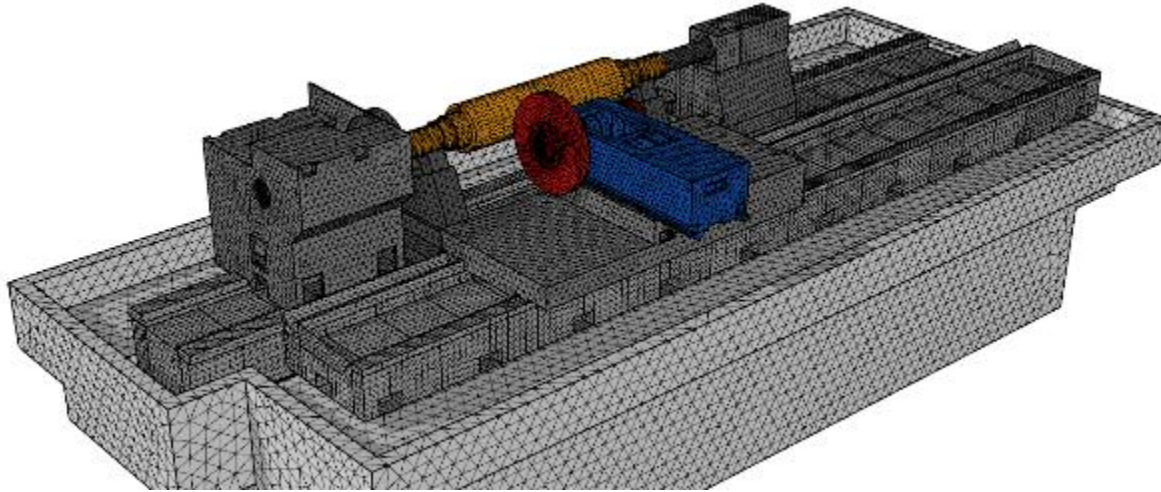


**Dynamische Prozessstabilität in der Hartfeinbearbeitung**  
– Strategien zur Schwingungsanalyse und -vermeidung –

Seminar: Feinbearbeitung von Zahnrädern  
Aachen, 06. November 2019

**Dr.-Ing. Severin Hannig**  
**planlauf GmbH, Jülich**



**Produkte und Dienstleistungen:  
Berechnung**

- Berechnung der Strukturmechanik
- Mechatroniksimulation
- Zerspansimulation
- Fundamentanalyse
- Werkzeugberechnung

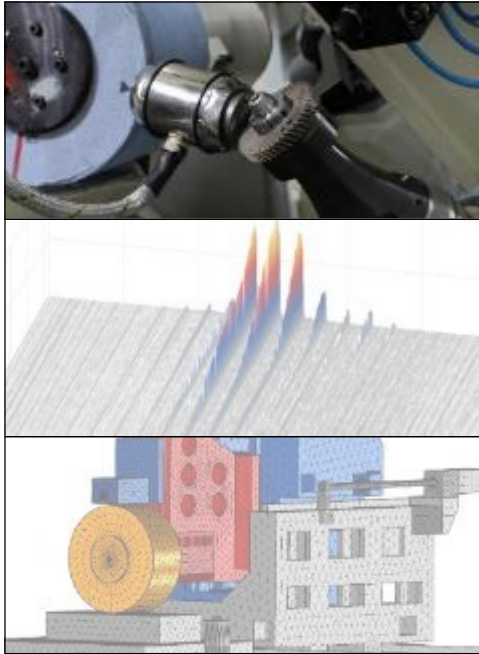
**Messung**

- Verlagerungen / Zerspankräfte
- Schwingungen / Steifigkeiten
- Modalanalyse / Frequenzgänge
- Geometrie / dyn. Spindelrundlauf
- Boden- / Fundamentanalysen
- Langzeitüberwachung von Maschinen

**Entwicklung**

- Schwingungserreger und -dämpfer
- Messelektronik
- Mess- und Berechnungsprogramme





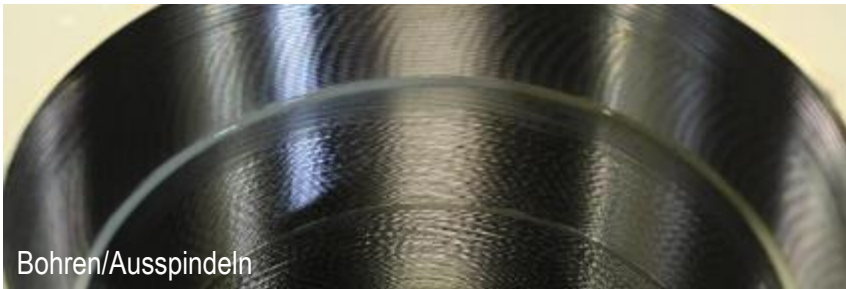
- Schwingungsarten & Ursachentrennung
- Problembeispiele & Analysestrategien
- Dynamikoptimierung & Schwingungsvermeidung



Fräsen



Drehen



Bohren/Ausspindeln



Schleifen

## Fremderregte Schwingungen

### INTERN:

- Unwucht-, Antriebs-, Getriebe- oder Riemenschwingung
- Lagerschaden, Hydraulikpulsation, sonstige Aggregate

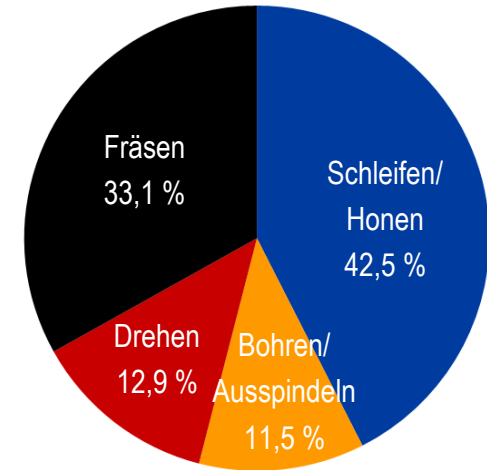
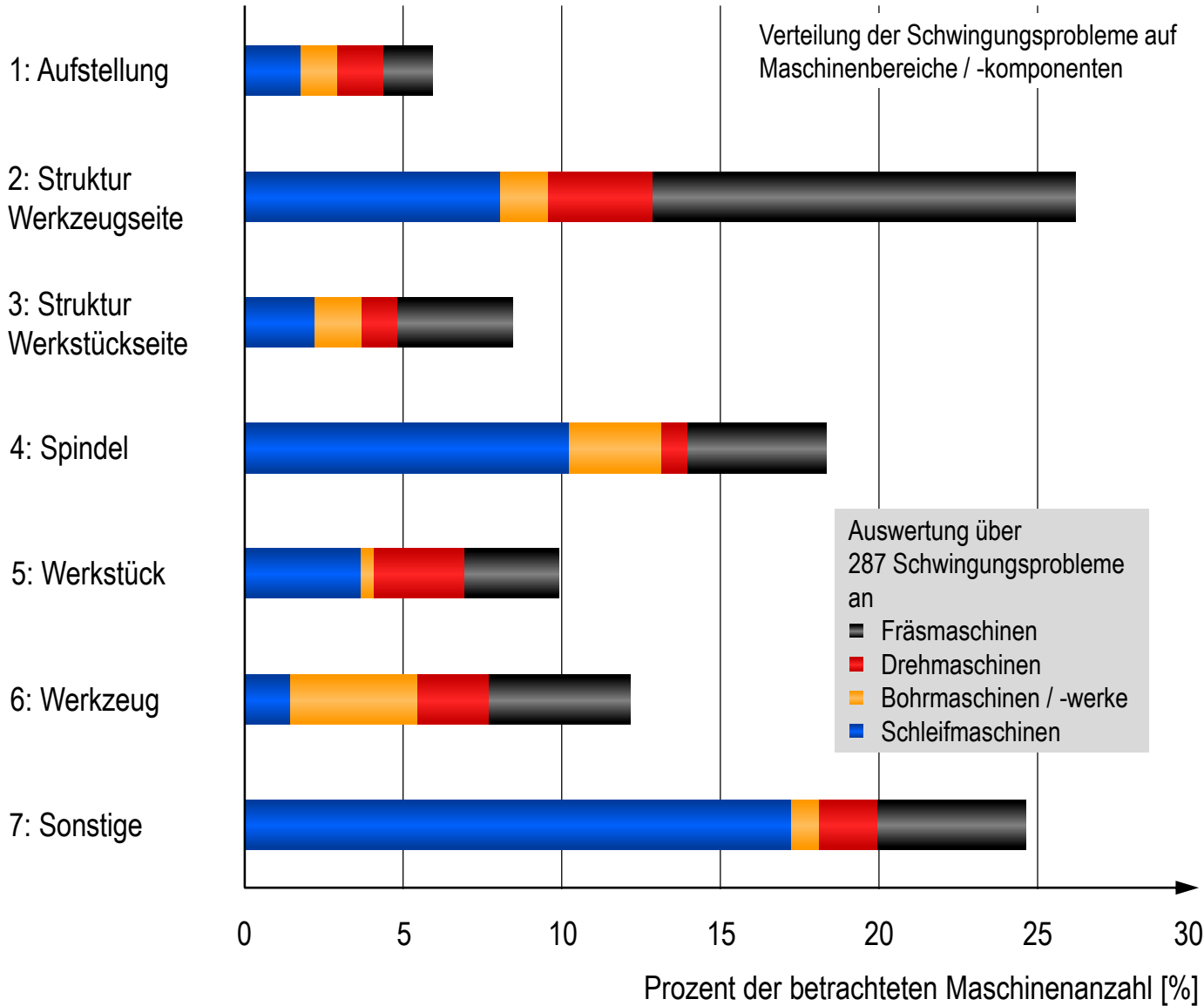
### EXTERN:

- Nachbarmaschinen
- Stapler-, Straßen- oder Bahnverkehr

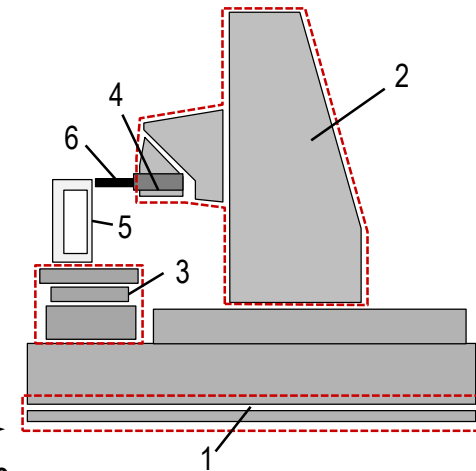
## Selbsterregte Schwingungen / Resonanz

- Überschwingen nach dynamischen Kraftänderungen
- Werkstückseitiger Regenerativeffekt (Ratterschwingungen)
- Schleifscheibenseitiger Regenerativeffekt (Ratterschwingungen)
- Welligkeitsabbildung nach selbsterregten Schwingungen beim Abrichten

