

**Dynamische Stabilität von Schleifmaschinen –
Potenziale und Risiken**

planlauf GmbH, Aachen (Deutschland)

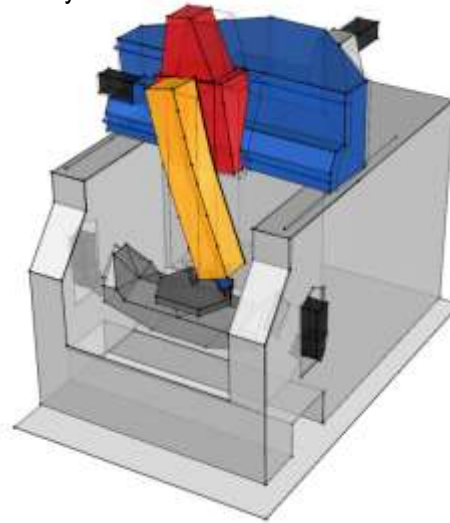
Thun, 23. Mai 2014

Dr.-Ing. Severin Hannig



Frequenzgangmessung

Modalanalyse



Messung

Produkte und Dienstleistungen:

Messung

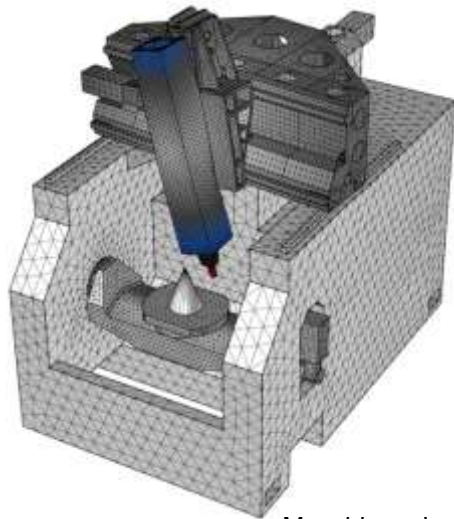
- Verlagerungen / Zerspankräfte
- Schwingungen / Steifigkeiten
- Modalanalyse / Frequenzgänge
- Geometrie / dyn. Spindelrundlauf
- Boden- / Fundamentanalysen
- Langzeitüberwachung von Maschinen

Berechnung

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

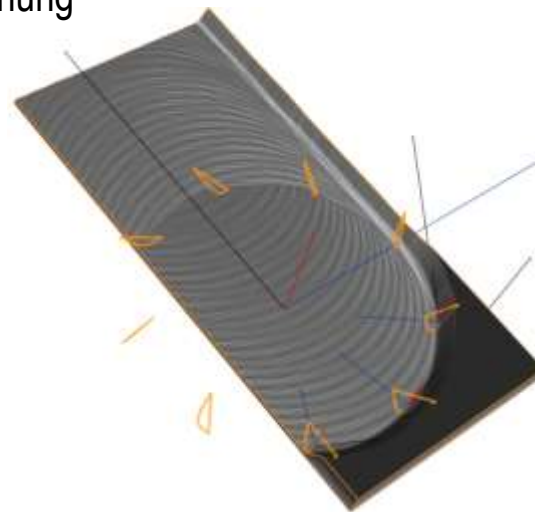
Entwicklung

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

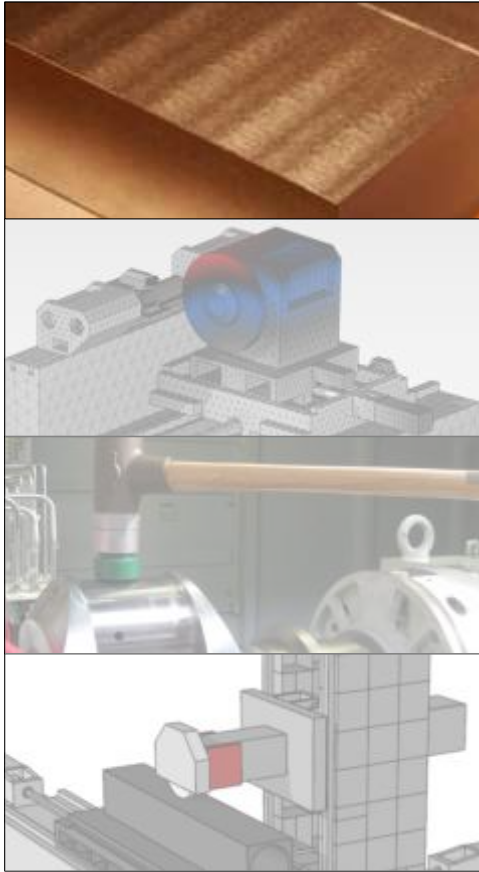


Maschinensimulation

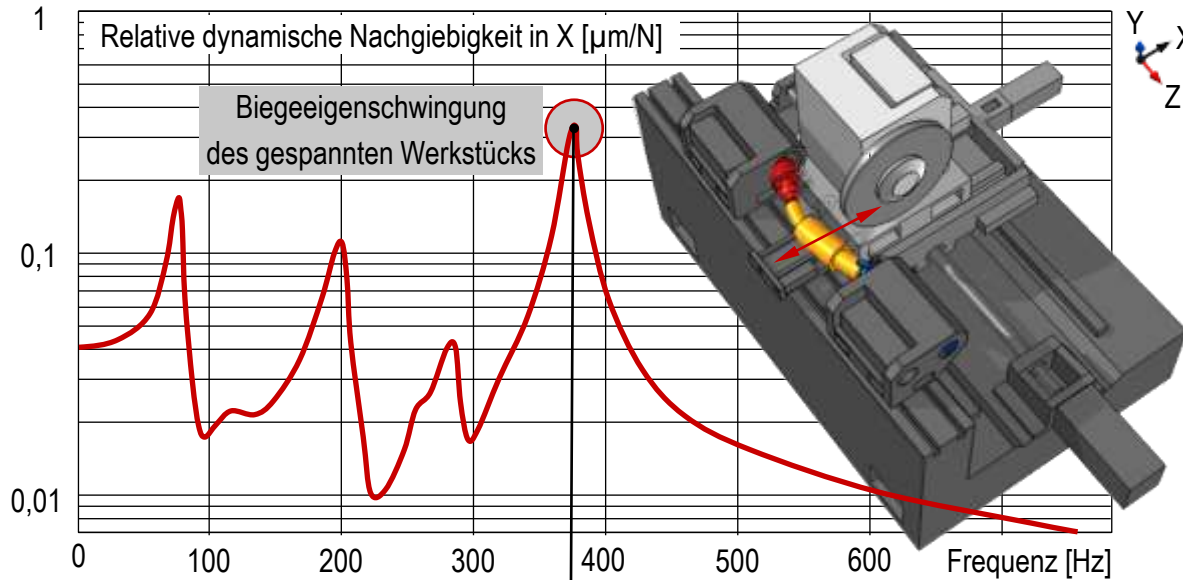
Berechnung



Zerspansimulation

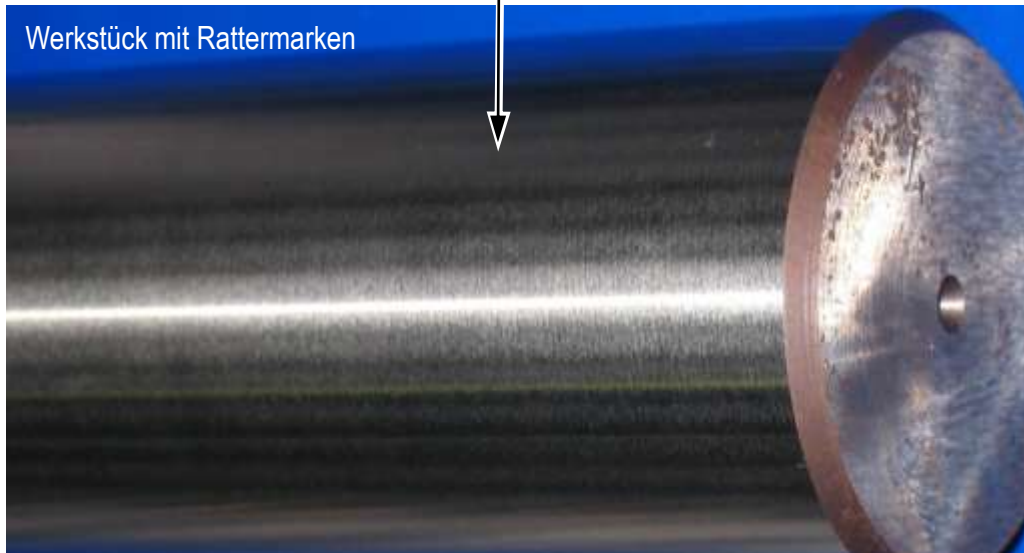


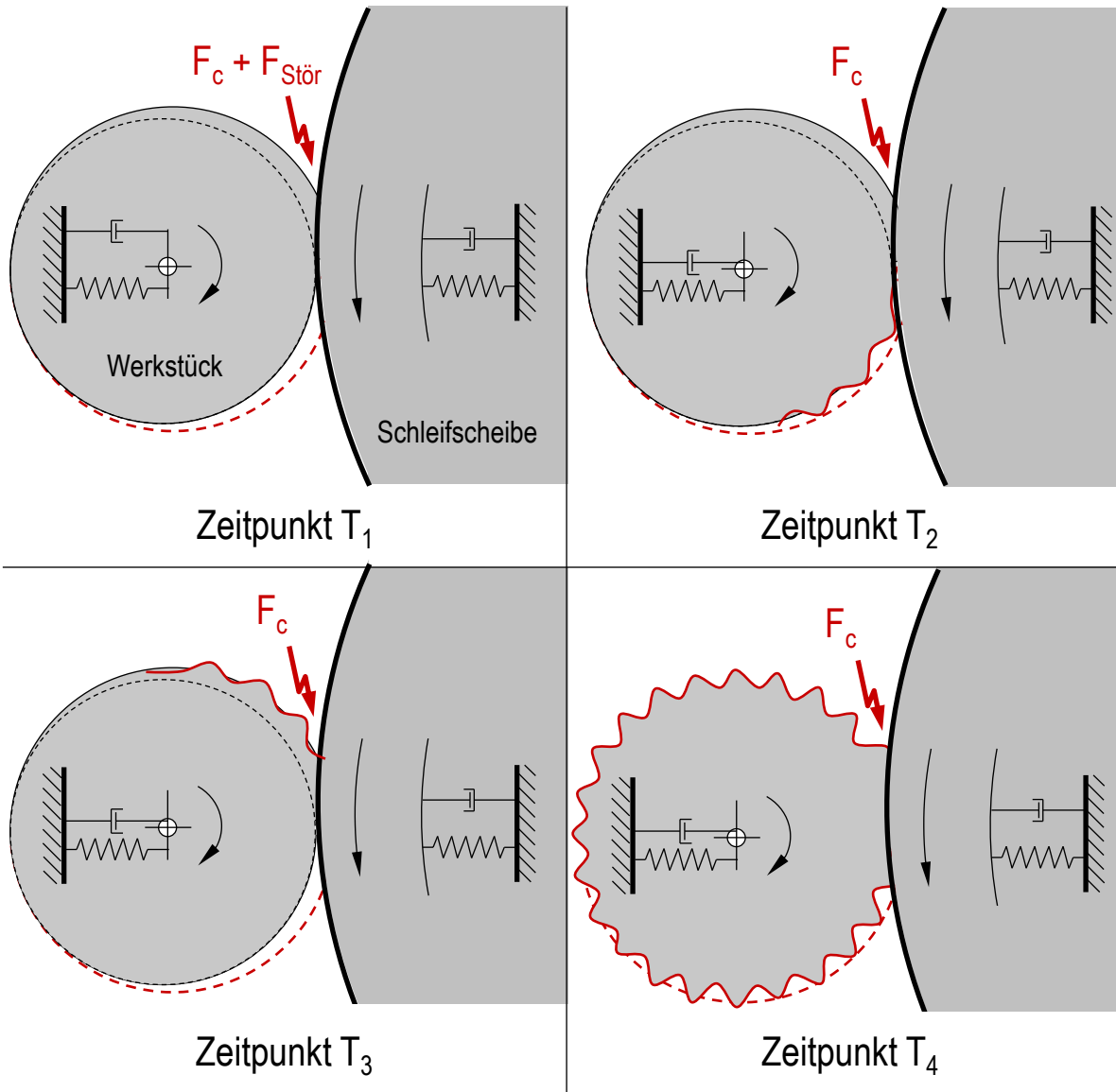
- Dynamische Stabilität und Schwingungen beim Schleifen
- Risiken der Dynamik in der Schleifmaschinenkonstruktion
- Möglichkeiten zur Erkennung von Schwingungsursachen
- Potenziale zur Vermeidung dynamischer Schwachpunkte
- Zusammenfassung



Charakteristik des Ratterns

- 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.



