planlauf

Statisches und dynamisches Verhalten einer fünfachsigen Fräsmaschine

- Ausgangszustand und Empfehlungen -

Dr.-Ing. Rouven Meidlinger

planlauf GmbH

Gliederung

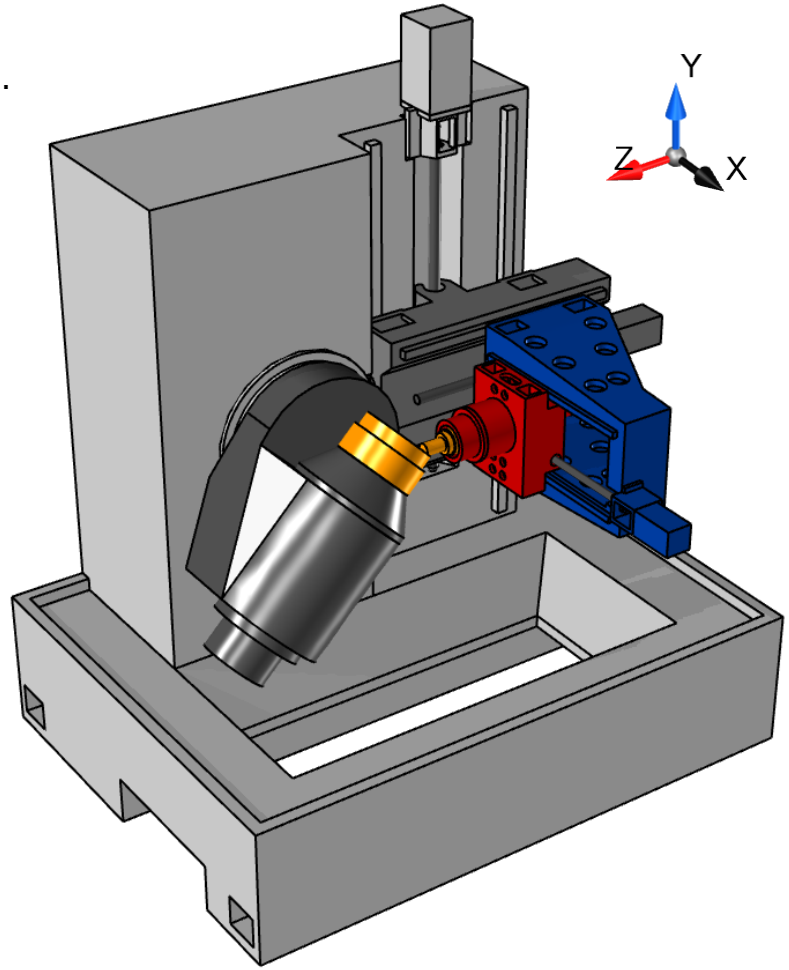
- Einleitung und Aufgabenstellung
- Statisches Verhalten
- Dynamisches Verhalten
- Zusammenfassung und Empfehlungen

© planlauf GmbH

Einleitung und Aufgabenstellung

Einleitung

- Der Auftraggeber entwickelt derzeit eine fünfachsige Fräsmaschine.
- Die Zielsteifigkeit in der Arbeitsraummitte liegt bei 20 N/µm relativ zwischen Werkzeug und Werkstück. Die maximale dynamische Nachgiebigkeit sollte im Frequenzbereich von 0 bis 400 Hz einen Wert von 0,2 µm/N nicht überschreiten.
- Erfahrungsgemäß ermöglicht die Einhaltung dieser Werte eine Ausnutzung der vorgesehenen Spindelleistung ohne das Auftreten von regenerativen Schwingungen (Rattern).

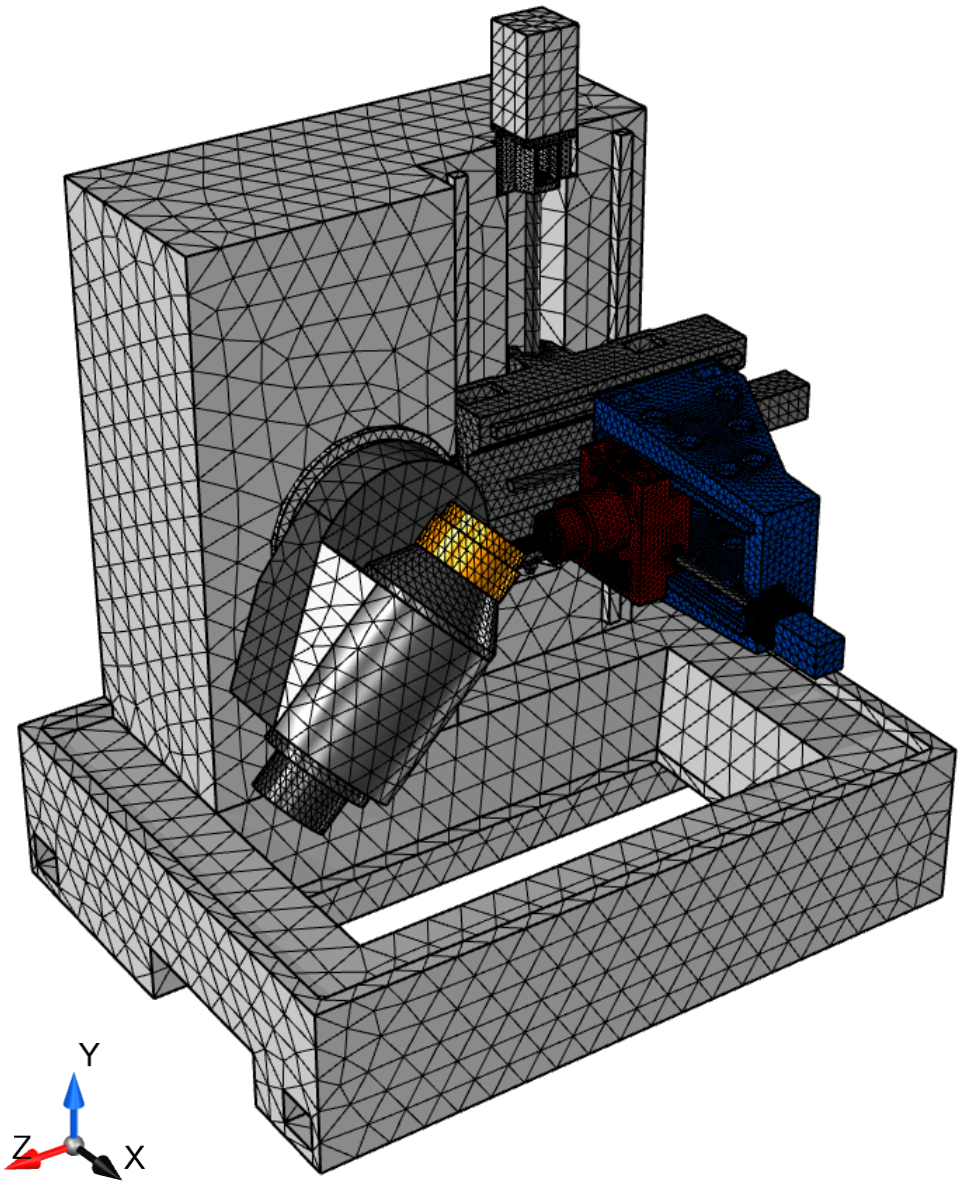


Aufgabenstellung

- Statisches Verhalten inkl. Schwachstellenanalyse
- Dynamisches Verhalten (Frequenzgänge/Schwingungsformen)
- Erarbeitung von Empfehlungen zur Verbesserung des statischen und dynamischen Verhaltens

© planlauf GmbH

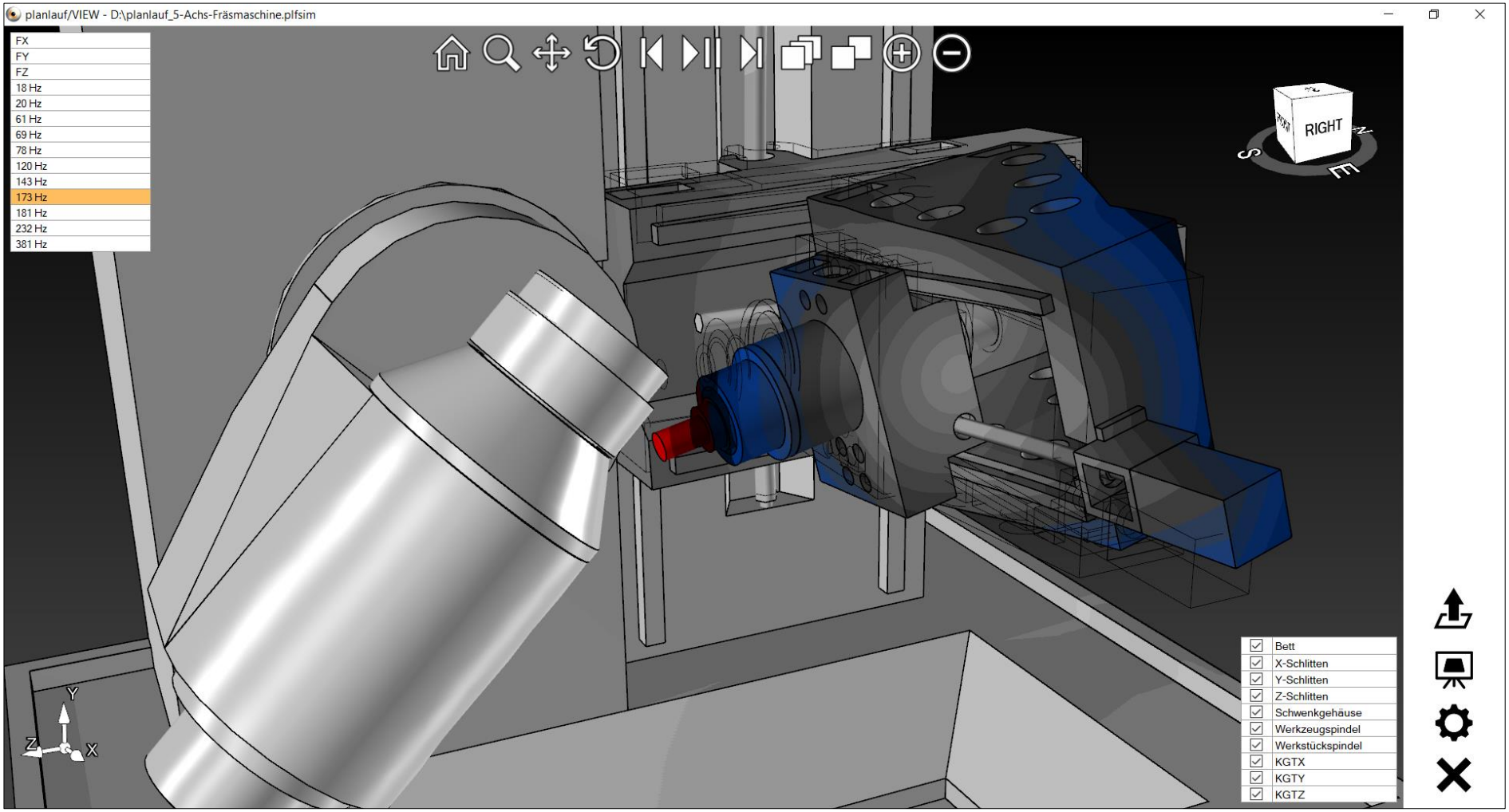
Aufbau des Finite-Elemente-Modells



- Führungen (Schneeberger)
  - X-Achse: MRB25 (4 Wagen / 2 Schienen)
  - Y-Achse: MRD45 (4 Wagen / 2 Schienen)
  - Z-Achse: MRB35 (4 Wagen / 2 Schienen)
- Kugelgewindespindeln
  - X-Achse: ∅32x10 mit INA ZKLF 2068
  - Y-Achse: ∅50x20 mit INA ZKLF 3590
  - Z-Achse: ∅40x20 mit INA ZKLF 3080
- Werkzeugspindel (/\ M w/\)
  - Vorne: 2x FAG B71917E.UL
  - Hinten: 2x FAG B71915E.UL
  - Werkzeug: ∅50x80
- Werkstückspindel (//\\ M Z)
  - Vorne: 4x FAG 71936C.UL
  - Hinten: FAG N1932K
- A-Achse: INA YRT 325 mit Klemmung
- Werkstoffe
  - Bett: Mineralguss
  - X-, Y- und Z-Schlitten: EN-GJS-500
  - Schwenkgehäuse und Lagerböcke: EN-GJL-250
  - alle anderen Bauteile: Stahl
- 4-Punkt-Aufstellung mit Isoloc UMS8-ASF/30

© planlauf GmbH

Visualisierung mit planlauf/VIEW



Hinweis: Die Berechnungsergebnisse können interaktiv und animiert mit unserer kostenfreien Software planlauf/VIEW visualisiert werden.
Download unter https://www.planlauf.com/de/software/planlaufview/

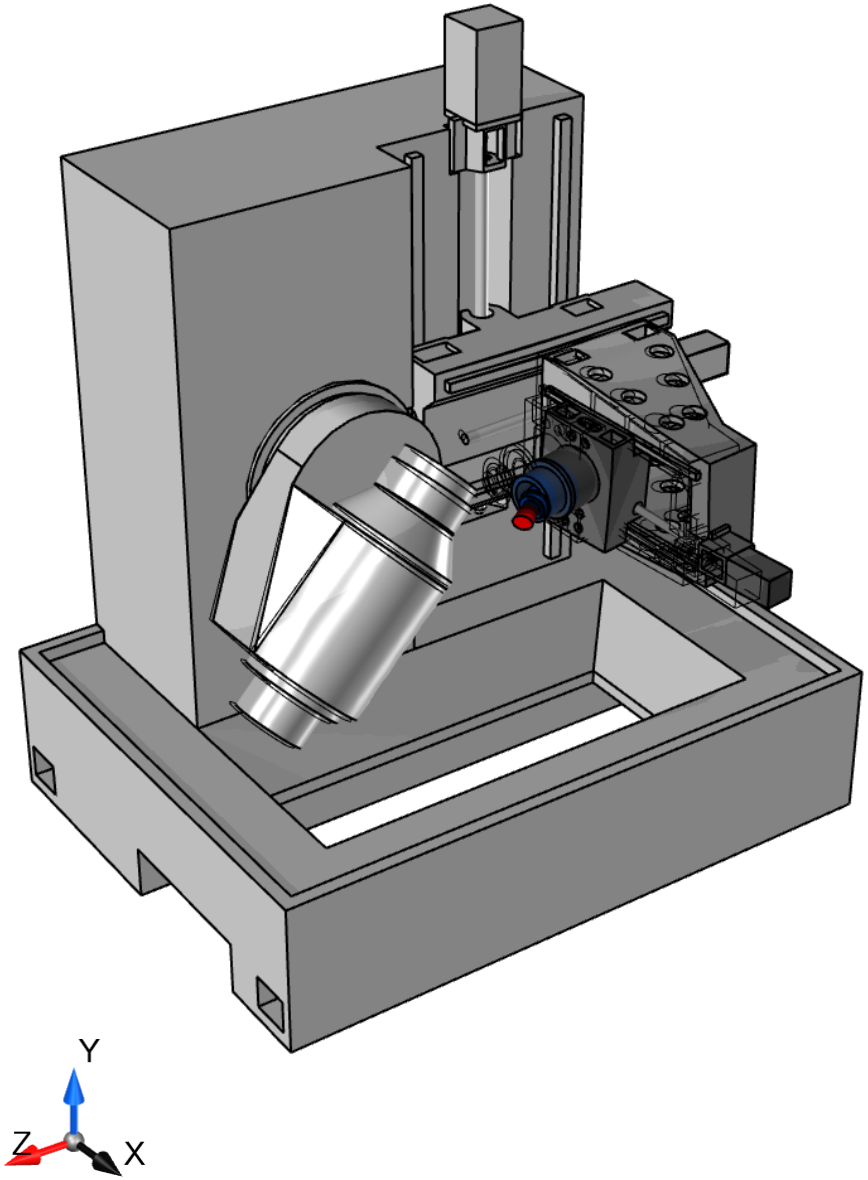
© planlauf GmbH

Gliederung

- Einleitung und Aufgabenstellung
- Statisches Verhalten – *Steifigkeiten und Schwachstellenanalyse*
- Dynamisches Verhalten
- Zusammenfassung und Empfehlungen