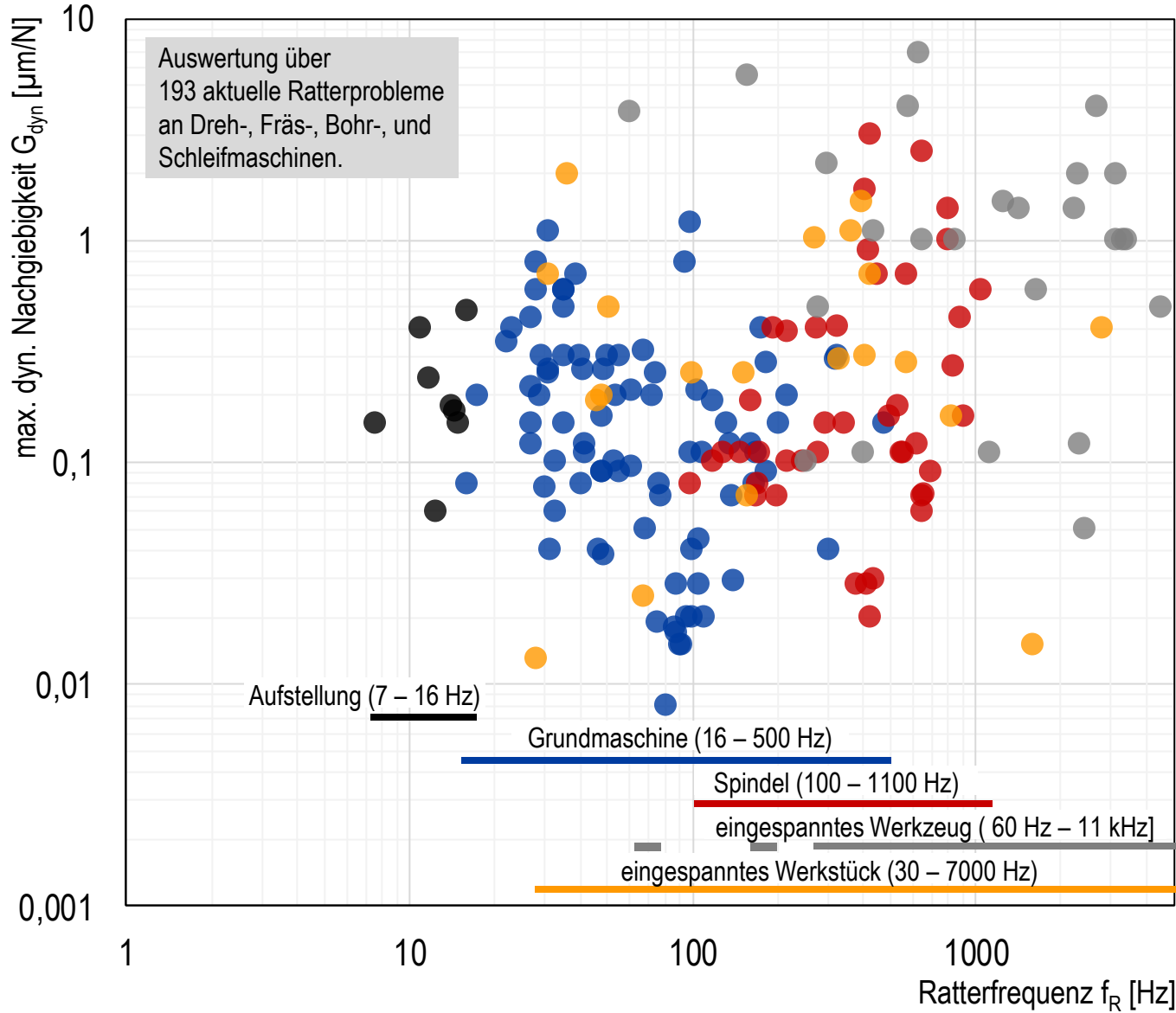
# Verteilung der Schwingungsprobleme auf Prozessarten und Maschinenbereiche bzw. -komponenten



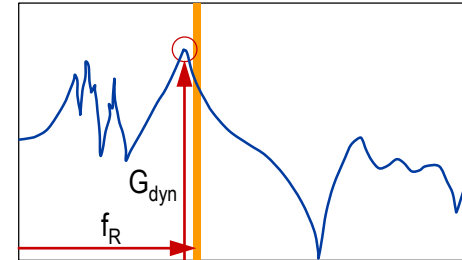
Verteilung der Schwingungsprobleme auf die Prozessarten



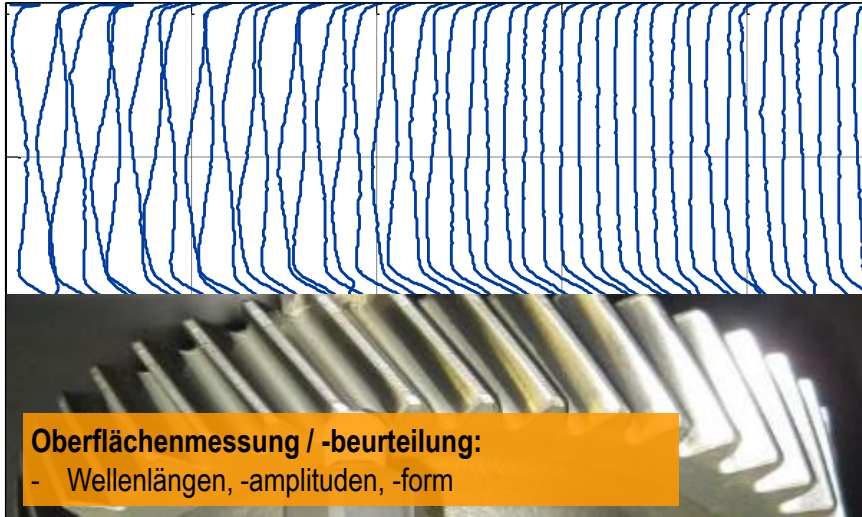
# Schwingungsprobleme an Produktionsmaschinen können in einem großen Frequenz- und Nachgiebigkeitsbereich auftreten



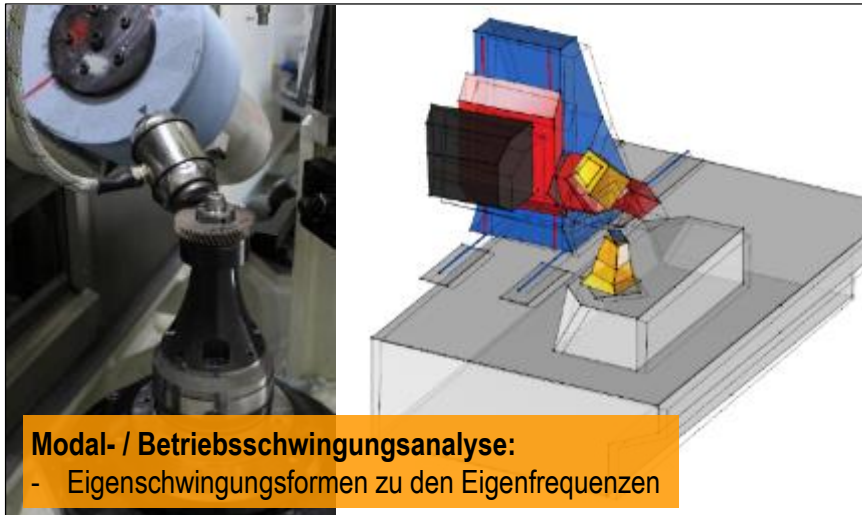
Dargestellt ist die verursachende maximale dynamische Nachgiebigkeit über der resultierenden Ratterfrequenz für eine Auswahl von Problemuntersuchungen an Produktionsmaschinen.



4 Beispiele von Werkzeugen bzw. Werkstücken zeigten Ratterfrequenzen oberhalb von 5 kHz.

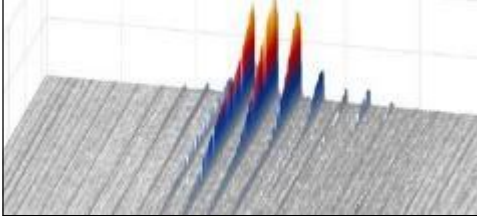


Ursache





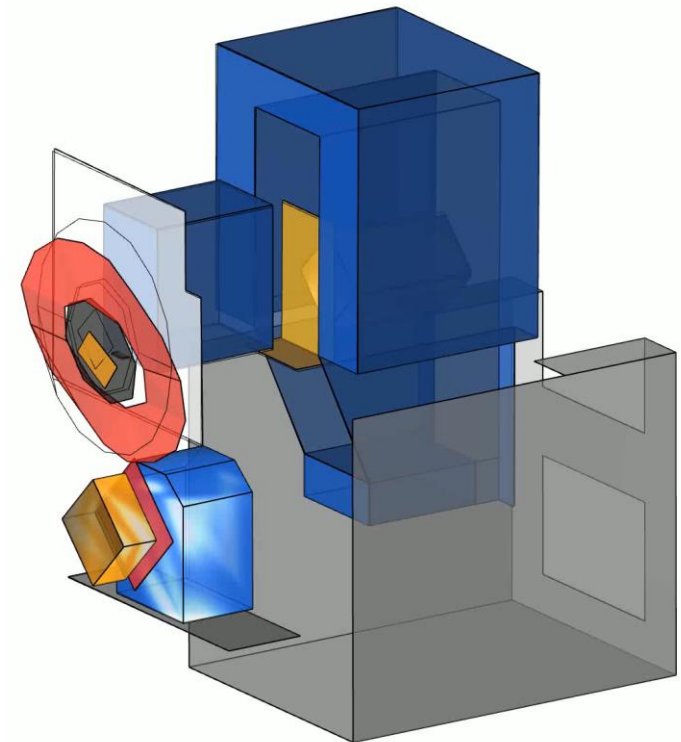
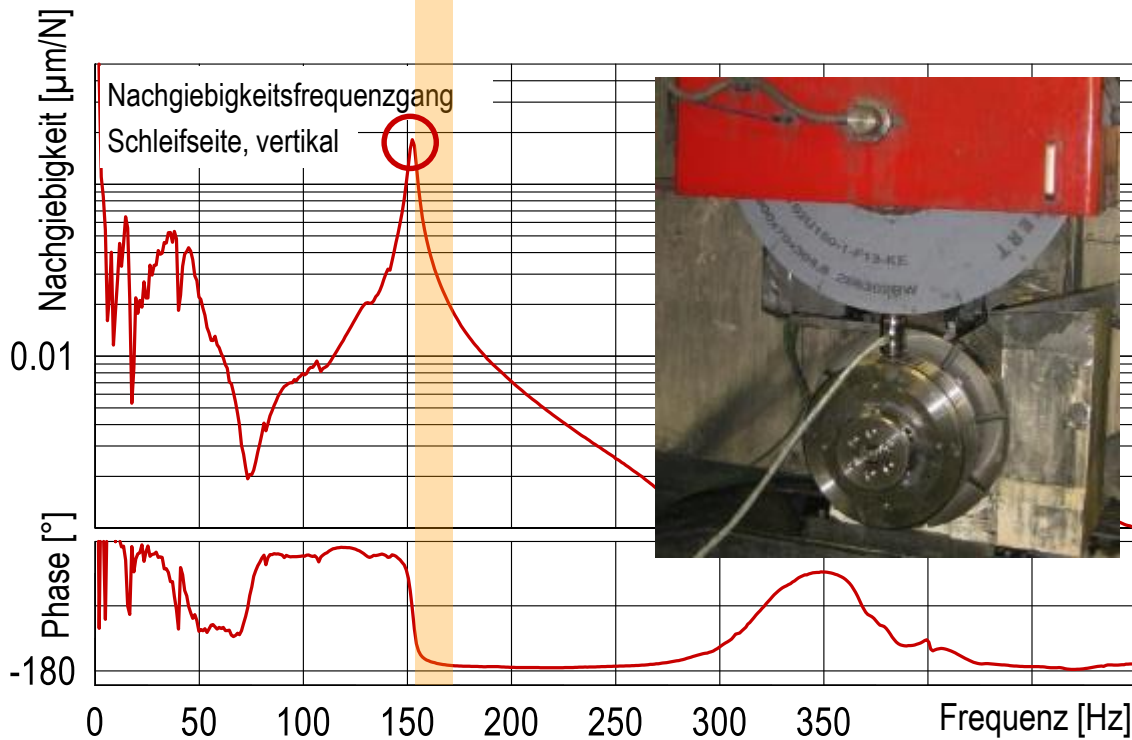
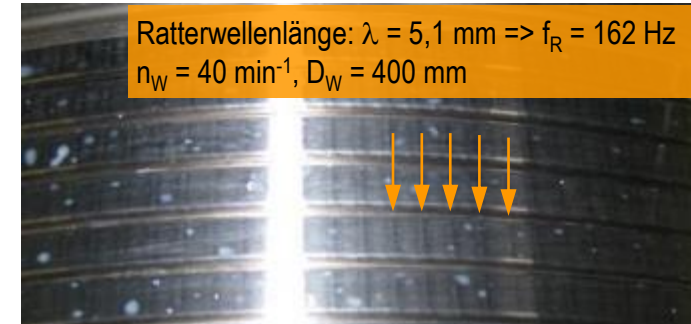
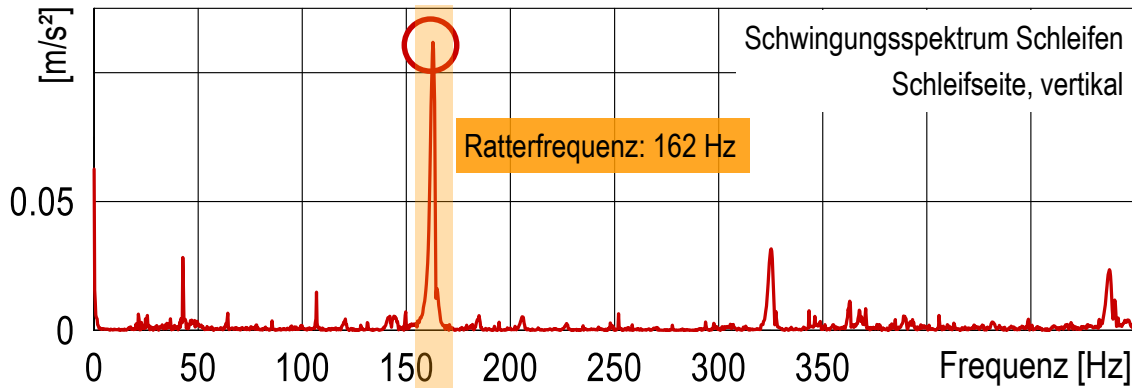
- Schwingungsarten & Ursachentrennung



