planlauf

Optimierte Stabilität von Hochleistungs-Präzisionsschleifmaschinen

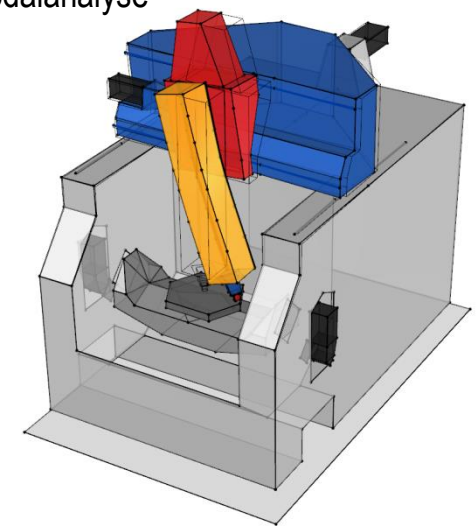
planlauf GmbH, Aachen

Kreuztal, 03. März 2015

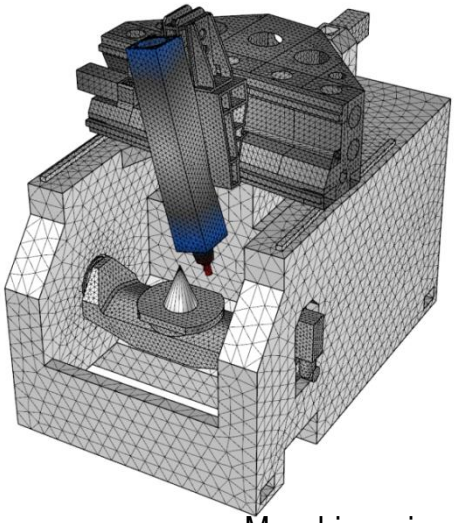
Dr.-Ing. Severin Hannig

planlauf GmbH – Messung / Berechnung von Maschinen und Prozessen

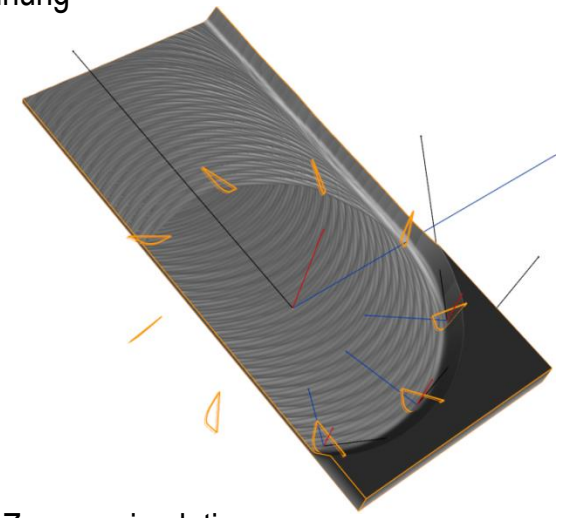
Messung



Berechnung



Maschinensimulation



Zerspansimulation

Produkte und Dienstleistungen:

Messung

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

Berechnung

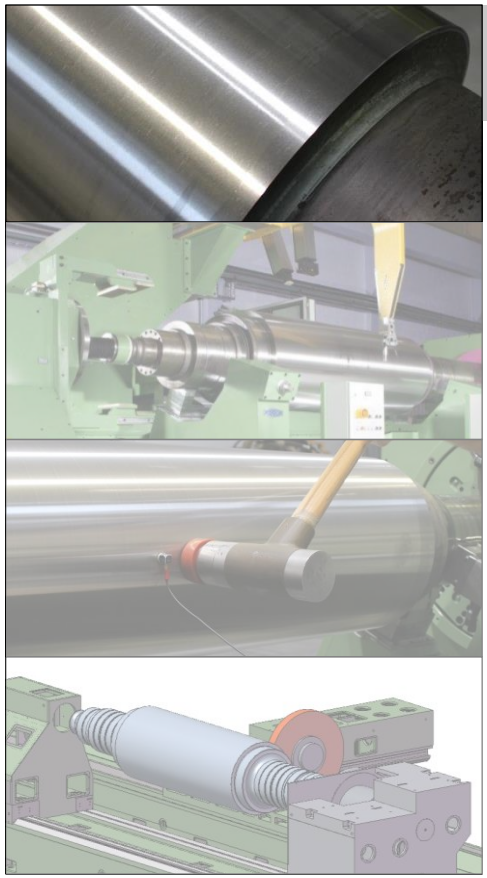
- Berechnung der Strukturmechanik
- Mechatroniksimulation
- Zerspansimulation
- Fundamentanalyse
- Werkzeugberechnung

Entwicklung

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

© planlauf GmbH

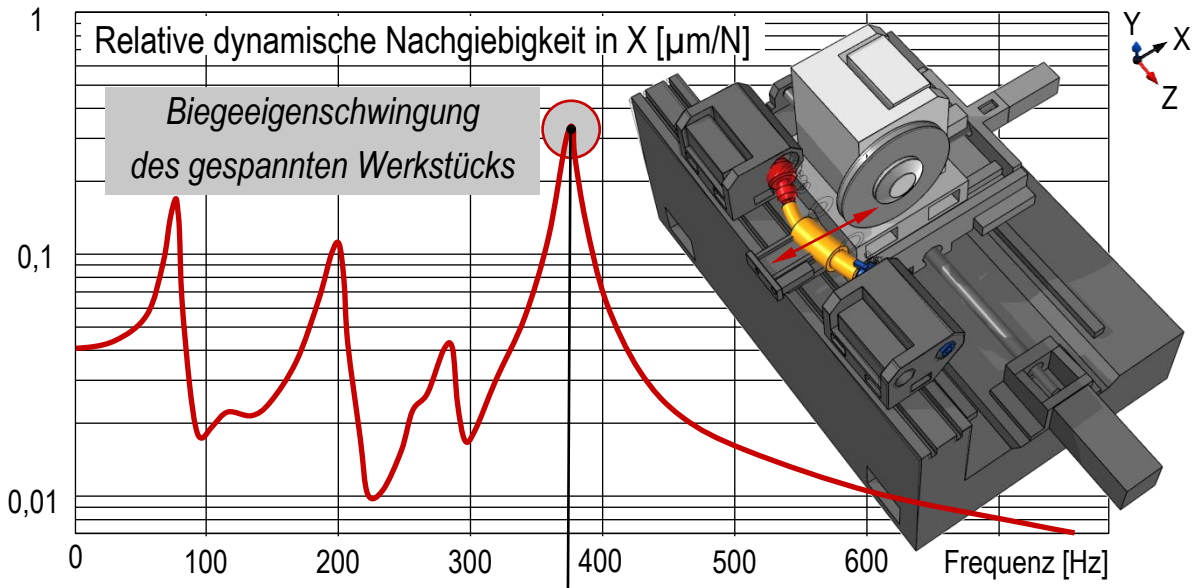
Gliederung

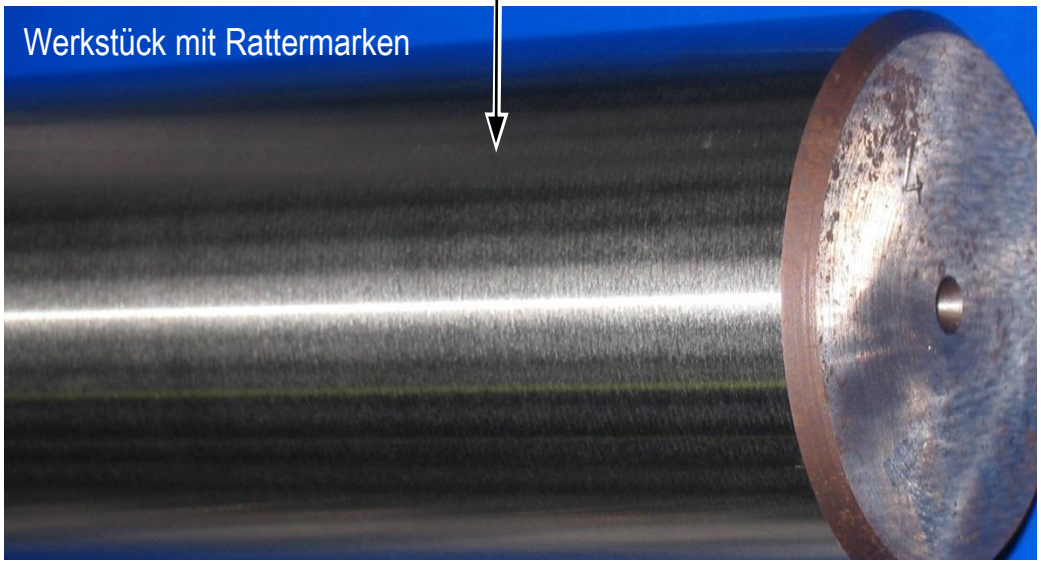


- Prozessstabilität statt Schwingungen beim Präzisionsschleifen
- Herausforderungen für die Schleifmaschinenkonstruktion
- Methoden zur Schwachstellenerkennung und -vermeidung
- Maßnahmen zur Stabilitätsoptimierung beim Walzenschleifen
- Zusammenfassung

