planlauf

Statisches und dynamisches Verhalten eines Bohrwerks

- Berechnung der 2. Entwurfs -

Dr.-Ing. Rouven Meidlinger

planlauf GmbH

Gliederung

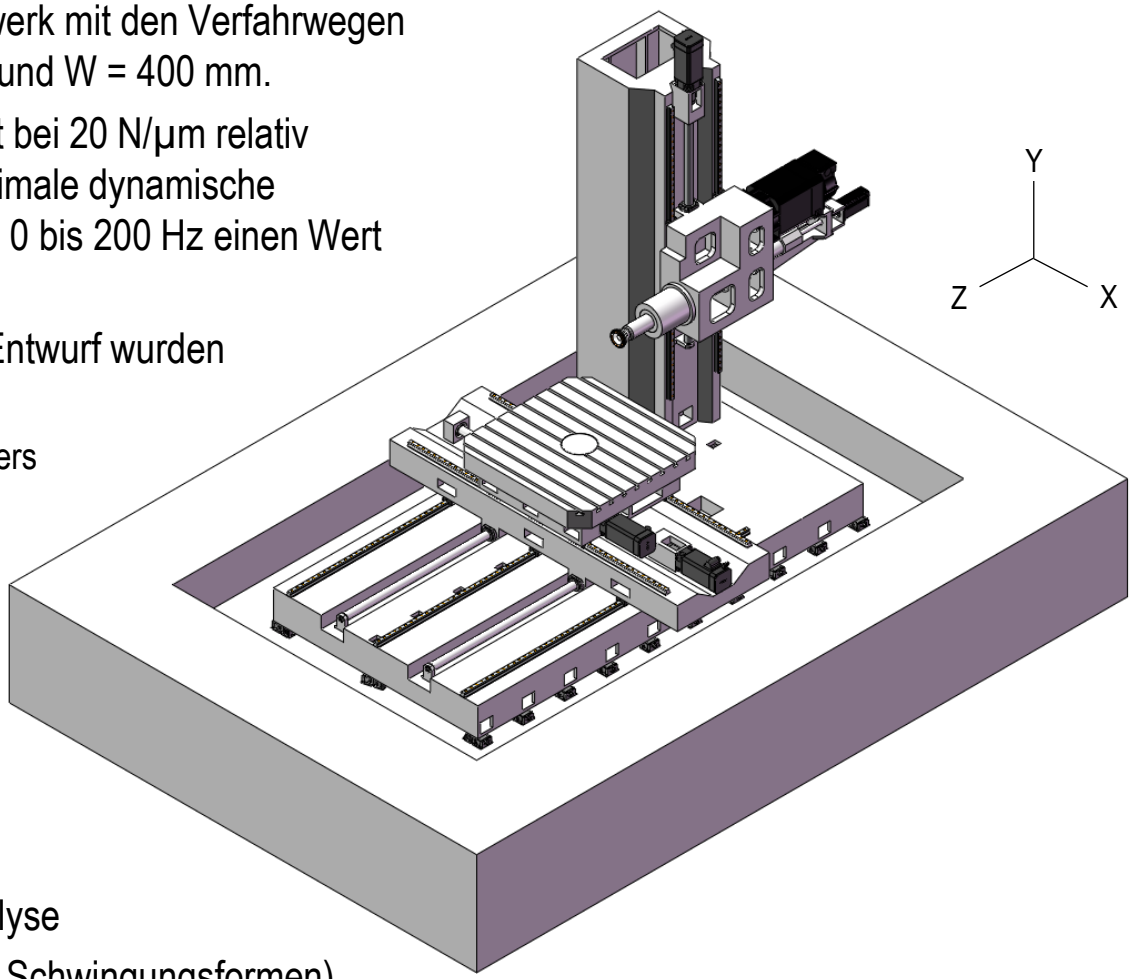
- Einleitung und Aufgabenstellung
- Statisches Verhalten
- Dynamisches Verhalten
- Zusammenfassung und Empfehlungen