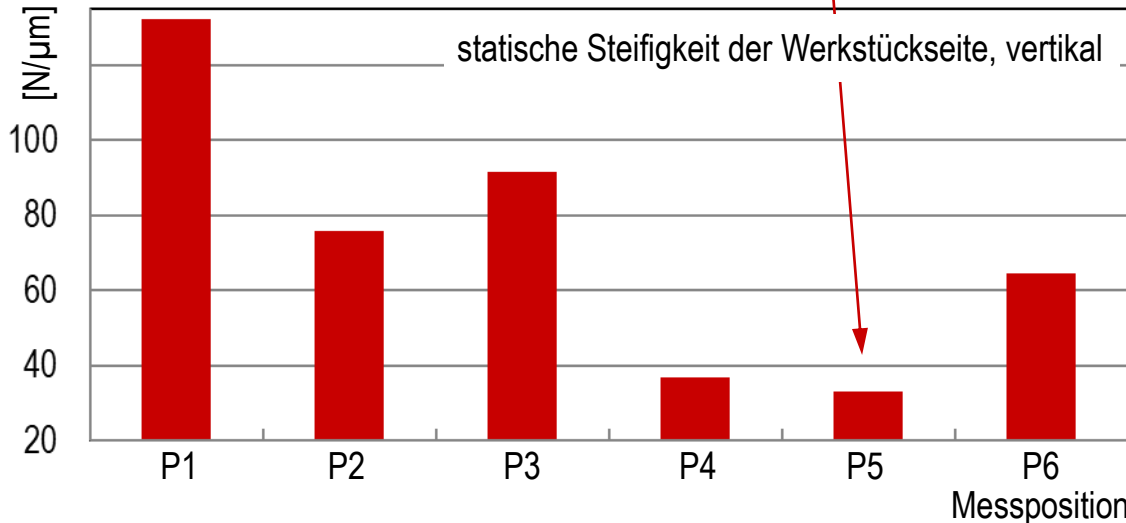
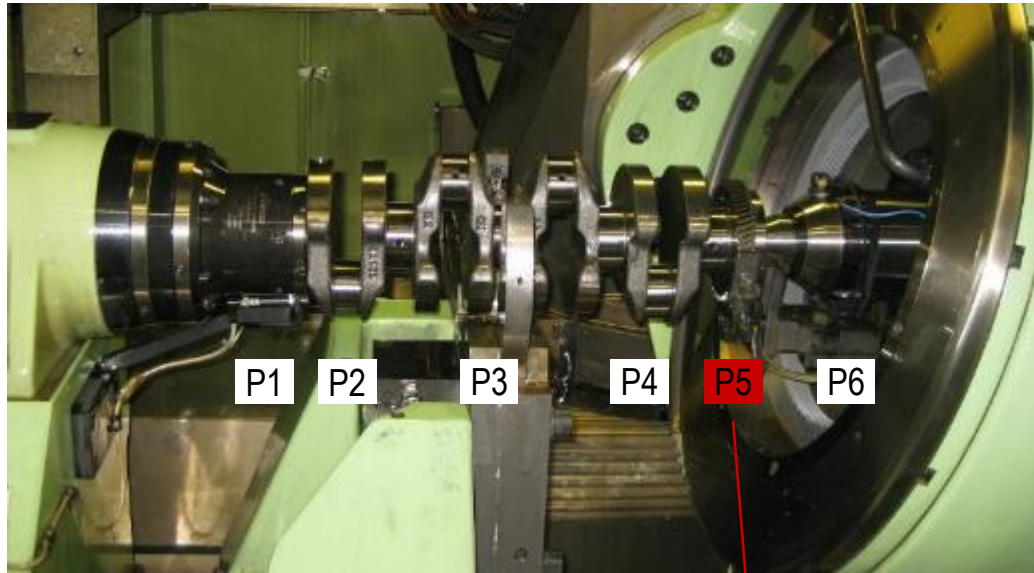
- Problembeispiele & Analysestrategien



- Dynamikoptimierung & Schwingungsvermeidung



Eigenschwingungsform 154 Hz



## Oberflächenbeurteilung

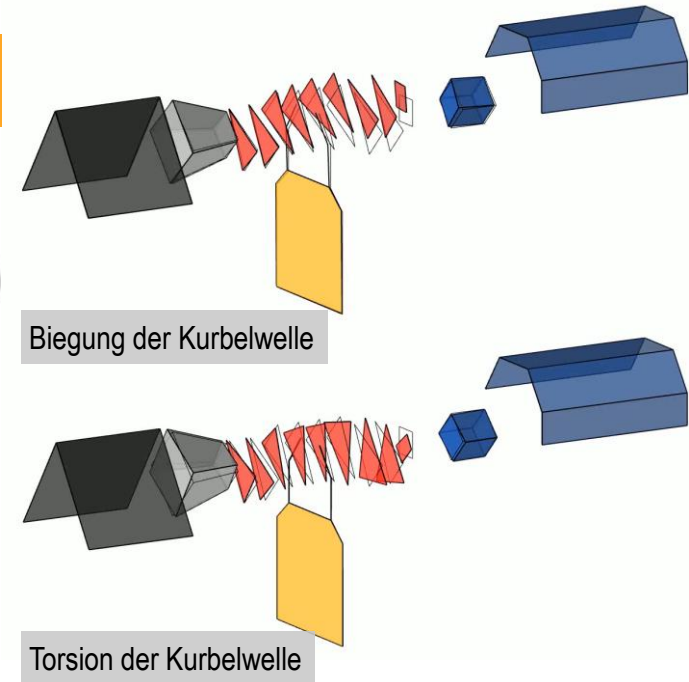
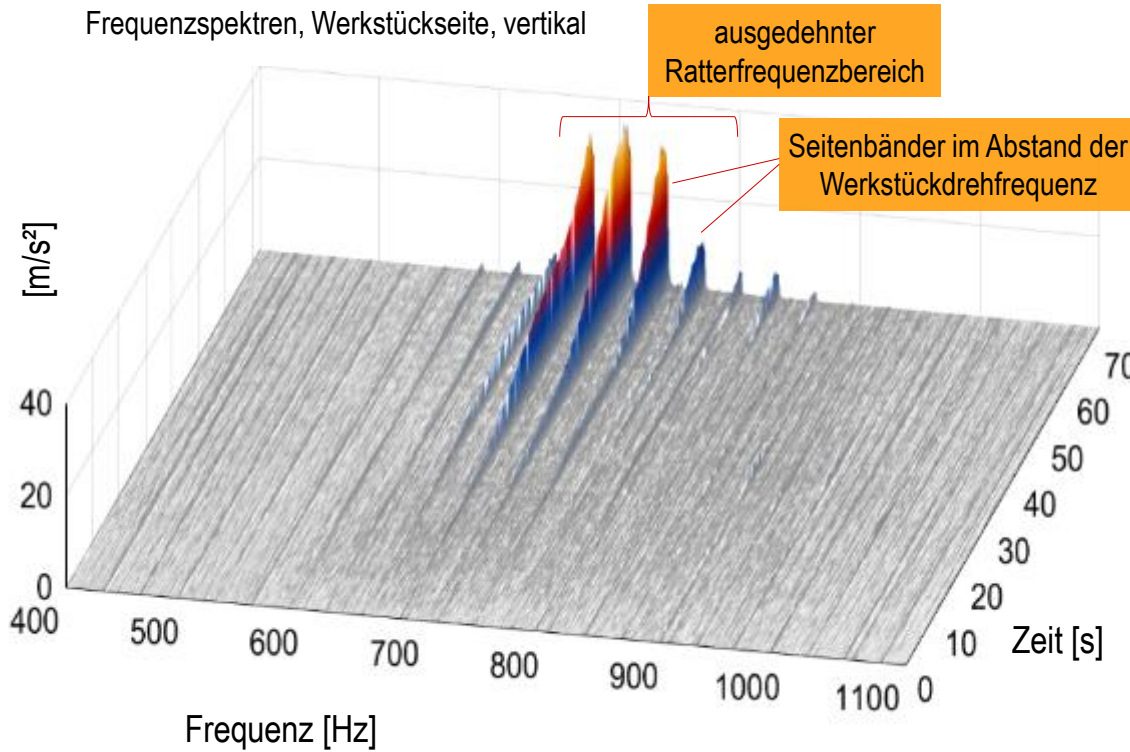
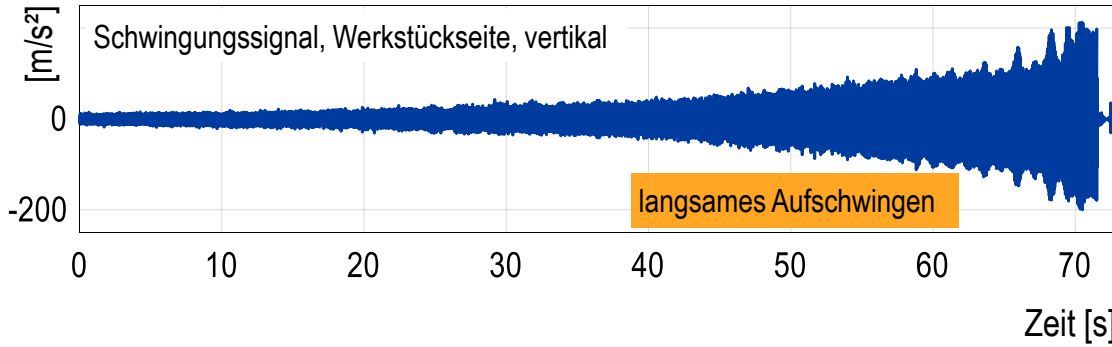
- Wellenlängen sind auf der Oberfläche meist nicht direkt ablesbar
- Verwechslung mit Unwucht-/Kinematikproblemen möglich