© planlauf GmbH

Ratterschwingungen – ein allgegenwärtiges Risiko der Feinbearbeitung



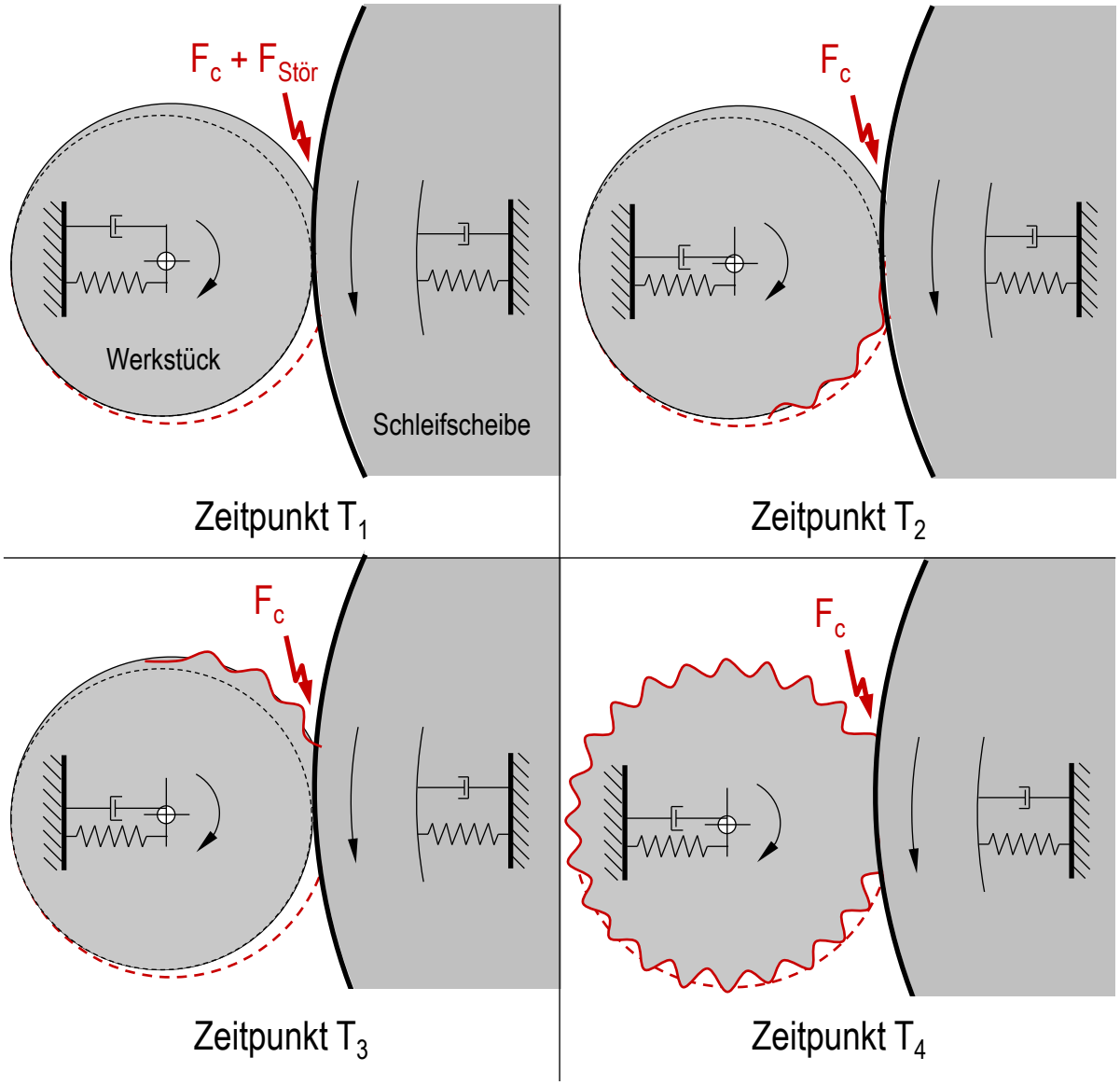


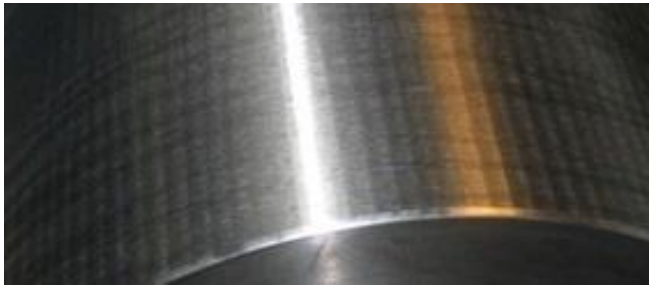
Charakteristik des Ratterns am allgemeinen Beispiel einer Außenrund-Schleifmaschine

- Selbstverstärkende Schwingung
- Ursache ist eine Resonanzstelle der Maschine/Werkstück/Spannvorrichtung
- Schwingungsfrequenz ist ohne Drehzahlproportionalität von Massen- / Steifigkeitseigenschaften abhängig
- Auftreten leicht oberhalb einer dominanten Resonanz der Maschine
- Bei kurzen Wellenlängen z.T. als Facetten sichtbar, bei größeren Wellenlängen oft nur messbar

© planlauf GmbH

Selbsterregte Schwingungen – der werkstückseitige Regenerativeffekt





Der Mechanismus des Ratterns

- T_1: Äußere Störkräfte erzeugen eine Relativverlagerung zwischen Scheibe und Bauteil.
- T_2: Die resultierende Schwingung klingt dämpfungsbedingt wieder ab.
- T_3: Nach einer Werkstückumdrehung führt die Welligkeit im Schleifspalt zu einer Schleifkraftänderung.
- T_4: Die Schleifkraftschwankung führt zur erneuten, verstärkten Auslenkung und zur Welligkeitsverstärkung.

Hinweis:

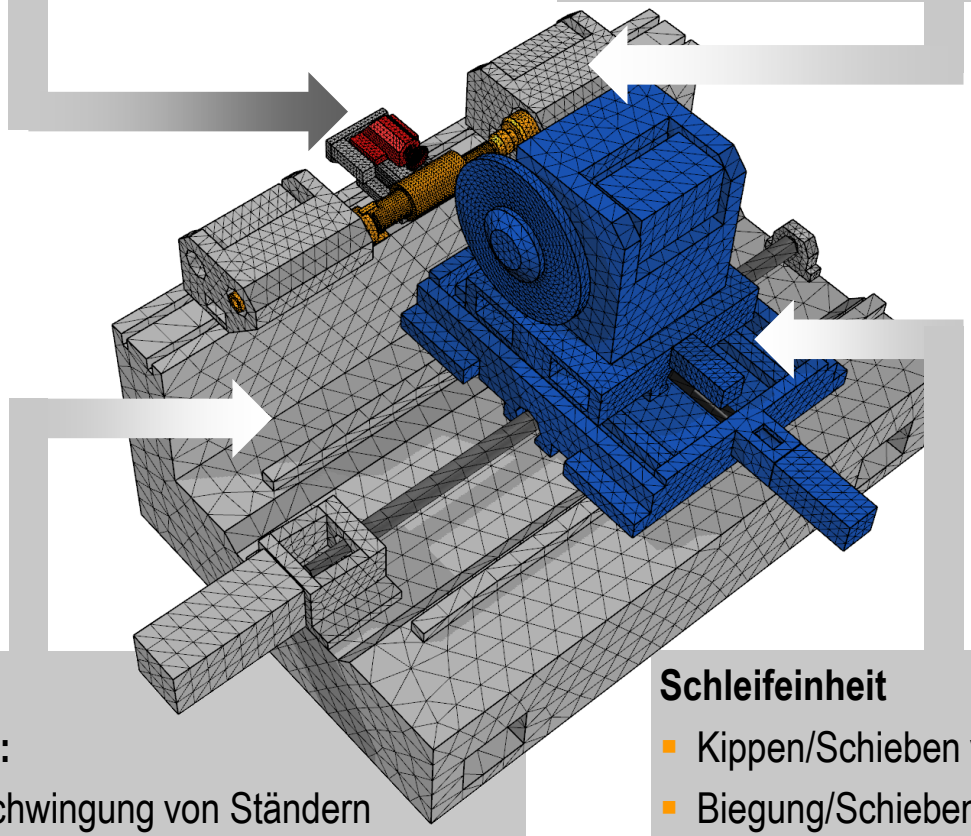
- Ein ähnlicher Ablauf ist auf der Scheibenseite beim Schleifen und beim Abrichten möglich!

© planlauf GmbH

Schwingungsprobleme sind komplex und vielfältig – aber lassen sich nach Herkunftsort klassifizieren

Abrichteinheit:
- Kippen/Schieben der Abrichtschlitten/Gehäuse
- Biegung/Schieben/Torsion der Abrichtspindel
- Eigenverformung des Abrichtwerkzeugs

Werkstückeinheit
- Kippen/Schieben von Schlitten/Gehäuse/Spindelstock
- Biegung/Schieben/Torsion von Spindel/Spannfutter/Werkstück
- Eigenverformung des Werkstücks



Sonstige Ursachen:
- Unwuchtanregung
- Geom. Rundlaufabweichung
- Steigungsfehler der KGT
- Lagerschäden
- Riemenschwingungen
- Pumpenpulsationen
- …

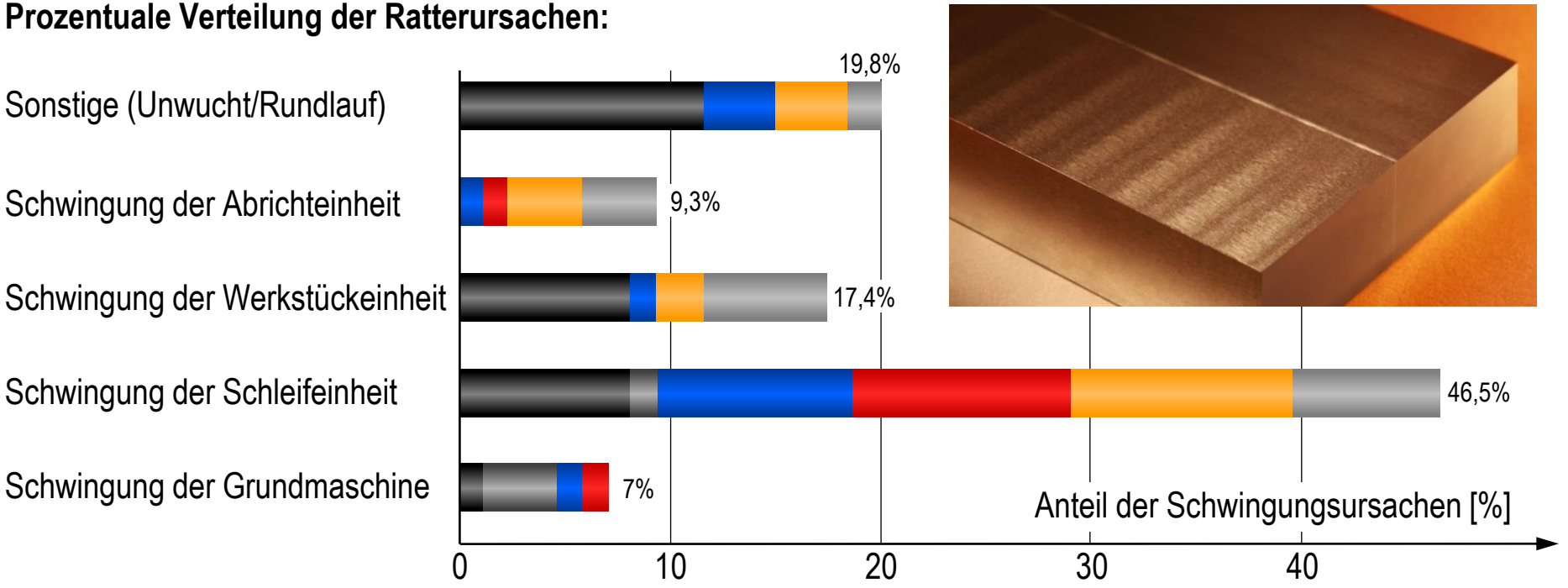
Grundmaschine:
- Kipp-/Pendelschwingung von Ständern
- Aufstellschwingung des Maschinenbetts

Schleifeinheit
- Kippen/Schieben von Schlitten/Gehäuse/Spindelstock
- Biegung/Schieben/Torsion von Spindel/Flansch/Scheibe
- Plattenschwingung von Scheibe/Werkzeug

© planlauf GmbH

Schwingungsprobleme treten an allen Schleifmaschinentypen auf – die Ursachen sind jedoch nicht gleichmäßig verteilt

Prozentuale Verteilung der Ratterursachen:



Statistik: Messtechnische Problemanalysen an **62 Schleifmaschinen** unterschiedlicher Größe und Typ:

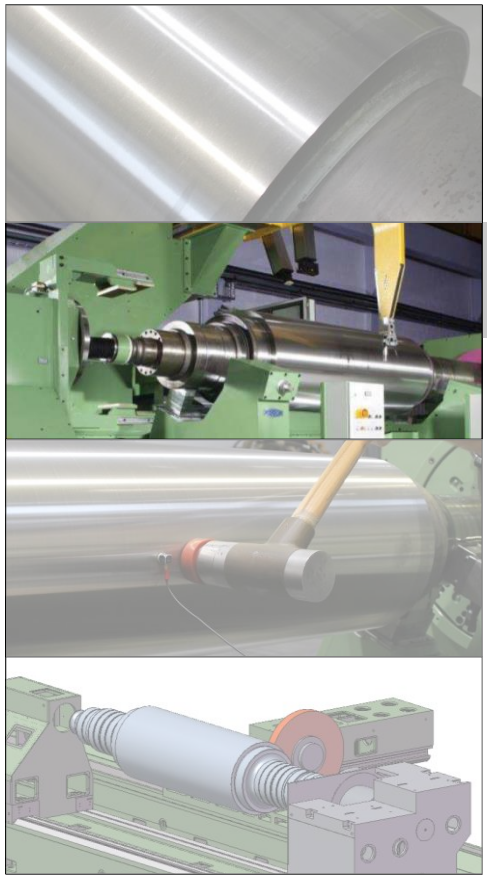
- 16 Außenrundschleifmaschinen (zwischen Spitzen)
- 4 Innenrundschleifmaschinen
- 11 Portal- oder Ständerschleifmaschinen (große Bauformen)
- 9 Flach- oder Profilschleifmaschinen (ein- und doppelspindlig)
- 12 Spitzenlosschleifmaschinen
- 10 Sonstige Schleifmaschinen (Verzahnung- / Messer- etc.)