© planlauf GmbH

Einleitung und Aufgabenstellung

Einleitung

- Der Auftraggeber entwickelt derzeit ein Bohrwerk mit den Verfahrwegen X = 1.600 mm, Y = 1.400 mm, Z = 1.400 mm und W = 400 mm.
- 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 200 Hz einen Wert von 0,2 µm/N nicht überschreiten.
- Gegenüber dem bereits berechneten ersten Entwurf wurden umfangreiche Änderungen vorgenommen:
  - Verbreiterung des Betts im Bereich des Ständers
  - Reduzierung des X-Verfahrwegs
  - Verkleinerung der Palette
  - Werkstoffwechsel für X- und Z-Schlitten
  - Gantry-Antrieb der Z-Achse
  - Uniaxiale Anordnung von Pinole und W-KGT
  - Versteifung der W-KGT-Konsole

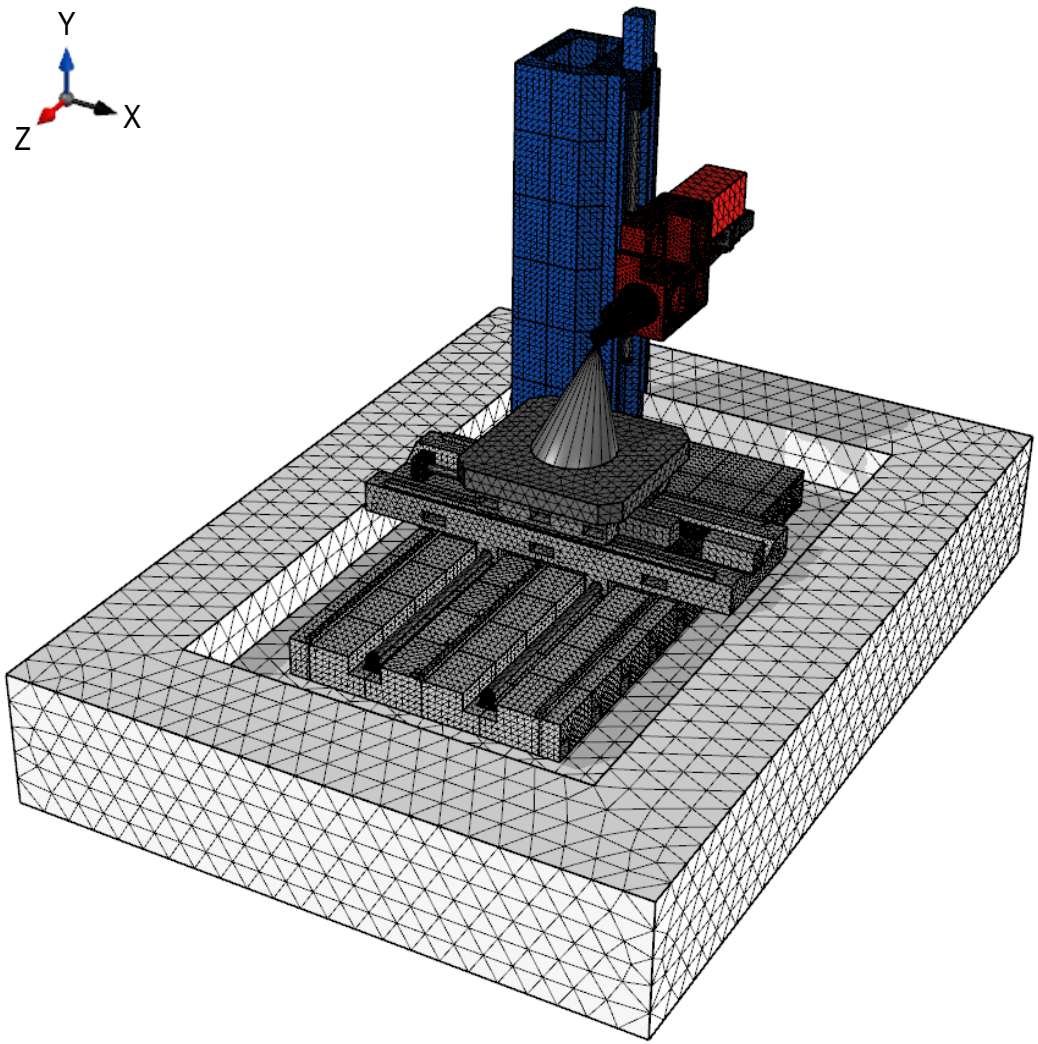


Aufgabenstellung

- Statisches Verhalten inkl. Schwachstellenanalyse
- Dynamisches Verhalten (Frequenzgänge und Schwingungsformen)
- Gegenüberstellung der Maschineneigenschaften zu denen des ersten Entwurfs