## Schwingungsmessung

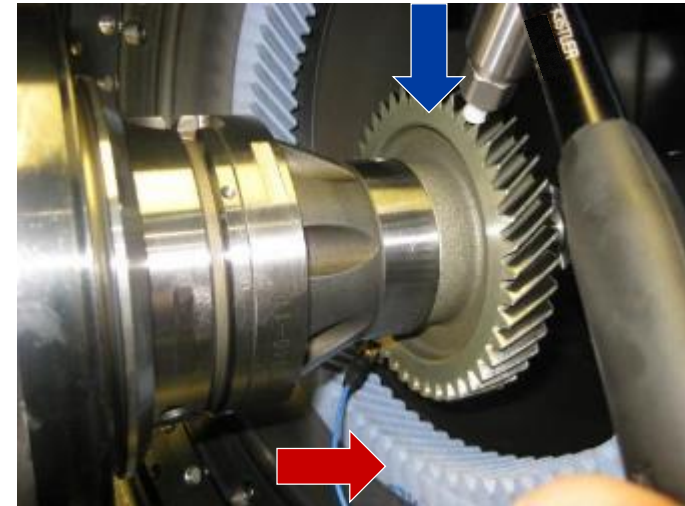
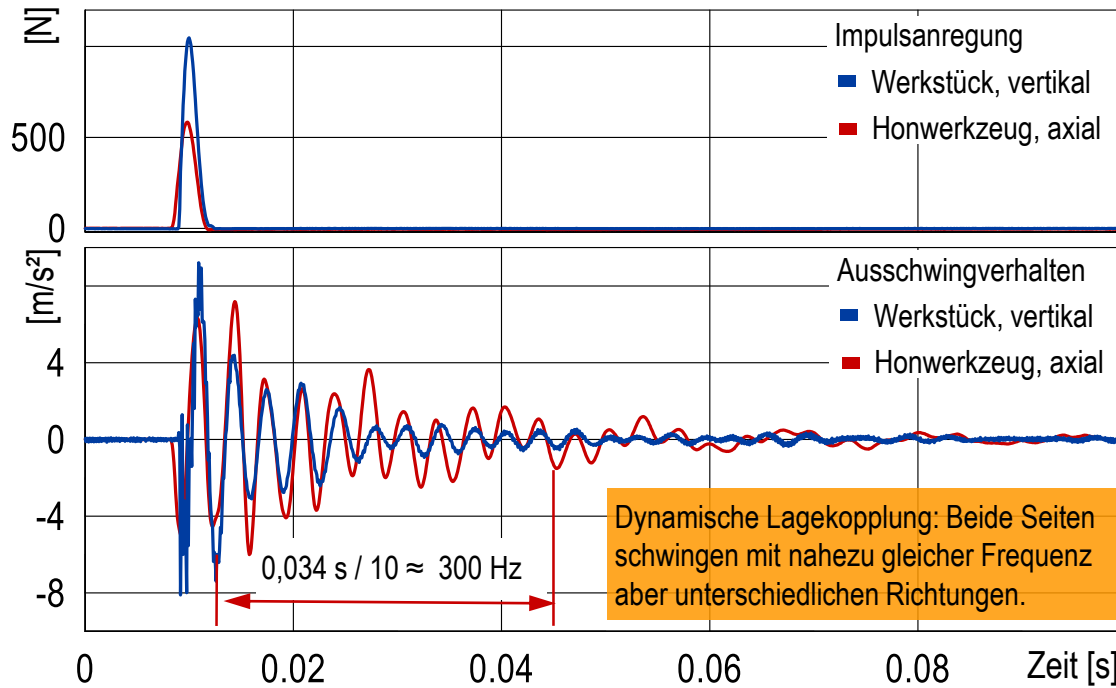
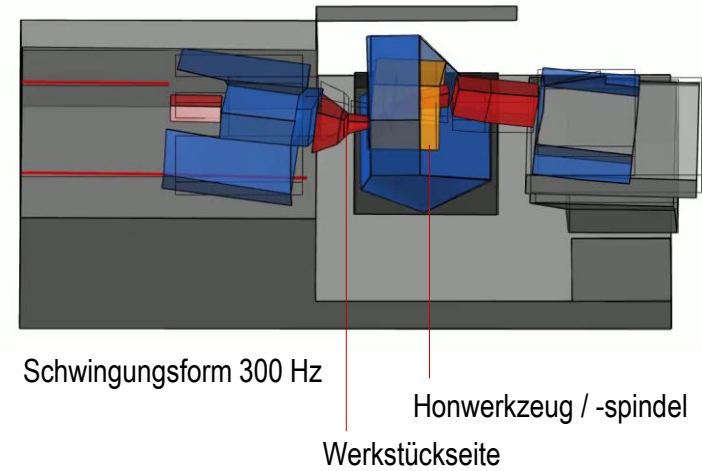
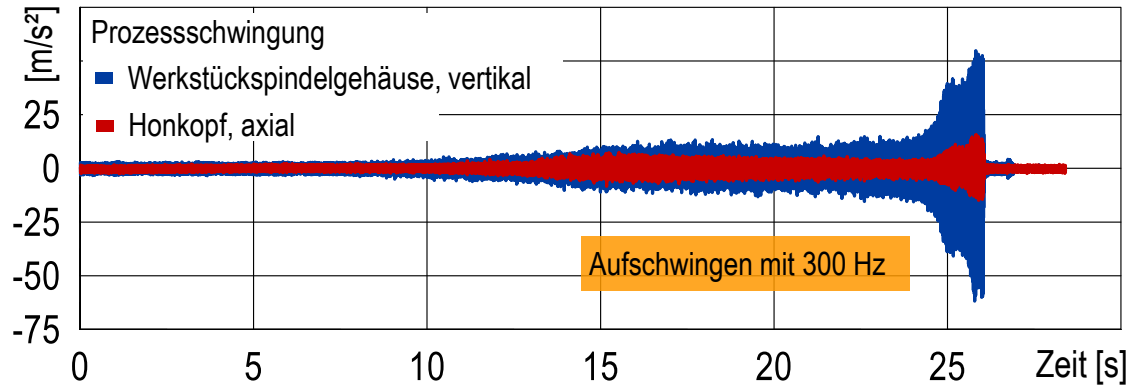
- Ratterfrequenzen können in Abhängigkeit des Zahneingriffs bzw. der Einspannbedingungen schwanken / teilen sich in Drehzahlvielfache auf.
- Abrichtprozess kann bereits instabil verlaufen, was auf dem Schleifwerkzeug nur schwer nachweisbar ist

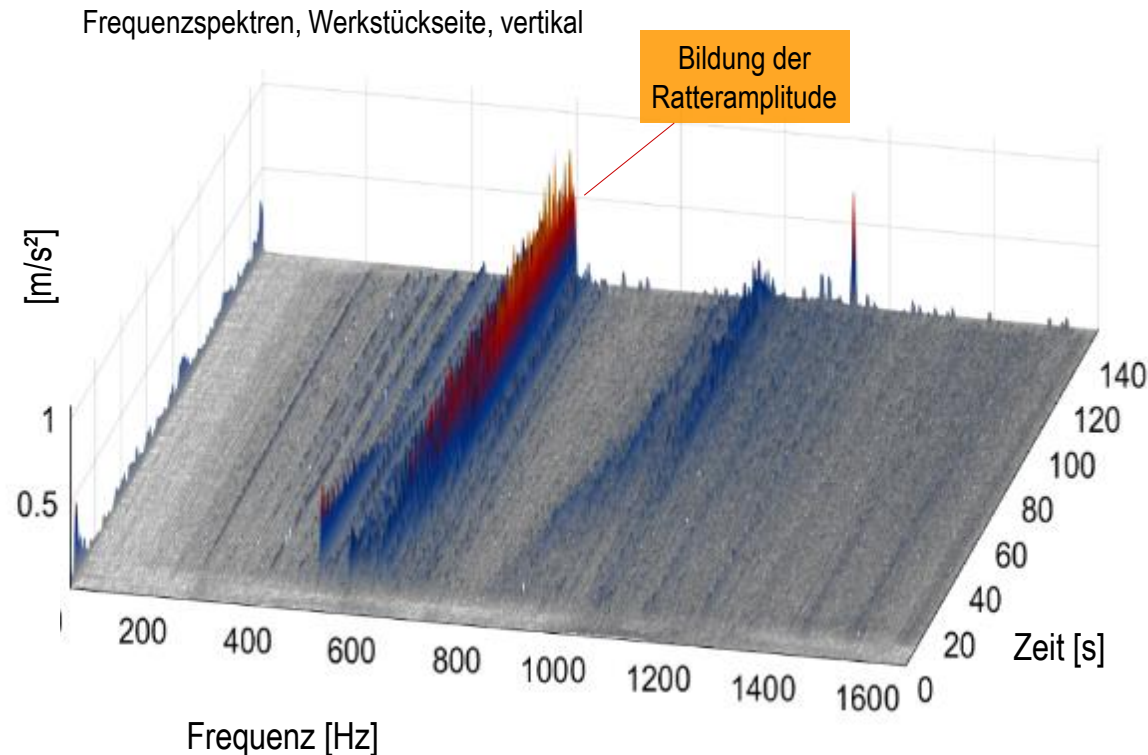
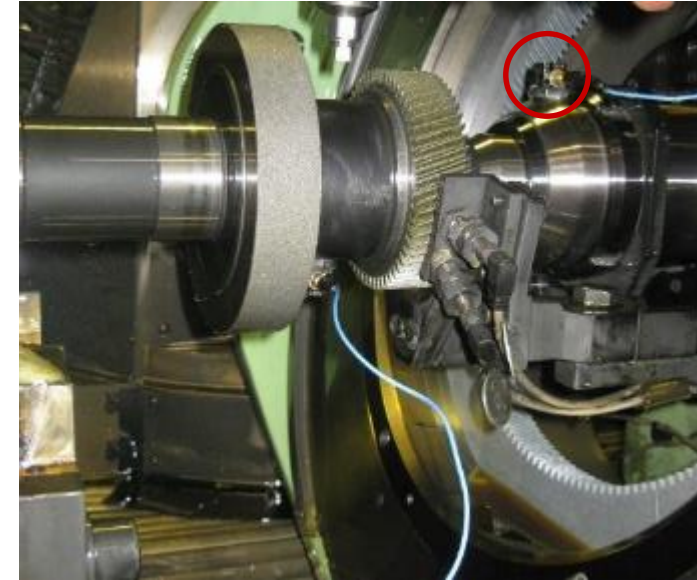
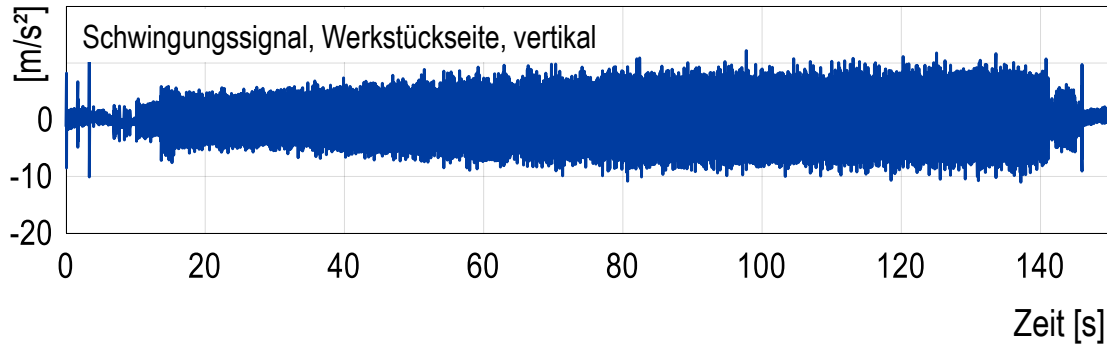
## Schwingungsformen

- Starke Kopplung zwischen Werkzeug und Werkstück kann die Struktureigenfrequenzen verschieben
- Räumliche Ausrichtung der Prozesskräfte kann zu gekoppelten Schwingungen der Werkzeug- und der Werkstückseite führen