Hinweis:

- Schwingungsprobleme mit mehreren Ursachen wurden auch mehreren Bereichen zugeordnet.

© planlauf GmbH

Gliederung



- Prozessstabilität statt Schwingungen beim Präzisionsschleifen
- Herausforderungen für die Schleifmaschinenkonstruktion
- Methoden zur Schwachstellenerkennung und -vermeidung
- Maßnahmen zur Stabilitätsoptimierung beim Walzenschleifen
- Zusammenfassung

© planlauf GmbH

Walzenschleifen – eine besondere Herausforderung für die dynamische Prozessstabilität

Die Maschinenentwicklung muss zwei wesentliche Anforderungen erfüllen:

➔ **Hohe dynamische Stabilität beim Leistungs-Schruppschleifen**

➔ **Hohe Schleifpräzision und Rundheitsgenerierung beim Feinschlichten**

Besondere Herausforderungen des Walzenschleifens:

- Schwere, weit auskragende Werkstücke
  Risiko ▶ *Walzenbiegeschwingungen*
- Schwere Schleifscheiben mit großen Schleifbreiten
  Risiko ▶ *Spindelschwingungen*
- Hohe Schleifkräfte durch große Schleifbreiten
  Risiko ▶ *Gesamtmaschinenschwing.*
- Große Messwege bei der Überprüfung des Messergebnisses
  Risiko ▶ *Messarmschwingungen*

© planlauf GmbH

Walzenschleifmaschinen – die dynamische Leistungsfähigkeit wird schon in der Entwicklungsphase entschieden

Wichtige, gewünschte Eigenschaften einer Walzenschleifmaschine:

Führungssysteme (z.B. Hydrostatik) mit dämpfenden Eigenschaften bei hoher Steifigkeit vermeiden Kippschwingungen der Schlitten.

Spindel-Lagersysteme (z.B. Hydrostatik) mit hoher Laufruhe bei ausreichender Dämpfung vermeiden Spindeleigenschwingungen.

Scheibenflansch und Scheibe mit steifer Anbindung zur Spindel vermeiden Kippschwingungen des Flansches.

Spindelstock, Reitstock und Schlitten mit flachem Aufbau reduzieren das Risiko von Kippschwingungen der Maschinenaufbauten.

Abrichter mit flachem, gedrungenem Aufbau reduziert die Gefahr von Abrichterschwingungen.

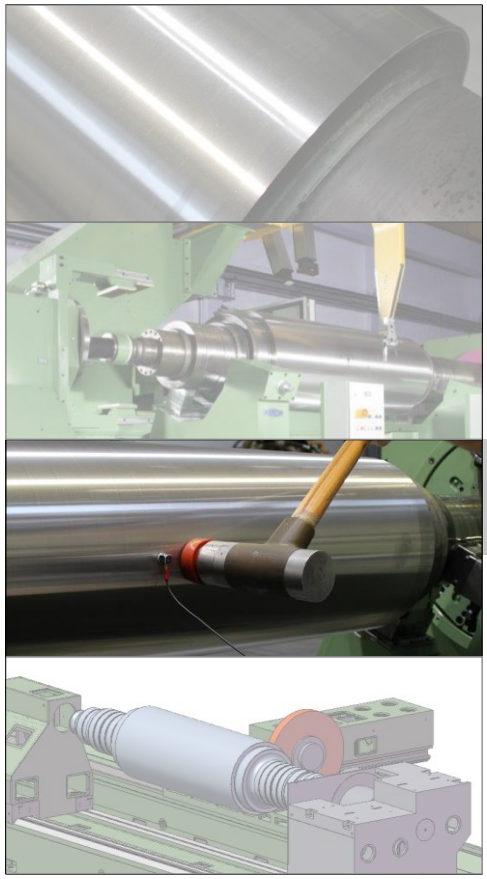
Fundamentierung und Maschinenaufstellung mit hoher Kontaktsteifigkeit vermeiden Aufstellschwingungen.

Messsysteme aus leichten, eigensteifen Materialien vermeiden Schwingungen bei der Walzenvermessung.

Setzstöcke mit breitem Aufbau und flächigen Spannbacken reduzieren das Risiko von Walzeneigenschwingungen.

© planlauf GmbH

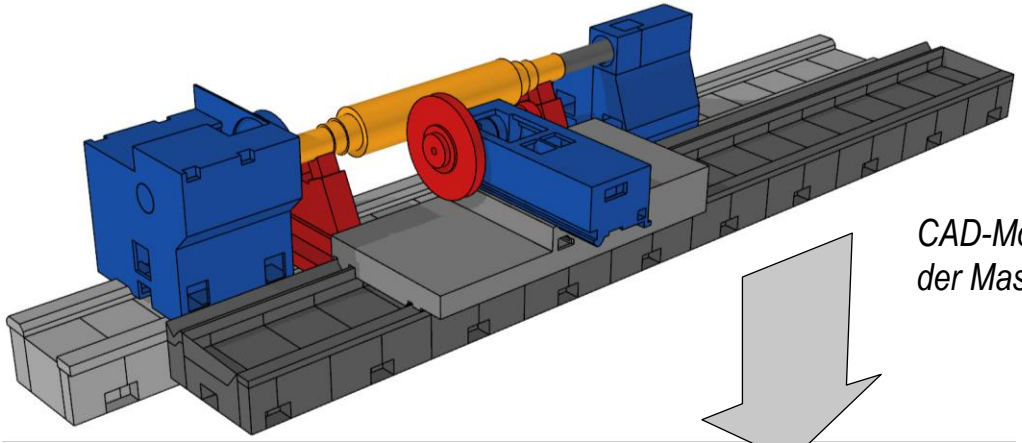
Gliederung



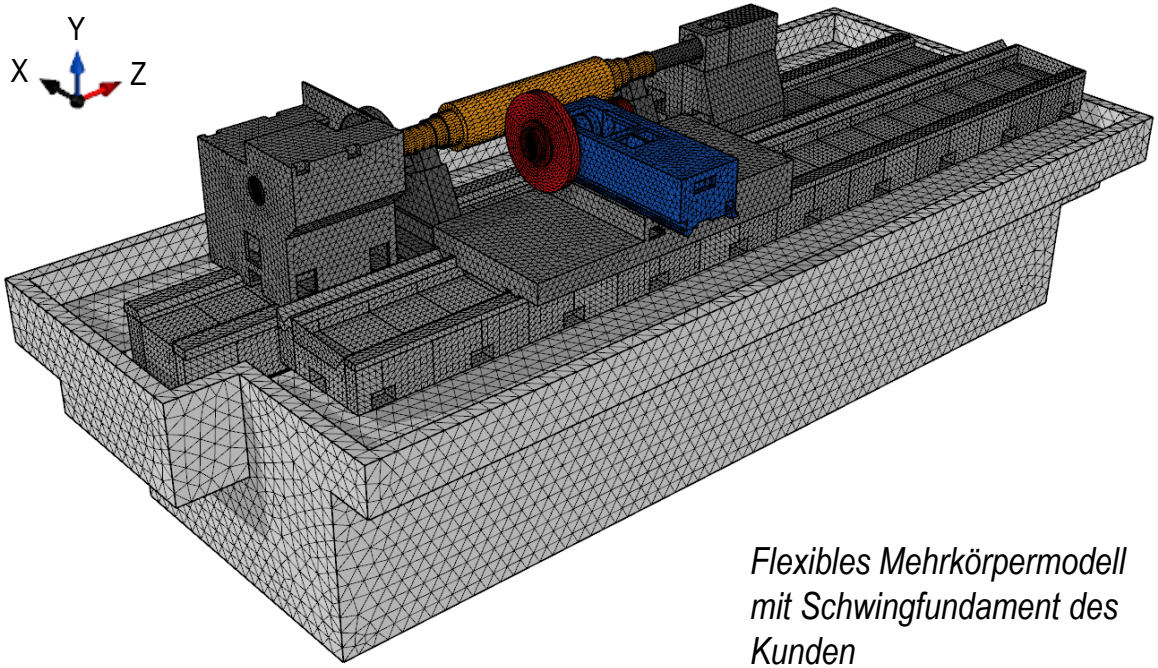
- Prozessstabilität statt Schwingungen beim Präzisionsschleifen
- Herausforderungen für die Schleifmaschinenkonstruktion
- Methoden zur Schwachstellenerkennung und -vermeidung
- Maßnahmen zur Stabilitätsoptimierung beim Walzenschleifen
- Zusammenfassung

© planlauf GmbH

Maschinenentwicklung: FE-Maschinensimulationen zur frühzeitigen Erkennung und Vermeidung dynamischer Schwachstellen



CAD-Modell der Maschine



Flexibles Mehrkörpermodell mit Schwingfundament des Kunden

Maschinensimulation:

- FE-Modellierung und flexible Mehrkörpersimulation der Maschine
- Berücksichtigung aller Strukturkomponenten, Spindeln, Führungsbahnen, Lagerungen und der Aufstellung / Fundamentierung
- Kopplung der Antriebsregelung

Berechnungsmöglichkeiten:

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

Keine Aufgabe von Monaten:

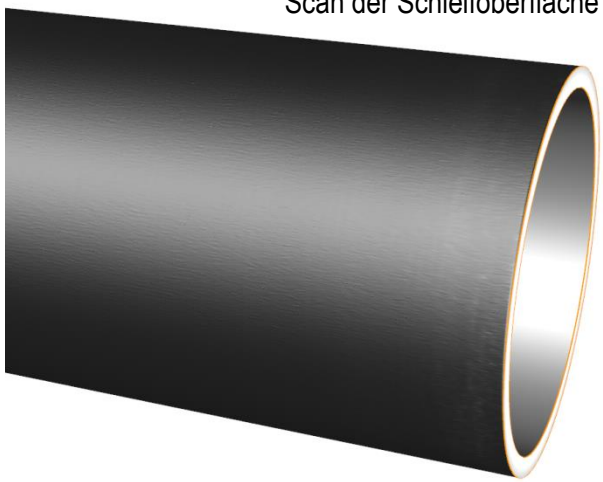
Zeitaufwand für die Berechnung einer Gesamtmaschine inkl. Varianten:

ca. 5 – 7 Tage

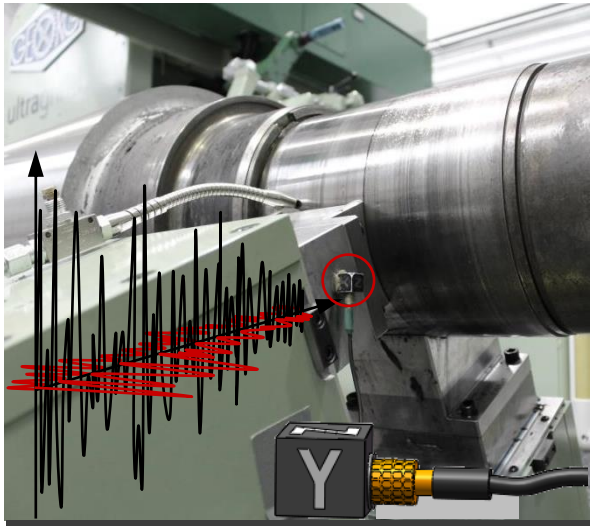
© planlauf GmbH

Maschinenentwicklung: Messtechnische Prozess- und Maschinenanalyse

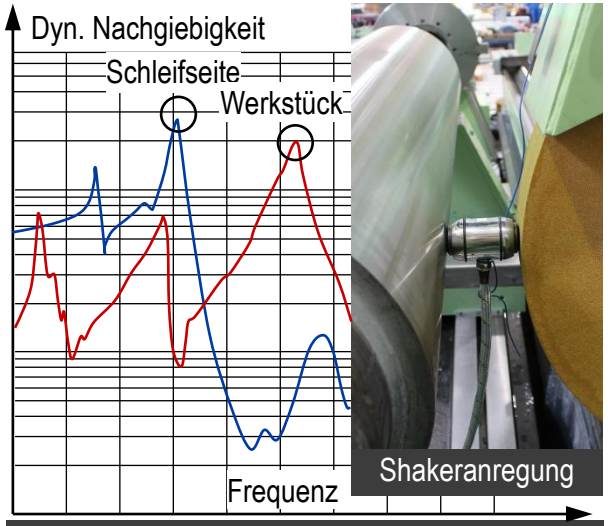
Scan der Schleifoberfläche



Analyse der zerspanten Oberflächen



Schwingungsanalyse der Prozesse

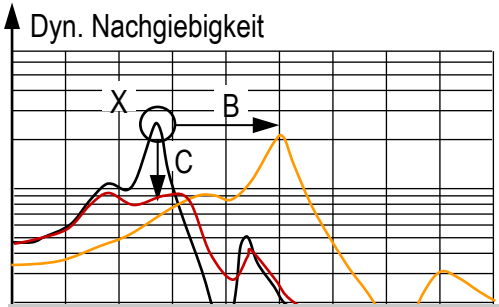


Maschinensteifigkeitsanalyse

Komplettuntersuchung:

Messung vor Ort:	1 - 2 Tage
Vorauswertung:	sofort
Ergebnisbericht:	2 – 5 Tage
Gesamt:	4 – 7 Tage
davon:	
Maschinenstillstand:	**1 – 2 Tage**
Ergebnis nach:	4 – 7 Tagen

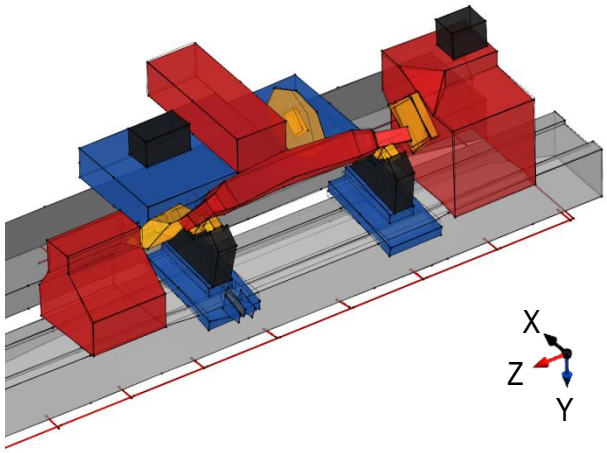
Zeitaufwand



Beurteilung von Verbesserungsmaßnahmen

- ☑ A: Prozessänderungen
- ☑ B: Versteifung von Komponenten
- ☑ C: Bedämpfung der Maschinenstruktur
- ☐ D: …

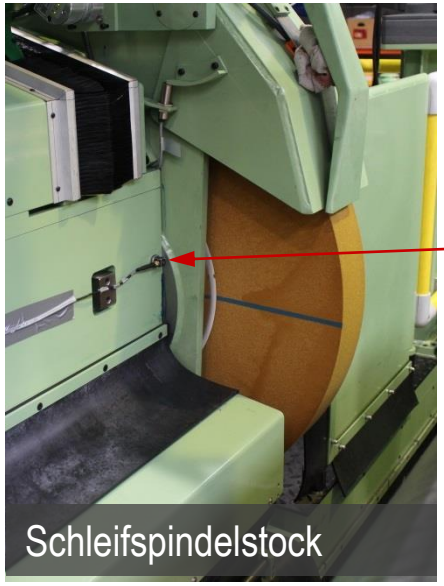
Schwachstellenanalyse/Maßnahmen

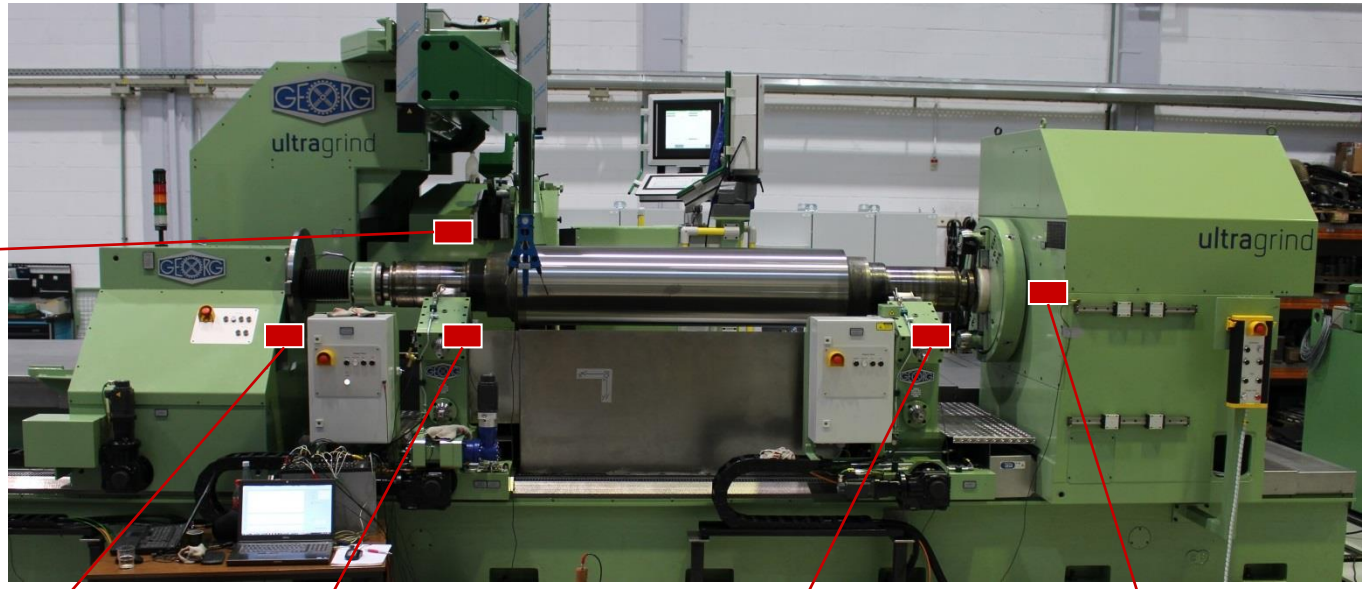


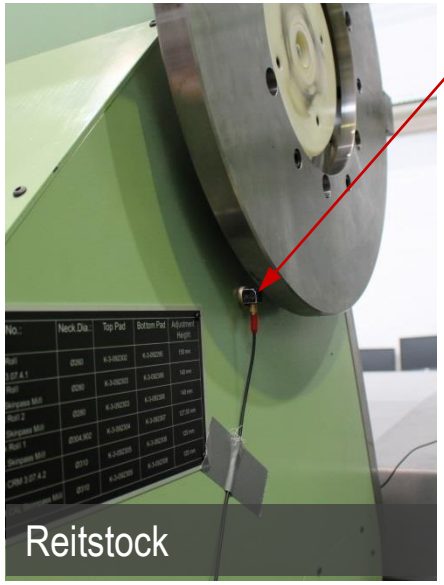
Gesamt- und Detailmodalanalysen

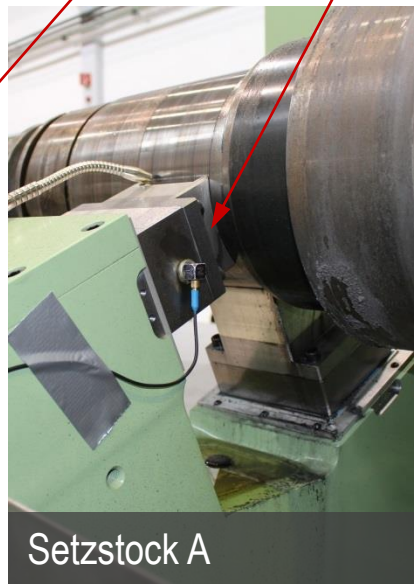
© planlauf GmbH

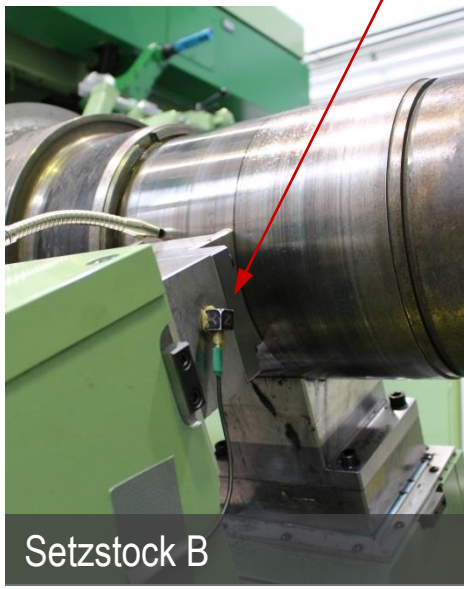
Prozessuntersuchung: Ausrüstung der Maschine mit Sensoren