© planlauf GmbH

Aufbau des Finite-Elemente-Modells



- Führungen:
  - X-Achse: INA RUE 45 E (6 Wagen / 2 Schienen)
  - Y-Achse: INA RUE 45 E (4 Wagen / 2 Schienen)
  - Z-Achse: INA RUE 45 E (6 Wagen / 3 Schienen)
  - W-Achse: INA RUE 45 E (1 Wagen / 1 Schiene)
- Kugelgewindespindeln:
  - X-Achse: ∅63x20 mit INA ZARF 40100 (fest-los)
  - Y-Achse: ∅63x20 mit INA ZARF 40100 (fest-los)
  - Z-Achse: 2x ∅63x20 mit INA ZARF 40100 (fest-los)
  - W-Achse: ∅32x20 mit INA ZARF 2575 (fest-frei))
- Hauptspindel (// \\ Z Z)
  - Spindellager 4x B71932E.UL
  - Zylinderrollenlager: N1928K und N1926K
  - Werkzeug: Messerkopffräser ∅125x65
- B-Achse: INA YRT 580 mit Klemmung
- Werkstoffe
  - Palette (1.250 x 1.250 mm²): EN-GJL-250
  - Ständer: EN-GJL-300
  - X-/Y-Z-Schlitten: EN-GJS-400
  - alle anderen Bauteile: Stahl
- Verankerte Aufstellung mit 32 Fixatoren BWF RK II