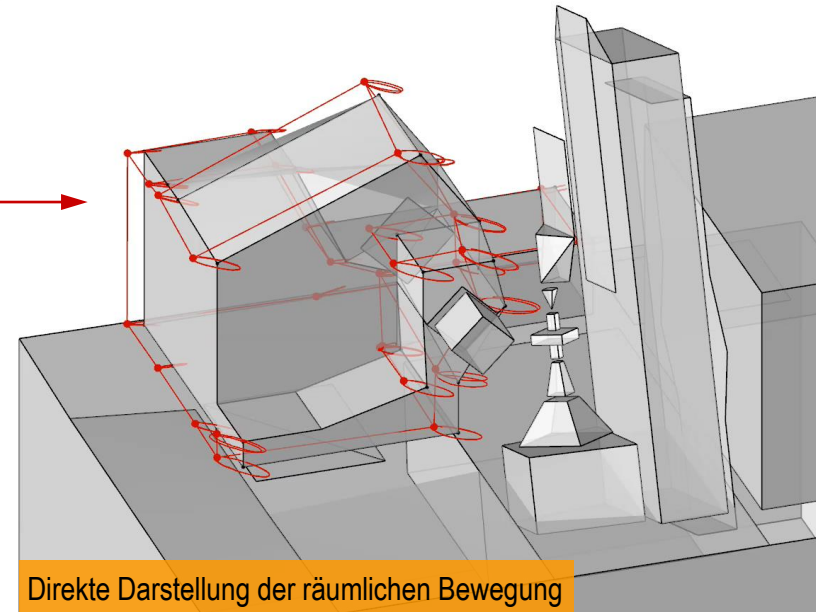
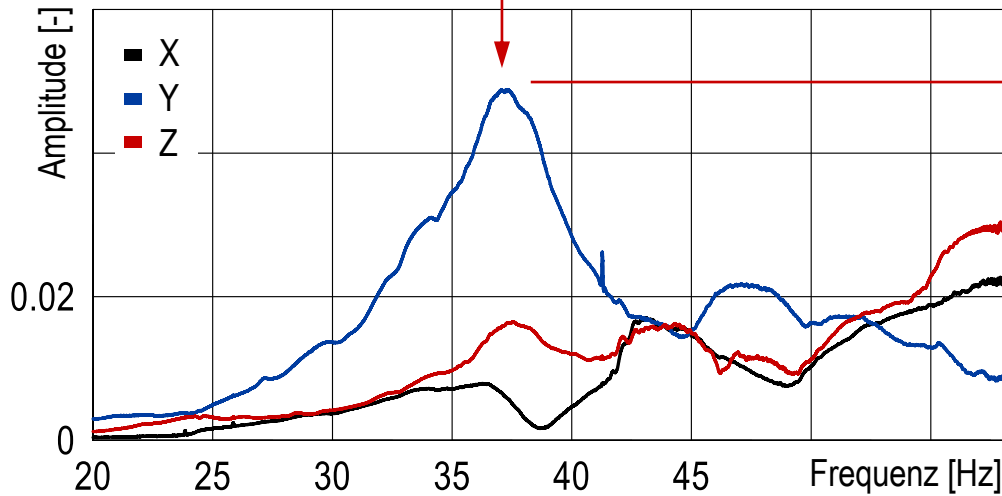
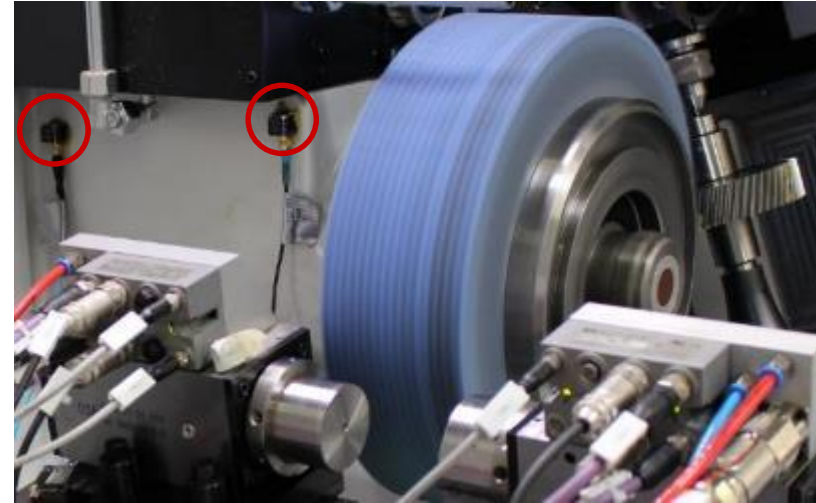
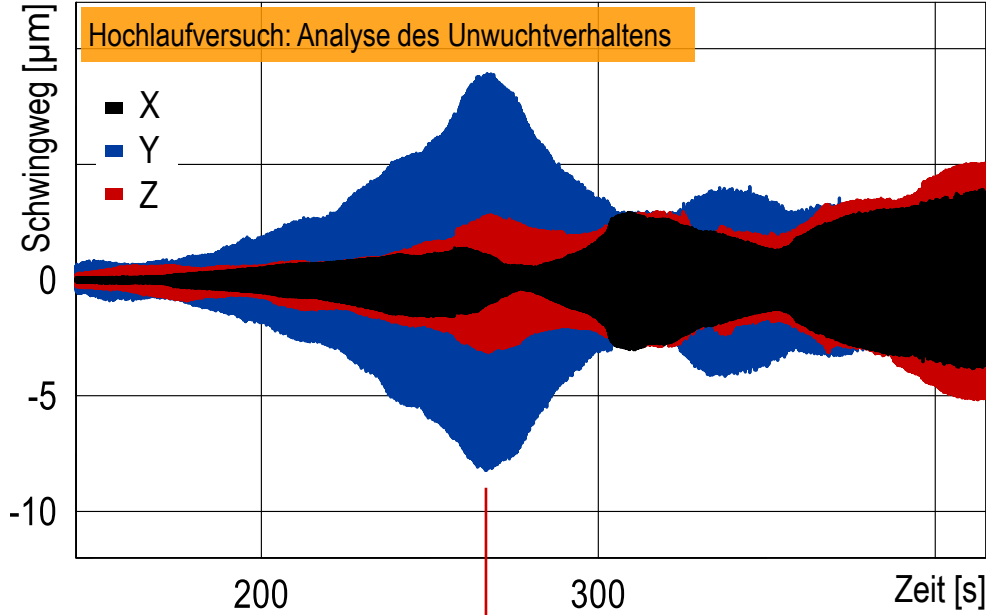
# Sonderfall: Kopplung einer werkstückseitigen Biegeeigenschwingung mit einer Axialschwingung der Werkzeugseite



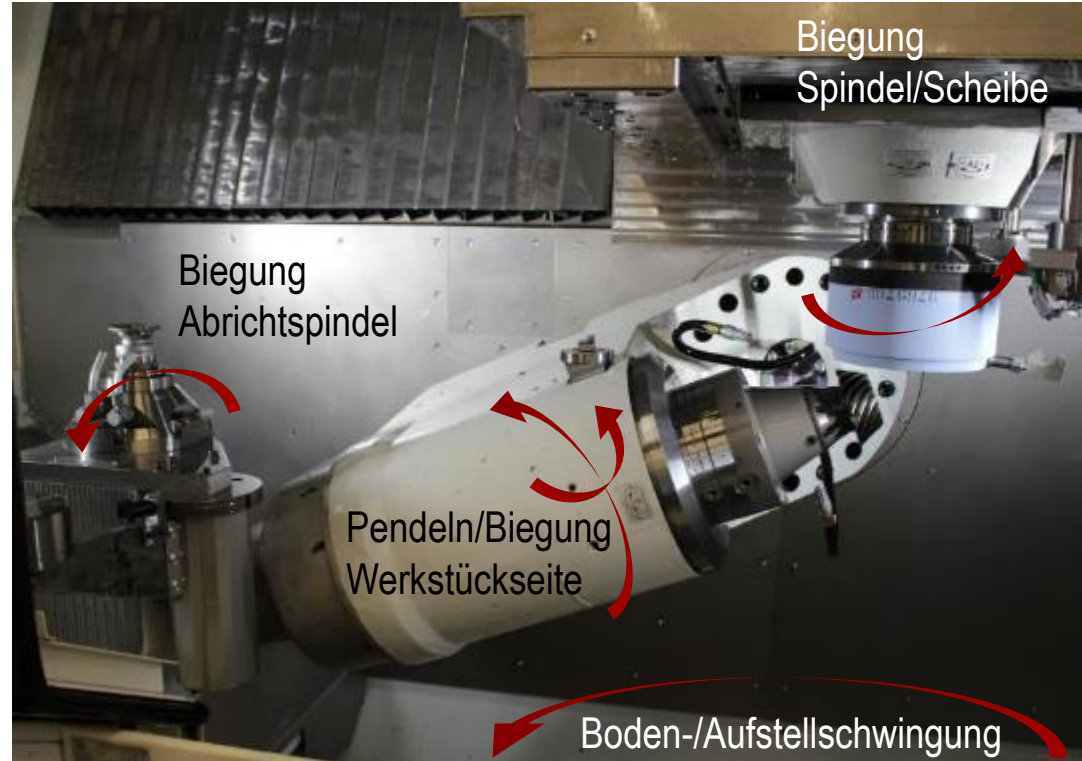
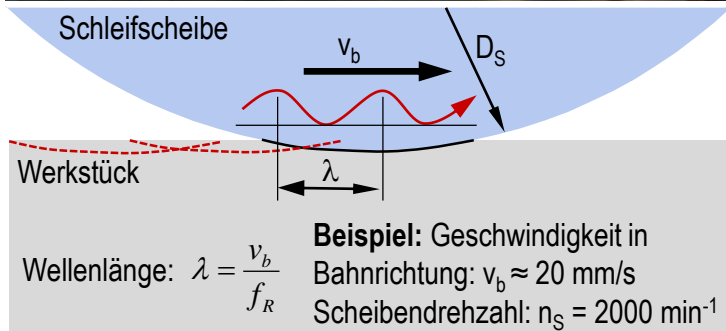


## Schwingungscharakteristik

- Eigenschwingungen des Abrichters verstärken sich im Verlauf des Abrichtprozesses und erzeugen Abweichungen auf dem Werkzeug
- Abweichungen des Werkzeugs bilden sich anschließend auf dem Werkstück ab bzw. fördern die Instabilität