© planlauf GmbH

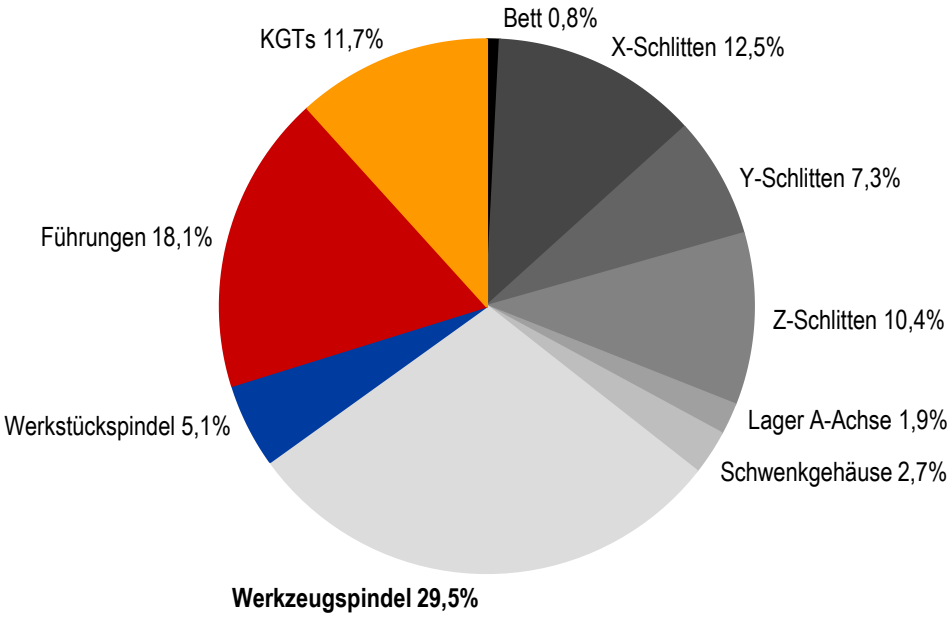
Statische Steifigkeit in X-Richtung



Statische Steifigkeit in X-Richtung
$k_{XX,REL}$ = 19,9 N/µm

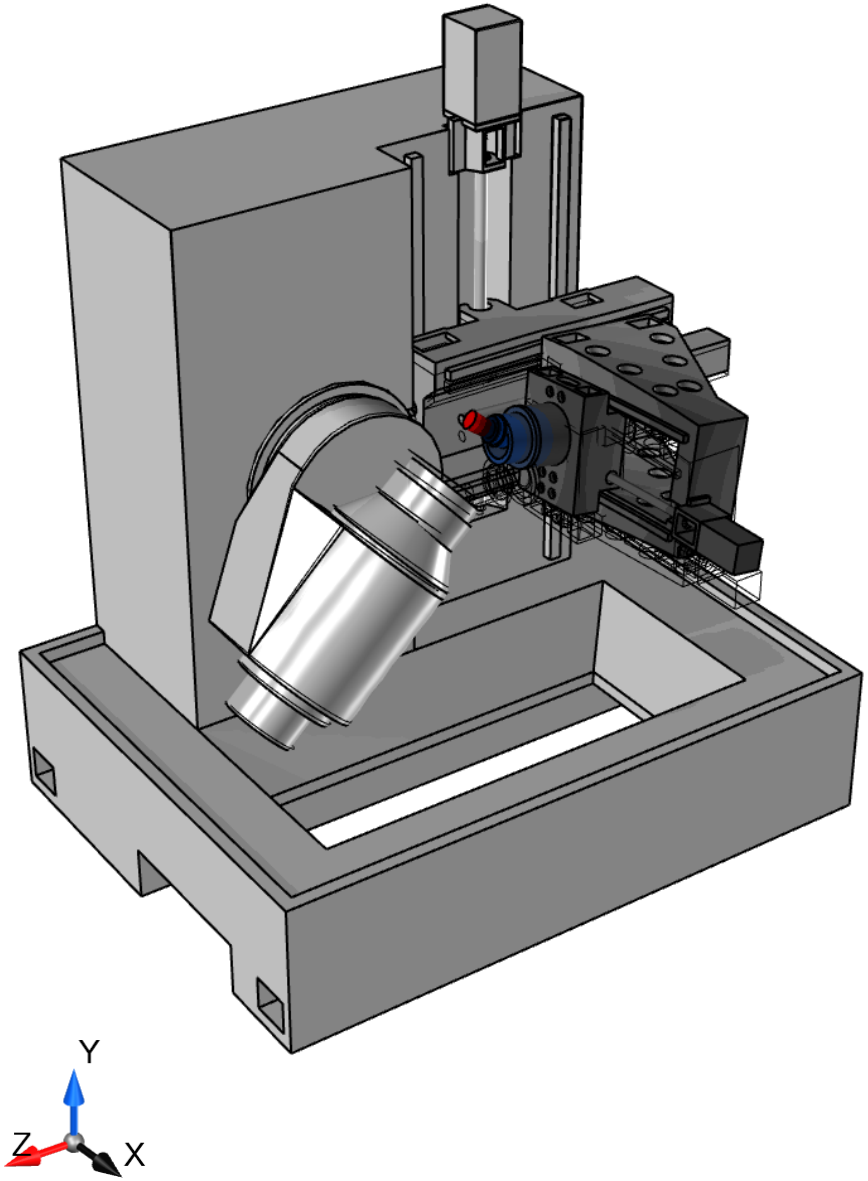
$k_{XX,WZG}$ = 22,1 N/µm
$k_{XX,WST}$ = 199,7 N/µm

Anteile der einzelnen Komponenten
an der Gesamtverformung



© planlauf GmbH

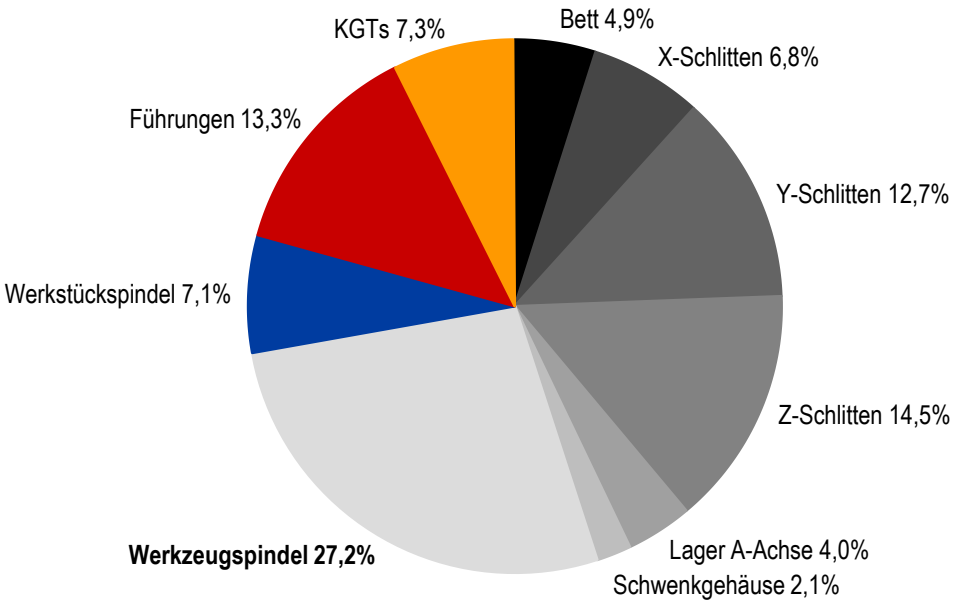
Statische Steifigkeit in Y-Richtung



Statische Steifigkeit in Y-Richtung
$k_{YY,REL}$ = 18,5 N/µm

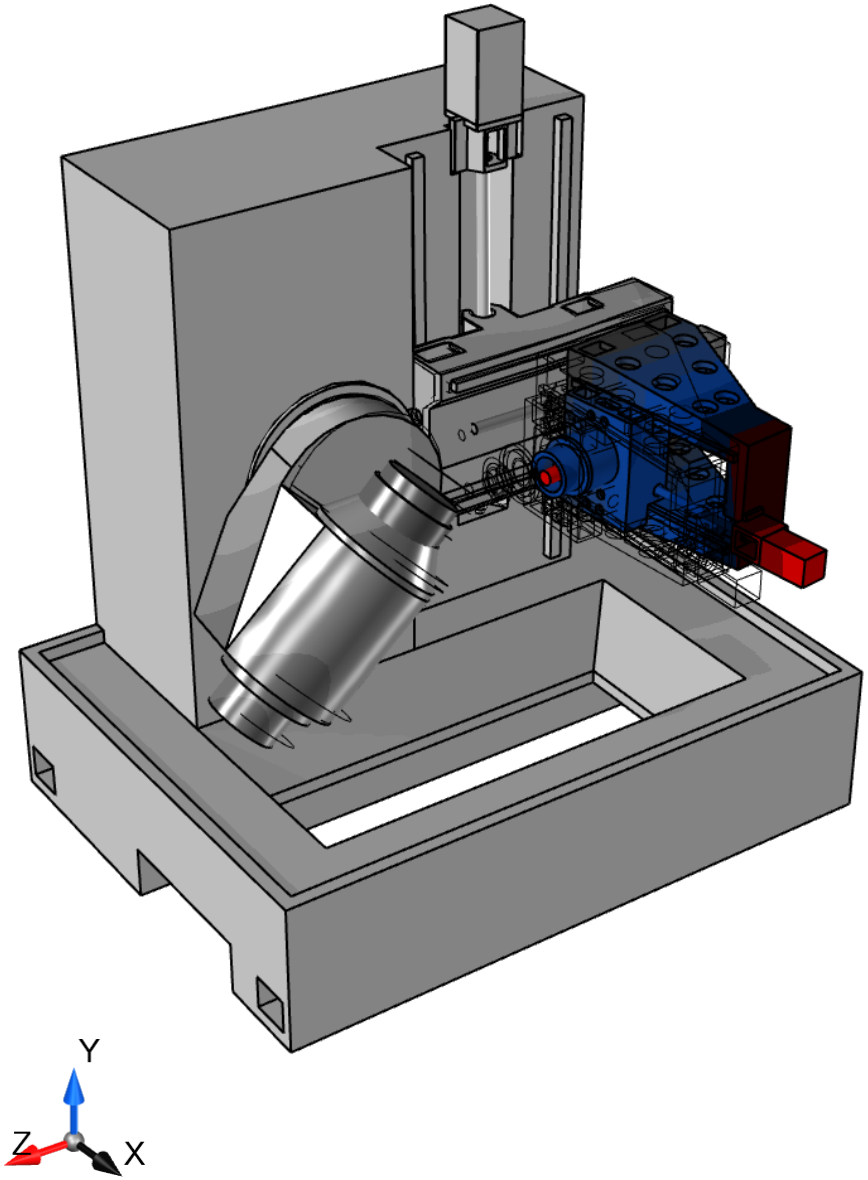
$k_{YY,WZG}$ = 21,5 N/µm
$k_{YY,WST}$ = 130,0 N/µm