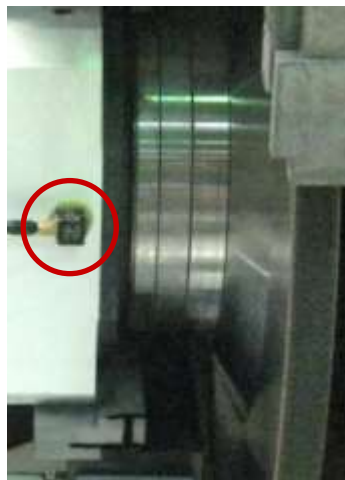
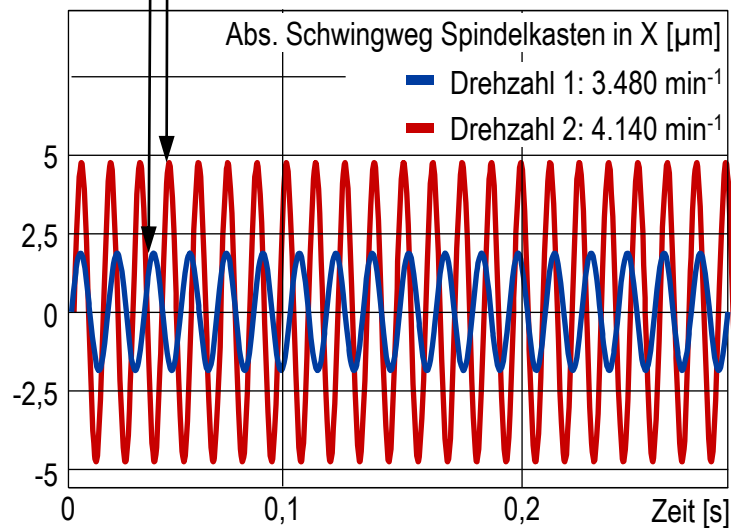
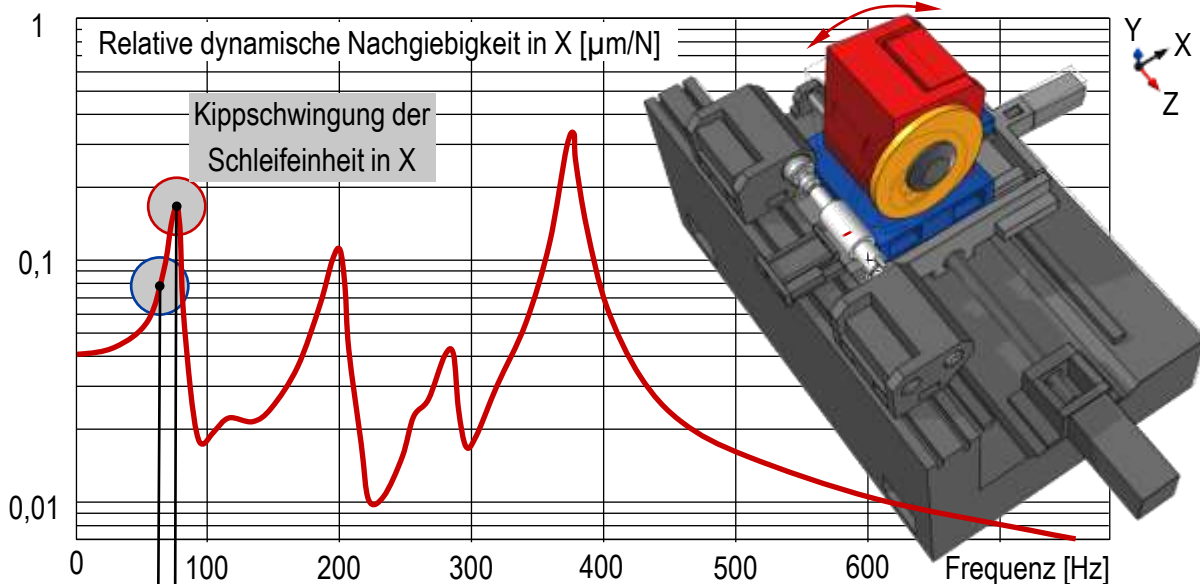


Der Mechanismus des Ratterns

- 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!

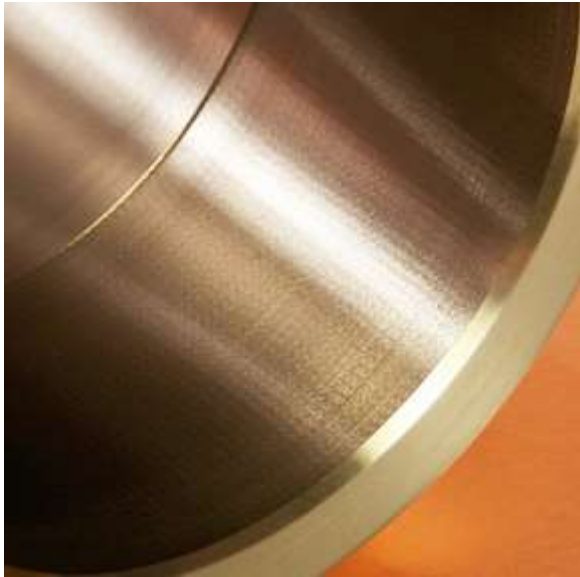


Charakteristik der Schwingung

- Die Drehfrequenz der Scheibe befindet sich in einem Frequenzbereich, in dem die Maschine mit höherer Nachgiebigkeit reagiert.
- Das Schwingungsniveau erhöht sich nicht gleichmäßig mit steigender Drehzahl (Resonanzdurchfahrt).
- Keine Selbstverstärkung und kein Aufschwingen.
- Die Wellenzahl auf geschliffenem Bauteil lässt sich immer auf die Drehfrequenz der Scheibe bzw. Vielfache zurückrechnen.

Verwandte Probleme:

- Aufstellerschwingung nach externer Anregung über den Boden.
- Schwingung durch interne Anregung über Aggregate.



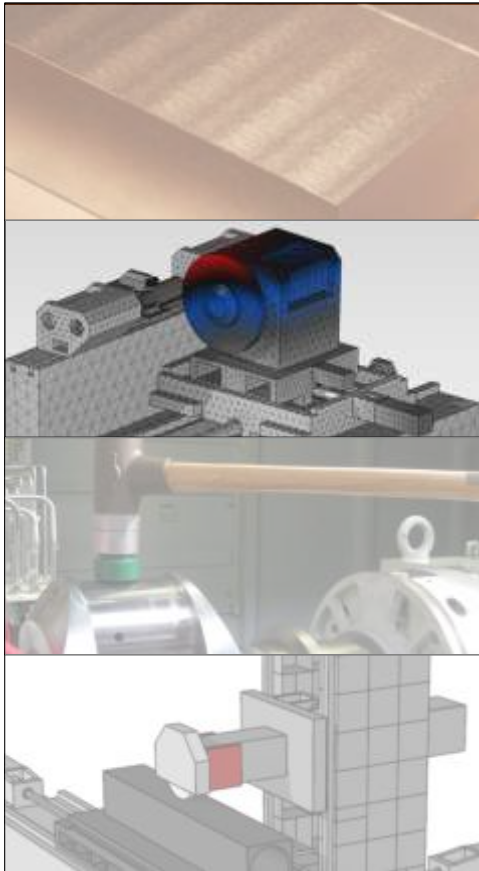
Konsequenz

- Sicht- und/oder messbare Facetten auf der geschliffenen Oberfläche.
- Verschleiß/Wellenbildung auf der Scheibe.
- Toleranzprobleme bei FFT-Ordnungsanalysen.
- Reduzierte Lebensdauer von Spindeln, Lagern, Führungen.



Fragestellungen

- **Vorhersage:** Ist das Schwingungsrisiko kalkulierbar?
- **Zuordnung:** Lassen sich Schwingungsprobleme gliedern, z.B. nach Herkunftsort?
- **Statistik:** Welche Schwingungsprobleme treten abhängig vom Maschinentyp häufig auf?



- Dynamische Stabilität und Schwingungen beim Schleifen
- Risiken der Dynamik in der Schleifmaschinenkonstruktion
- Möglichkeiten zur Erkennung von Schwingungsursachen
- Potenziale zur Vermeidung dynamischer Schwachpunkte
- Zusammenfassung

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

Abrichteinheit:

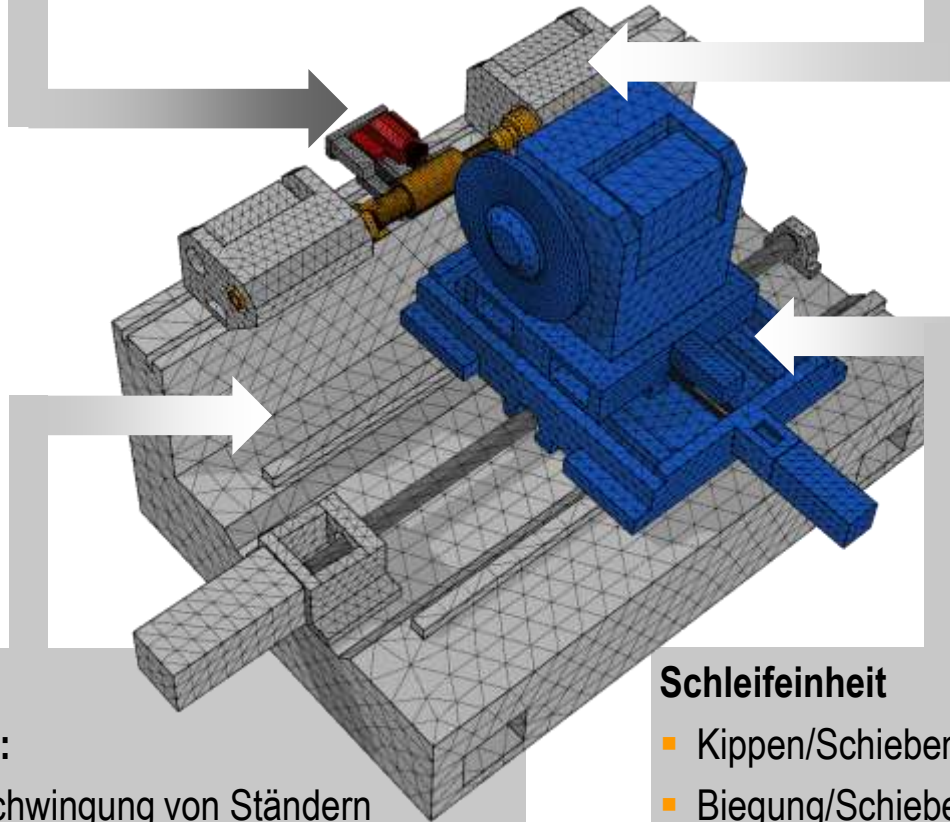
- Kippen/Schieben der Abrichtschlitten/Gehäuse
- Biegung/Schieben/Torsion der Abrichtspindel
- Eigenverformung des Abrichtwerkzeugs

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
- ...