# Welche Resonanz der Maschinenstruktur kann überhaupt für den Verzahnungsschleifprozess kritisch sein?

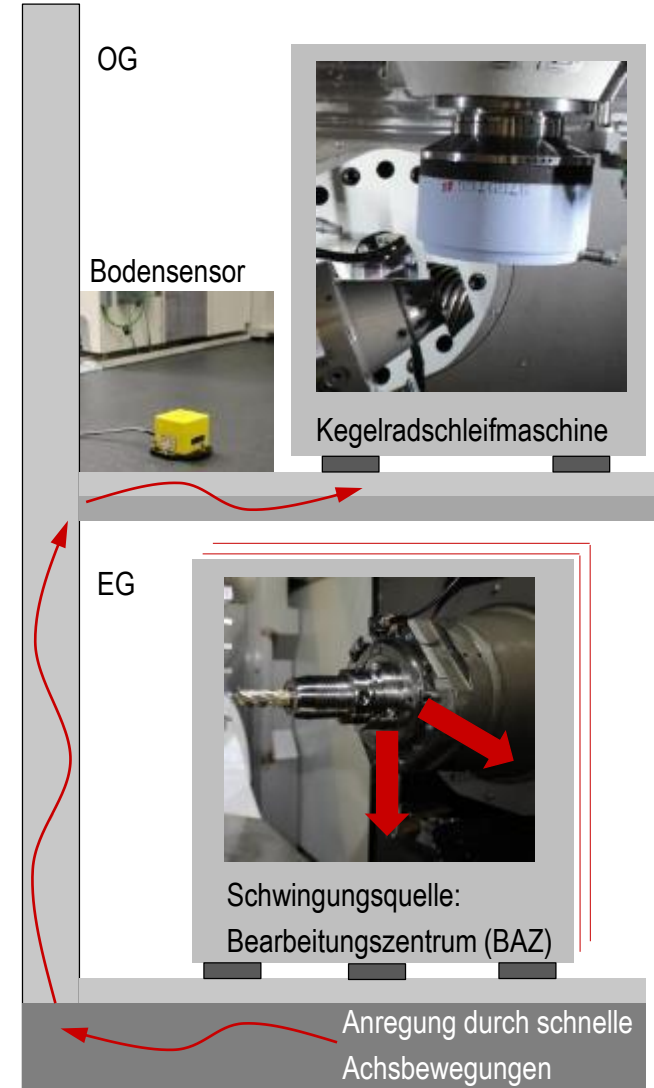
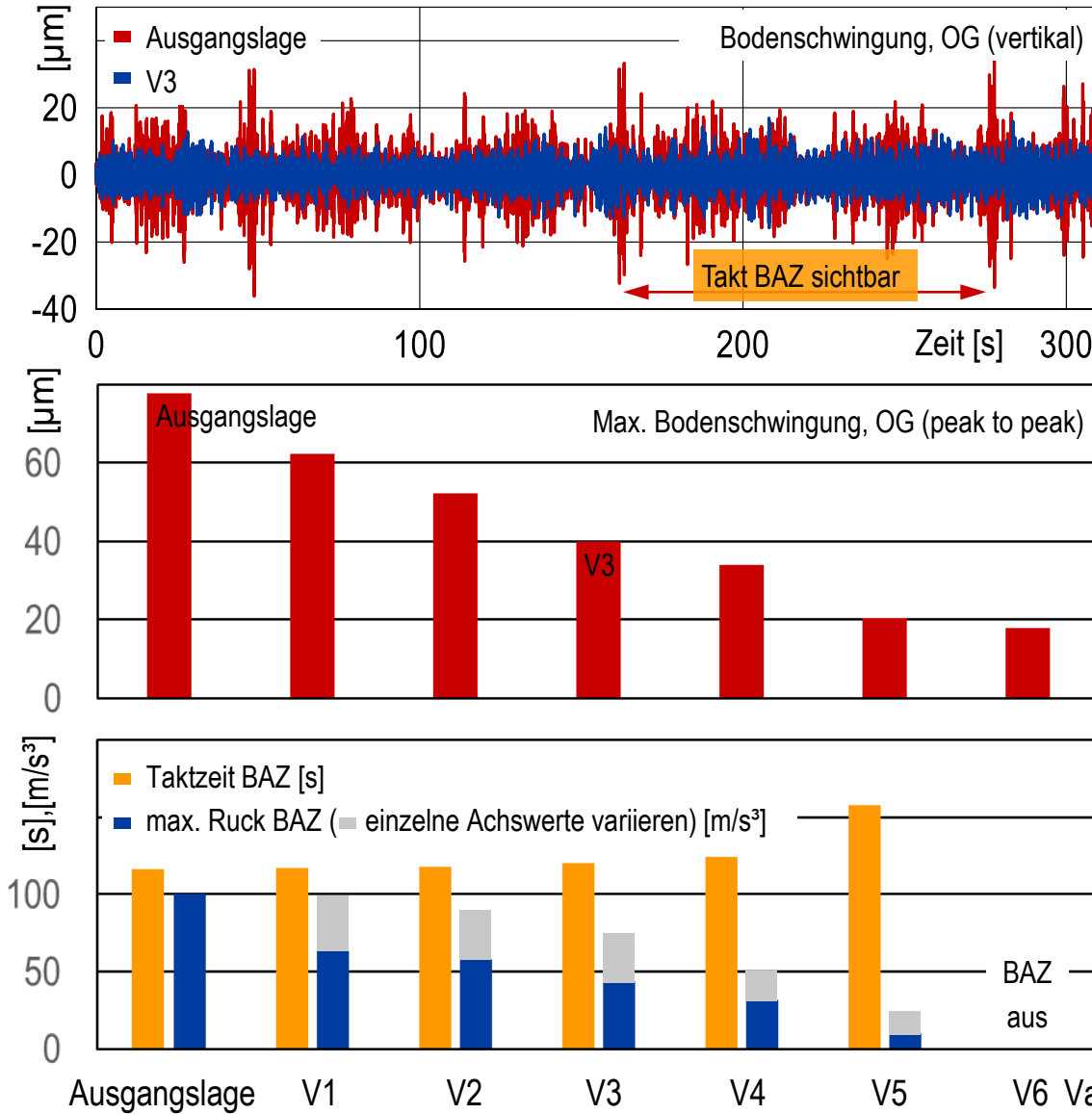


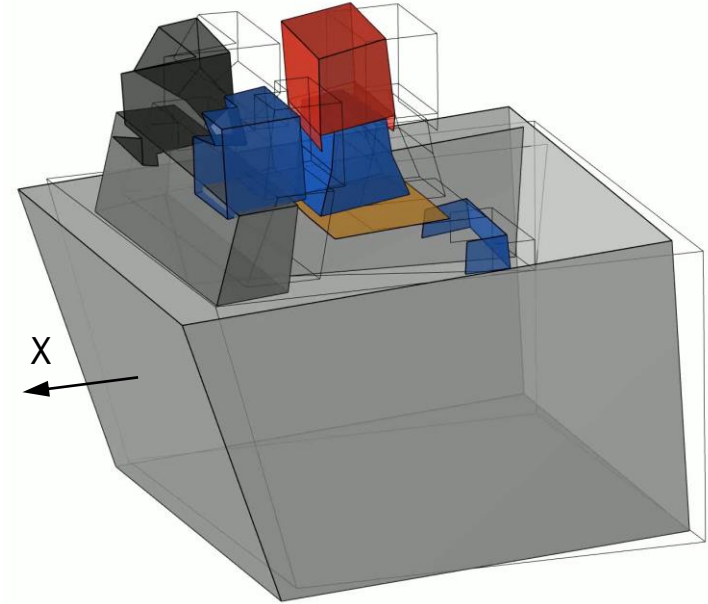
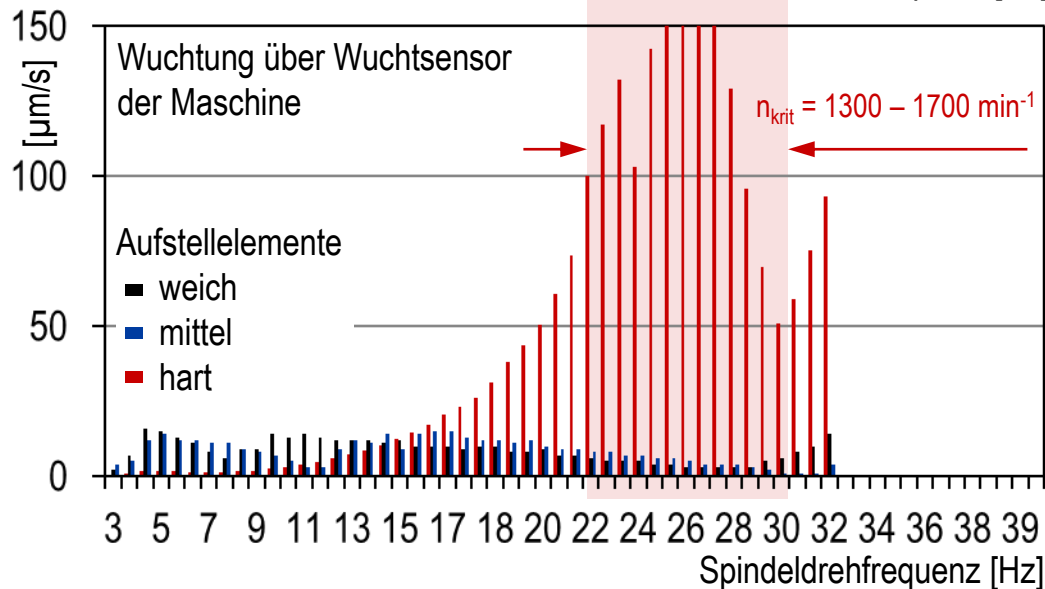
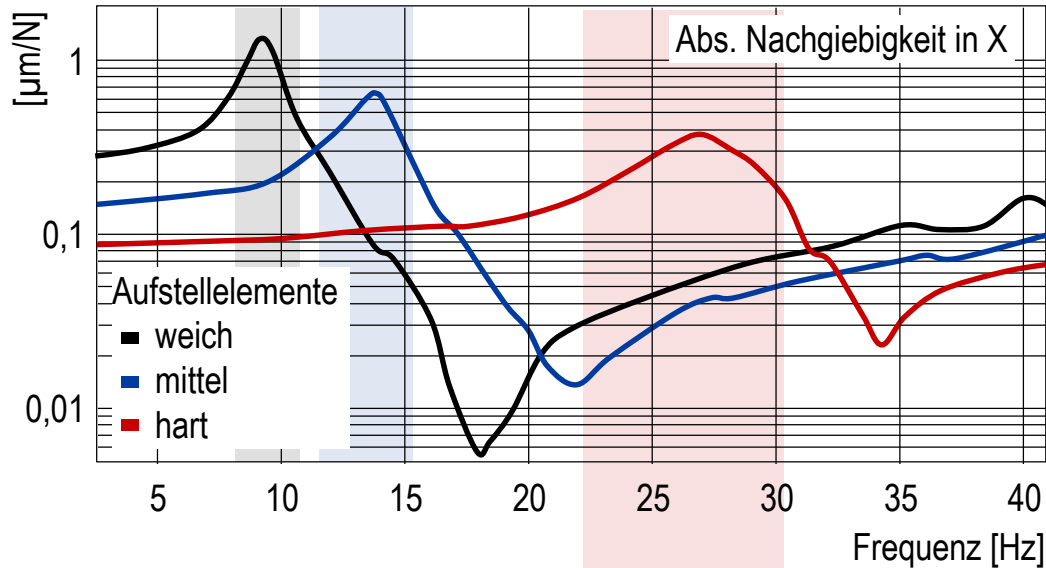
## Wellenlänge in Abhängigkeit der Schwingungsfrequenz

- $f_R \approx 10 \text{ Hz}$  Boden-/Aufstellungsschwingung  $\longrightarrow \lambda = 2 \text{ mm}$
- $f_U = 33 \text{ Hz}$  Scheibendrehfrequenz (Unwucht)  $\longrightarrow \lambda = 0,6 \text{ mm}$
- $f_R \approx 100 \text{ Hz}$  Biegung Werkstückseite horizontal  $\longrightarrow \lambda = 0,2 \text{ mm}$
- $f_R \approx 200 \text{ Hz}$  Biegung Werkstückseite vertikal  $\longrightarrow \lambda = 0,1 \text{ mm}$
- $f_R \approx 350 \text{ Hz}$  Biegung Spindel / Scheibe  $\longrightarrow \lambda = 0,057 \text{ mm}$
- $f_R \approx 1 \text{ kHz}$  Biegung Abrichterspindel  $\longrightarrow \lambda = 0,02 \text{ mm}$

- Prozesskritisch sind in hier besonders niederfrequente Schwingungsanteile. Höherfrequente Anteile werden aufgrund der endlichen Krümmung der Scheibe verschliffen (Übergangsfrequenz)

# Risiko von Bodenschwingungen: Taktzeitoptimierungen benachbarter Maschinen können die Schleifqualität deutlich beeinträchtigen