Anteile der einzelnen Komponenten
an der Gesamtverformung



© planlauf GmbH

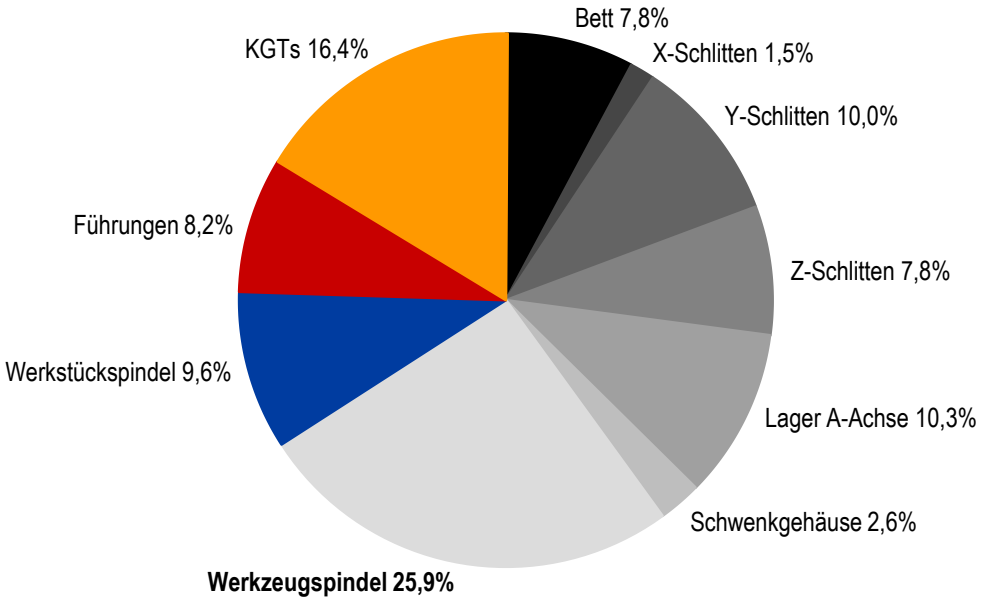
Statische Steifigkeit in Z-Richtung



Statische Steifigkeit in Z-Richtung
$k_{ZZ,REL}$ = 46,6 N/µm

$k_{ZZ,WZG}$ = 62,8 N/µm
$k_{ZZ,WST}$ = 180,7 N/µm

Anteile der einzelnen Komponenten
an der Gesamtverformung



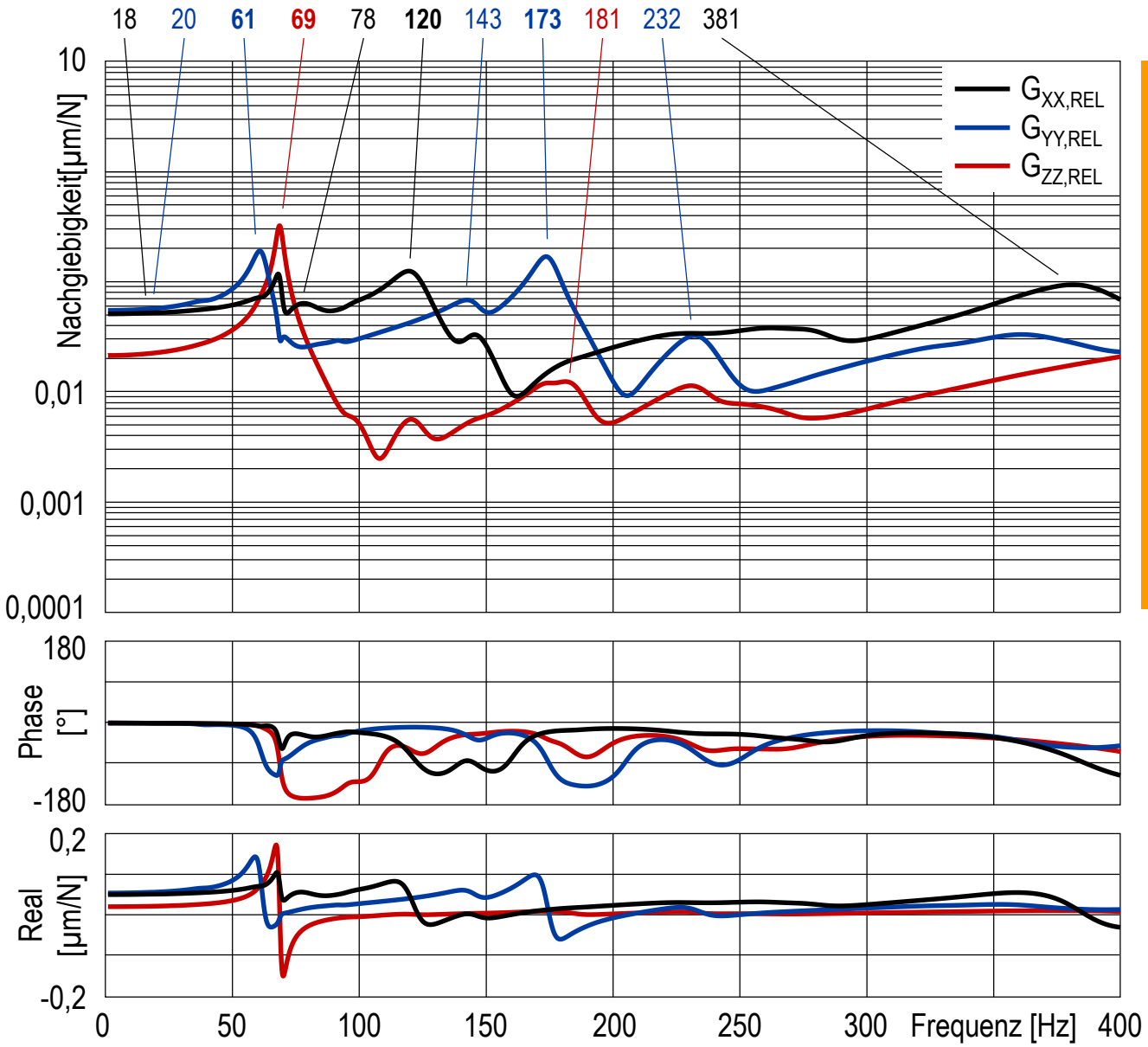
© planlauf GmbH

Gliederung

- Einleitung und Aufgabenstellung
- Statisches Verhalten
- Dynamisches Verhalten – *Frequenzgänge und Schwingungsformen*
- Zusammenfassung und Empfehlungen

© planlauf GmbH

Relative Nachgiebigkeitsfrequenzgänge



Dominante Resonanzfrequenzen

61 Hz
- Schieben und Nicken des Y-Schlittens
- Biegung des Z-Schlittens
- Kippen der A-Achse

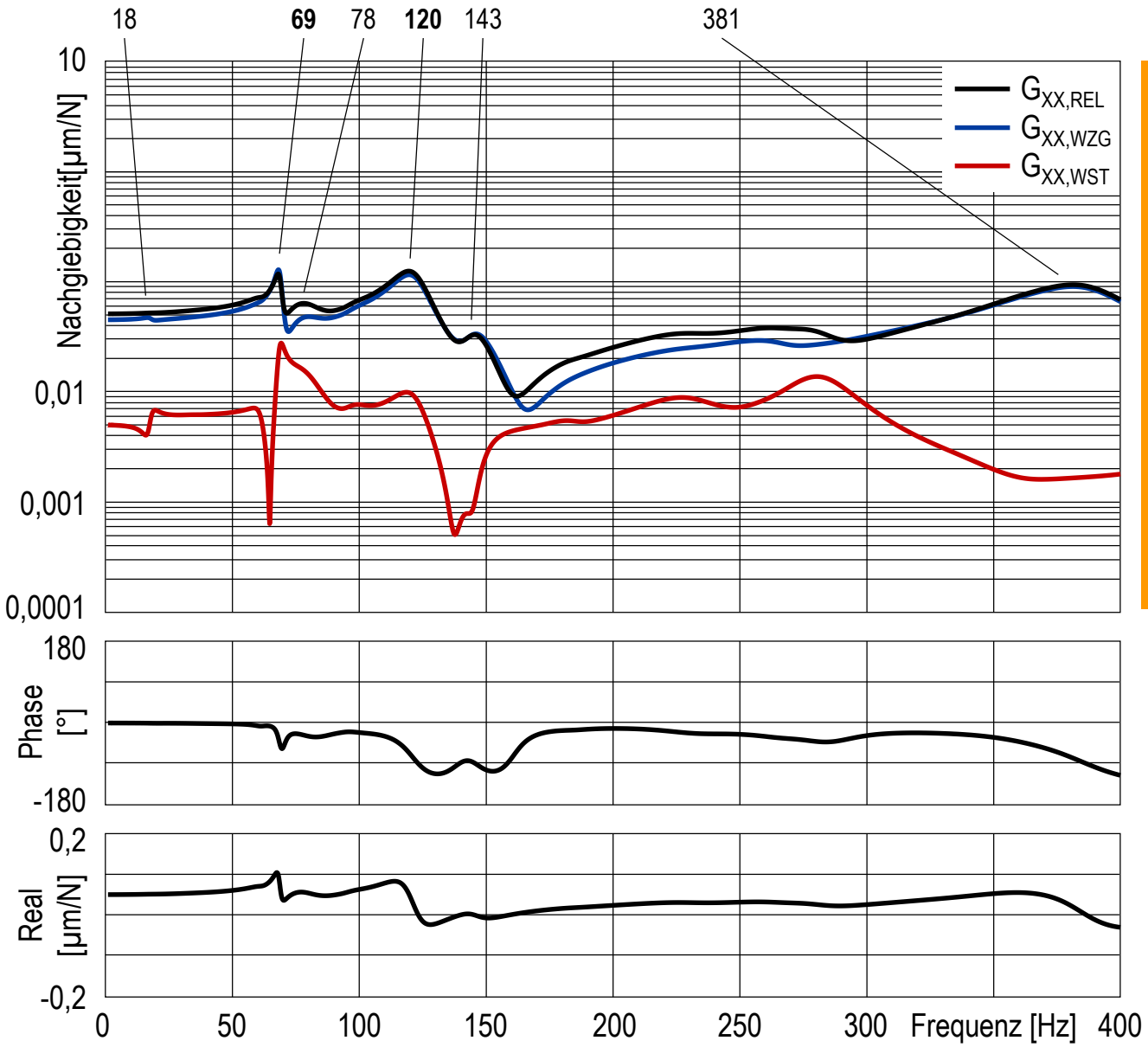
69 Hz
- Schieben und Nicken des Z-Schlittens
- Biegung des Y-Schlittens im hinteren Bereich

120 Hz
- Schieben und Gieren des X-Schlittens
- Trapezförmige Biegung des Z-Schlittens

173 Hz
- Gieren und Torsion des Z-Schlittens

© planlauf GmbH

Nachgiebigkeitsfrequenzgänge in X-Richtung



Dominante Resonanzfrequenzen

61 Hz
- Schieben und Nicken des Y-Schlittens
- Biegung des Z-Schlittens
- Kippen der A-Achse

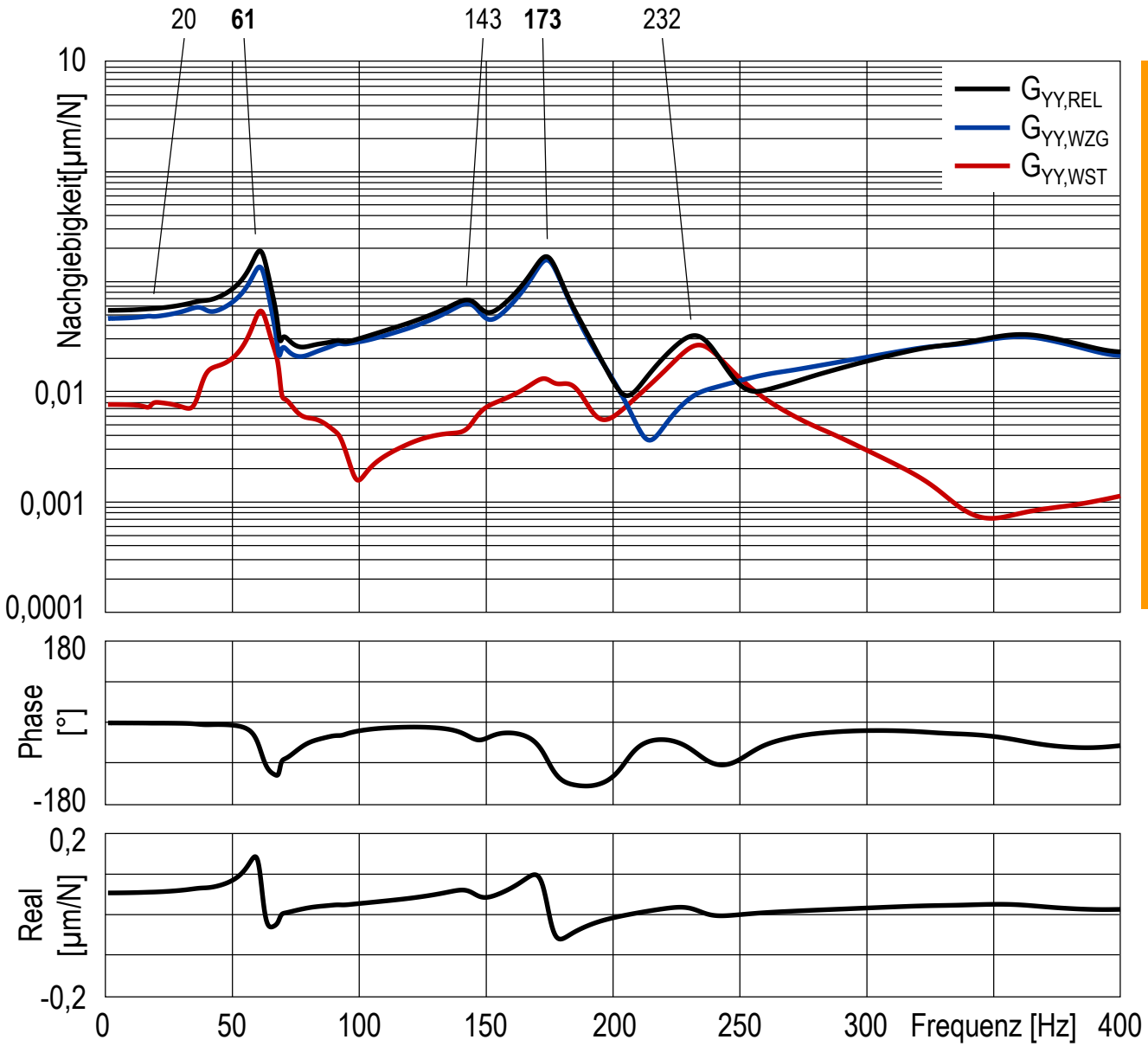
69 Hz
- Schieben und Nicken des Z-Schlittens
- Biegung des Y-Schlittens im hinteren Bereich

120 Hz
- Schieben und Gieren des X-Schlittens
- Trapezförmige Biegung des Z-Schlittens

173 Hz
- Gieren und Torsion des Z-Schlittens

© planlauf GmbH

Nachgiebigkeitsfrequenzgänge in Y-Richtung



Dominante Resonanzfrequenzen

61 Hz
- Schieben und Nicken des Y-Schlittens
- Biegung des Z-Schlittens
- Kippen der A-Achse

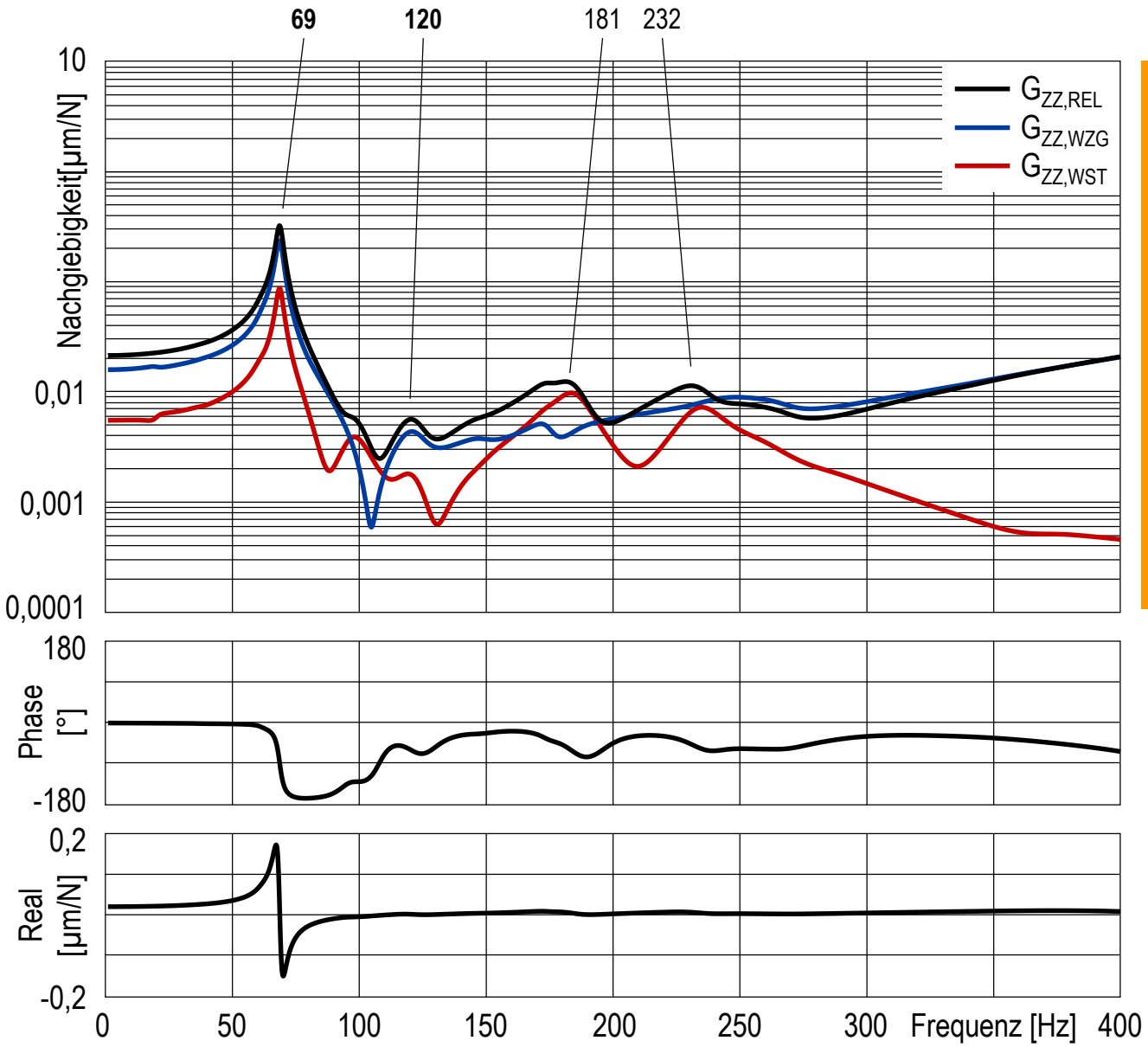
69 Hz
- Schieben und Nicken des Z-Schlittens
- Biegung des Y-Schlittens im hinteren Bereich