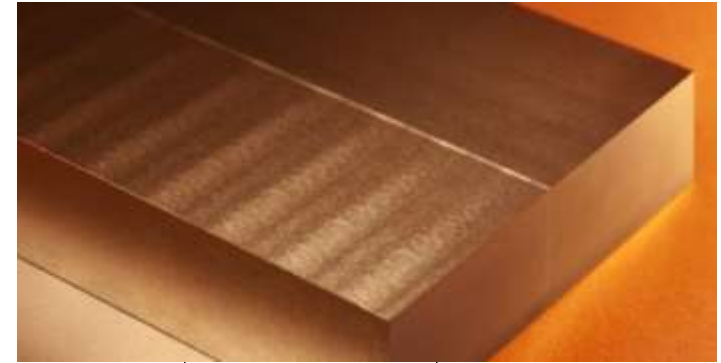
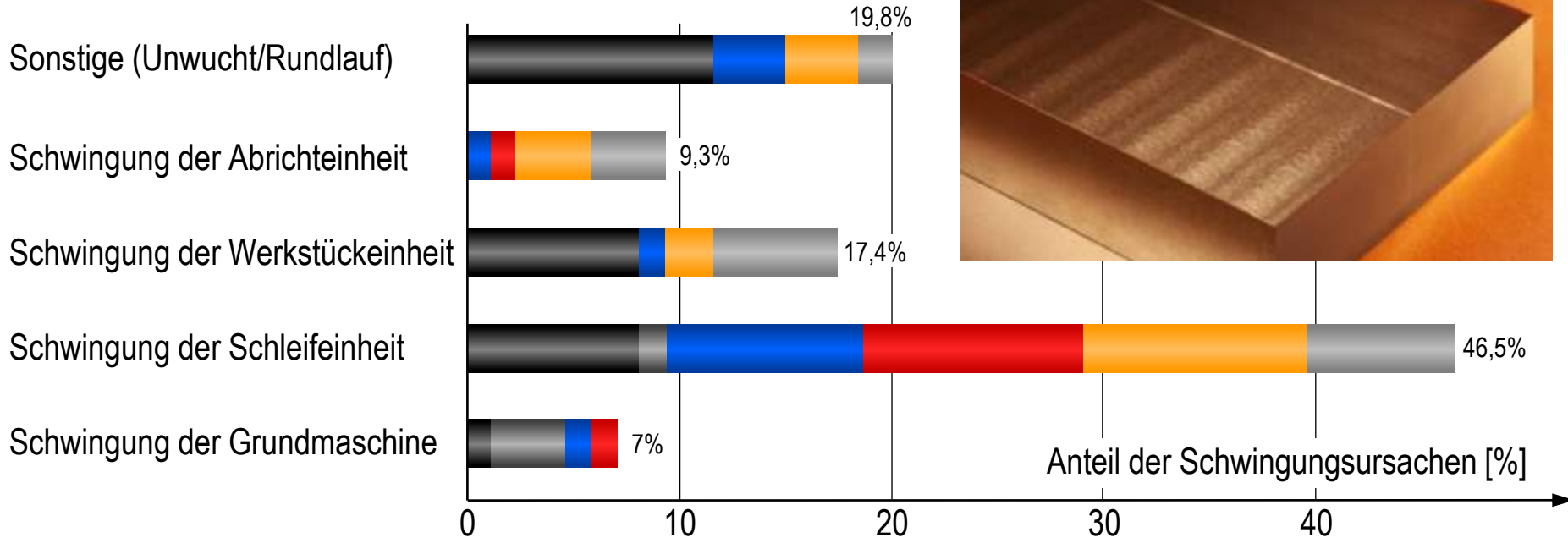
Grundmaschine:

- Kipp-/Pendelschwingung von Ständern
- Aufstellerschwingung des Maschinenbetts

Schleifeinheit

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

Prozentuale Verteilung der Ratterursachen:



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

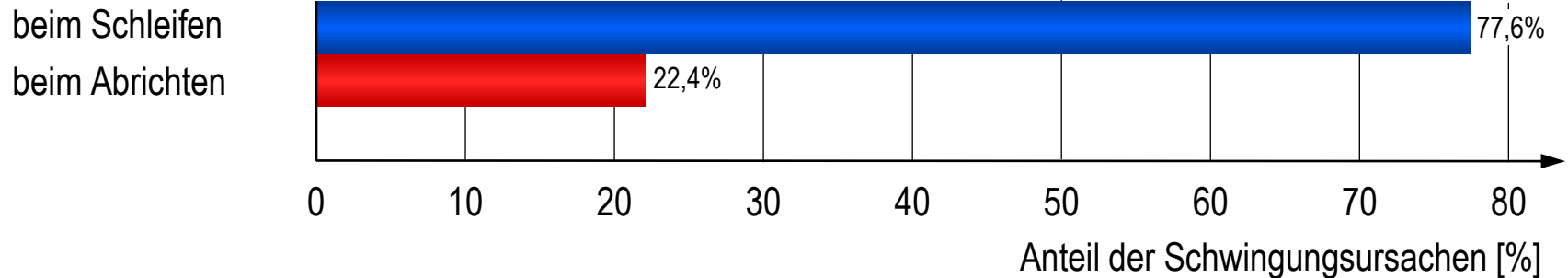
- 16 Außenrundscheifmaschinen (zwischen Spitzen)
- 4 Innenrundscheifmaschinen
- 11 Portal- oder Ständerscheifmaschinen (große Bauformen)
- 9 Flach- oder Profilscheifmaschinen (ein- und doppelspindlig)
- 12 Spitzenlosscheifmaschinen
- 10 Sonstige Scheifmaschinen (Verzahnung- / Messer- etc.)

Hinweis:

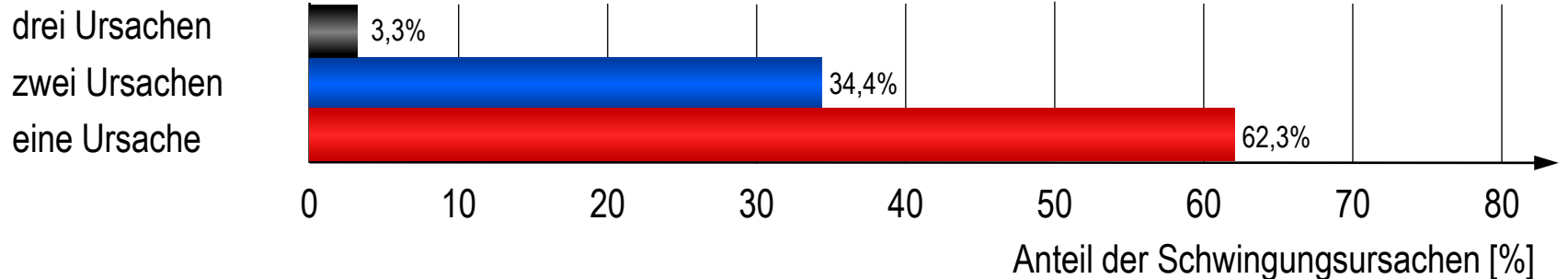
- Schwingungsprobleme mit mehreren Ursachen wurden auch mehreren Bereichen zugeordnet.

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

Die Ratterschwingungen traten auf:

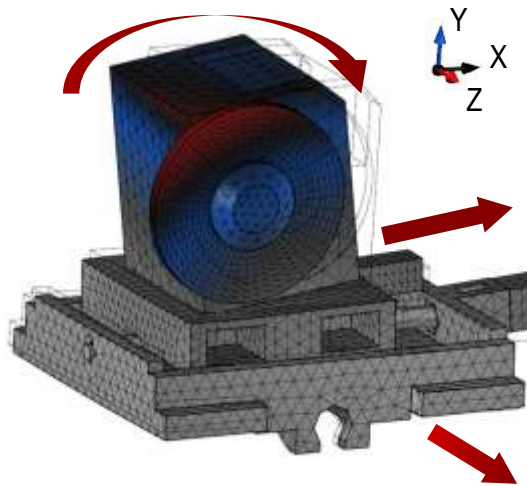


Die Ratterprobleme hatten:

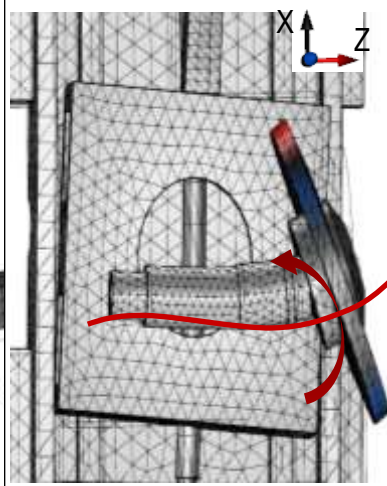


Fazit:

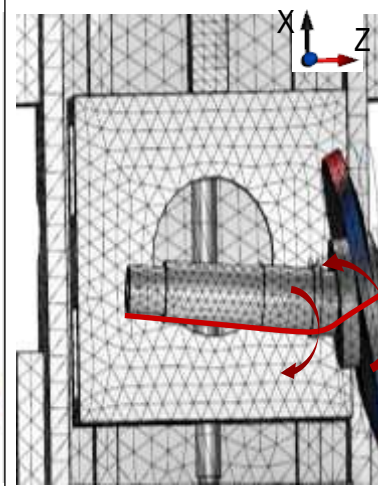
- Aufgrund der höheren Prozesskräfte traten mit ca. 78% die meisten Ratterprobleme beim Schleifen auf.
- Ca. 38% der Bauteilabweichungen entstanden jedoch durch mehr als eine dynamische Schwachstelle der Maschine.



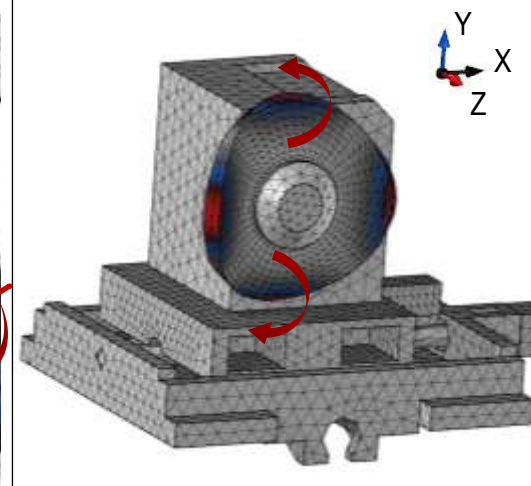
Schieben/Kippen der Schleifeinheit



Biegung des Spindel-Lager-Systems



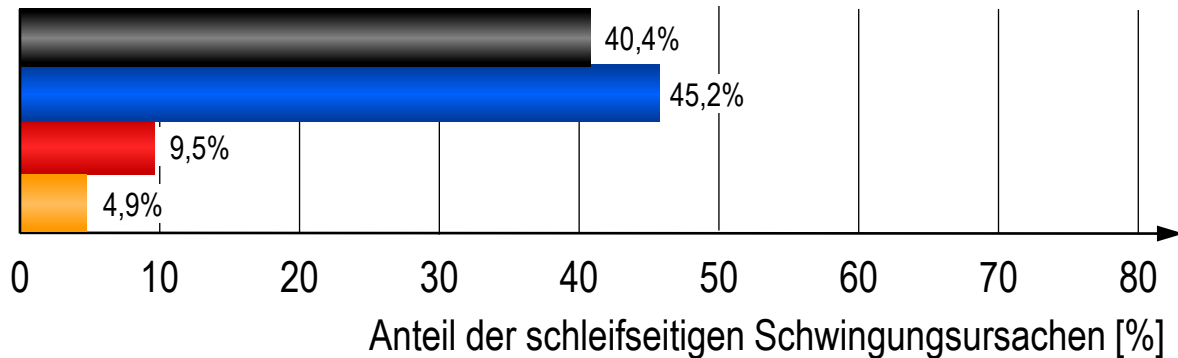
Verkipfung von Spindel und Flansch/Scheibe

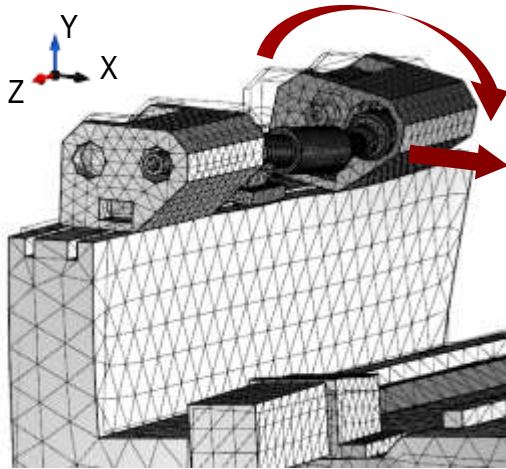


Plattenschwingungen der Schleifscheibe

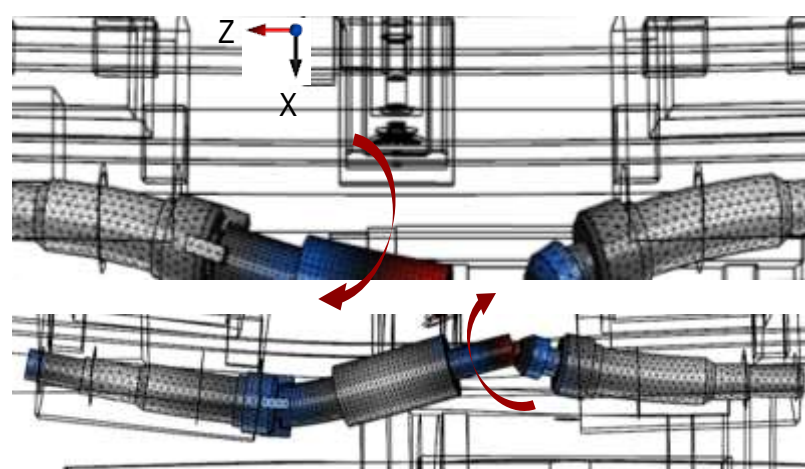
Statistik: Auswertung von 42 Schleifmaschinen mit **Schleifeinheiten**, die Ratterprobleme verursachten:

- Schieben/Kippen der Schleifeinheit
- Biegung des Spindel-Lager-Systems
- Verkipfung von Spindel, Flansch/Scheibe
- Plattenschwingungen der Scheibe

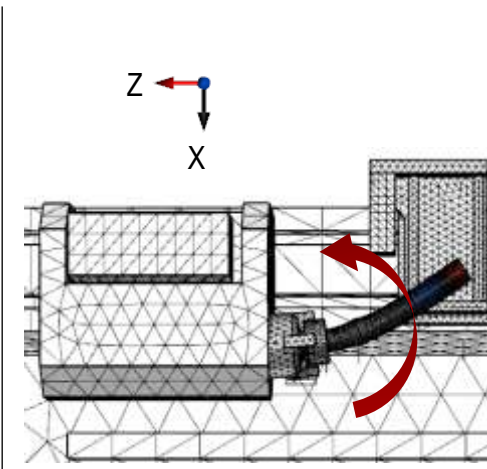




Schieben/Kippen der Werkstückeinheit



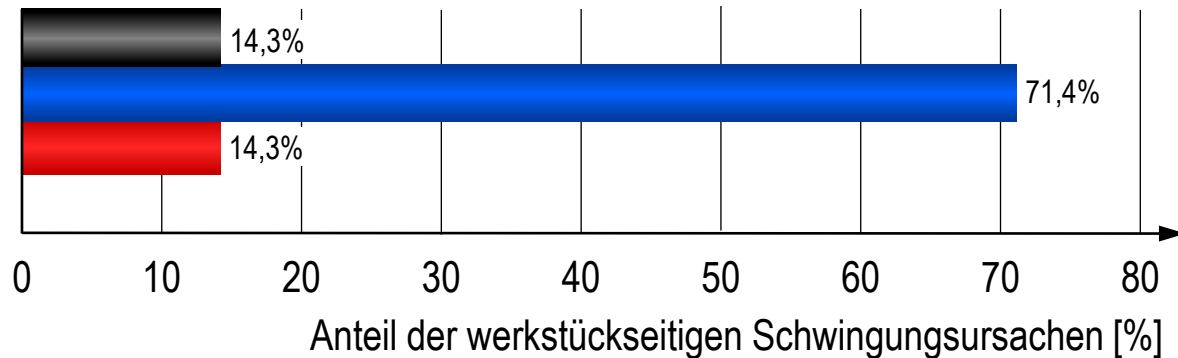
Biegung der Gesamteinheit Spindel/Spannfutter/Werkstück und ggf. Pinole

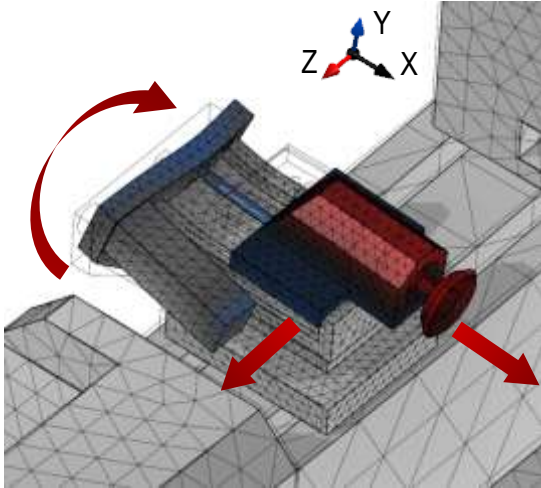


Eigenverformung des Werkstücks

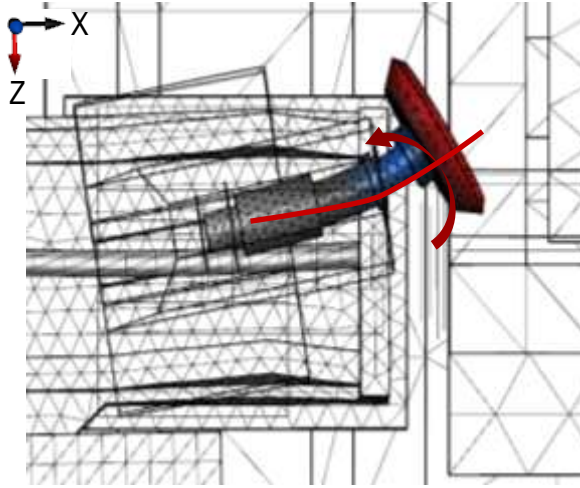
Statistik: Auswertung von 14 Schleifmaschinen mit **Werkstückeinheiten**, die Ratterprobleme verursachten:

- Schieben/Kippen der Werkstückeinheit
- Biegung Spindel/Spannfutter/Werkstück
- Eigenschwingung des Werkstücks

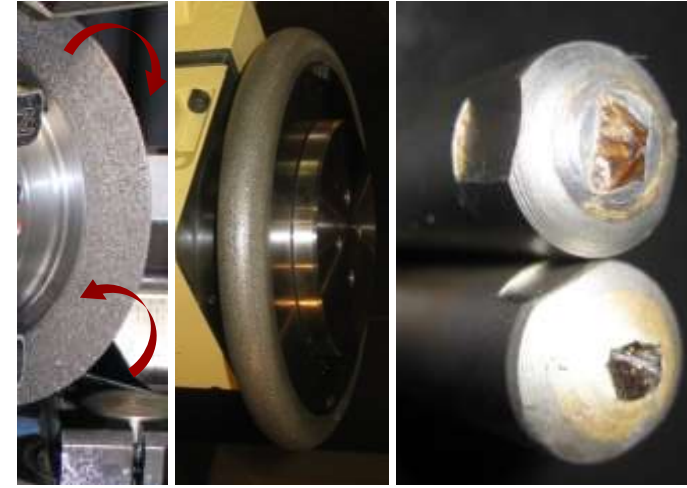




Schieben/Kippen der Abrichteinheit



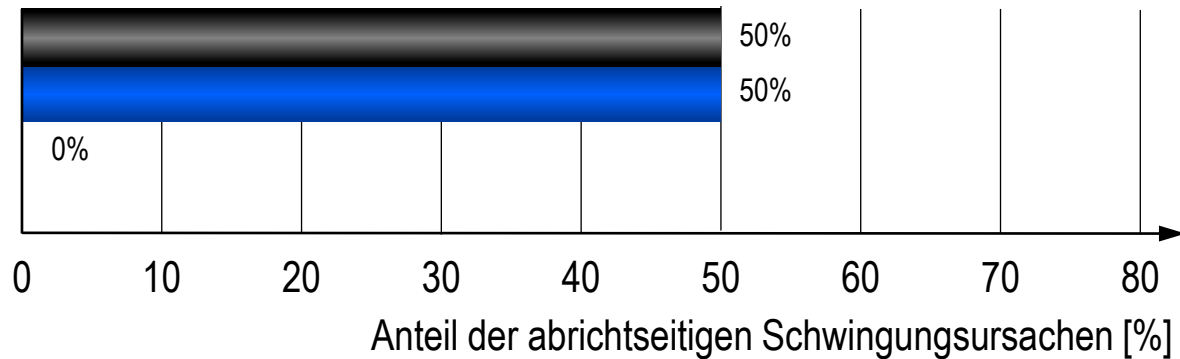
Biegung des Spindel-Lager-Systems

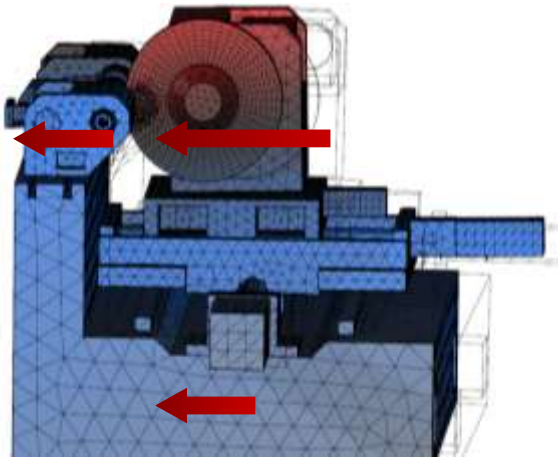


Eigenverformung des Abrichtwerkzeugs (Rolle / Flies / Einkorn etc.)

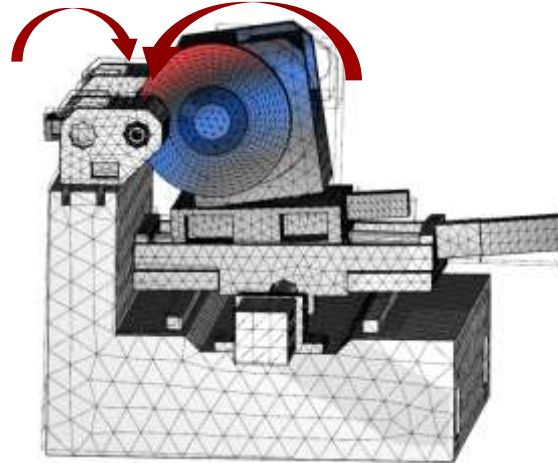
Statistik: Auswertung von 8 Schleifmaschinen mit **Abrichteinheiten**, die Ratterprobleme verursachten:

- Schieben/Kippen der Abrichteinheit
- Biegung des Spindel-Lager-Systems
- Eigenverformung des Abrichtwerkzeugs





Aufstellungsschwingung mit Phasenversatz zwischen beiden Seiten



Kippschwingung der Werkzeugseite gegenüber der Werkstückseite

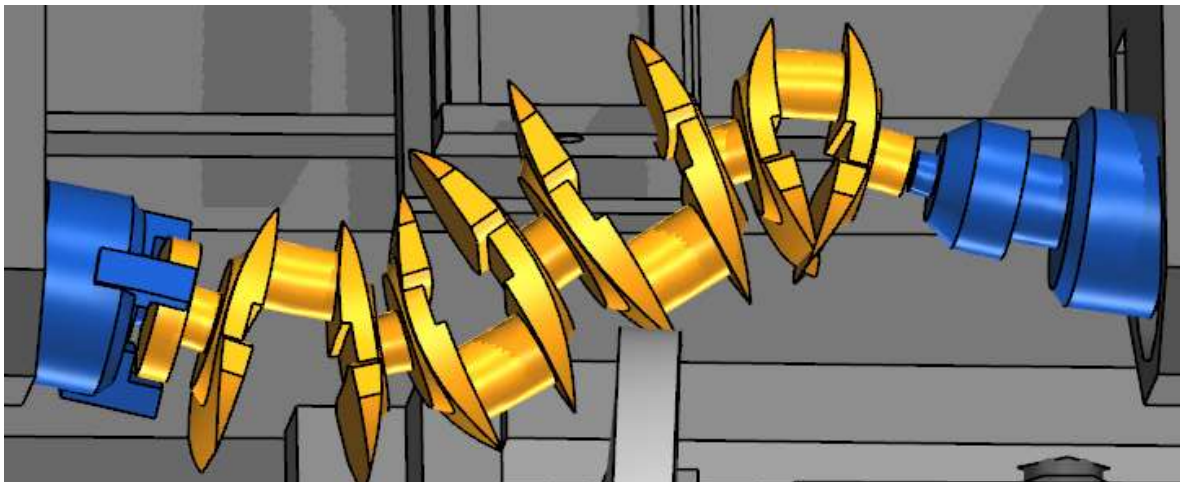
Überschwingen durch Massen-/Trägheitsunterschiede zwischen Werkzeug und Werkstückseite werden begünstigt durch:

- Schnelle Richtungswechsel der Schlitten aufgrund der Nockenform.
- Hohe Aufbauten oberhalb des Betts.
- Ähnliche Eigenfrequenzen der Werkstück- und der Werkzeugeinheit.