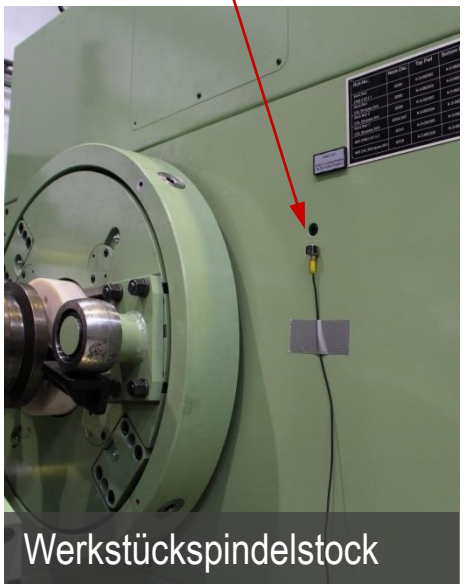






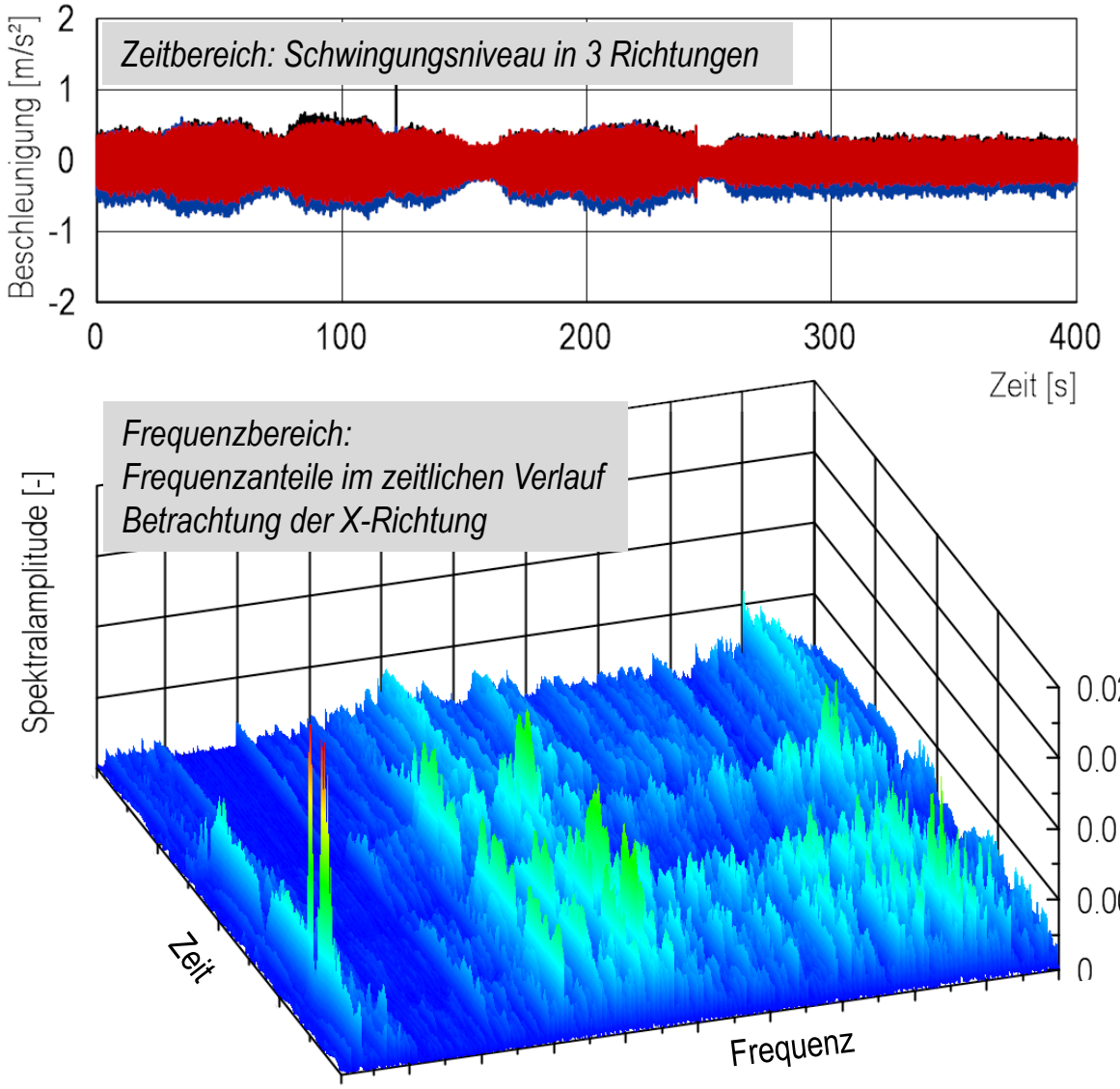


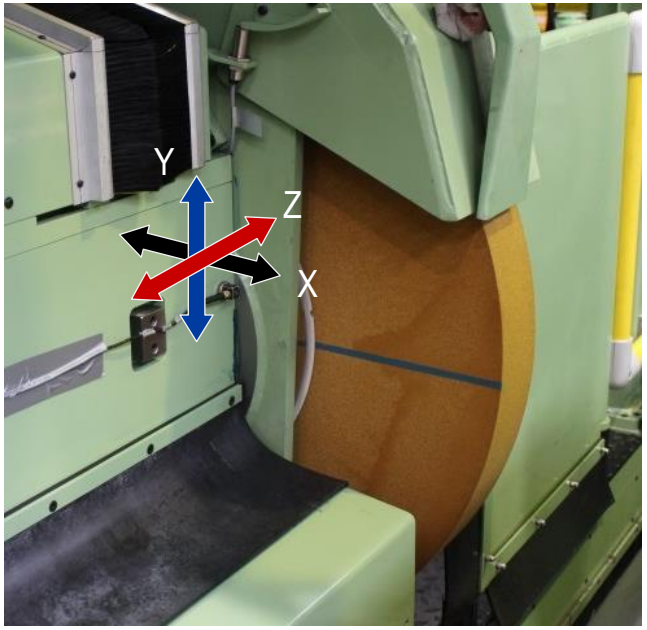




© planlauf GmbH

Prozessuntersuchung: Niedriges Schwingungsniveau beim Schleifen



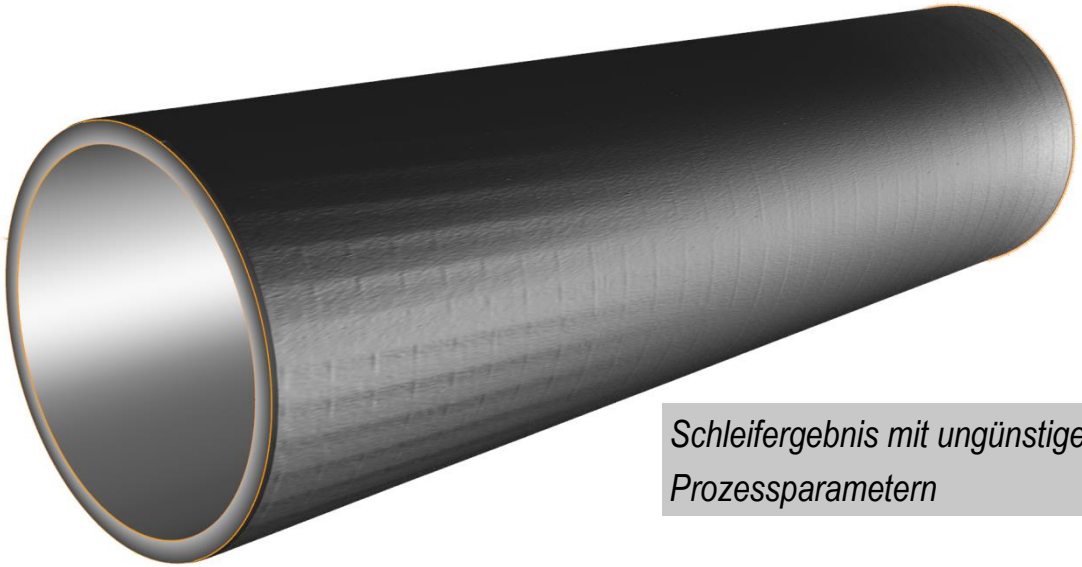


Abricht- und Schleifprozessanalyse

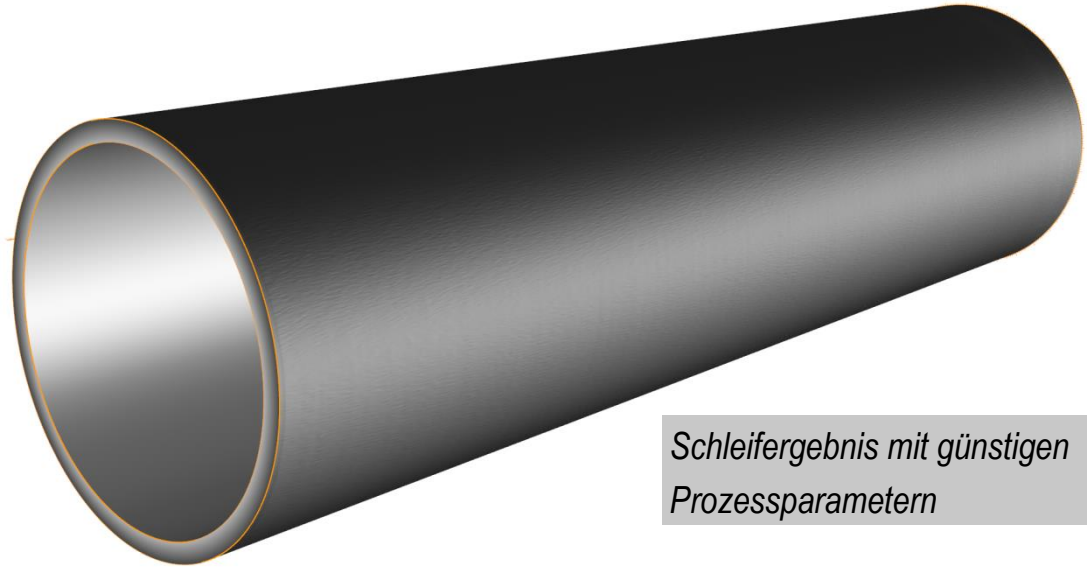
- Messung in jeweils 3 Richtungen
- Auswertung im Zeit- und Frequenz-bereich
- Ermittlung und Bewertung der wesentlichen Schwingungsbereiche, -amplituden und -frequenzen

© planlauf GmbH

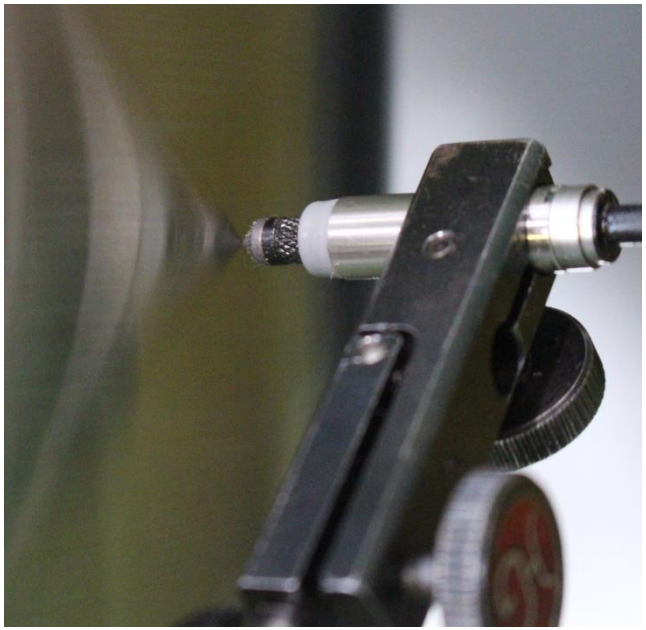
Prozessuntersuchung: Bewertung und Optimierung der Oberflächen