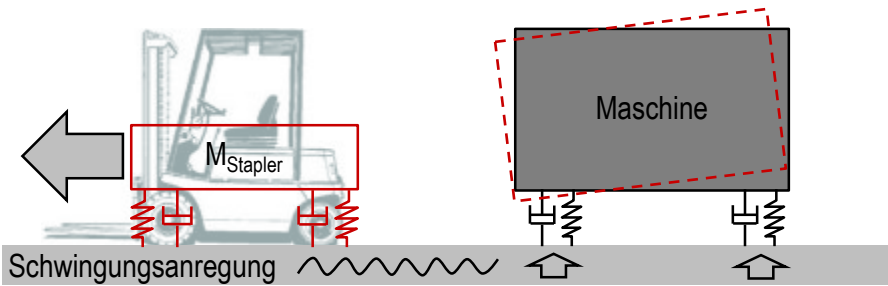


Betriebschwingungsanalyse ( $n_s = 1560 \text{ min}^{-1}$ )



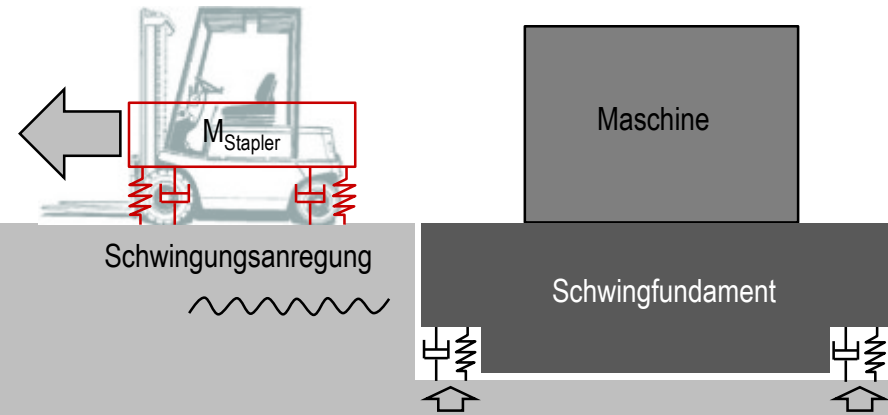
Variation der Aufstellelemente

**Ungünstig:** Drehfrequenz bei Betriebsdrehzahl trifft die Aufstelleigenfrequenz (harte Aufstellung) und führt zu Schwierigkeiten bei der Wuchtung



## Direkte weiche Aufstellung

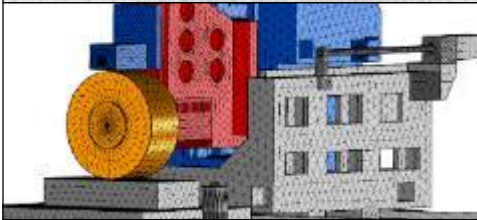
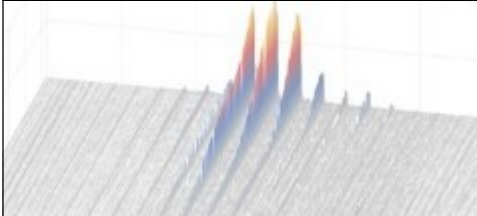
- Starkes Überschwingen bei Achsbewegungen (Probleme mit Peripherie / Bauhöhe)
- Isolationsfrequenz 3 – 4 Hz über Gummielemente kaum erreichbar



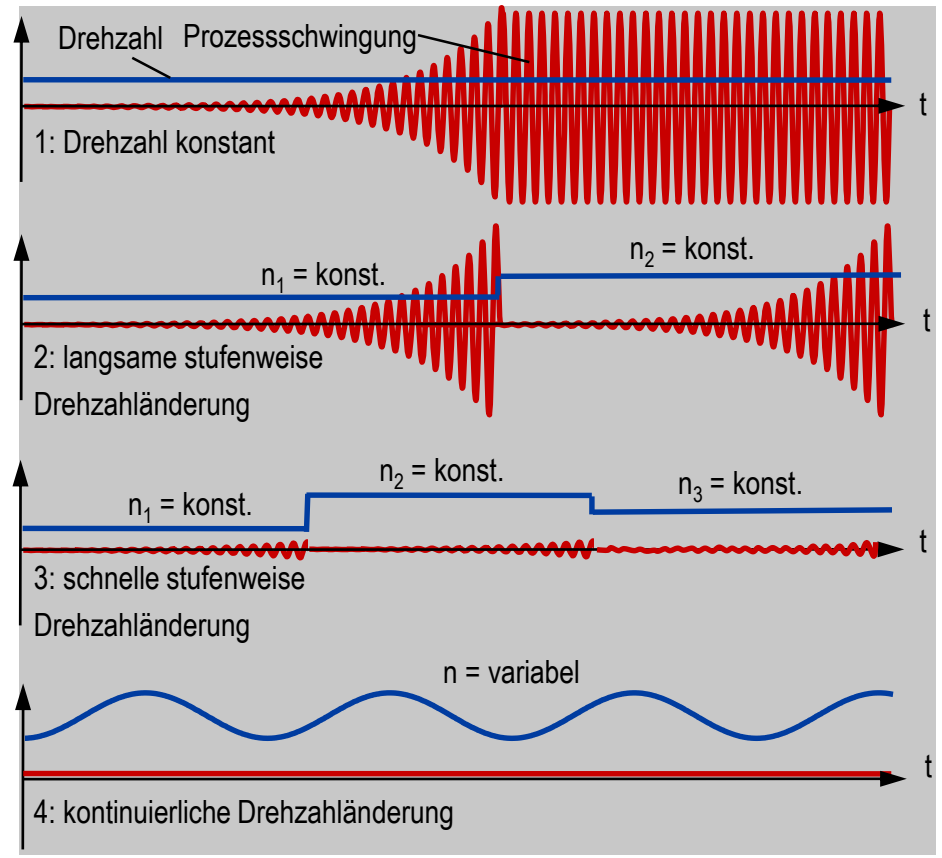
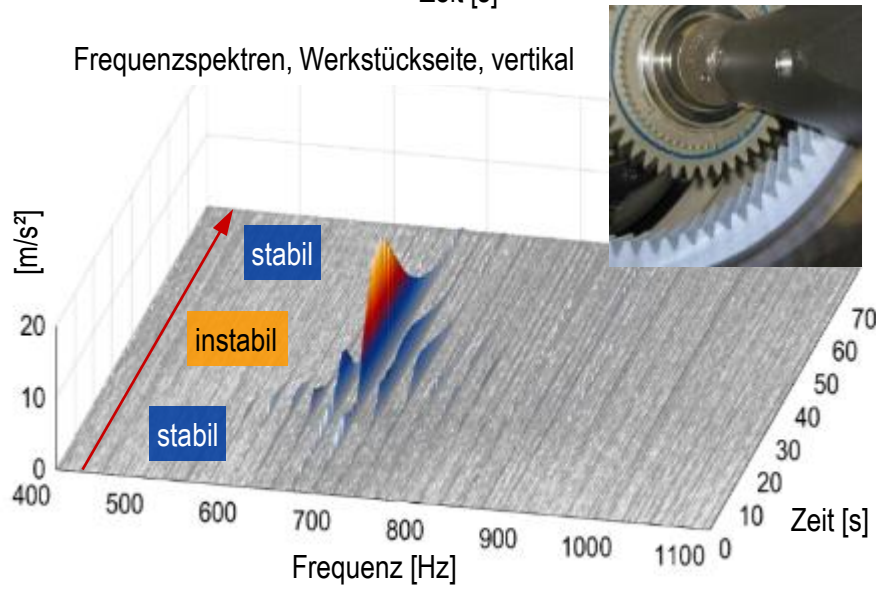
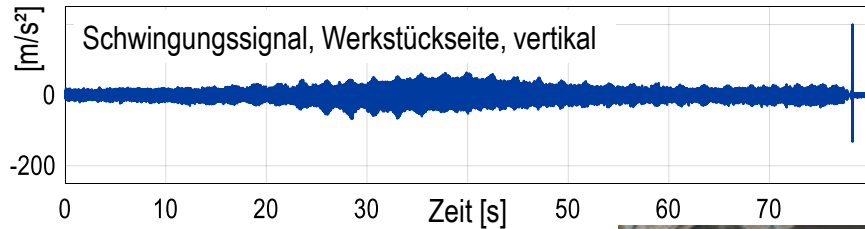
## Aufstellung auf einem Schwingfundament

- Schwingungsisolierung (3 – 4 Hz) erreichbar / gleiche Bauhöhe
- Fundamentmasse reduziert Überschwingen bei Achsbewegungen
- Teure, aufwendige Fundamentart





- Schwingungsarten & Ursachentrennung
- Problembeispiele & Analysestrategien
- Dynamikoptimierung & Schwingungsvermeidung



## Strategie

- Die Instabilität benötigt Zeit für den Welligkeitsaufbau.
- Eine kontinuierliche Änderung der Drehzahl stört den Schwingungsaufbau und erhält die Stabilität

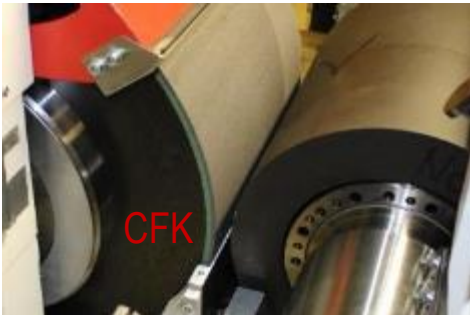
## Nachteile

- Zeit- und Frequenzintervall: Neue Parameter der Drehzahlschwankung vorab schwer definierbar.
- Anwendbar nur bei langsamen Aufschwingprozessen
- Häufig fehlende Akzeptanz beim Anwender

## Risiko:

## Verbesserungsmaßnahme

### Unwucht



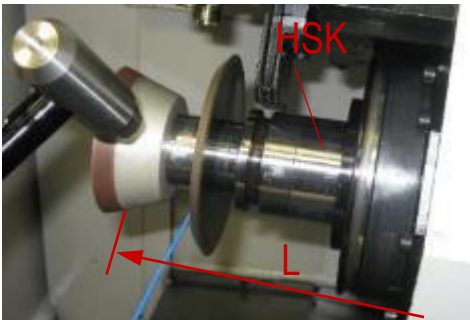
### Reduzierung der Anregungsquelle

- Reduzierung rotierender Massen (ggf. CFK-Grundkörper)
- Verbesserung der Wuchtsysteme (Wuchtung von Werkzeugen im gespannten Zustand in der Maschine, 2-Ebenen-Wuchtung langer Spindeln)

### Reduzierung der Anregungsauswirkung

- Rechnerische Auslegung und Umsetzung steifer Maschinen- und Spindelstrukturen

### Dynamische Instabilität



### Erhöhung der Eigenfrequenzen und des allgemeinen Steifigkeitsniveaus

- Konstruktive Einflussnahme zur Strukturversteifung (Wandstärken, Verrippung, Stützweiten / Typ / Größe der Lager/Führungen, Material)
- Vermeidung auskragender, schwerer Massen (biege- und torsionsnachgiebig)
- **Hinweis:** Änderungen der Lagervorspannung oder des Werkstückspanndrucks reichten erfahrungsgemäß in vielen Fällen nicht aus