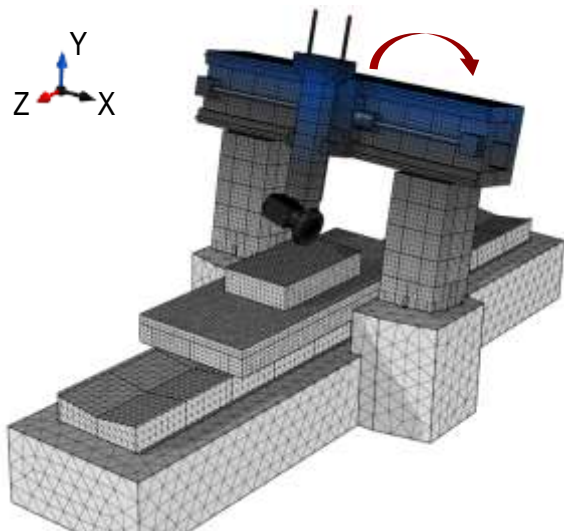
Eigenschwingung der gespannten Kurbelwelle ist problematisch bei:

- Kurbelwellen mit hohem Hub (schwache Querschnitte)
- Einspannungskonzepten ohne Verzug (Gelenke im Spannfutter)
- erstem Anschliff ohne Lünetten

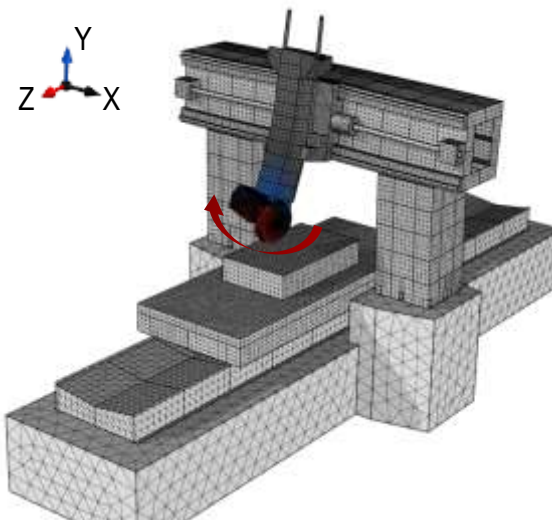
Eine Welligkeit auf Lager A kann sich beim Kontakt zur Lünette anschließend auf Lager B übertragen.



S-förmige Eigenverformung einer Kurbelwelle



KippSchwingung des Portals



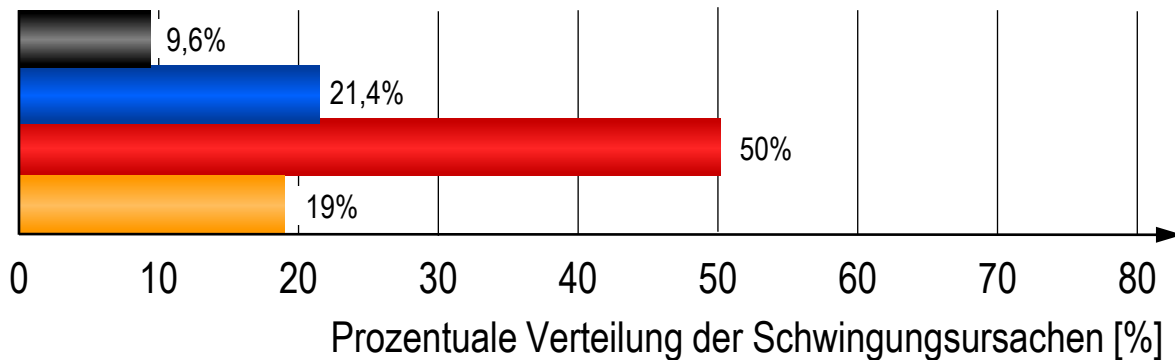
Pendelschwingung des Schiebers

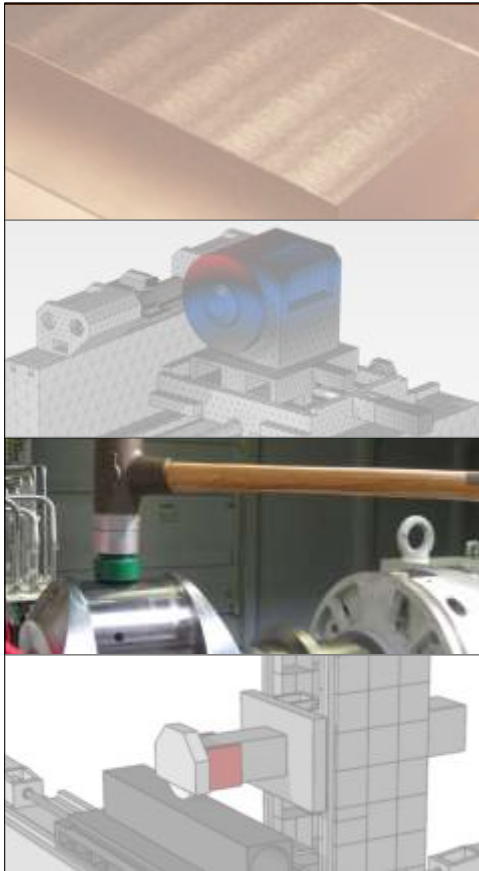
Das Pendeln des Schiebers/Schleifkopfes wird begünstigt durch:

- Weite Auskragungen des Schiebers
- Schwere Werkzeug-/Schleifköpfe
- Geringe Schieberquerschnitte

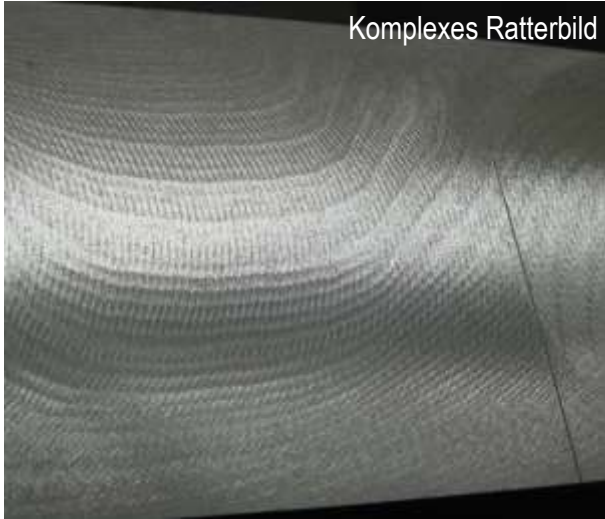
Statistik: Messtechnische Problemanalysen an 42 Großwerkzeugmaschinen in Portal-, Gantry-, oder Ständerbauweise mit senkrechtem Schieber

Kippenschwingung Ständer/Portal
 Eigenschwingung Werkstück / Tisch
 Pendelschwingung des Schiebers
 Sonstige Ursachen



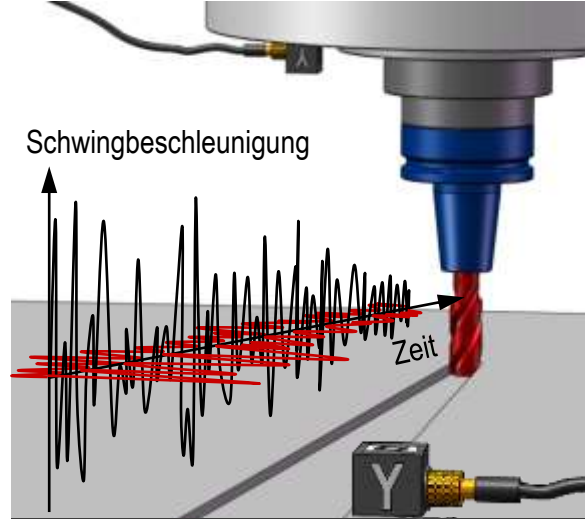


- Dynamische Stabilität und Schwingungen beim Schleifen
- Risiken der Dynamik in der Schleifmaschinenkonstruktion
- Möglichkeiten zur Erkennung von Schwingungsursachen
- Potenziale zur Vermeidung dynamischer Schwachpunkte
- Zusammenfassung

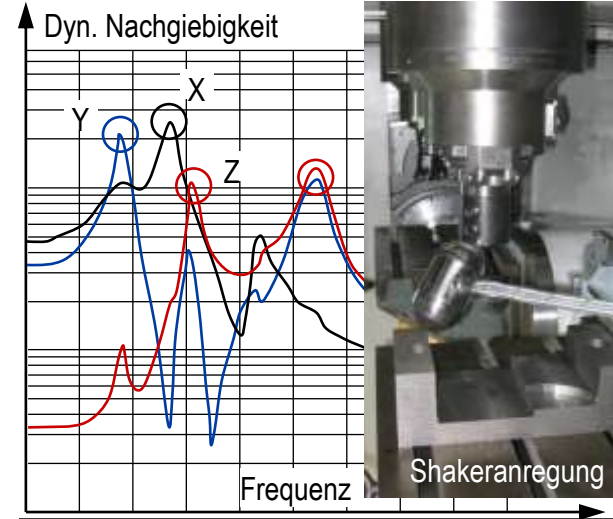


Komplexes Ratterbild

Analyse der zerspannten Oberflächen



Schwingungsanalyse der Prozesse



Maschinensteifigkeitsanalyse

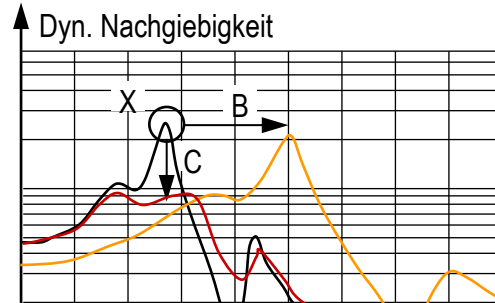
Komplettuntersuchung:

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

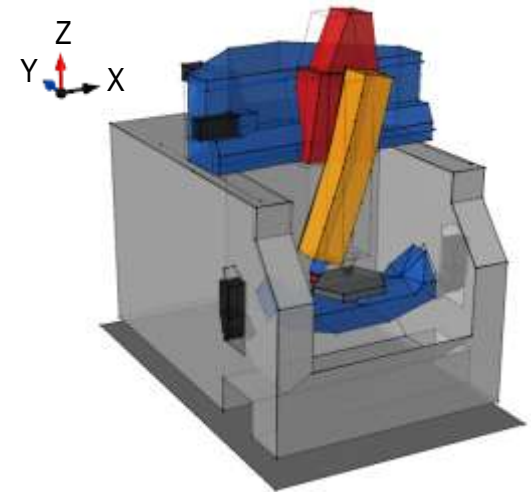
Zeitaufwand



Beurteilung von Verbesserungsmaßnahmen

- A: Prozessänderungen
- B: Versteifung von Komponenten
- C: Bedämpfung der Maschinenstruktur
- D: ...