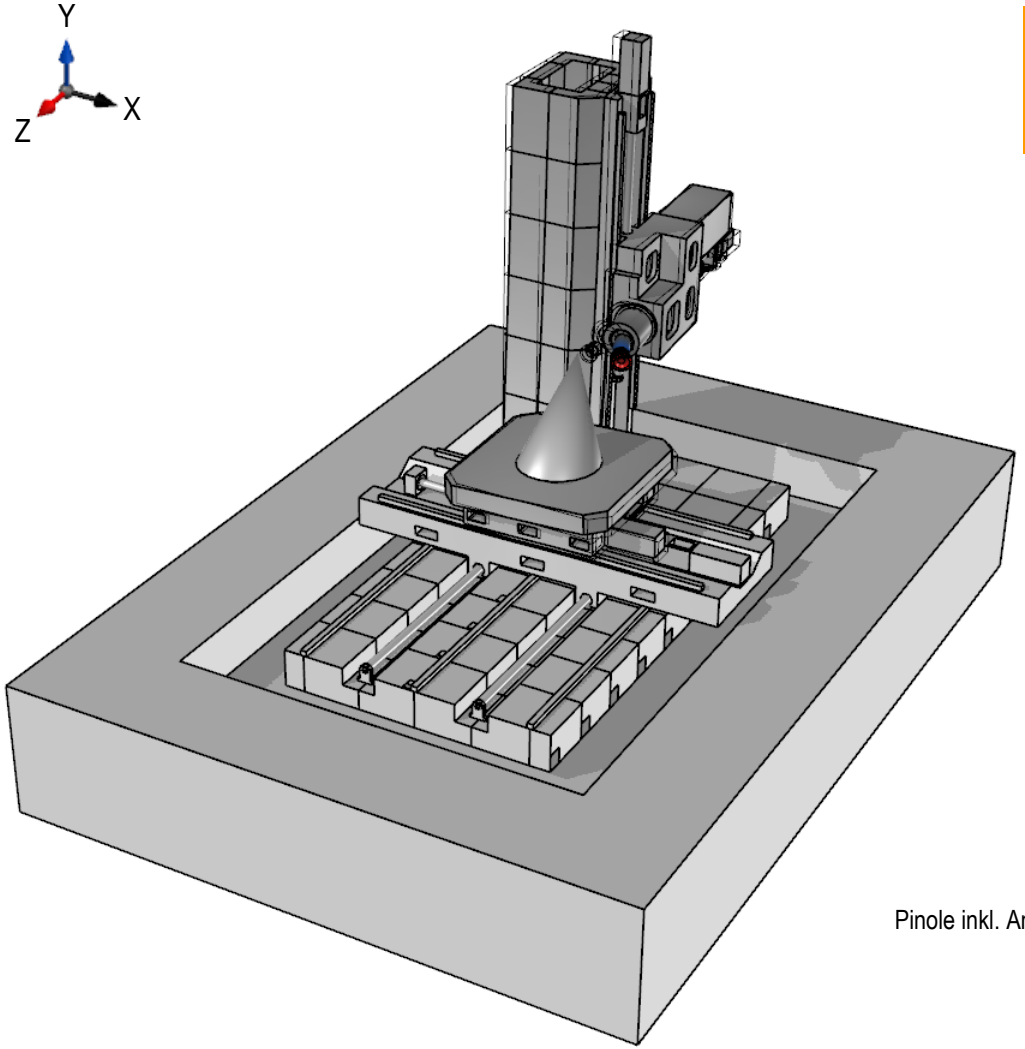
© planlauf GmbH

Gliederung

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

© planlauf GmbH

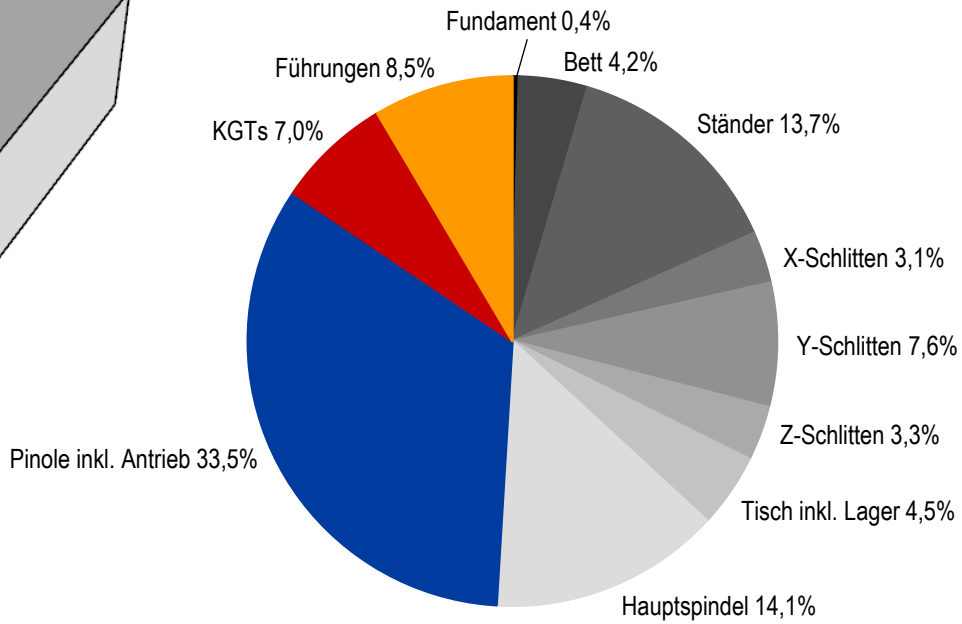
Statische Belastung in X-Richtung (X0 Y0 Z0 W0, Mitte)