### Reduzierung / Dämpfung der Nachgiebigkeitsmaxima

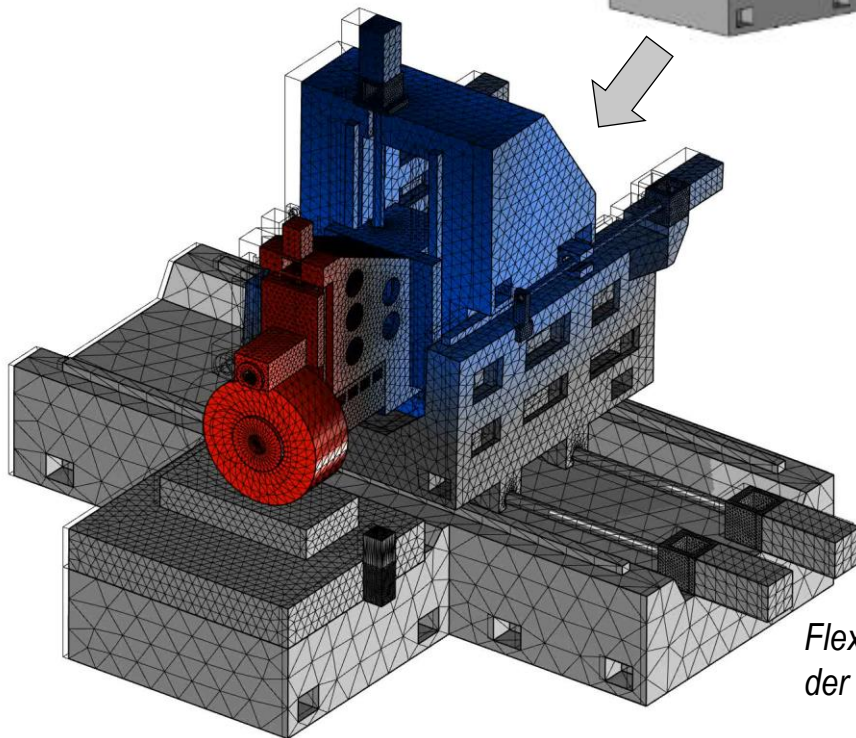
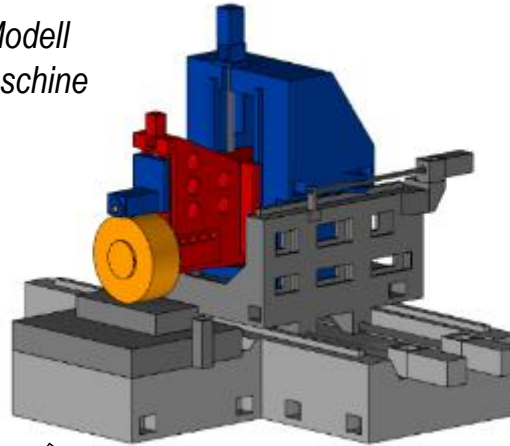
- Integration dämpfender Zusatzsysteme in die Maschinenstruktur, Spindeln oder Werkzeuge

**FAZIT** → Verbesserungsmaßnahmen sind fast immer maschinenspezifisch.  
Pauschale Lösungsvorschläge sind nur in seltenen Fällen möglich.

**Berücksichtigung von:**

- Strukturkomponenten
- Spindeln / Werkzeugen
- Führungsbahnen / Lagerungen
- Aufstellung / Fundamentierung
- Antrieben / Regelung

*CAD-Modell  
der Maschine*



*Flexibles Mehrkörpermodell  
der Maschine*

**Umfang:**

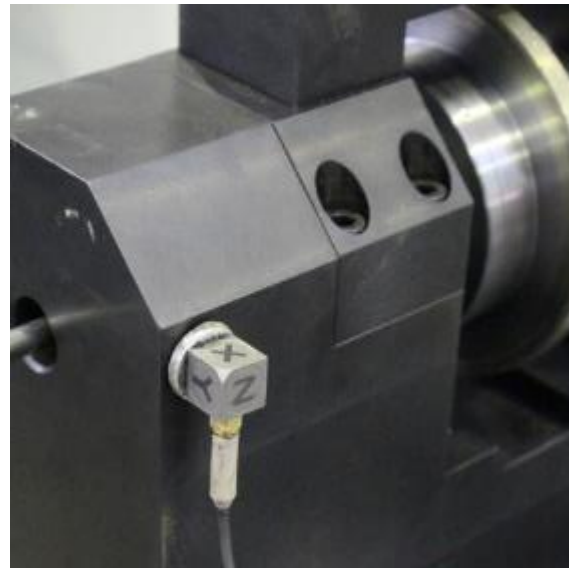
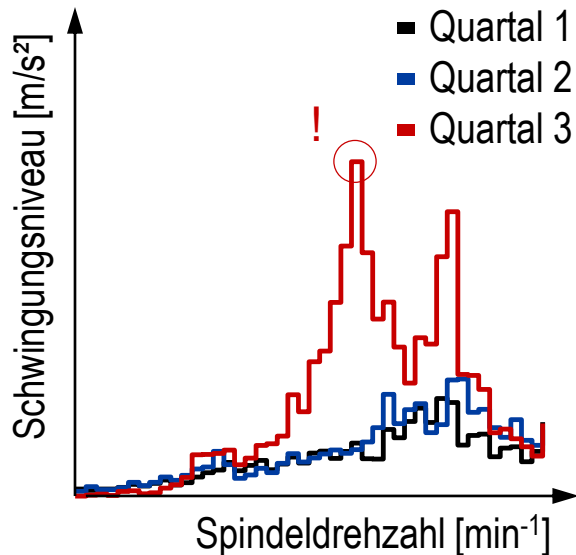
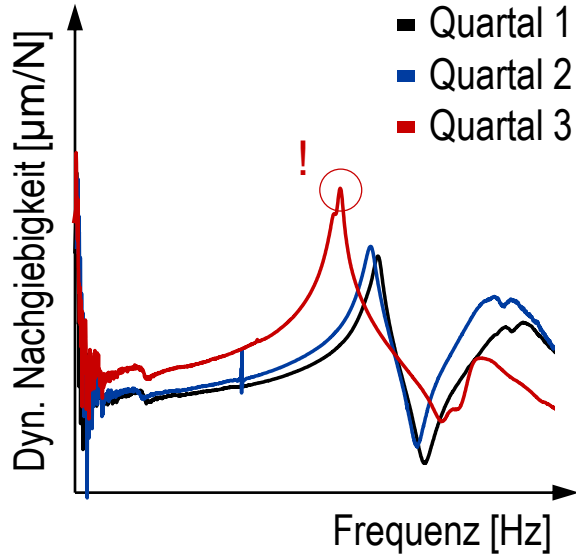
- Statische Steifigkeiten
- Nachgiebigkeitsfrequenzgänge
- Modalanalyse / Eigenschwingungen
- Aufstellungs- / Fundamenteinfluss
- Wandstärkenoptimierung
- Auslegung von Hilfsmassendämpfern

**Benefit:**

- Vergleichsmöglichkeit von Achskonzepten in der Entwicklungsphase
- Frühzeitige Erkennung von Risiken in der Konstruktionsphase
- Prognostizierung der Wirkung von Verbesserungsmaßnahmen bei erkannten Schwachstellen

Keine Aufgabe von Monaten:  
Zeitaufwand für die Berechnung einer  
Gesamtmaschine inkl. Varianten:

**ca. 5 Tage**



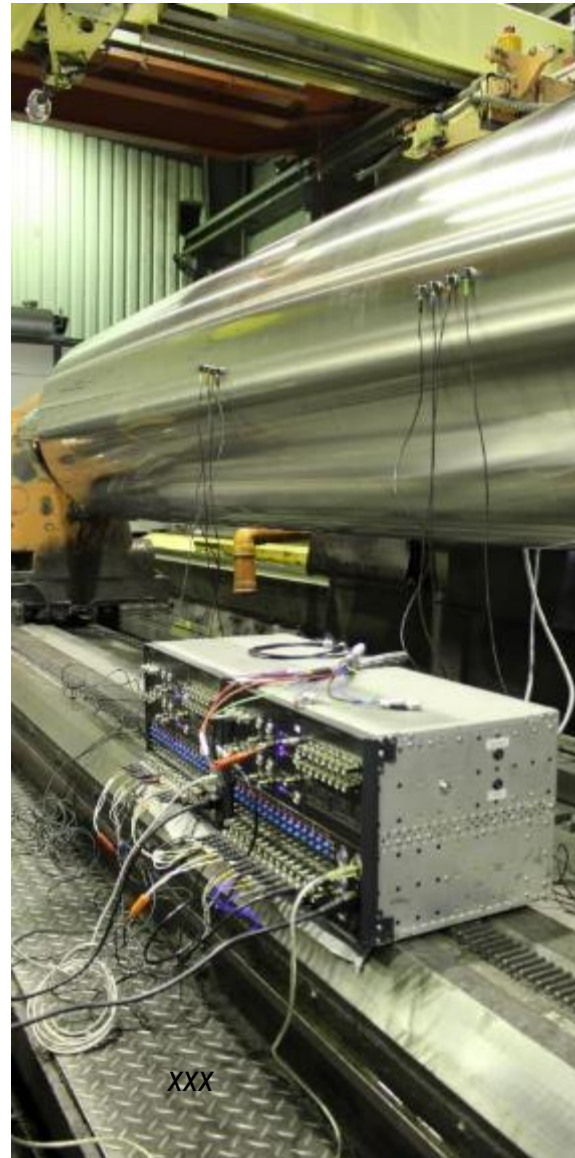
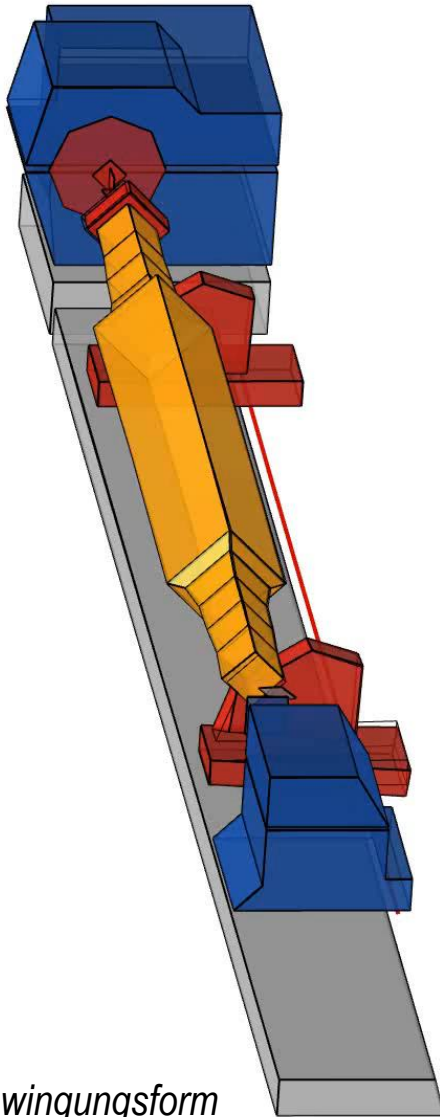
## Umfang:

- Quartals- / halbjährliche Kurzmessung der Maschine mit definierten Randbedingungen, z.B.:
- Nachgiebigkeitsfrequenzgänge
- Schwingungsmessung beim Achsverfahren und Spindelhochlauf
- Statistische Dokumentation des Maschinensteifigkeitsverhaltens

## Benefit:

- Erkennung von Schwachstellen bei der Maschinenabnahme
- Einschätzung von Risiken bei Werkzeug- oder Spannmitteländerungen
- Überwachung drehender Komponenten (Spindeln, KGTs, Führungen) hinsichtlich Verschleiß und Vorspannungsverlust

Zeitaufwand: ca. 0,5 – 1 Tag



## Umfang:

- Detaillierte messtechnische Maschinenuntersuchung optional mit...
- Prozessschwingungsmessungen
- Verlagerungsmessungen
- Spindelhochlaufmessungen
- Statischen & dynamischen Nachgiebigkeitsmessungen
- Zerspankraftmessungen
- Modal- / Betriebsschwingungsanalyse

## Benefit:

- Bewertung von Prototypen und Vergleich innerhalb einer Baureihe
- Abgleich von FE-Berechnungen bzgl. Steifigkeits- und Dämpfungslevel
- Ursachenanalyse von Ratterproblemen als Basis zur Optimierung der Fertigungsqualität

Zeitaufwand: ca. 2 – 3 Tage

**Ihr Kontakt**

planlauf GmbH

Gereonstr. 1

52428 Jülich

[www.planlauf.com](http://www.planlauf.com)

**Ihr Ansprechpartner**

Dr.-Ing. Severin Hannig

Telefon 02461 / 3169 565

[s.hannig@planlauf.com](mailto:s.hannig@planlauf.com)