Schwachstellenanalyse/Maßnahmen



Gesamt- und Detailmodalanalysen

Messsystem Shaker in verschiedenen Größen



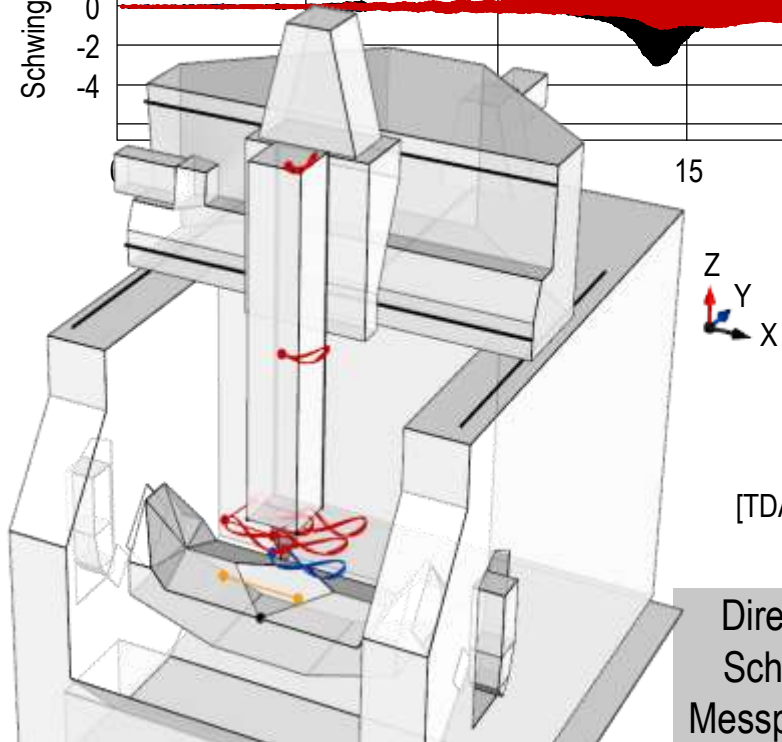
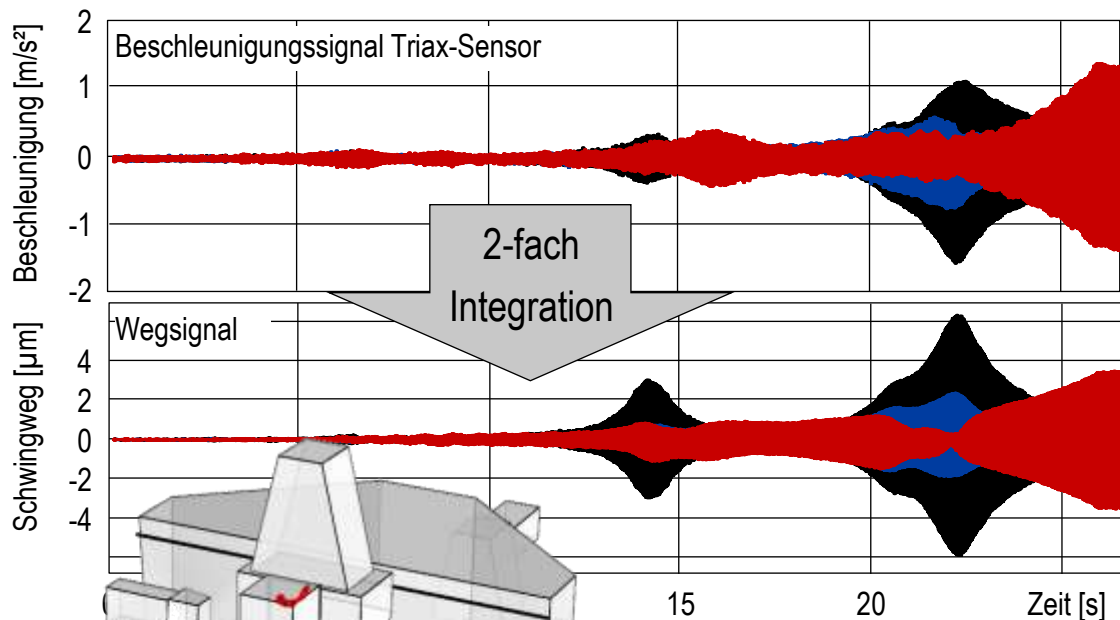
Schwingungserreger (Shaker):

- Einfache Einspannung relativ zwischen Scheiben- und Werkstückseite.
- Prozessnahe Relativanregung der Maschinenstruktur mit statischer Vorlast.
- Flexible Wahl des Anregungsspektrums.

Verwendung:

- Reproduzierbare Messung des quasistatischen und dynamischen Nachgiebigkeitsverhaltens von Maschinen.
- Trennung der Nachgiebigkeitsanteile für die Scheiben- und Werkstückseite.
- Kontinuierliche Anregung und Krafterfassung bei der Modalanalyse.



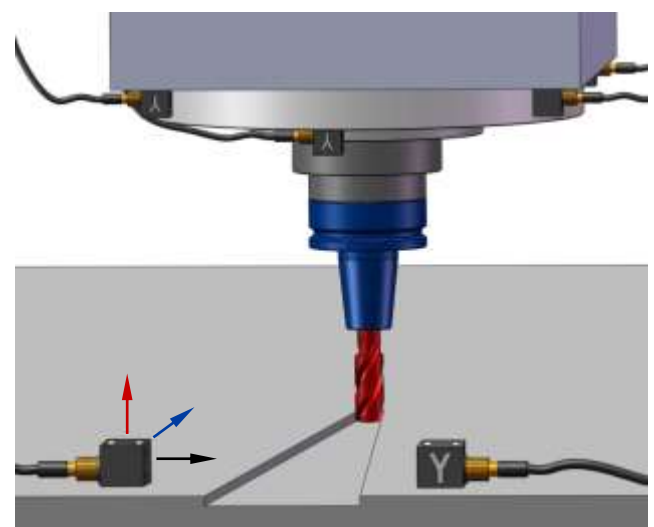


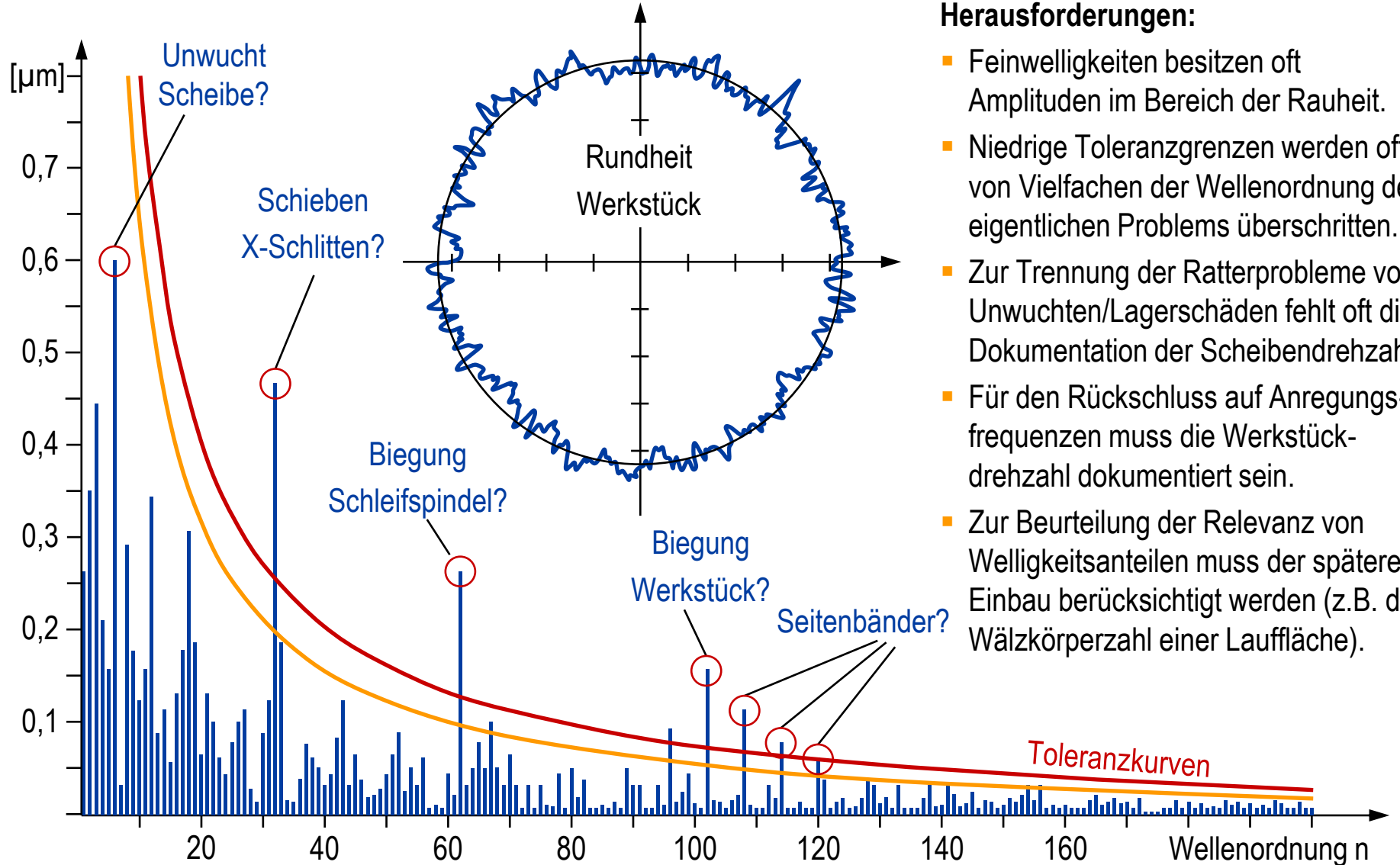
[TDA – Time Domain Analysis]

Direkte Darstellung der Schwingbewegung pro Messpunkt in 3 Richtungen

Direkte Zeitbereichsanalyse (TDA):

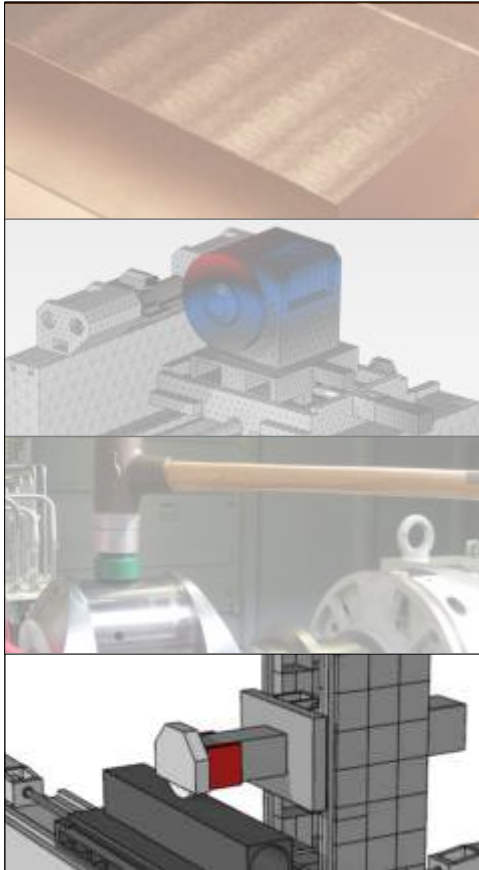
- Nichtlineare und instationäre Prozesse (Aufschwingvorgänge, zeitliche Schwingrichtungsänderungen) können nicht mit Methoden des Frequenzbereiches (Betriebsschwingungs- / Modalanalyse) erfasst werden.
- Die Schwingbeschleunigungen werden gemessen, geeignet 2-fach integriert und als Schwingwege dargestellt.
- I.A. ist die gleichzeitige Messung mit mehreren Triax-Sensoren notwendig.





Herausforderungen:

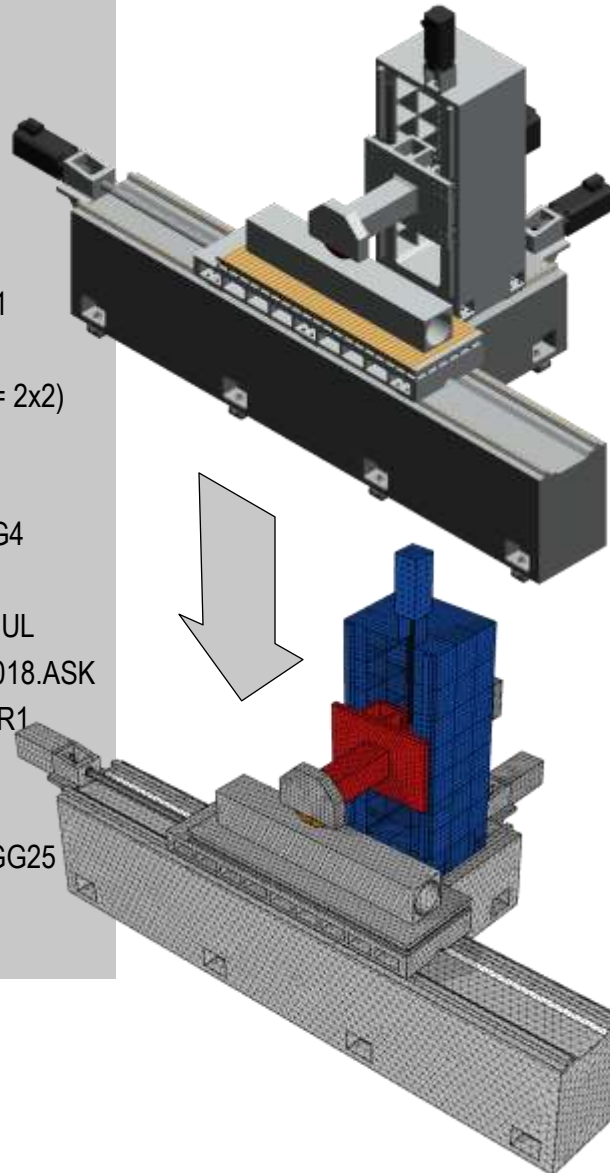
- Feinwelligkeiten besitzen oft Amplituden im Bereich der Rauheit.
- Niedrige Toleranzgrenzen werden oft von Vielfachen der Wellenordnung des eigentlichen Problems überschritten.
- Zur Trennung der Ratterprobleme von Unwuchten/Lagerschäden fehlt oft die Dokumentation der Scheibendrehzahl.
- Für den Rückschluss auf Anregungsfrequenzen muss die Werkstückdrehzahl dokumentiert sein.
- Zur Beurteilung der Relevanz von Welligkeitsanteilen muss der spätere Einbau berücksichtigt werden (z.B. die Wälzkörperzahl einer Lauffläche).