Schleifergebnis mit ungünstigen Prozessparametern



Schleifergebnis mit günstigen Prozessparametern

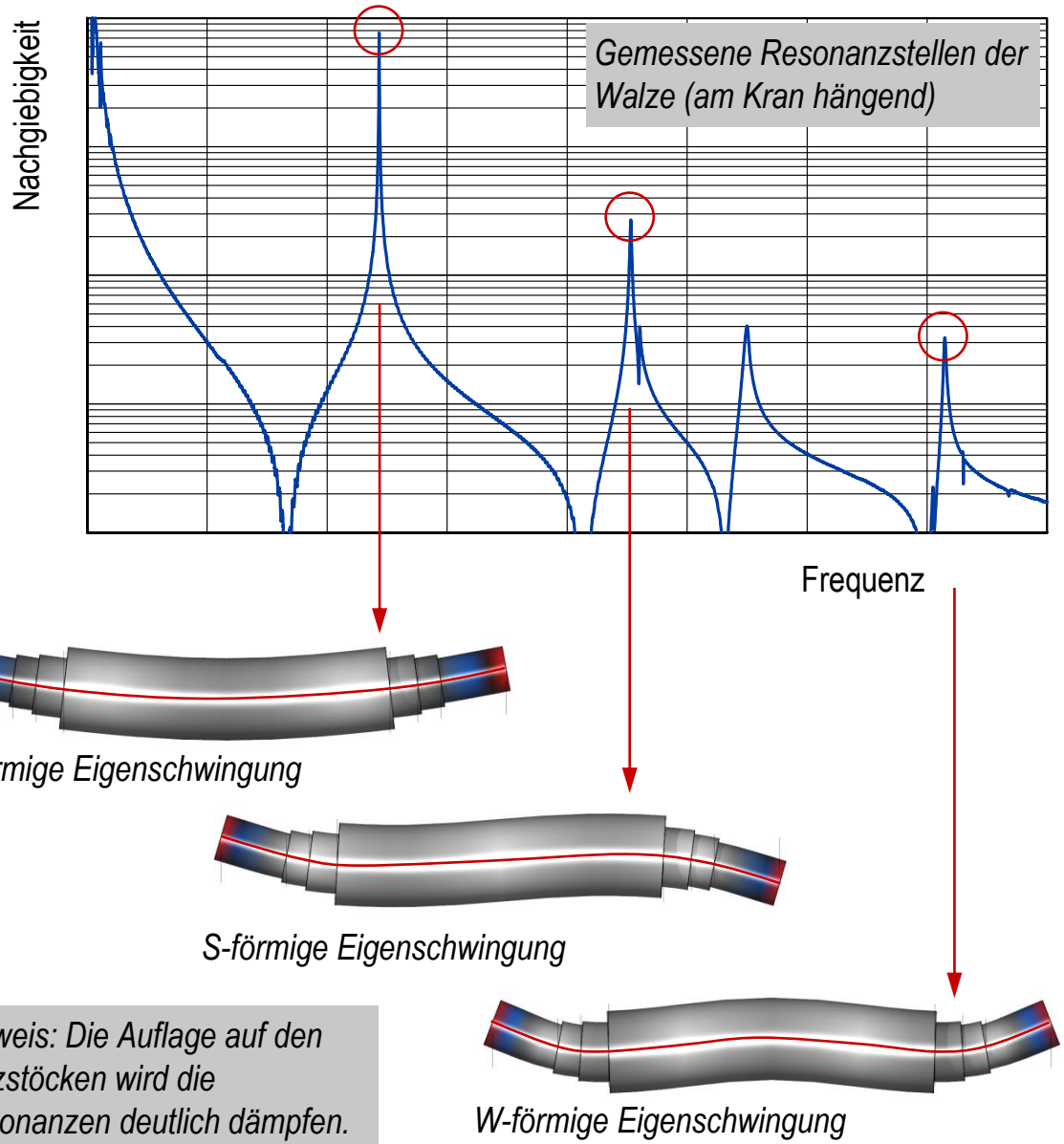


Abtastung der Oberflächen

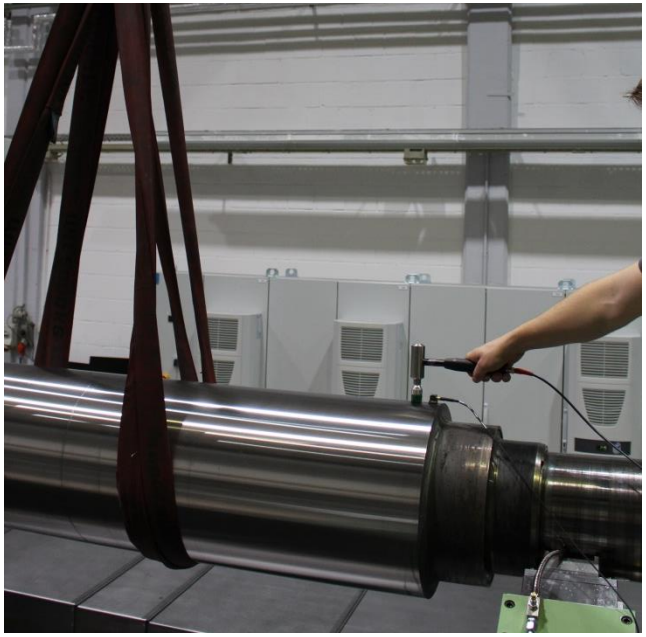
- Schneller „Scan“ der Oberfläche zur Beurteilung möglicher Welligkeitsanteile mit räumlicher Ausdehnung

© planlauf GmbH

Maschinenuntersuchung: Das dynamische Steifigkeitsverhalten von Maschine und Walze bestimmt die Prozessstabilität



Hinweis: Die Auflage auf den Setzstöcken wird die Resonanzen deutlich dämpfen.

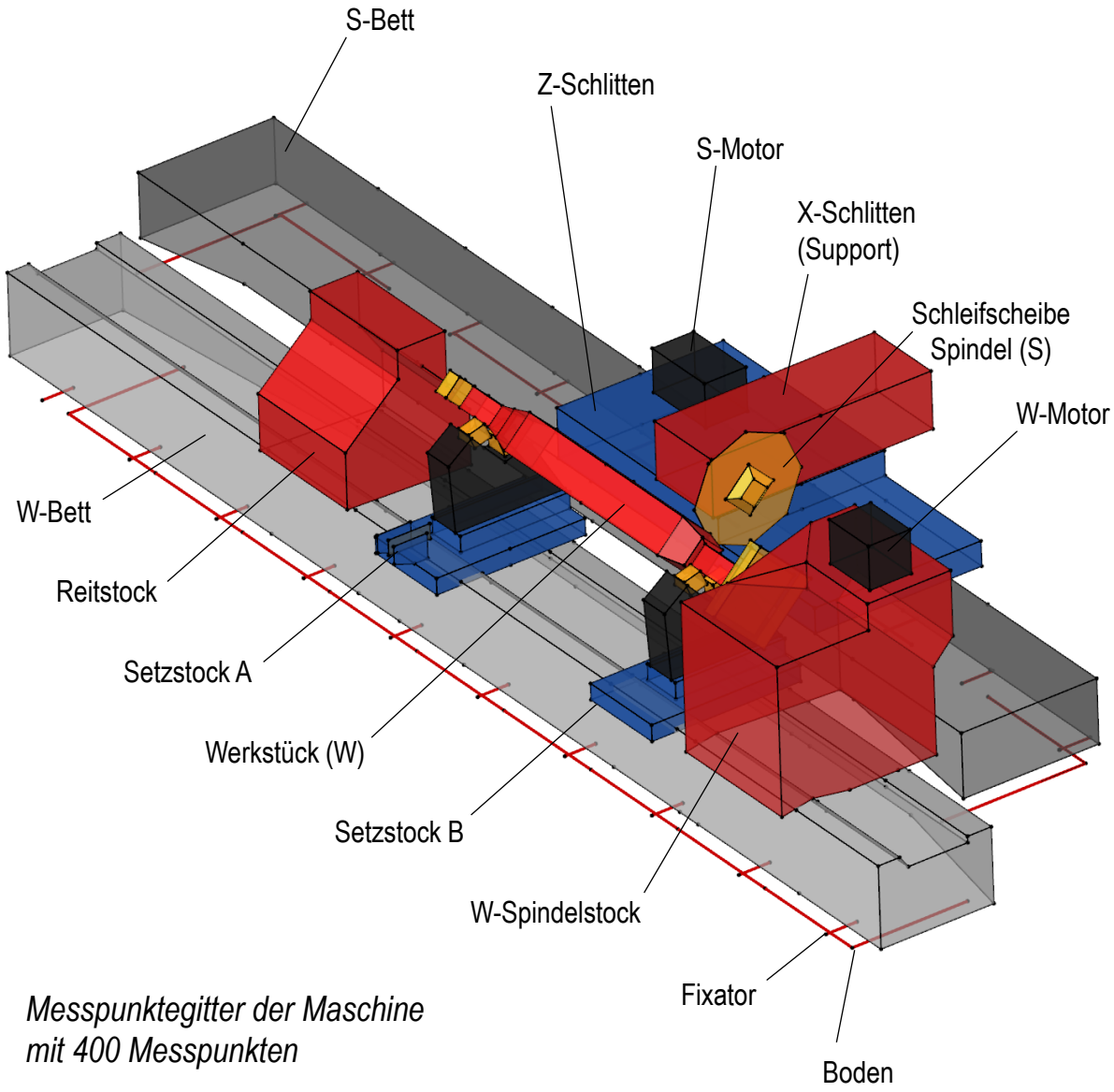


Dynamisches Steifigkeitsverhaltens:

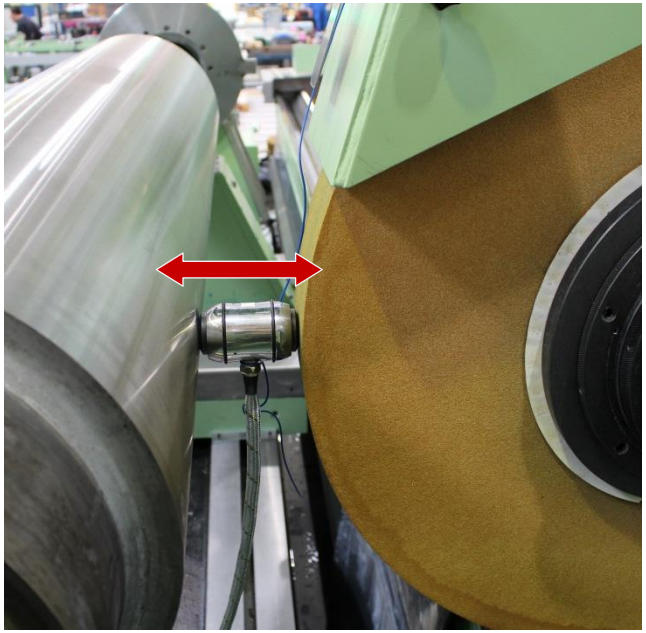
- Erfassung der wesentlichen Resonanzen von Maschine und Walze
- Abgleich der Resonanzfrequenzen mit möglichen Schwingungsanteilen im Schleifprozess
- Betrachtung der Dämpfung der Walzeneigenschwingung durch die Auflage auf den Setzstöcken

© planlauf GmbH

Maschinenuntersuchung: Ermittlung und Bewertung der Eigenschwingungsformen von Maschine und Walze



