneigenschaften
4. In-Prozess-Bewertung des Werkzeugzustandes
5. Regelungskonzept
6. **Zusammenfassung**

© Fraunhofer IWU

Zusammenfassung

- Neue technische Möglichkeiten bei der Erfassung und Verarbeitung von Prozessdaten ermöglichen **adaptive Bearbeitungsprozesse**
- Voraussetzung dafür ist die **Kombination von Prozessdaten mit Prozesswissen** zur Überwachung und Regelung von Fertigungsprozessen (Industrie 4.0)
- **Robustheit** von Zerspanungsprozessen **steigt**
- **Beherrschung steigender Fertigungs- und Qualitätsanforderungen**
- Mit dem **Barkhausenrauschen** und **hochfrequenten Körperschall** stehen **neue Messtechniken zur Verfügung**, welche eine **In-Prozess-Bewertung des Werkzeug- und Randzonenzustandes** beim Schleifen gestattet
- Mit Einsatz dieser Messtechnik als Basis für eine **Prozessregelung** sind **signifikante Potenziale** hinsichtlich **Produktivität, Qualität** und **Kosten** erschließbar

© Fraunhofer IWU

Vielen Dank
für Ihre Aufmerksamkeit!

Kontaktdaten:

Carsten Hochmuth
Reichenhainer Str. 88
09126 Chemnitz
Tel: 0371 / 5397 1811
carsten.hochmuth@iwu.fraunhofer.de

© Fraunhofer IWU

Fraunhofer IWU