120 Hz
- Schieben und Gieren des X-Schlittens
- Trapezförmige Biegung des Z-Schlittens

173 Hz
- Gieren und Torsion des Z-Schlittens

© planlauf GmbH

Nachgiebigkeitsfrequenzgänge in Z-Richtung



Dominante Resonanzfrequenzen

61 Hz
- Schieben und Nicken des Y-Schlittens
- Biegung des Z-Schlittens
- Kippen der A-Achse

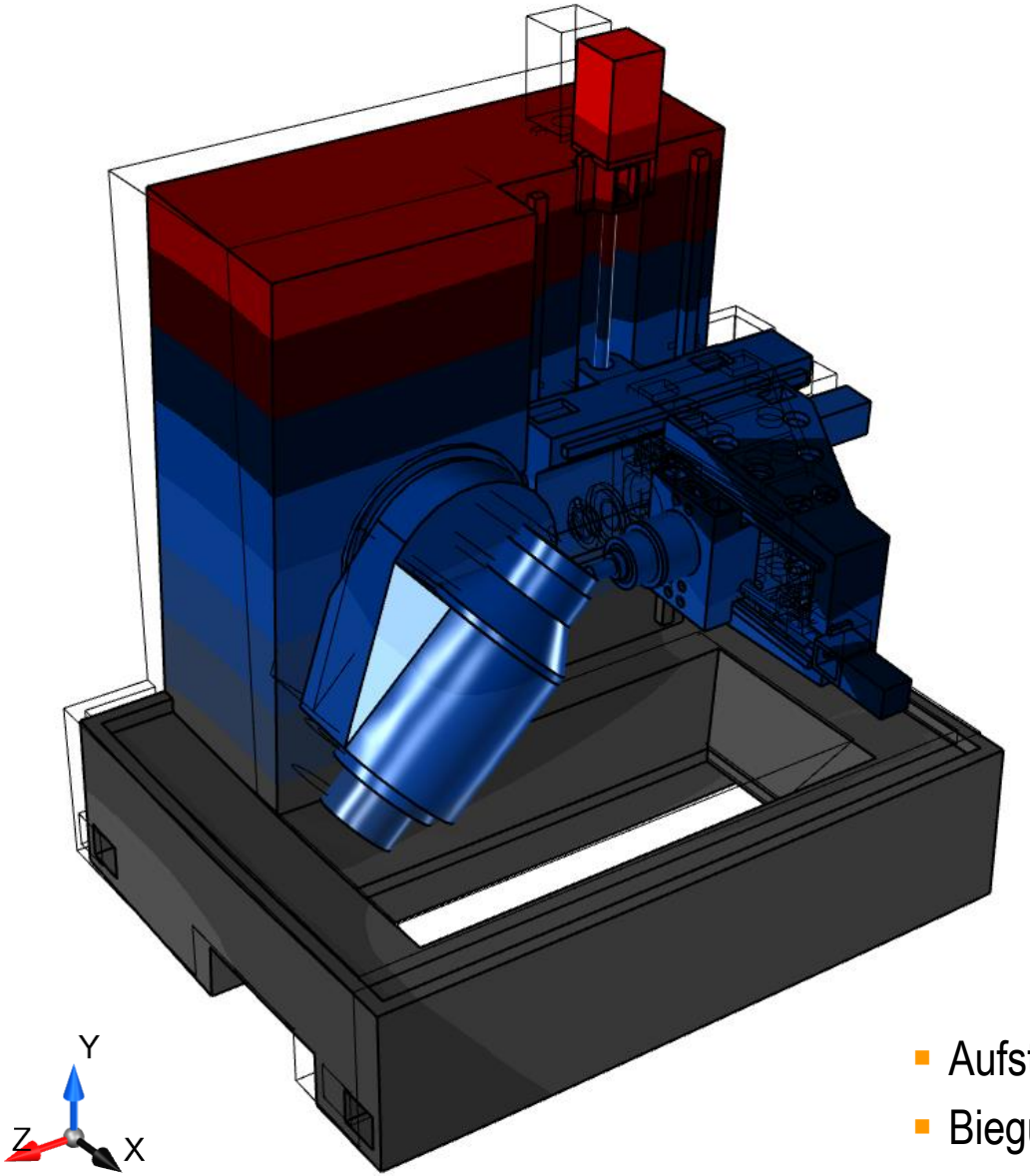
69 Hz
- Schieben und Nicken des Z-Schlittens
- Biegung des Y-Schlittens im hinteren Bereich

120 Hz
- Schieben und Gieren des X-Schlittens
- Trapezförmige Biegung des Z-Schlittens

173 Hz
- Gieren und Torsion des Z-Schlittens

© planlauf GmbH

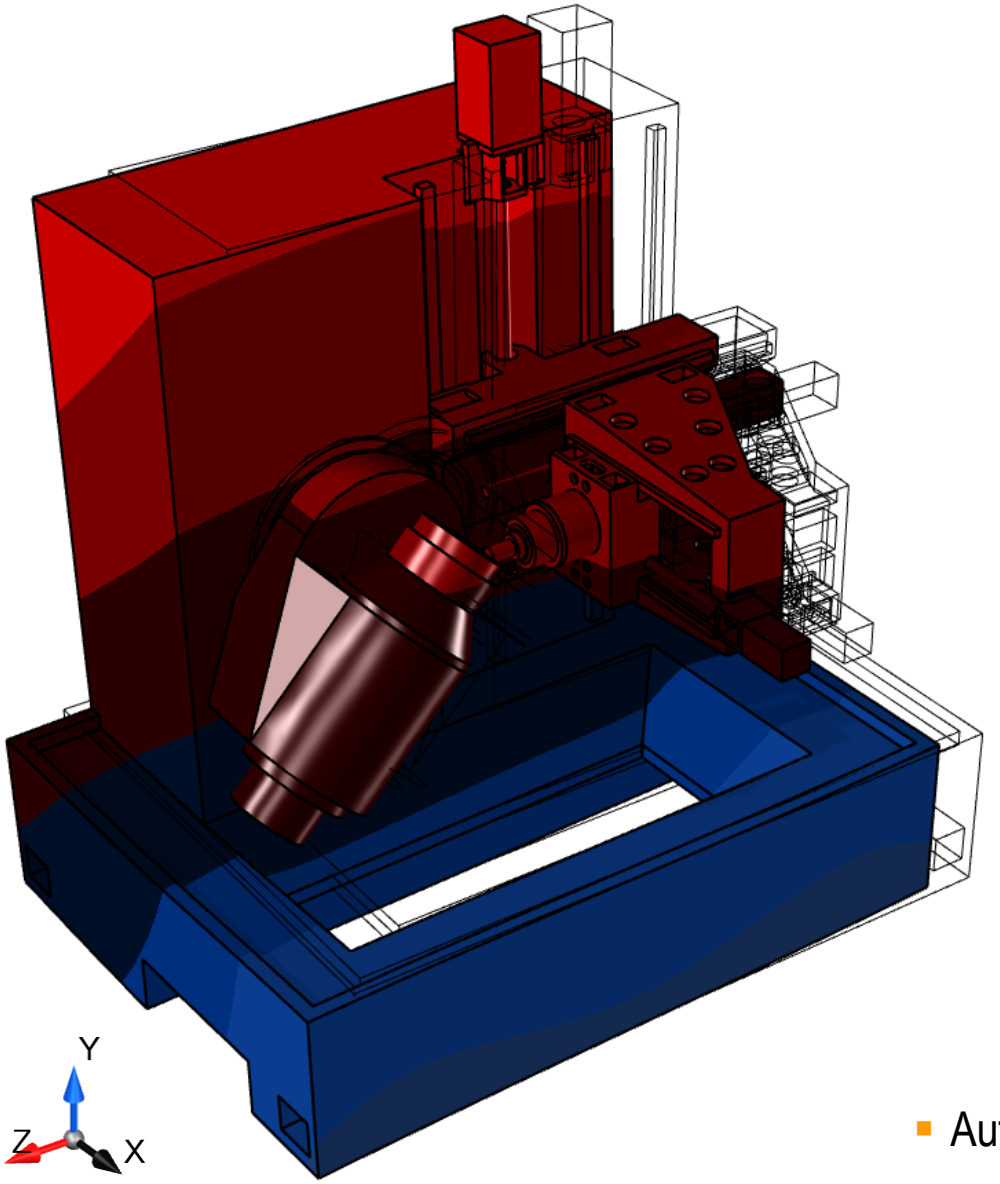
Schwingungsform bei 18 Hz



- Aufstellschwingung in X-Richtung
- Biegung des Unterbaus und Kippen des Ständers