Messpunktegitter der Maschine mit 400 Messpunkten

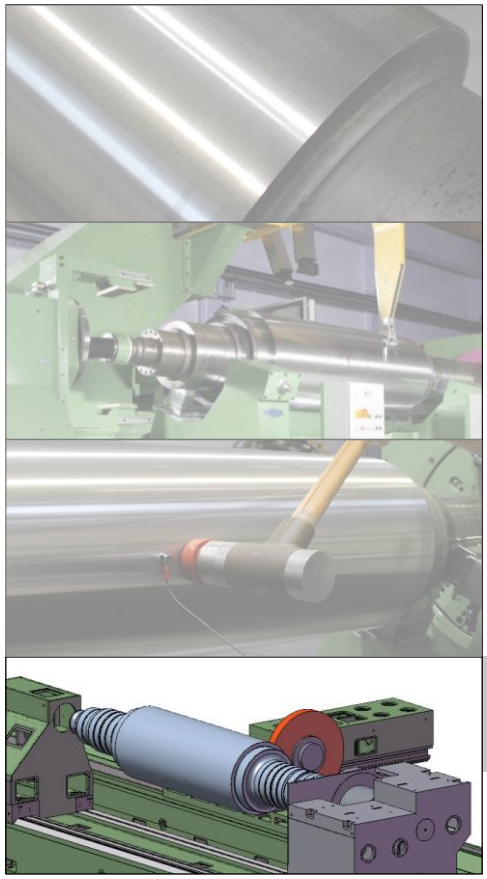


Modalanalyse:

- Relative oder absolute Anregung
- Gerichtete oder räumliche Anregung
- Messung der Maschinenbewegung an 200 – 600 Messpunkten
- Darstellung aller Messpunkte und Animation der kritischen Bewegungsformen

© planlauf GmbH

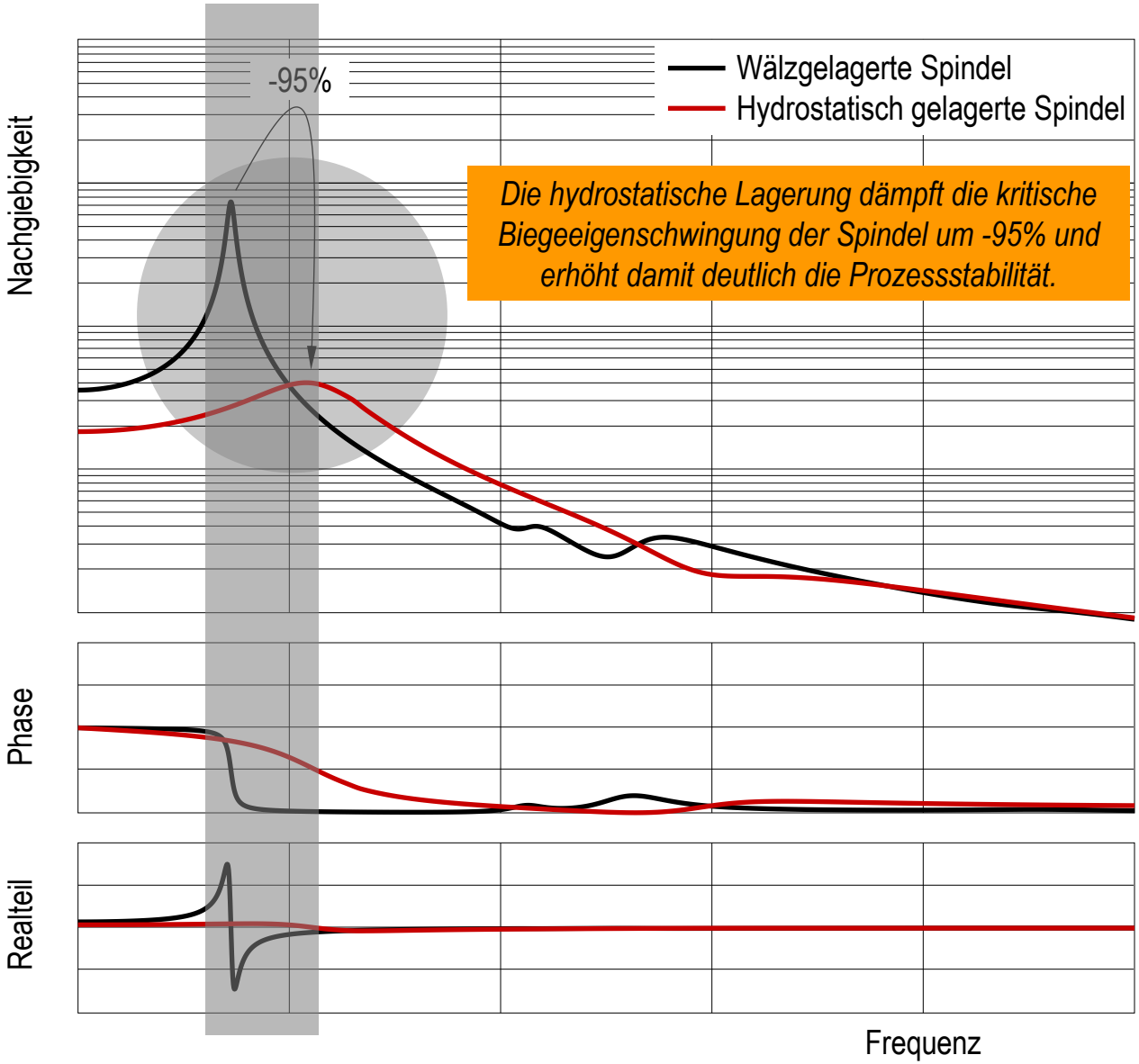
Gliederung

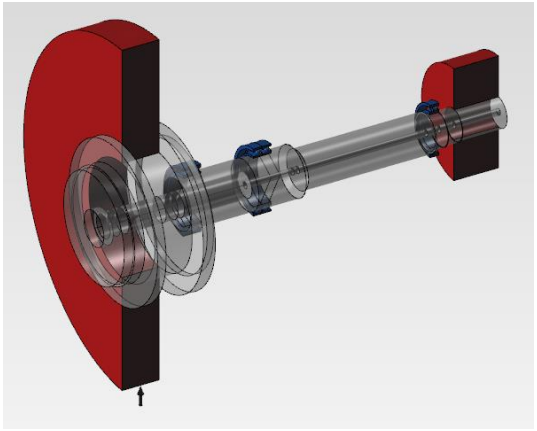


- Prozessstabilität statt Schwingungen beim Präzisionsschleifen
- Herausforderungen für die Schleifmaschinenkonstruktion
- Methoden zur Schwachstellenerkennung und -vermeidung
- Maßnahmen zur Stabilitätsoptimierung beim Walzenschleifen
- Zusammenfassung

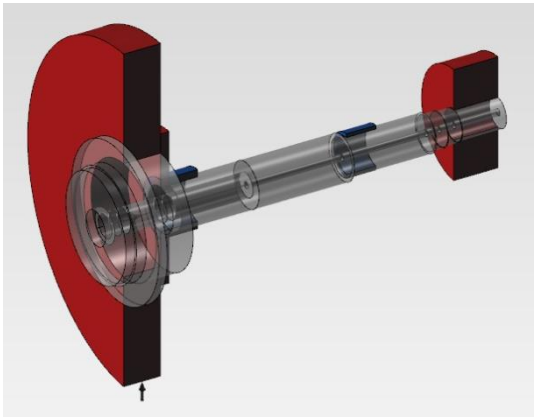
© planlauf GmbH

Hydrostatik vs. Wälzlagerung – Vorteile im Dämpfungsverhalten
Radialer Nachgiebigkeitsfrequenzgang





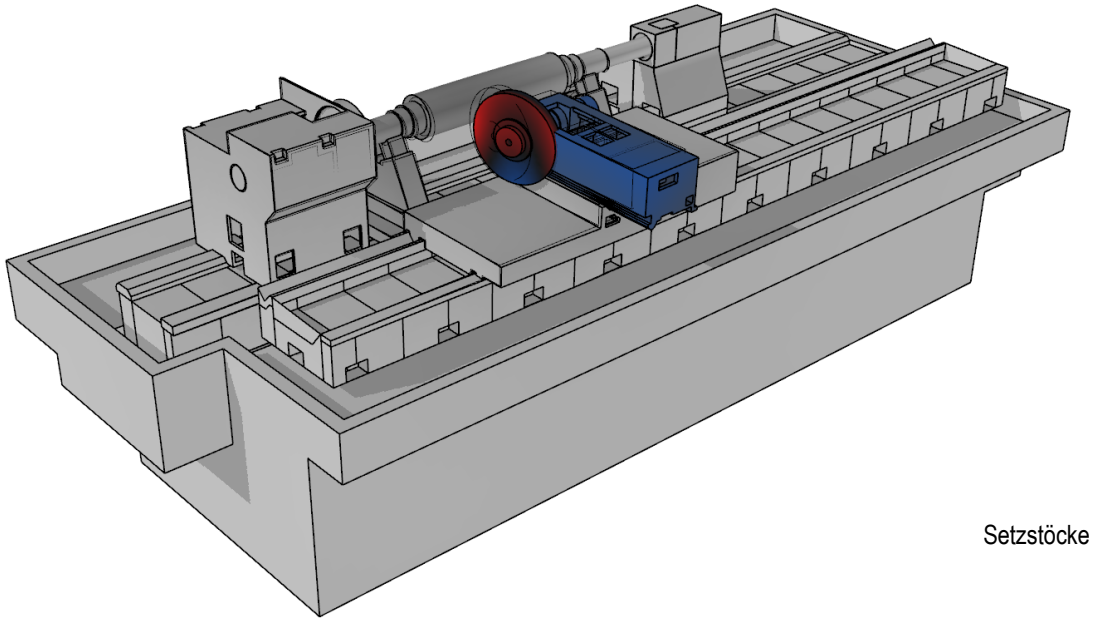
Wälzgelagerte Spindel



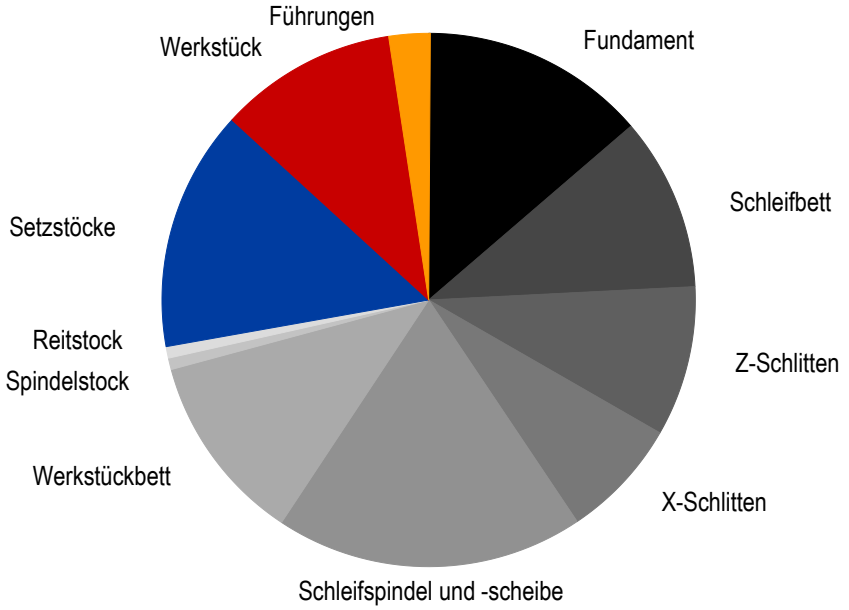
Hydrostatisch gelagerte Spindel

© planlauf GmbH

Maschinenaufstellung: Erhöhung des Steifigkeitsniveau im Schleifspalt bei ausreichender Fundamentierung