- Dynamische Stabilität und Schwingungen beim Schleifen
- Risiken der Dynamik in der Schleifmaschinenkonstruktion
- Möglichkeiten zur Erkennung von Schwingungsursachen
- Potenziale zur Vermeidung dynamischer Schwachpunkte
- Zusammenfassung

Beispiel einer Flachsleifmaschine:

- Arbeitsraum (X/Y/Z): 800/2000/600 mm³
- X-Achse
 - Führung: 2x2 INA RUE 35 D
 - KGT: Steinmeyer 10.40.7,5.4
 - Festlager: INA ZKLF 3080
 - Motor: Siemes 1FT6086-1AF71-2AH1
- Y-/Z-Achse
 - Führung: INA RUE 45 D (Y = 2x3, Z = 2x2)
 - KGT: Steinmeyer 20.50.9.4
 - Festlager: INA ZKLF 3590
 - Motor: Siemens 1FT6108-8AF71-4PG4
- Hauptspindel
 - Vorne: 4x Spindellager FAG B7020C.UL
 - Hinten: Zylinderrollenlager FAG NN3018.ASK
 - Motor: Siemens 1PM6138-2VF81-1BR1
- Werkstoffe
 - Bett: Epument 145B
 - Ständer, X-Schlitten, Tischschlitten: GG25
 - alle anderen Bauteile: Stahl
- Aufstellung: 12x Isoloc UMS5-ASF/30



Maschinensimulation:

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

Berechnungsmöglichkeiten:

- Statische Steifigkeiten
- Nachgiebigkeitsfrequenzgänge
- Modalanalyse / Eigenschwingungen
- Berücksichtigung des Fundaments
- Wandstärkenoptimierung
- Auslegung von Hilfsmassendämpfern

Keine Aufgabe von Monaten:

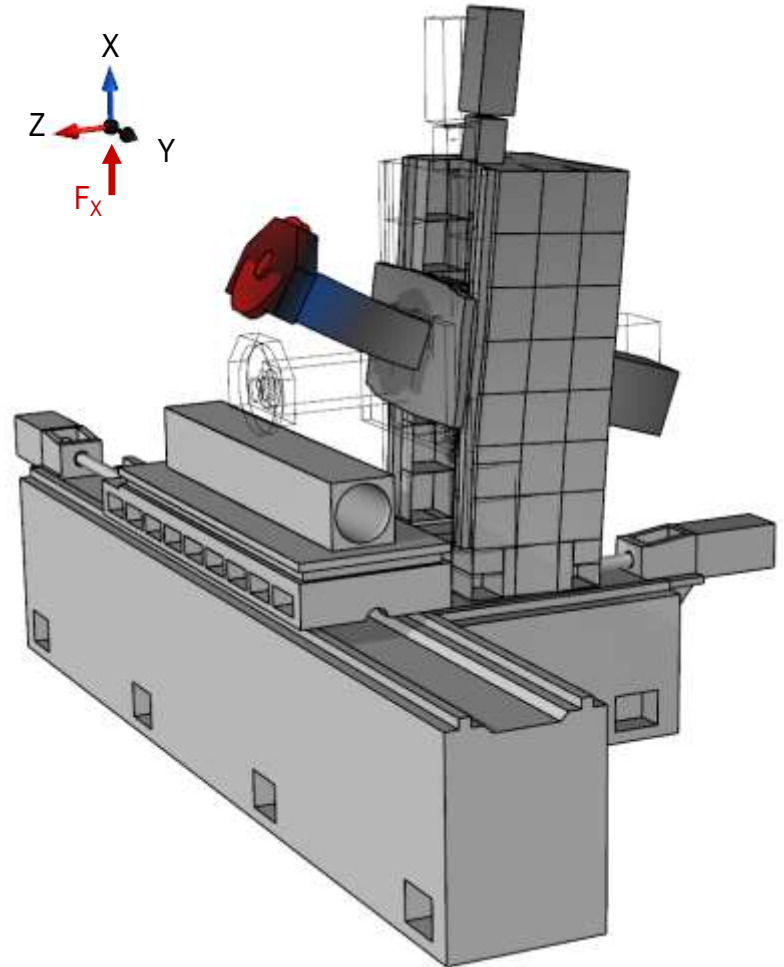
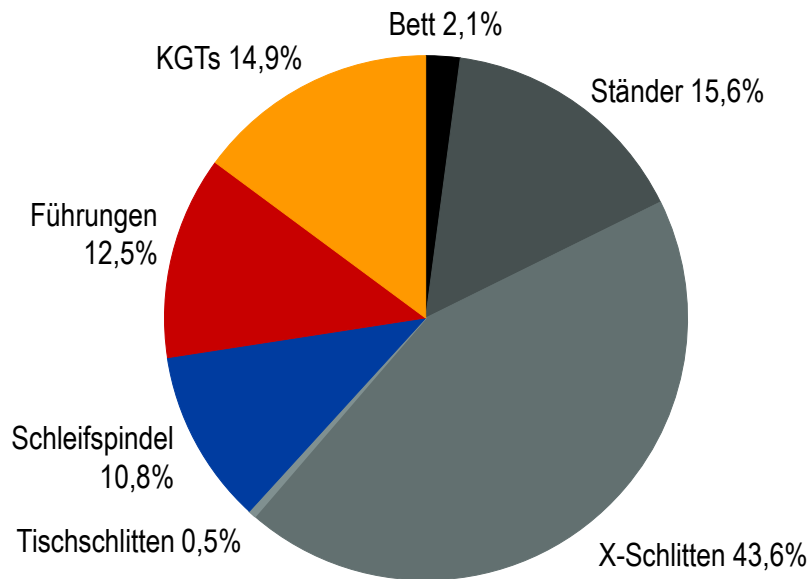
Zeitaufwand für die Berechnung einer Gesamtmaschine inkl. Varianten:

ca. 5 – 7 Tage

Statische Steifigkeit in X-Richtung:

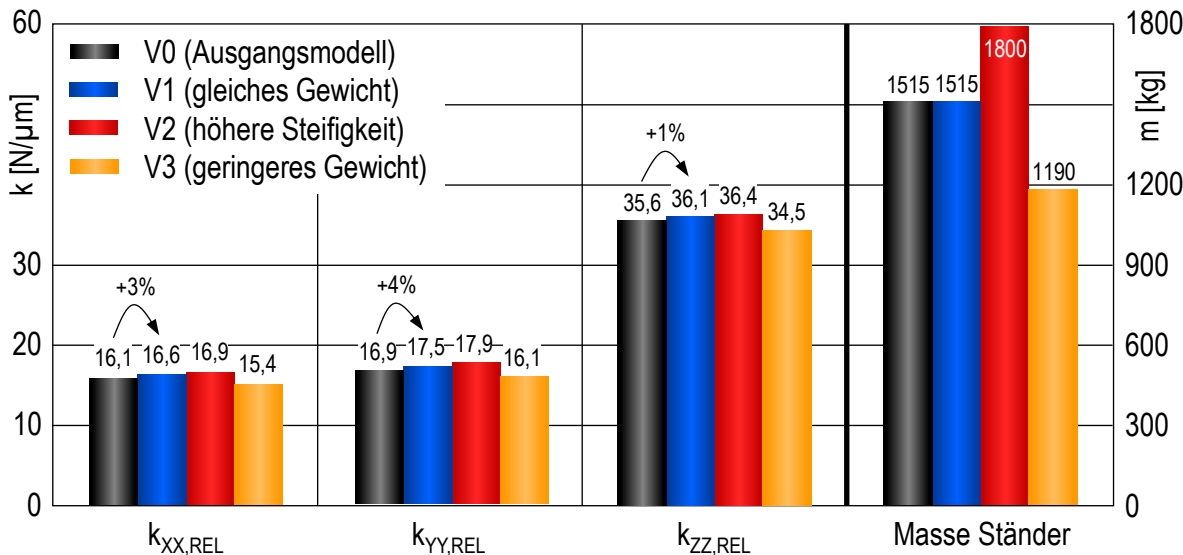
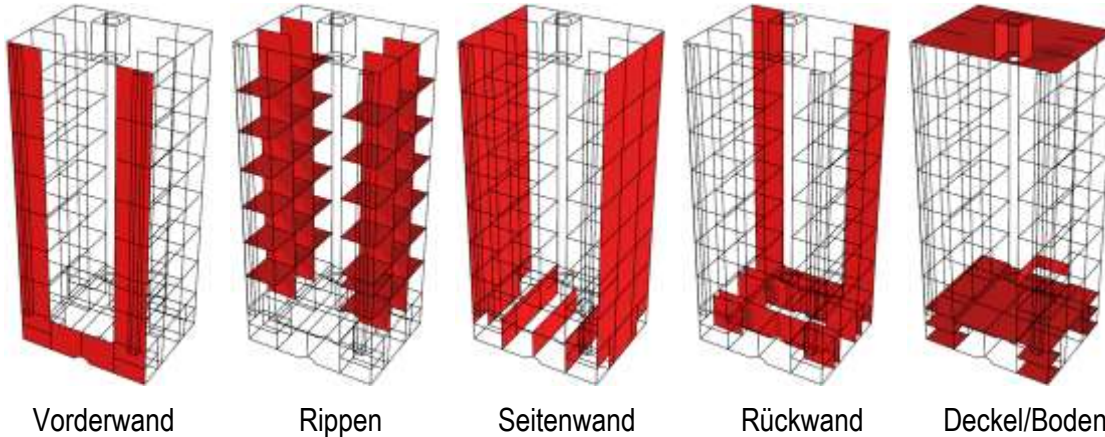
- $k_{XX,REL}$ = 17,9 N/ μ m
- $k_{XX,WZG}$ = 18,1 N/ μ m
- $k_{XX,WST}$ = 2117,9 N/ μ m

Anteile der einzelnen Komponenten an der Gesamtverformung



Die größten Anteile an der Gesamtverformung besitzen der X-Schlitten, der Ständer und der X-KGT.