Statische Steifigkeit in X-Richtung
$k_{XX,REL}$ = 21,9 N/µm

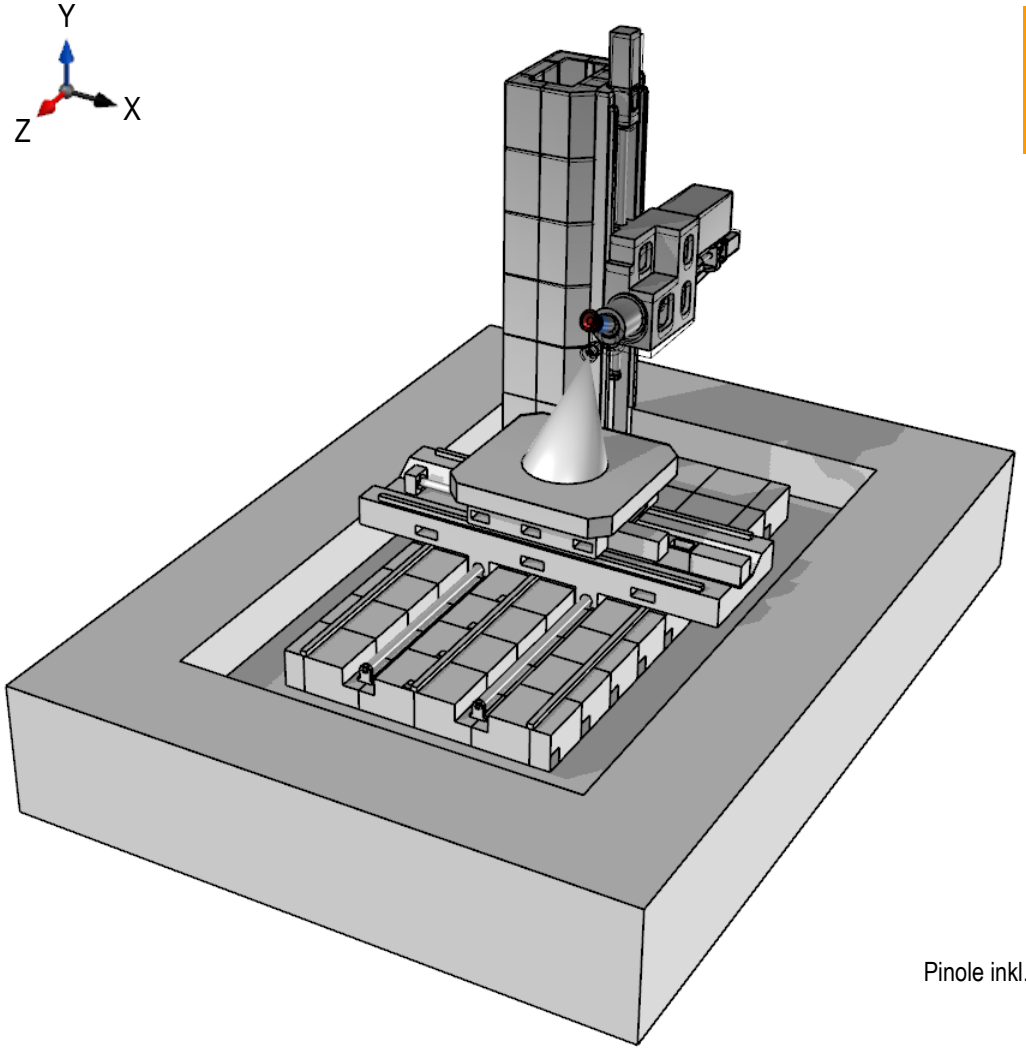
$k_{XX,WZG}$ = 28,8 N/µm
$k_{XX,WST}$ = 92,5 N/µm

Anteile der einzelnen Komponenten an der Gesamtverformung



© planlauf GmbH

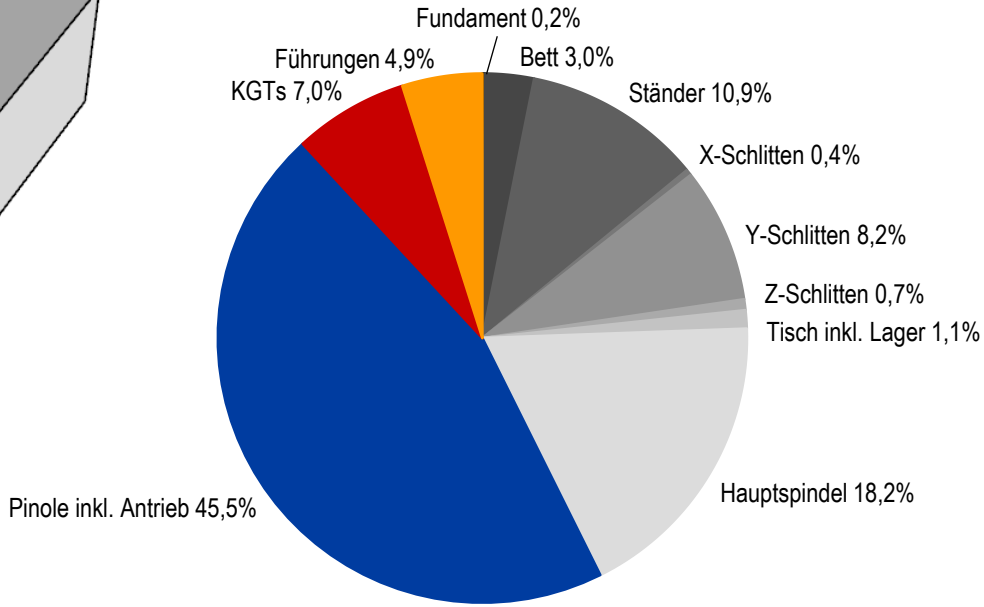
Statische Belastung in Y-Richtung (X0 Y0 Z0 W0, Mitte)