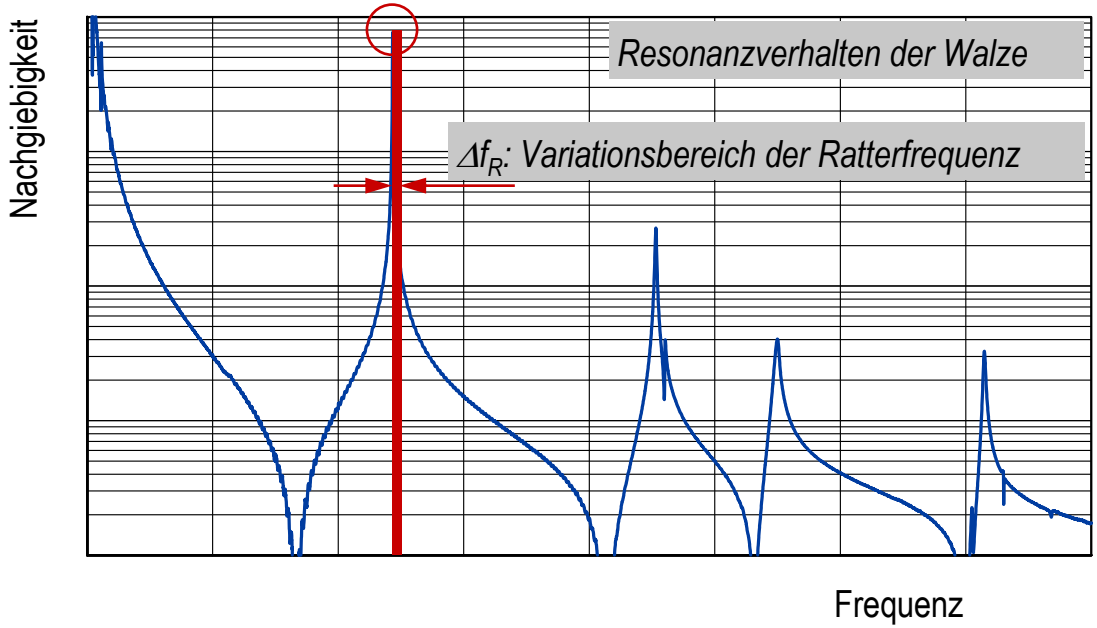
Anteile der einzelnen Komponenten an der Gesamtverformung

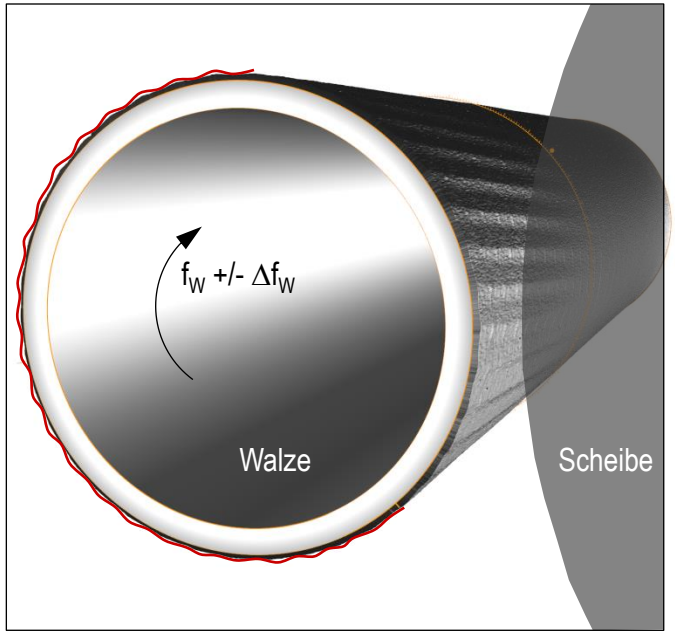


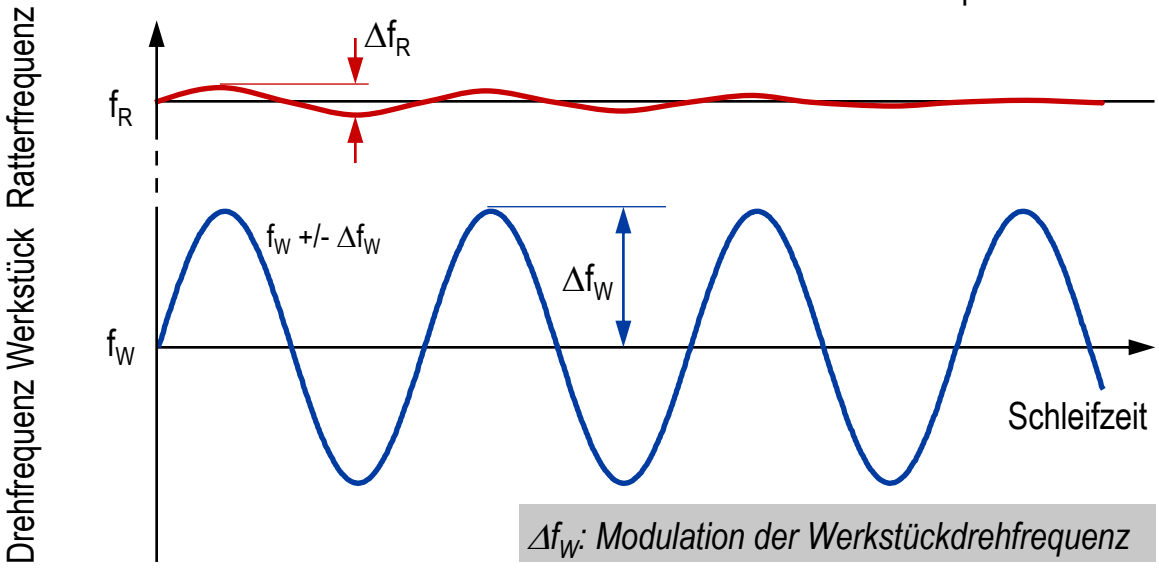
Mit Schwingfundament des Anwenders wird eine gleichmäßige Verteilung der Verformungsanteile erreicht

© planlauf GmbH

Prozessführung: Drehzahlmodulation als Werkzeug zur Schleifprozess-stabilisierung





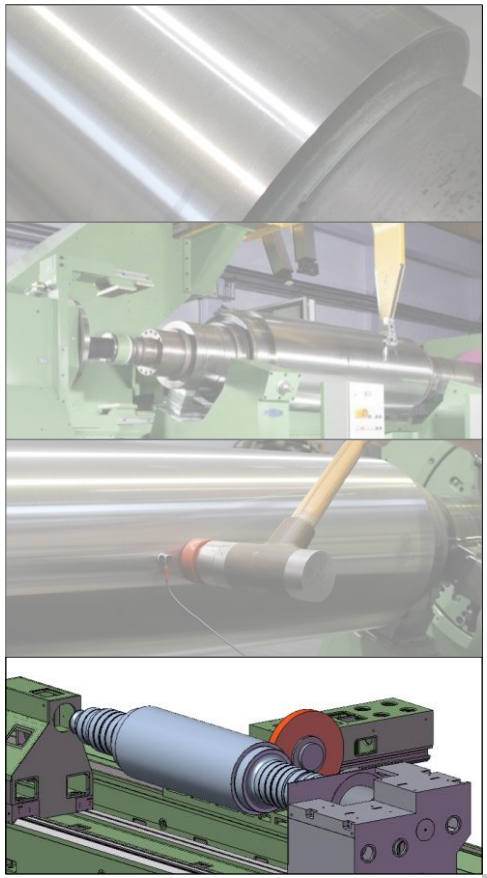


Drehzahlmodulationen:

- **Schleifdrehzahlmodulation:** Reduziert den Einfluss durch die geometrische bzw. massebedingte Restunwucht
- **Werkstückdrehzahlmodulation:** Stört die Welligkeitsbildung durch den regenerativen Rattereffekt über mehrere Überschliffe

© planlauf GmbH

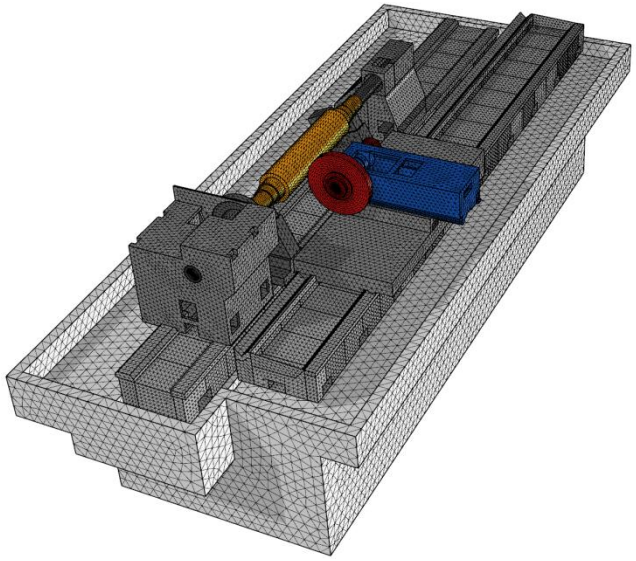
Gliederung



- Prozessstabilität statt Schwingungen beim Präzisionsschleifen
- Herausforderungen für die Schleifmaschinenkonstruktion
- Methoden zur Schwachstellenerkennung und -vermeidung
- Maßnahmen zur Stabilitätsoptimierung beim Walzenschleifen
- Zusammenfassung

© planlauf GmbH

Zusammenfassung



- Verschiedenste Schwingungseinflüsse können die Werkstückqualität beim Schleifen reduzieren.
- Die Entwicklung von Walzenschleifmaschinen muss die Anforderungen „hohe dynamische Stabilität beim Leistungsschleifen“ und „hohe Schleifpräzision beim Feinschlichten“ kombinieren.
- Modernste Simulationsverfahren helfen bereits frühzeitig bei der Optimierung des statischen und dynamischen Steifigkeits-verhalten einer Walzenschleifmaschine.
- Bewährte Messstrategien zur Schwingungs- und Steifigkeitserfassung ermöglichen eine schnelle und systematische Maschinen- und Prozessanalyse.
- Beispiele zeigten die Relevanz einer guten Maschinen-fundamentierung und einer Schleifspindel mit hohem Dämpfungsverhalten zur vollen Nutzung der dynamischen Leistungsfähigkeit einer Walzenschleifmaschine.

© planlauf GmbH

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

planlauf GmbH
Steinbachstraße 25
52074 Aachen
Telefon 0241 / 568 2768-0
Telefax 0241 / 568 2768-98
www.planlauf.com

Ihr Ansprechpartner
Dr.-Ing. Severin Hannig
Telefon 0241 / 568 2768-11
s.hannig@planlauf.com

mit uns technisch überlegen

Heinrich Georg GmbH
Langenauer Str. 12
57223 Kreuztal
Telefon 02732 / 779 306
wzm@georg.com

© planlauf GmbH