© planlauf GmbH

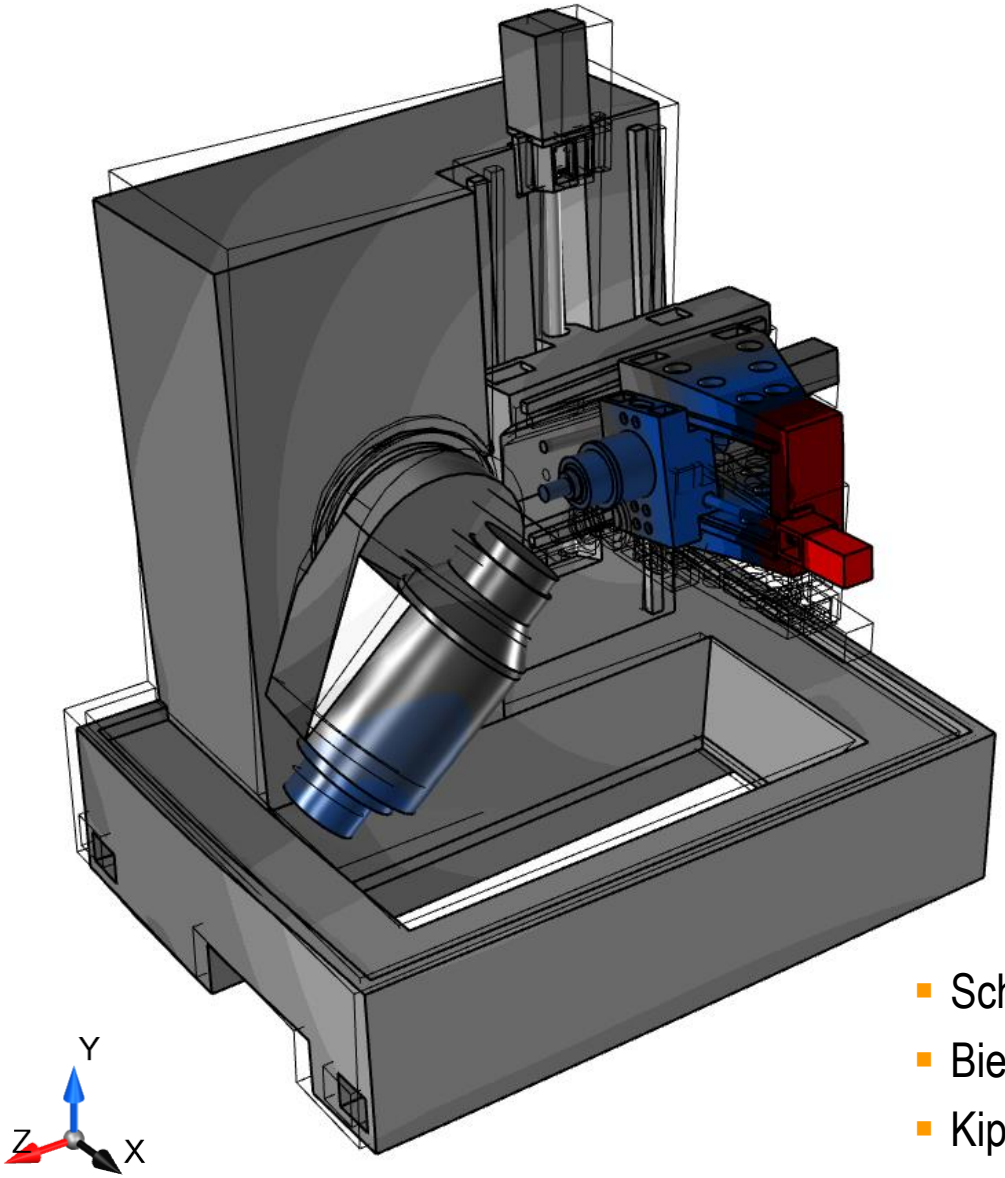
Schwingungsform bei 20 Hz

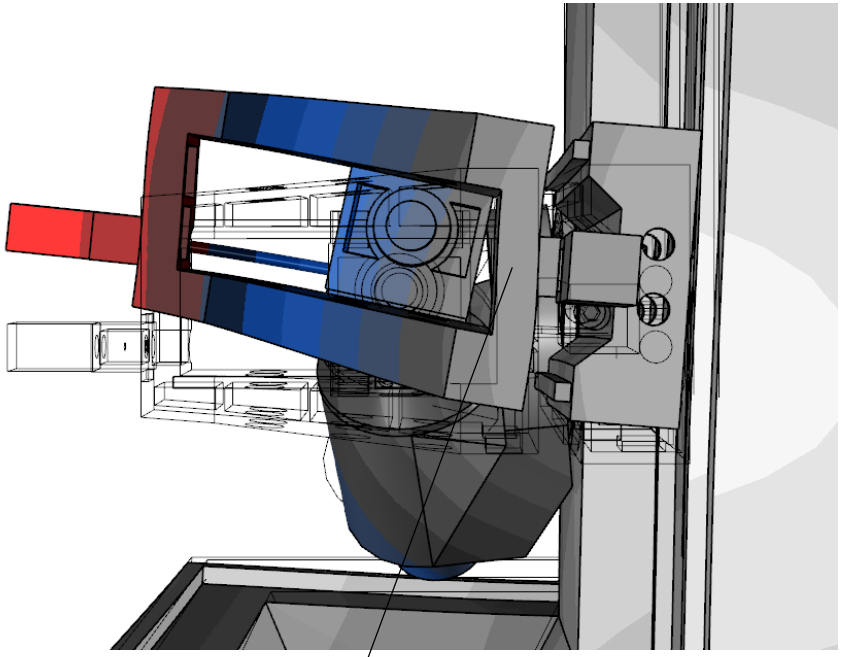


- Aufstellschwingung in Z-Richtung

© planlauf GmbH

Schwingungsform bei 61 Hz



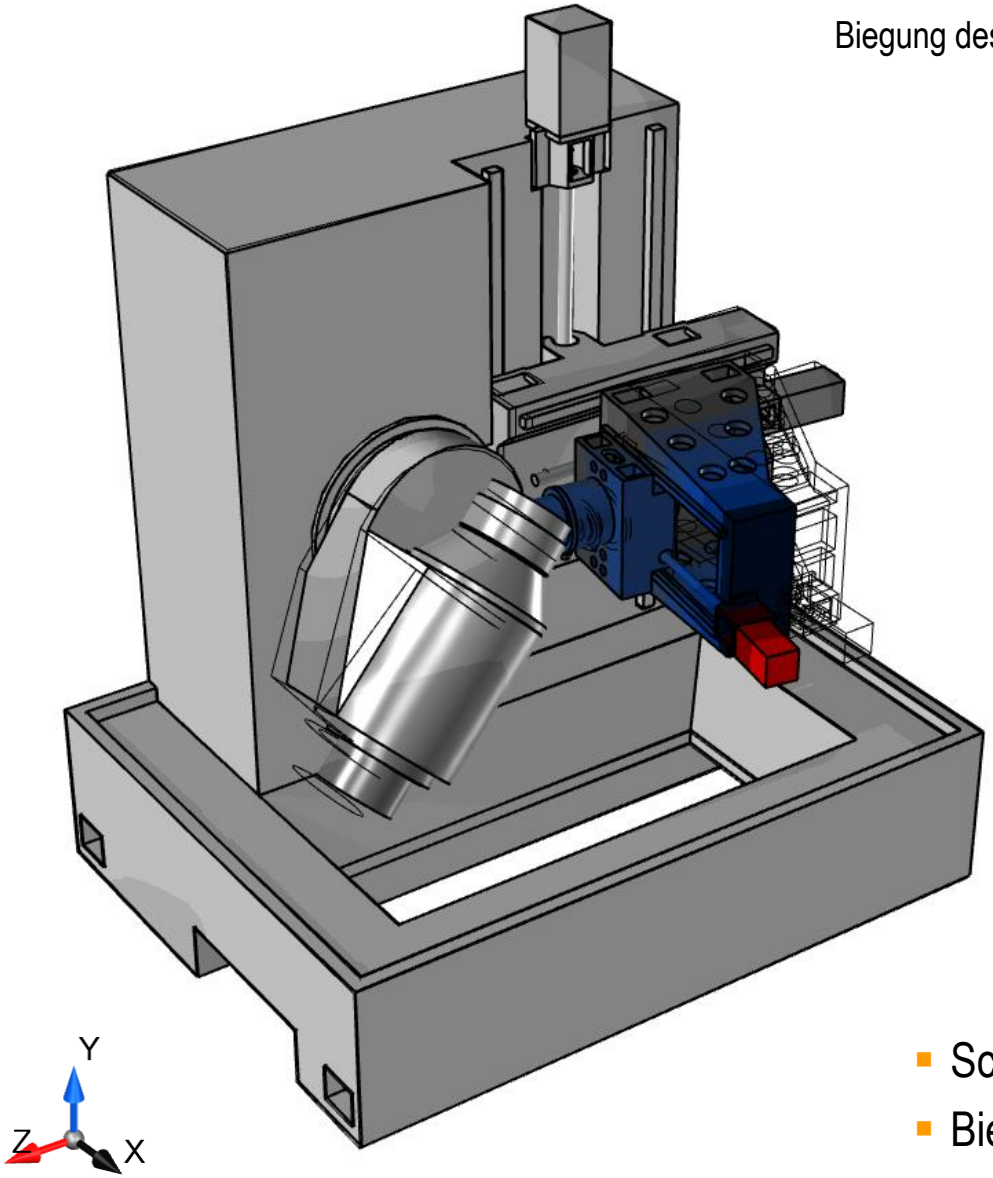


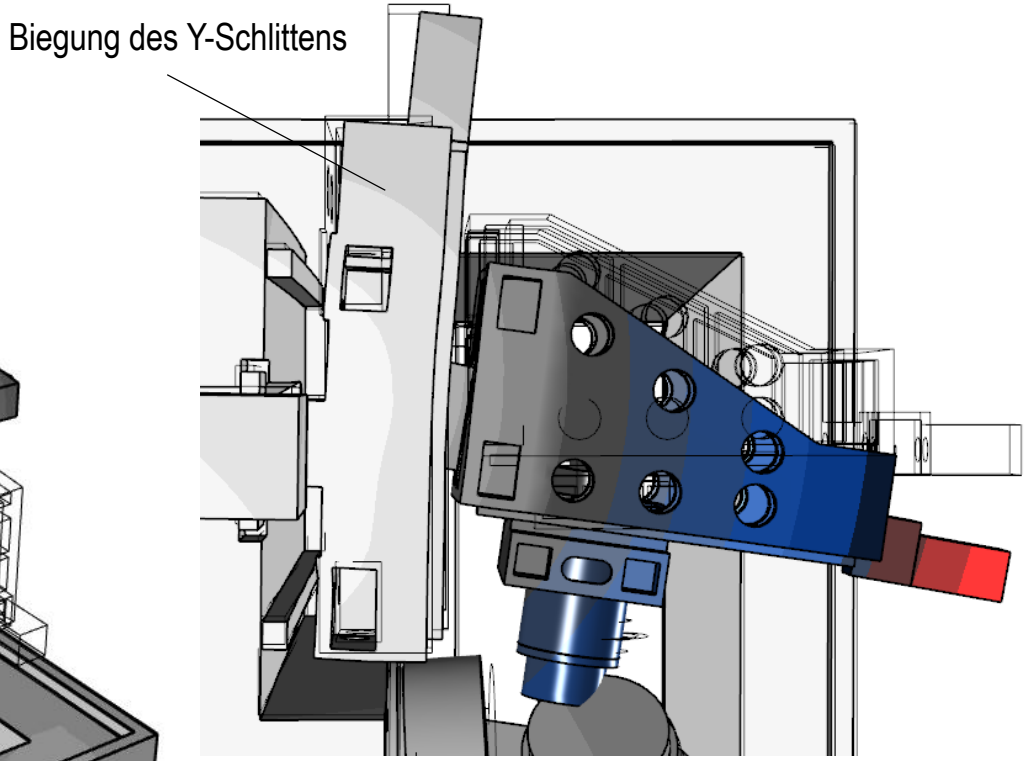
Biegung des Z-Schlittens

- Schieben und Nicken des Y-Schlittens
- Biegung des Z-Schlittens
- Kippen der A-Achse

© planlauf GmbH

Schwingungsform bei 69 Hz

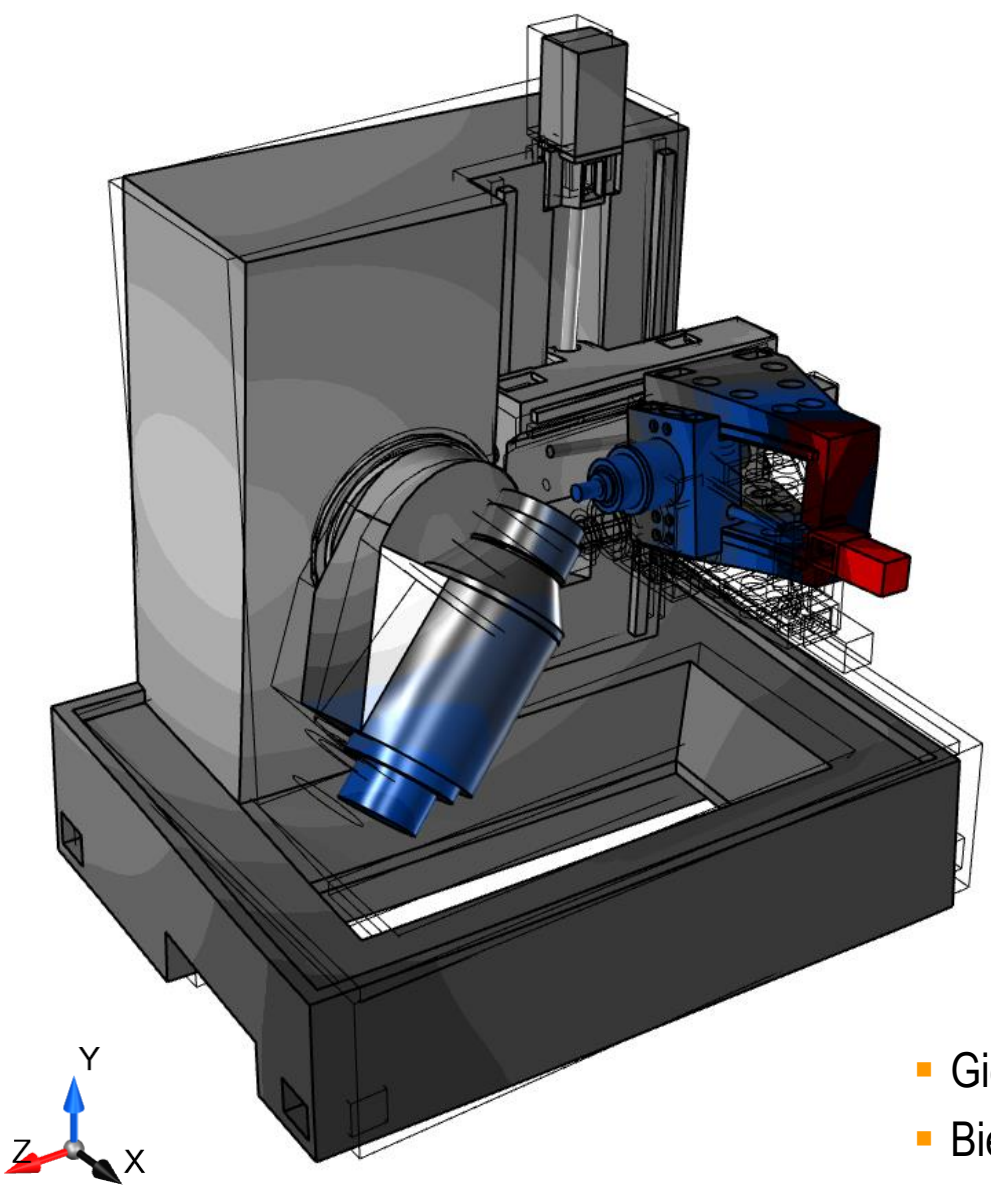


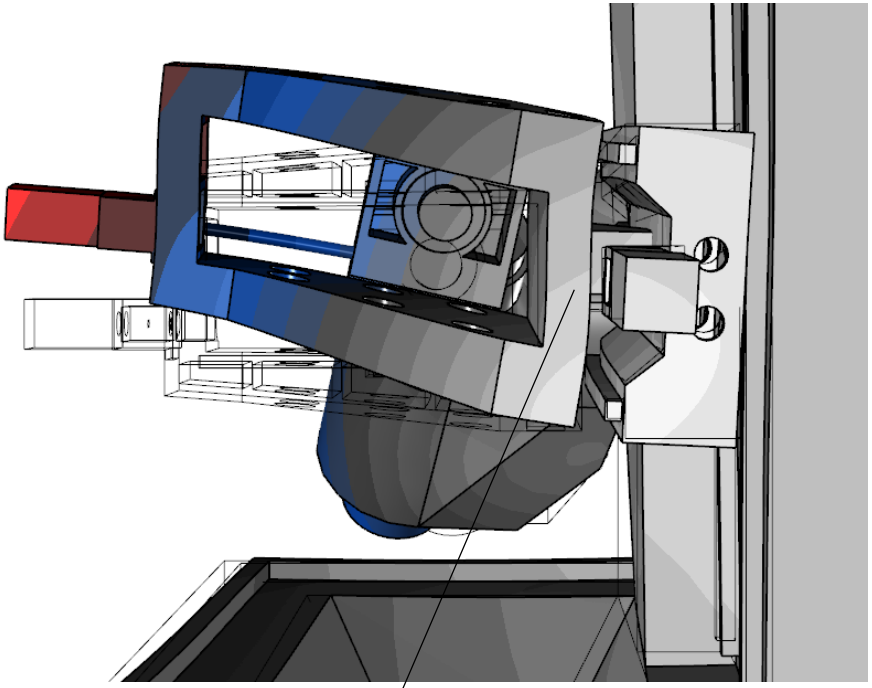


- Schieben und Nicken des Z-Schlittens
- Biegung des Y-Schlittens im hinteren Bereich