Statische Steifigkeit in Y-Richtung
$k_{YY,REL}$ = 31,2 N/µm

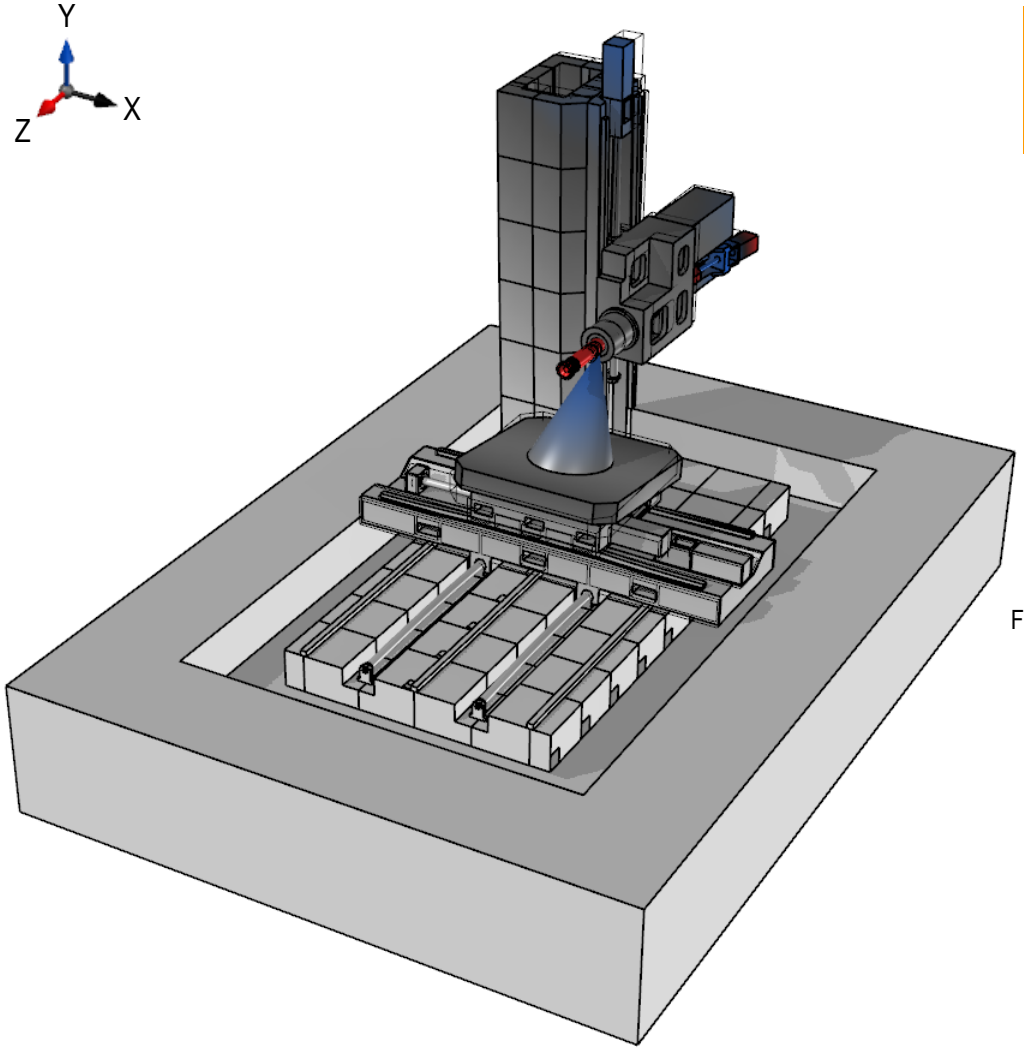
$k_{YY,WZG}$ = 32,4 N/µm
$k_{YY,WST}$ = 872,6 N/µm