Ansatzpunkte der Optimierung:

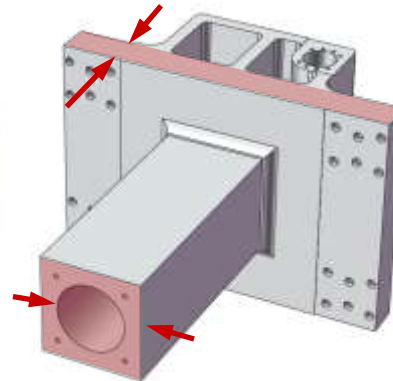
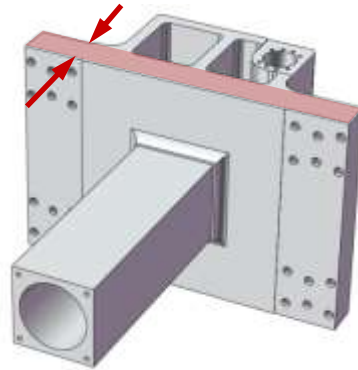
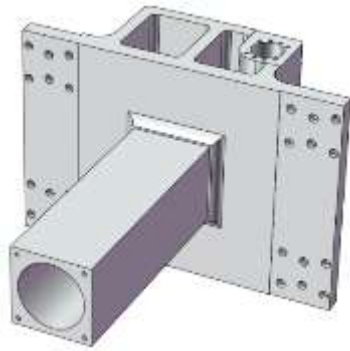


Zielsetzung:

- Verringerung des Bauteilgewichts bei gleichen Steifigkeiten
- Erhöhung der Steifigkeiten bei gleichem Bauteilgewicht

Beispiel Maschinenständer:

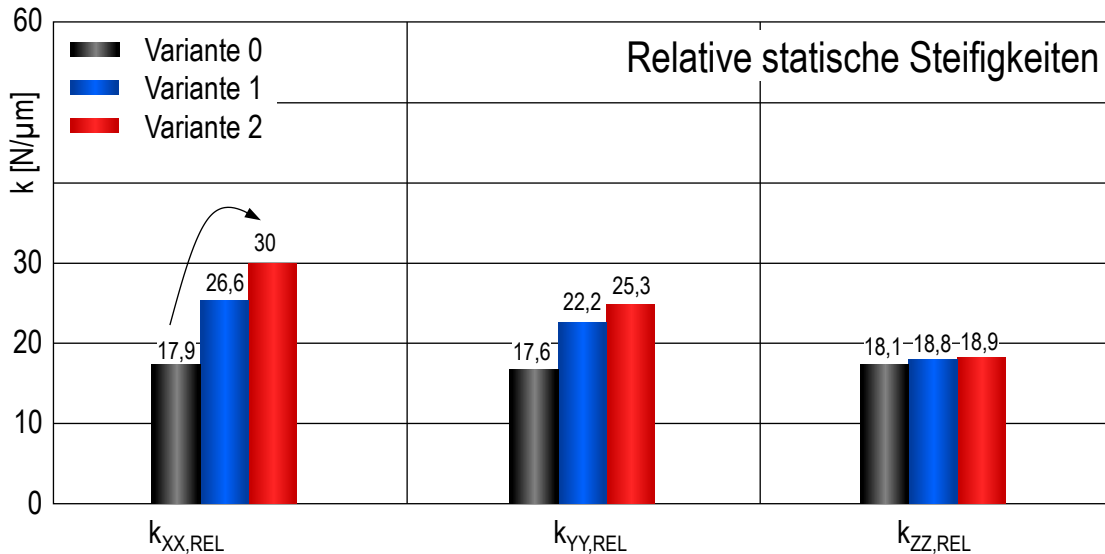
- Durch eine gewichtsneutrale Optimierung der Wandstärken des Ständers kann die Steifigkeit der Flachsleifmaschine in X- und Y-Richtung um 3 bis 4% gesteigert werden.
- Bei einem Verformungsanteil des Ständers von 16 - 21% (X- und Y-Richtung) stellt dies eine recht gute Verbesserung dar.
- Zusätzliche (geringe) Verbesserungen erfordern deutlich mehr Material (vgl. Variante 2: +285 kg).



Variante 0
Ausgangszustand
Material: GG 25

Variante 1
Grundplatte: +40 mm
Material: GGG40

Variante 2
Grundplatte: +40 mm
Vierkant: 220 mm
Material: GGG40

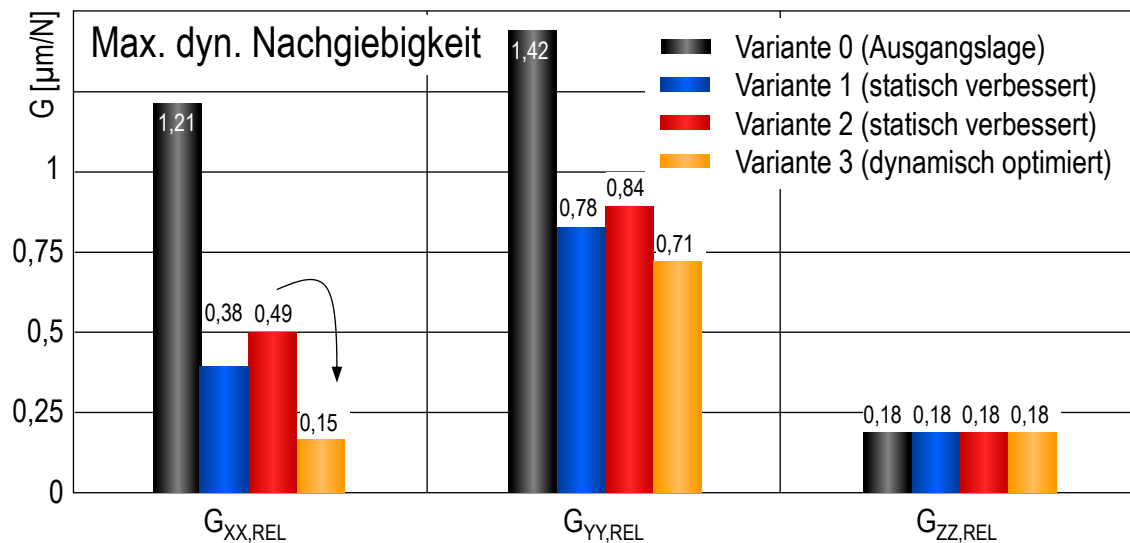
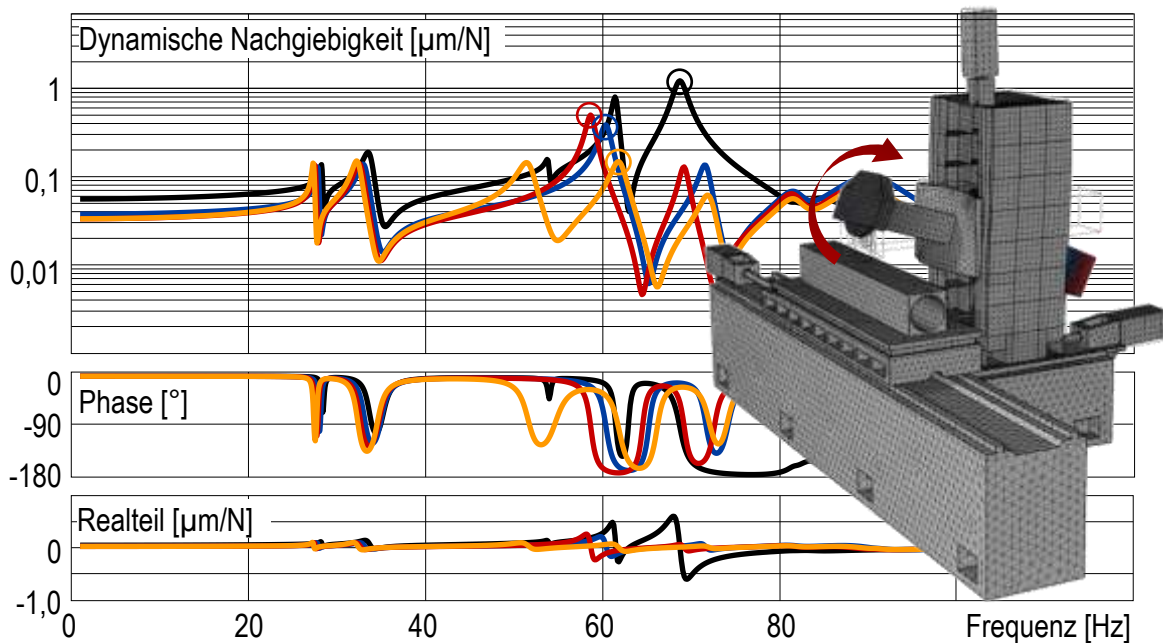


Zielsetzung:

- Systematische Erhöhung statischen Steifigkeiten von Bauteile mit größter Beteiligung an der Gesamtverformung

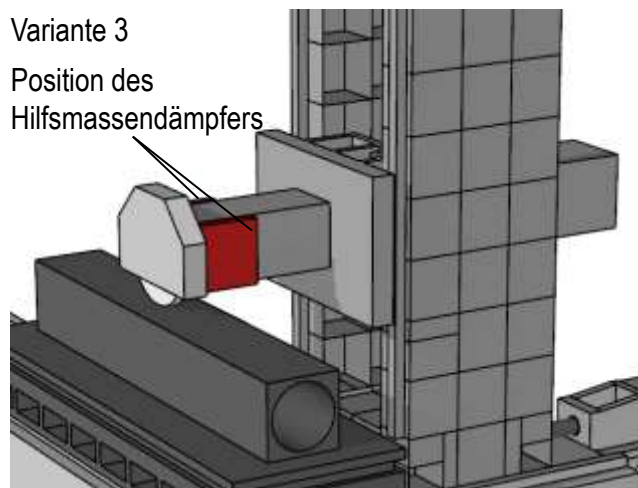
Beispiel X-Schlitten:

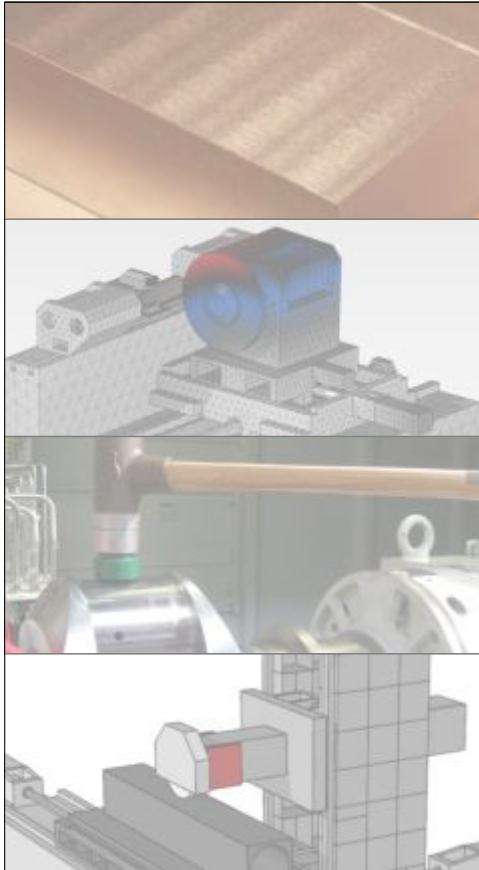
- Variante 1:** Die Verstärkung der Grundplatte um 40 mm bei einem gleichzeitigen Werkstoffwechsel von GG25 auf GGG40 führt zu einer deutlichen Steigerung der Steifigkeiten zwischen 4% (Z) und 33% (X).
- Variante 2:** Die Steigerung der Abmessungen des Vierkants auf 220 mm erscheint als guter Kompromiss aus Störkontur und Steifigkeit und erhöht die Steifigkeit in schleifsensibler Richtung (X) nochmals um 12 %.



Bedämpfung des X-Schlittens:

- Der Vierkant führt auch in der statisch verbesserten Variante 2 eine Nickschwingung in X-Richtung aus, da der Vierkant mehr Masse besitzt.
- Variante 3:** Über einen Hilfsmassendämpfer am Vierkant kann die maximale dynamische Nachgiebigkeit um 70% gegenüber der Variante 2 reduziert werden.





- Dynamische Stabilität und Schwingungen beim Schleifen
- Risiken der Dynamik in der Schleifmaschinenkonstruktion
- Möglichkeiten zur Erkennung von Schwingungsursachen
- Potenziale zur Vermeidung dynamischer Schwachpunkte
- Zusammenfassung



- Die Werkstückqualität kann durch eine Vielzahl unterschiedlicher Schwingungseinflüsse reduziert werden.
- Nicht alle Schwingungsprobleme treten jedoch gleich häufig auf. Bestimmte Maschinentypen sind konstruktionsbedingt mehr oder weniger anfällig für Ratterschwingungen, wobei die Ursache häufig bei den gleichen Baugruppen zu finden ist.
- Bewährte Messstrategien zur Schwingungs- und Steifigkeitserfassung ermöglichen jedoch eine schnelle und systematische Ursachenanalyse.
- Modernste Simulationsverfahren helfen bereits frühzeitig bei der Erkennung und Vermeidung von dynamischen Schwachstellen.

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Falls Sie das Thema interessiert:

Unsere kostenfreie **Software planlauf/VIEW** zur animierten 3D-Ansicht der vorgestellten Maschinensimulationen/Modalanalysen und die **Präsentationsfolien dieses Vortrags**

finden Sie im **Downloadbereich** unserer Website:

www.planlauf.com