© planlauf GmbH

Schwingungsform bei 78 Hz



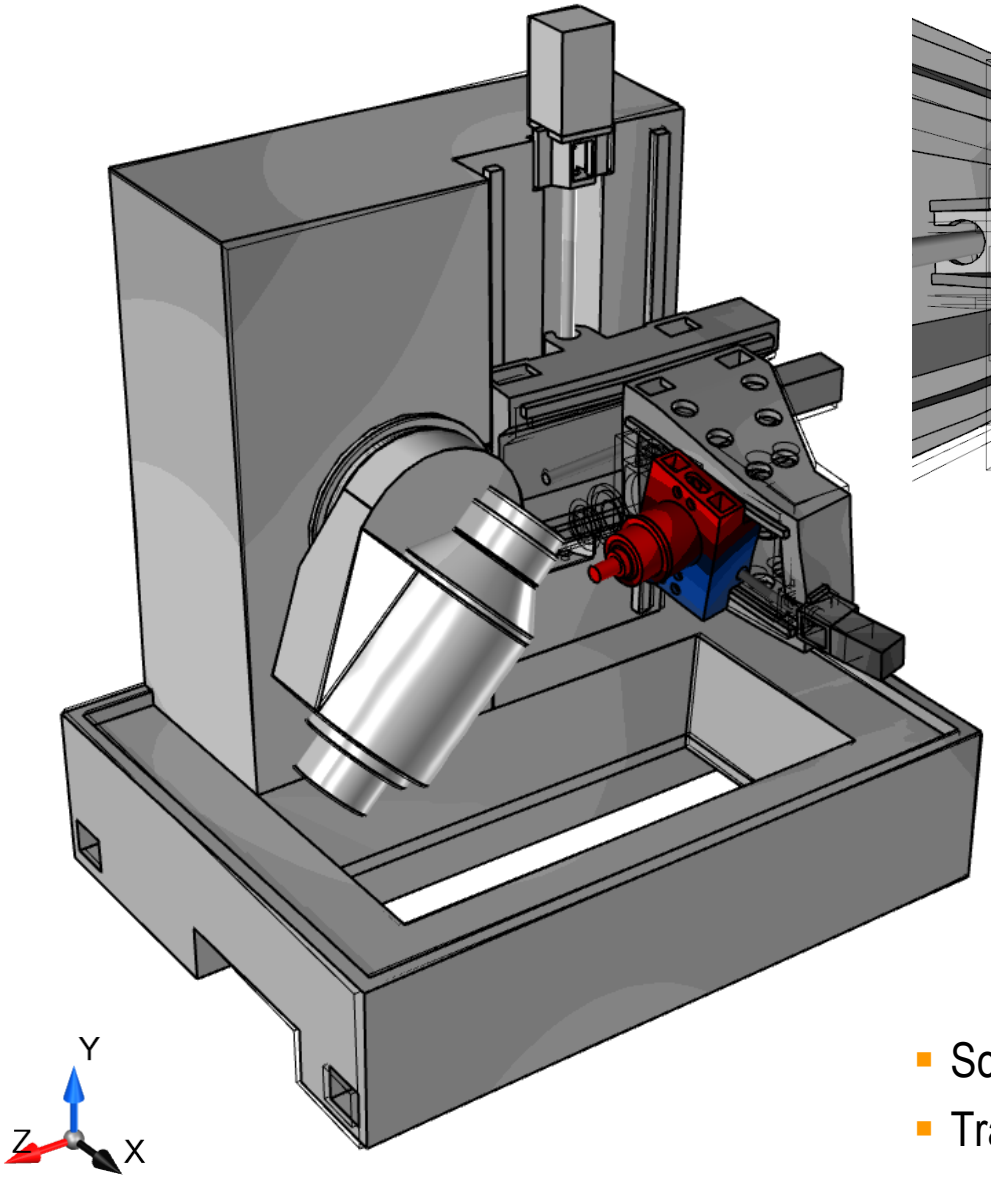


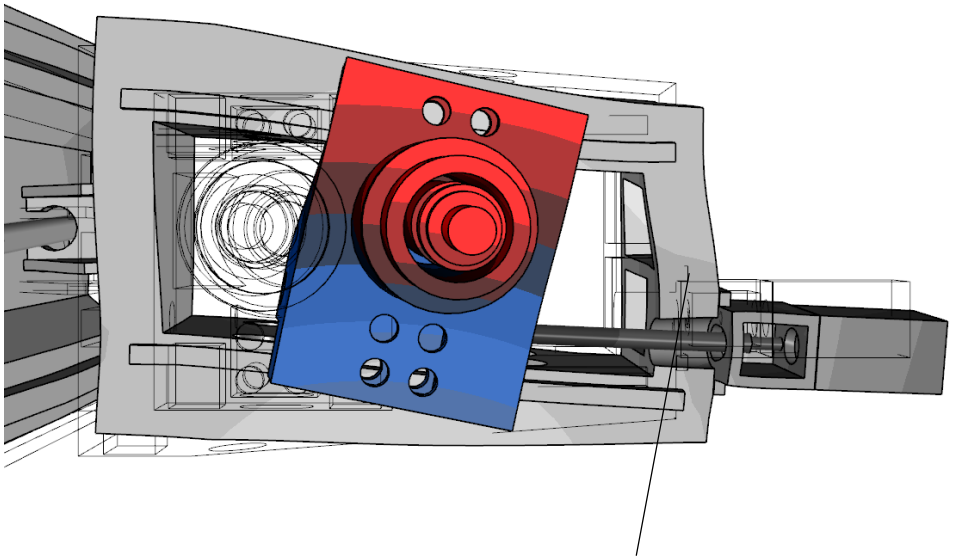
Biegung des Z-Schlittens

- Gieren des Y-Schlittens
- Biegung des Z-Schlittens

© planlauf GmbH

Schwingungsform bei 120 Hz

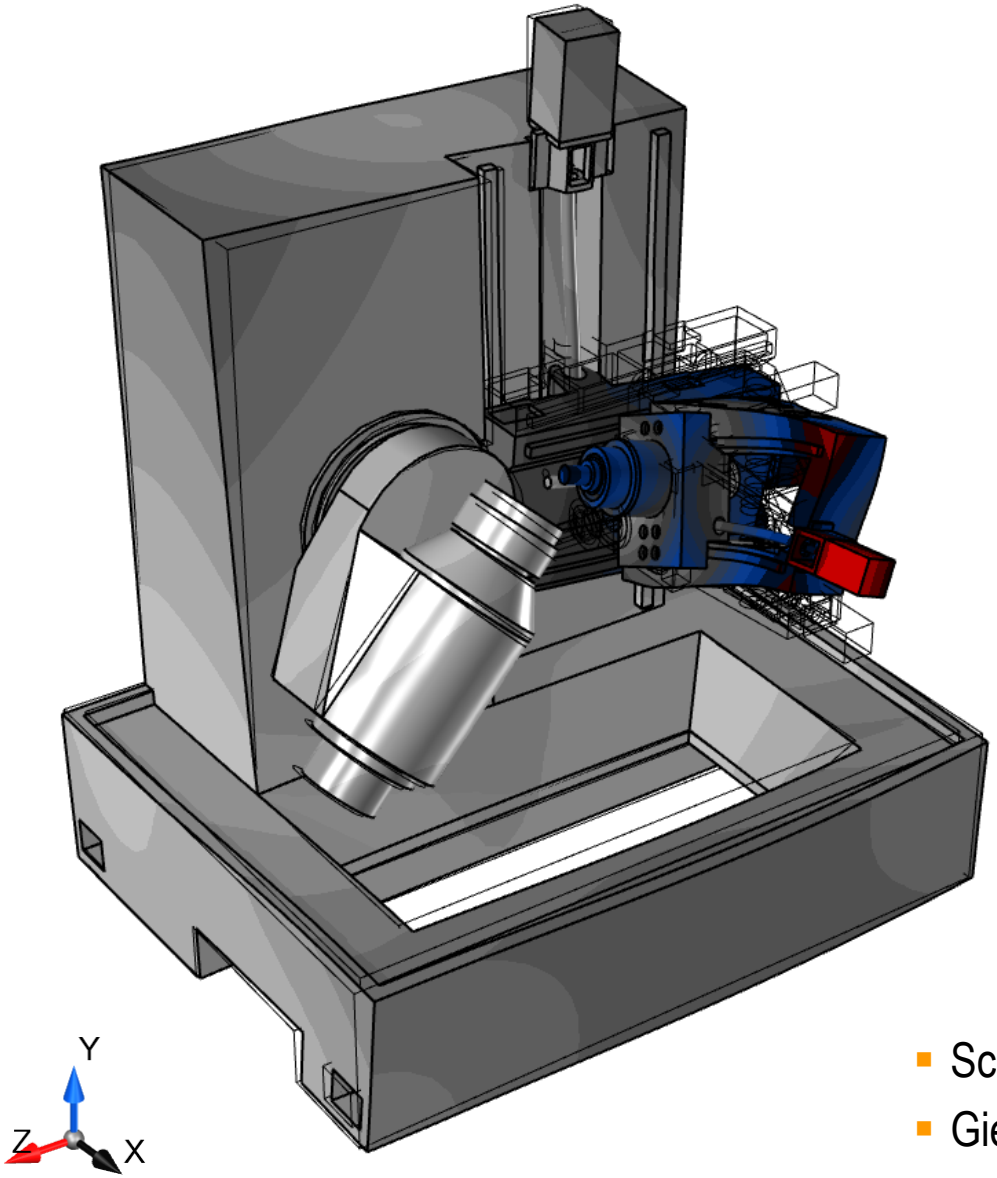




- Schieben und Gieren des X-Schlittens
- Trapezförmige Biegung des Z-Schlittens

© planlauf GmbH

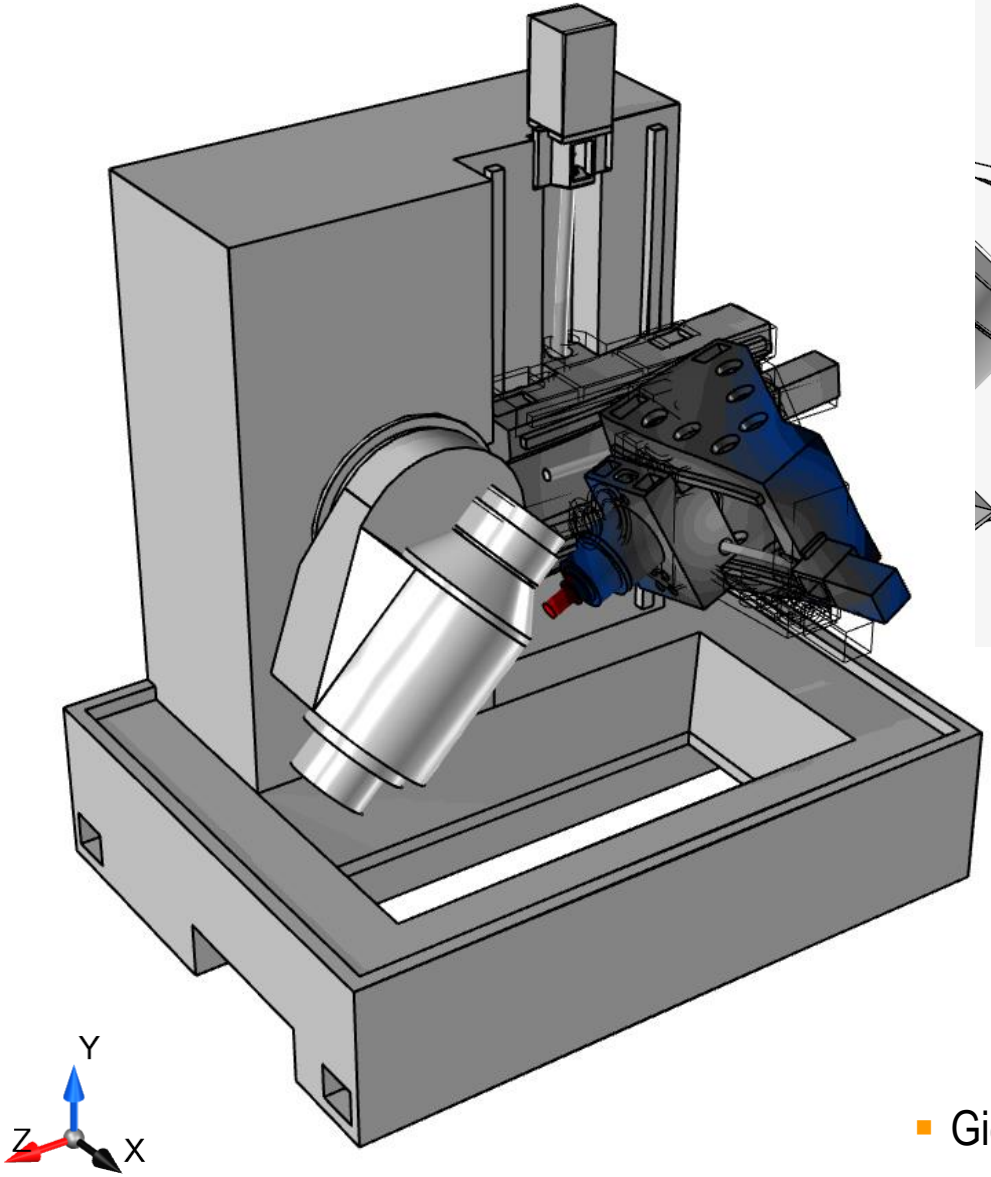
Schwingungsform bei 143 Hz

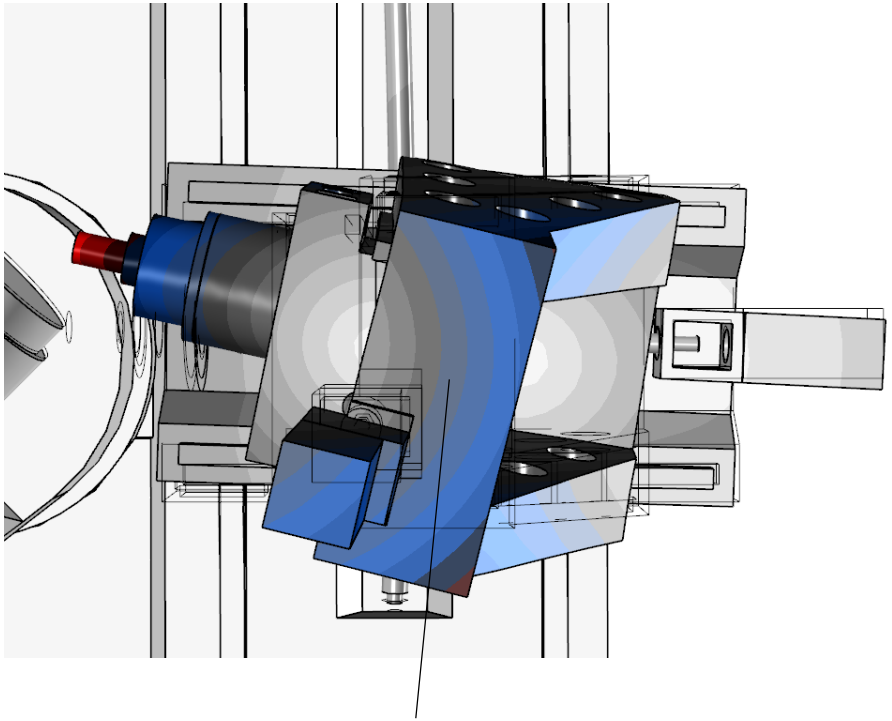


- Schieben des Y-Schlittens
- Gieren und Torsion des Z-Schlittens

© planlauf GmbH

Schwingungsform bei 173 Hz

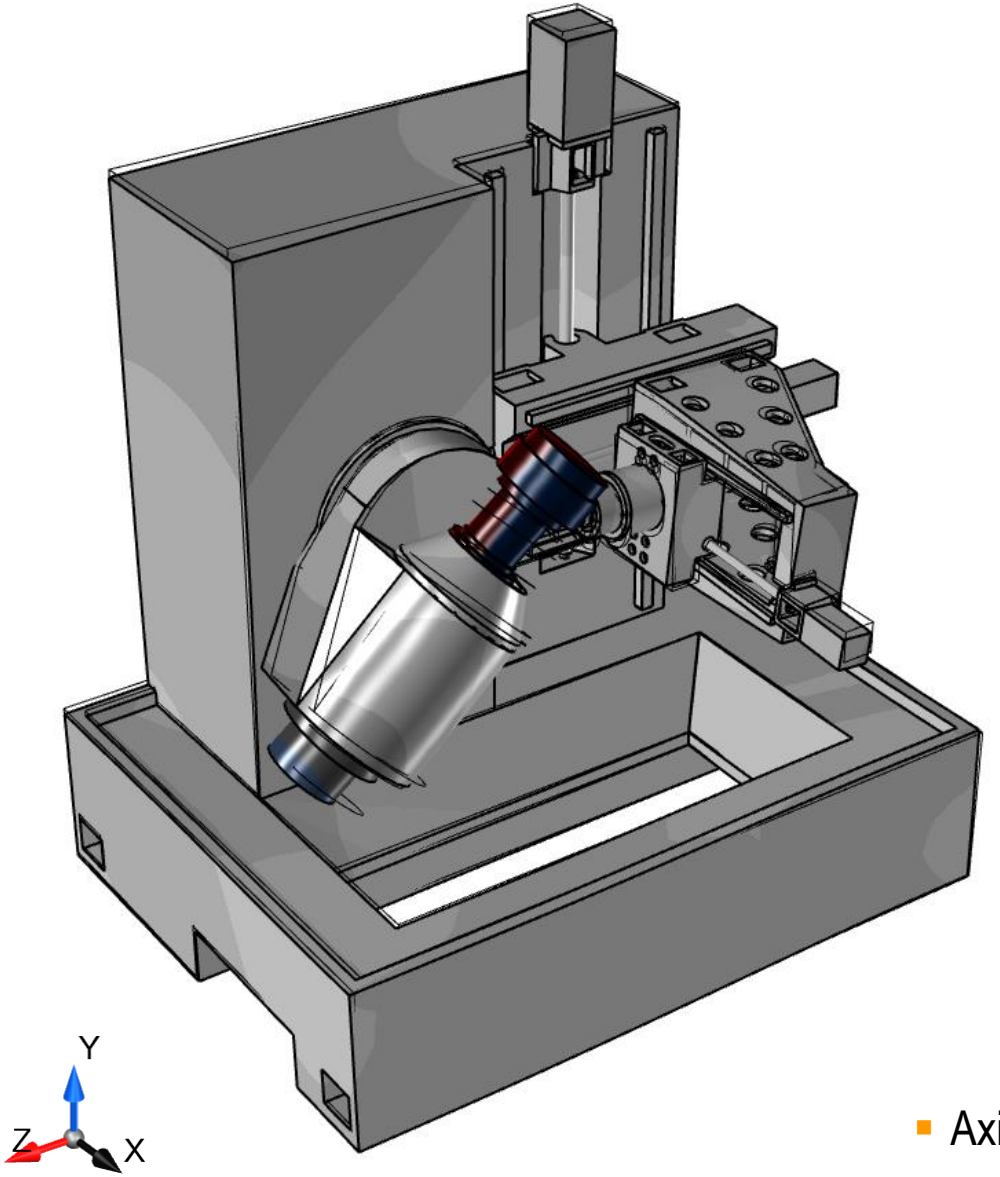


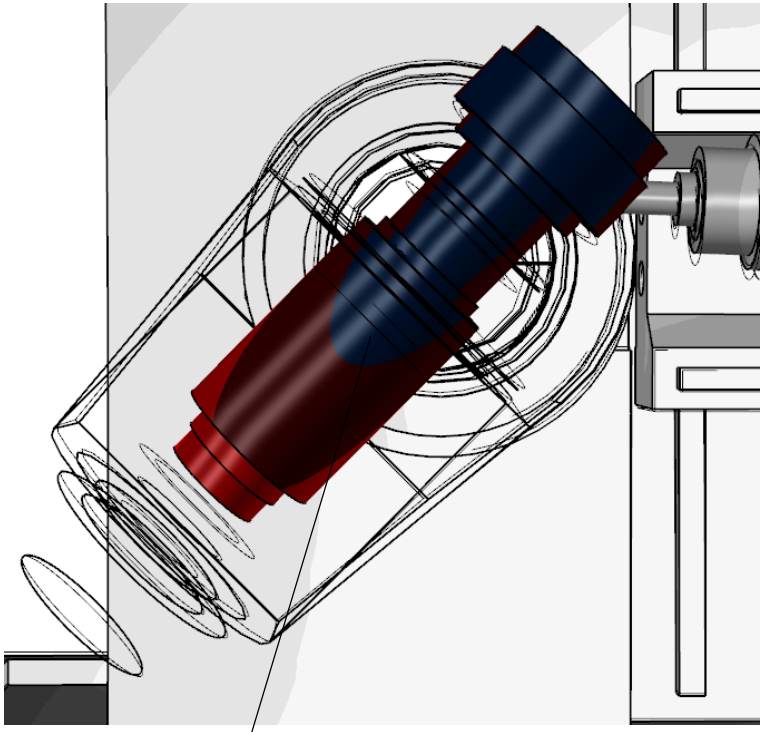


- Gieren und Torsion des Z-Schlittens

© planlauf GmbH

Schwingungsform bei 181 Hz



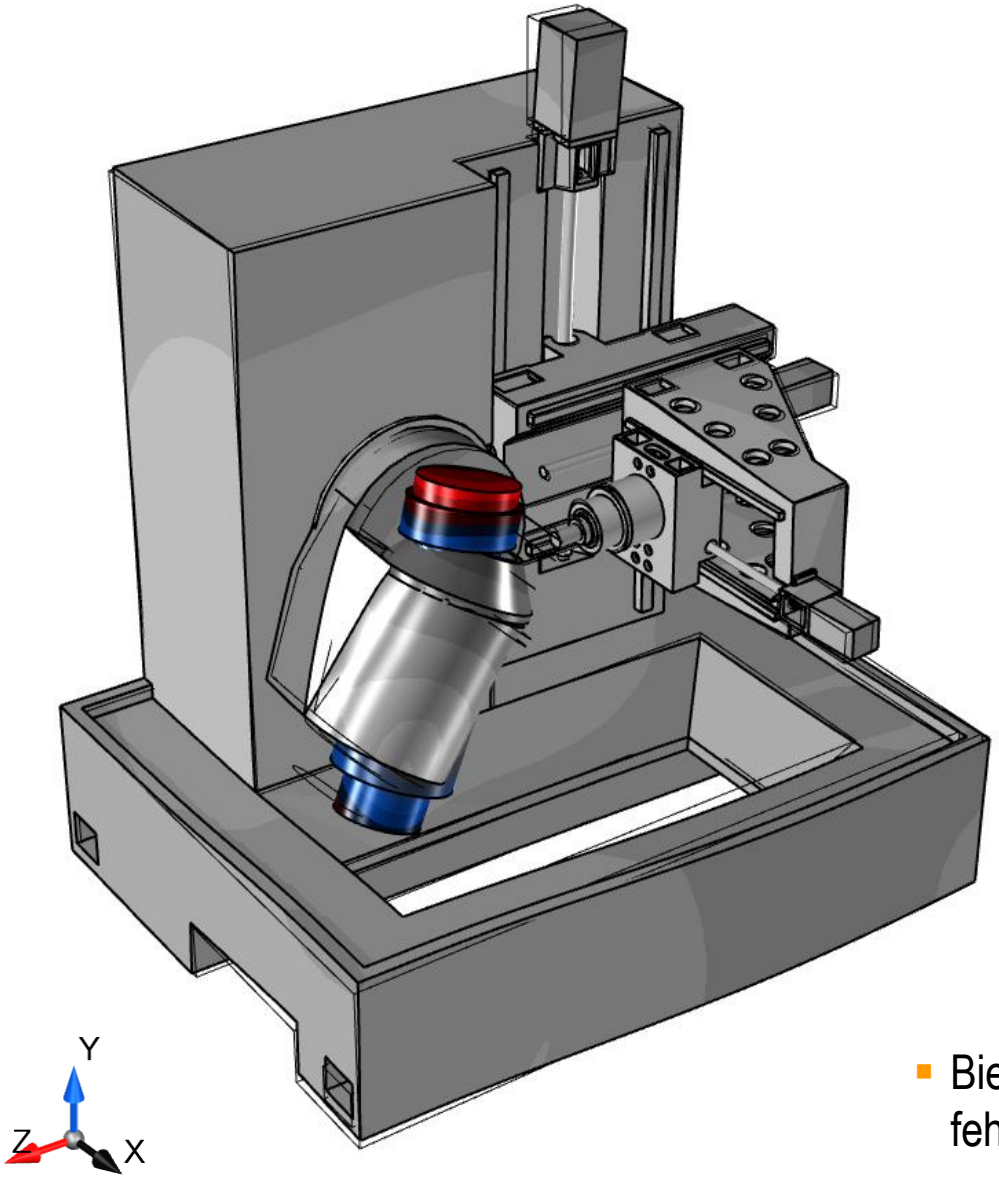


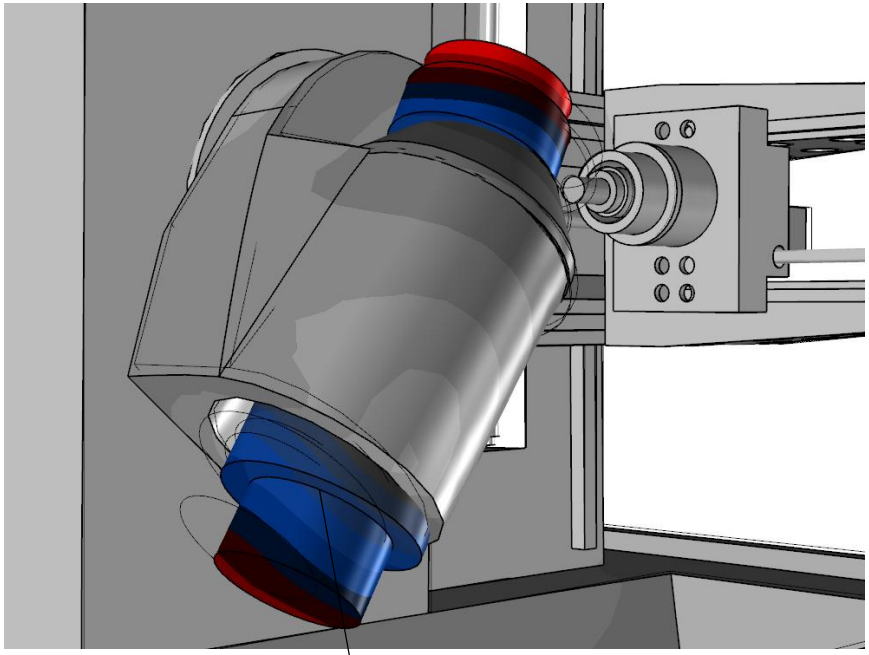
Axialschwingung

- Axialschwingung der Werkstückspindel

© planlauf GmbH

Schwingungsform bei 232 Hz



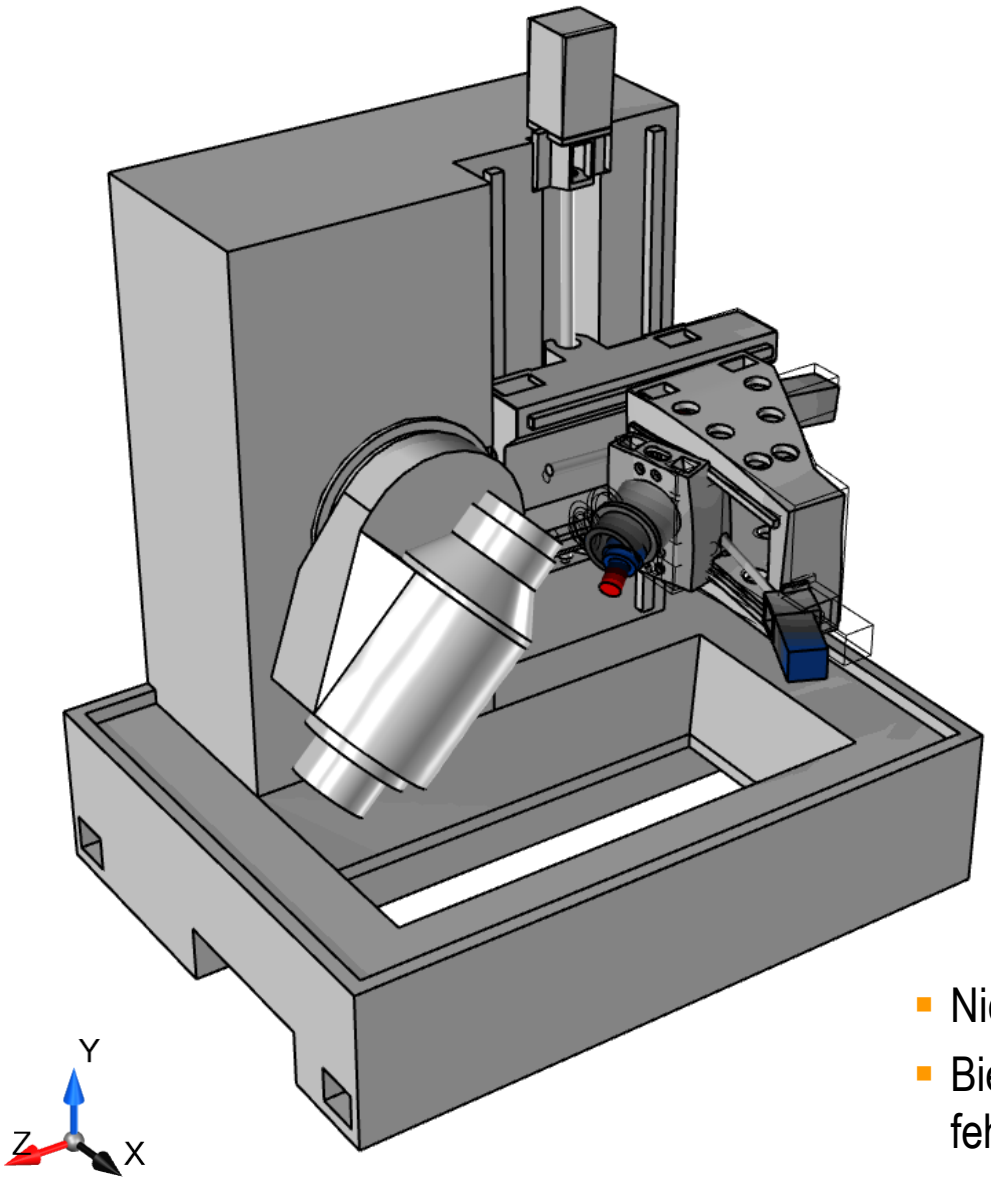


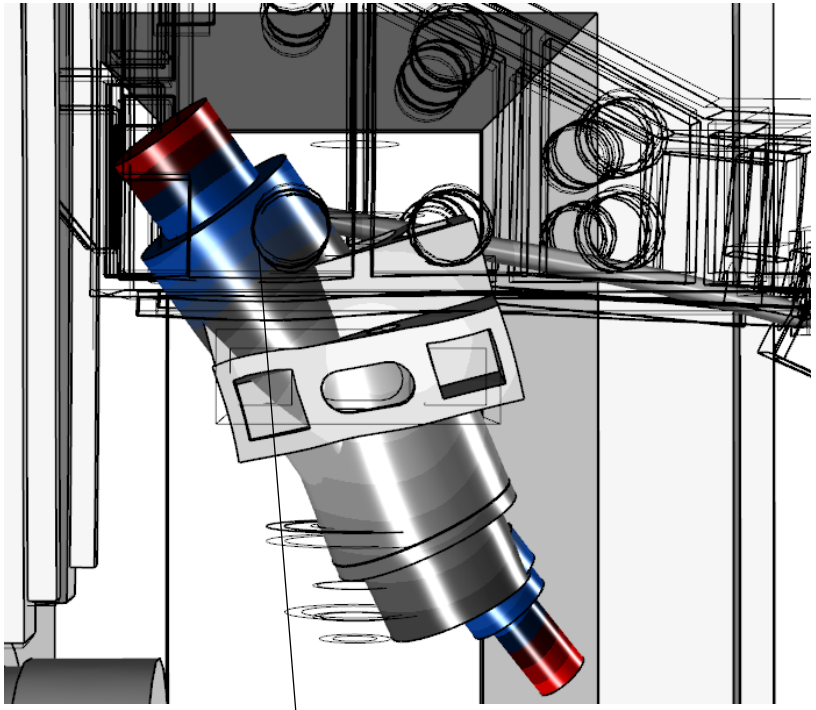
Biegung des Werkstückspindelgehäuses

- Biegung des Werkstückspindelgehäuses durch die fehlende Abstützung im hinteren Bereich

© planlauf GmbH

Schwingungsform bei 381 Hz





Biegung des Werkzeugspindelgehäuses

- Nicken des X-Schlittens
- Biegung des Werkzeugspindelgehäuses durch die fehlende Abstützung im hinteren Bereich

© planlauf GmbH

Gliederung

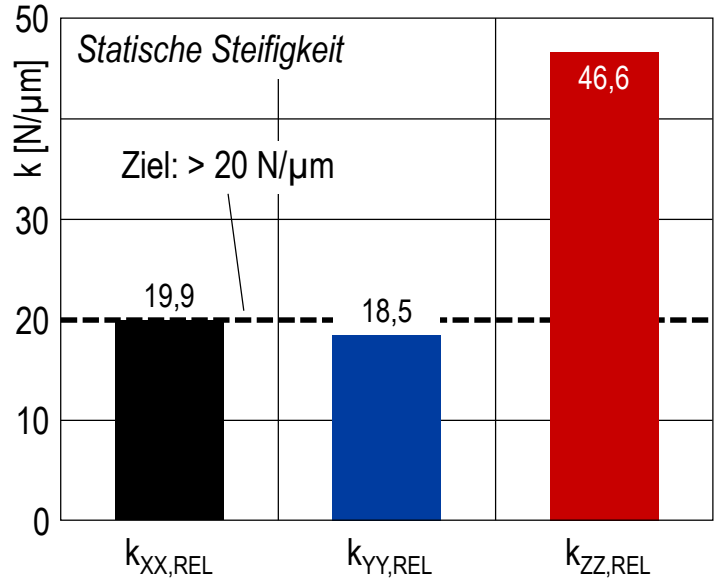
- Einleitung und Aufgabenstellung
- Statisches Verhalten
- Dynamisches Verhalten
- Zusammenfassung und Empfehlungen

© planlauf GmbH

Zusammenfassung

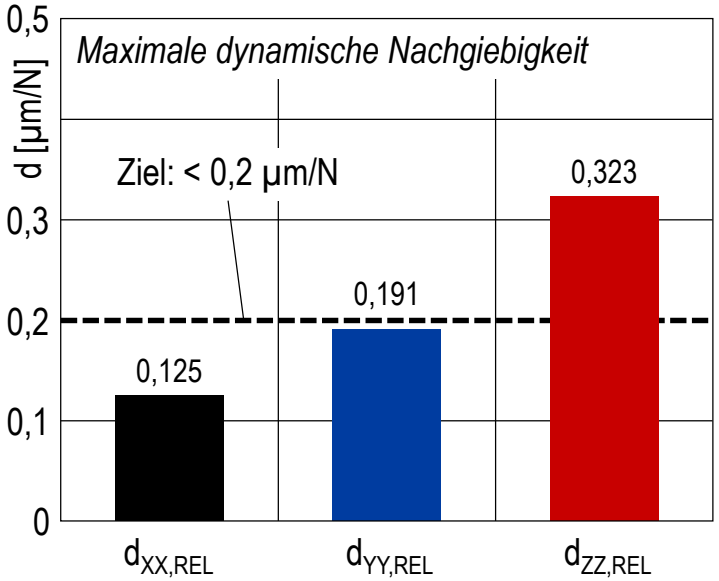
Statisches Verhalten

- Die **Zielsteifigkeit** von 20 N/µm relativ zwischen Werkzeug und Werkstück wird von dem aktuellen Entwurf **in Y-Richtung knapp verfehlt**.
- Das statische Verhalten wird von der **Werkzeugseite** und hier insbesondere von der Spindel und dem Werkzeug dominiert.
- Gesonderte Maßnahmen zur Erhöhung der statischen Steifigkeit erscheinen nicht erforderlich, da die Optimierung des dynamischen Verhaltens auch einen Beitrag zur statischen Steifigkeit liefern wird.



Dynamisches Verhalten

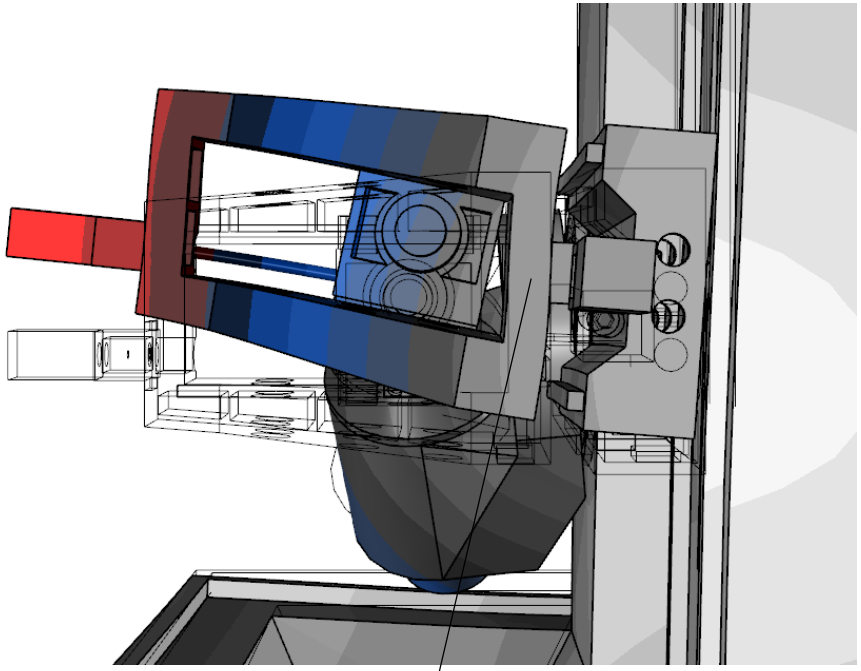
- Die geforderte maximale **dynamische Nachgiebigkeit** von 0,2 µm/N wird in Z-Richtung **um mehr als 50% überschritten**.
- Die wesentlichen dynamischen Schwachstellen sind die Biegung und Torsion des Z-Schlittens sowie die Biegung des Y-Schlittens im Bereich der Z-KGT-Festlageraufnahme.



- **Die dominanten Schwachstellen werden auf den folgenden Seiten zusammen mit den Empfehlungen näher erläutert.**

© planlauf GmbH

Empfehlungen (1/5)
Dynamische Schwachstelle bei 61 Hz



Biegung des Z-Schlittens

Schwingungsform

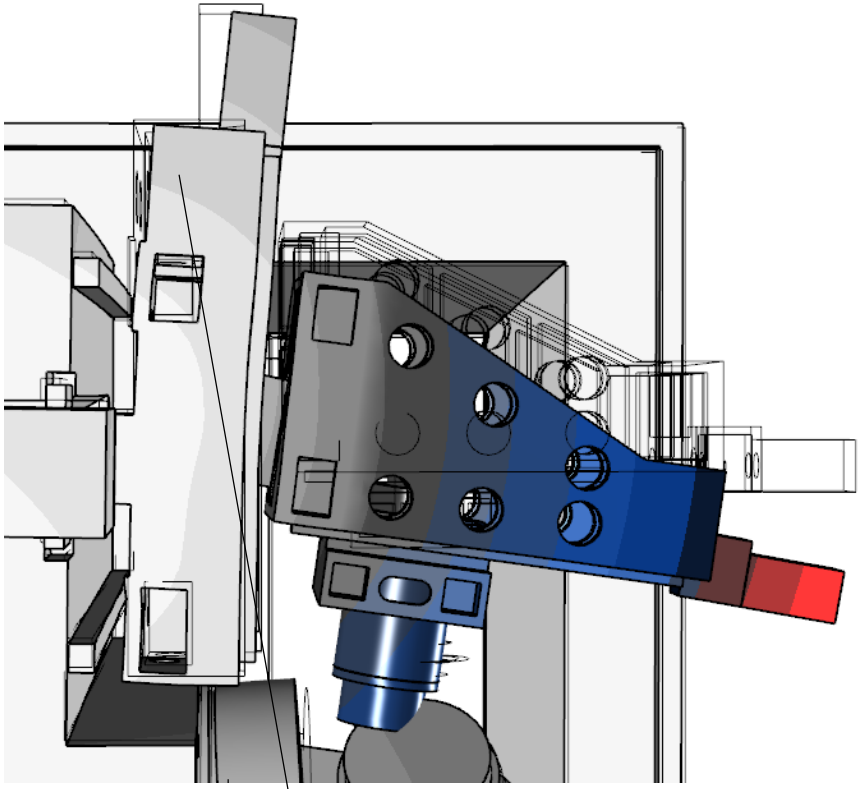
- Schieben und Nicken des Y-Schlittens
- Biegung des Z-Schlittens
- Kippen der A-Achse

Empfehlung

- Verstärkung des Z-Schlittens im unteren Bereich
- Schließen des Z-Schlittens im unteren Bereich durch eine möglichst weit nach oben ragende Rückwand
- Vergrößerung des Abstands der Z-Führungswagen in Y-Richtung

© planlauf GmbH

Empfehlungen (2/5)
Dynamische Schwachstelle bei 69 Hz



Biegung des Y-Schlittens

Schwingungsform

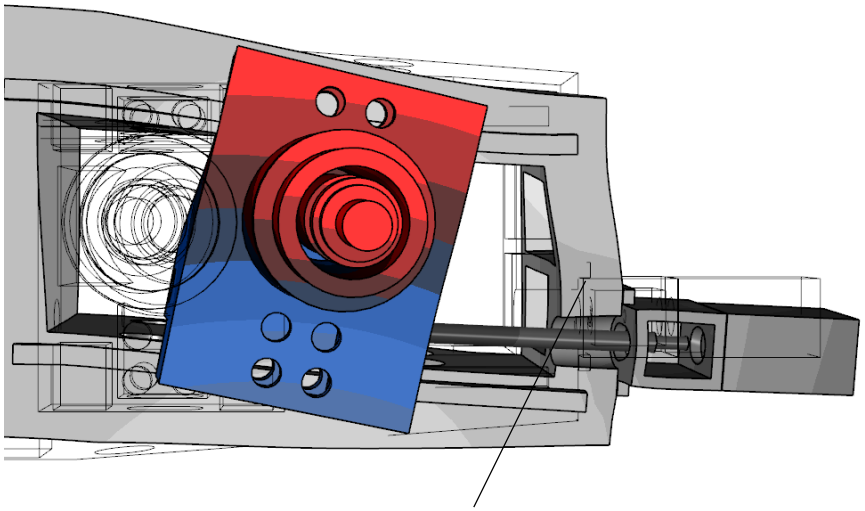
- Schieben und Nicken des Z-Schlittens
- Biegung des Y-Schlittens im hinteren Bereich

Empfehlung

- Vergrößerung des Abstands der Z-Führungswagen in Z-Richtung
- Vergrößerung des Abstands der Y-Führungsschienen in Z-Richtung zur Verringerung des Überstands des Y-Schlittens
- Zwei Festlager für den Z-KGT oder Vertauschen von Fest- und Loslagerseite

© planlauf GmbH

Empfehlungen (3/5)
Dynamische Schwachstelle bei 120 Hz



Schwingungsform

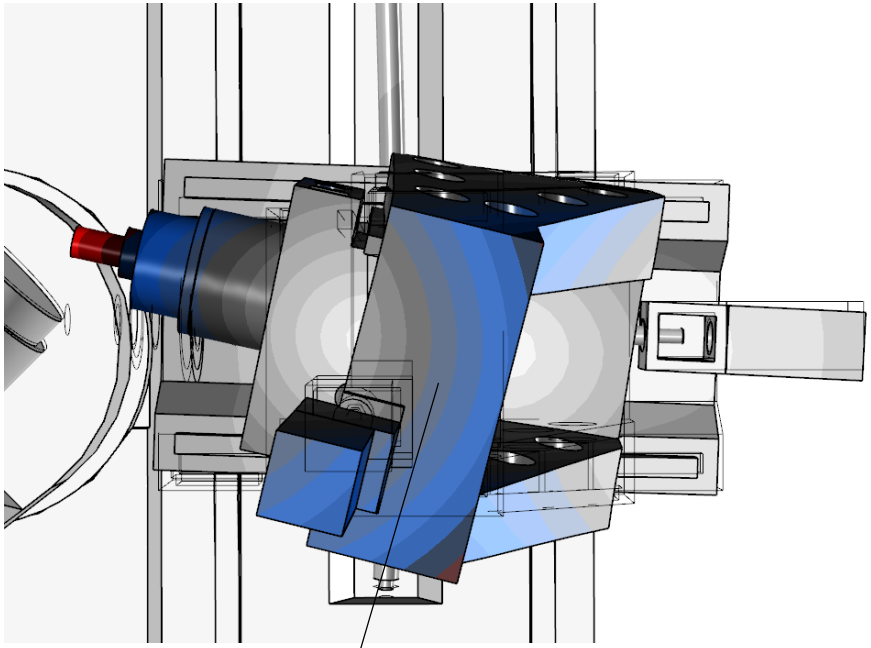
- Schieben und Gieren des X-Schlittens
- Trapezförmige Biegung des Z-Schlittens

Empfehlung

- Verstärkung des Z-Schlittens im oberen Bereich
- Schließen des Z-Schlittens im unteren Bereich durch eine möglichst weit nach oben ragende Rückwand

© planlauf GmbH

Empfehlungen (4/5)
Dynamische Schwachstelle bei 173 Hz



Torsion des Z-Schlittens

Schwingungsform

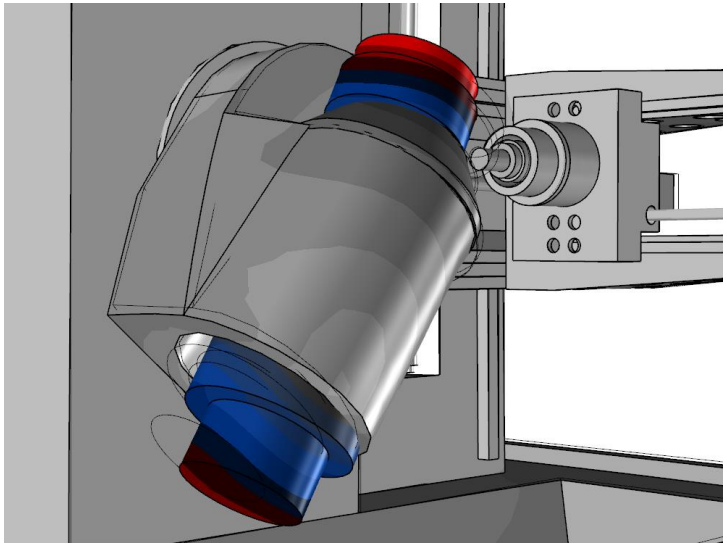
- Gieren und Torsion des Z-Schlittens

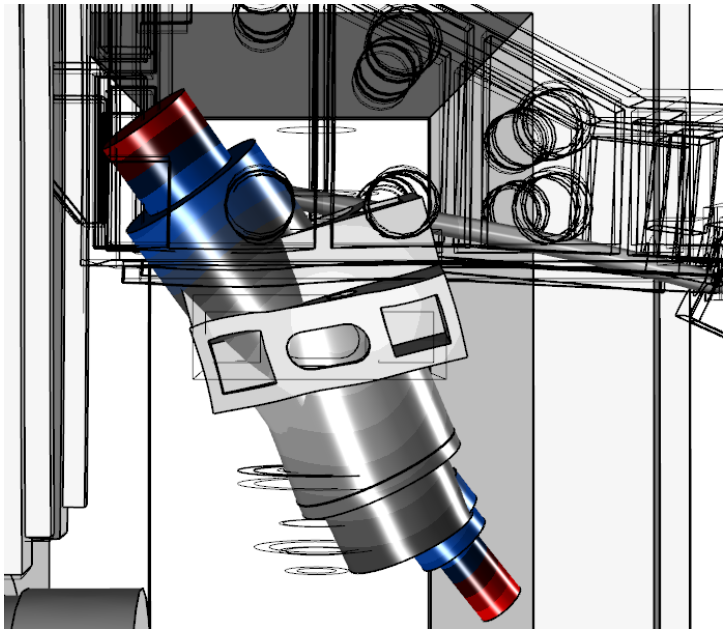
Empfehlung

- Querschnittsvergrößerung des Z-Schlittens
- Vergrößerung des Abstands der Z-Führungswagen in Y- und Z-Richtung
- Schließen des Z-Schlittens im unteren Bereich durch eine möglichst weit nach oben ragende Rückwand

© planlauf GmbH

Empfehlungen (5/5)
Dynamische Schwachstellen bei 232 Hz und 381 Hz





Schwingungsform

- Biegung des Werkstück- bzw. Werkzeugspindelgehäuses durch die fehlende Abstützung im hinteren Bereich

Empfehlung

- Axial freie Abstützung der Spindelgehäuse im hinteren Bereich

© planlauf GmbH