Anteile der einzelnen Komponenten an der Gesamtverformung



© planlauf GmbH

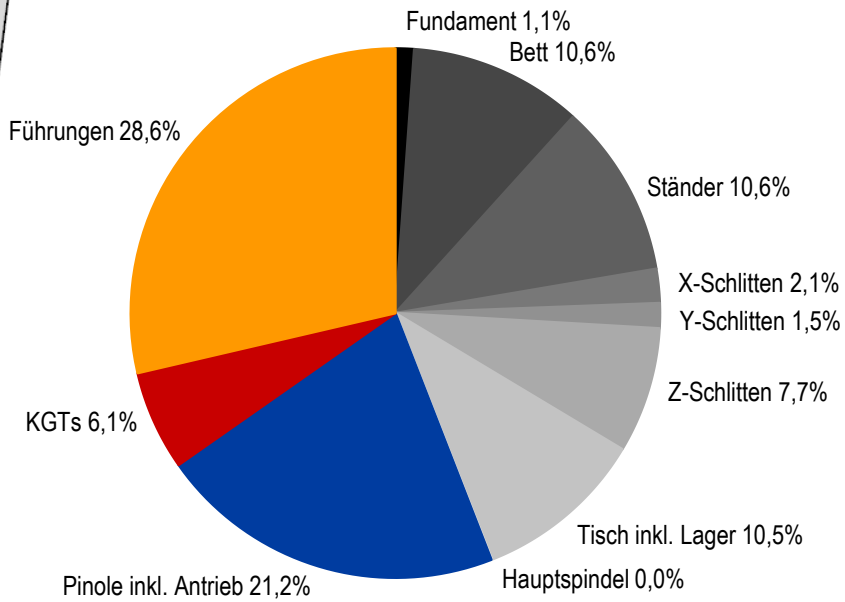
Statische Belastung in Z-Richtung (X0 Y0 Z0 W0, Mitte)



Statische Steifigkeit in Z-Richtung
$k_{ZZ,REL}$ = 50,0 N/µm

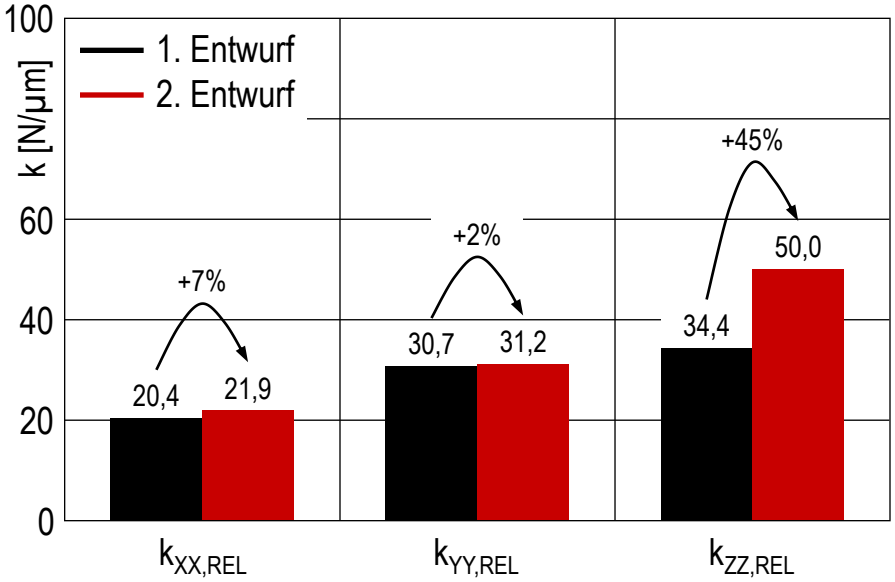
$k_{ZZ,WZG}$ = 86,6 N/µm
$k_{ZZ,WST}$ = 118,5 N/µm

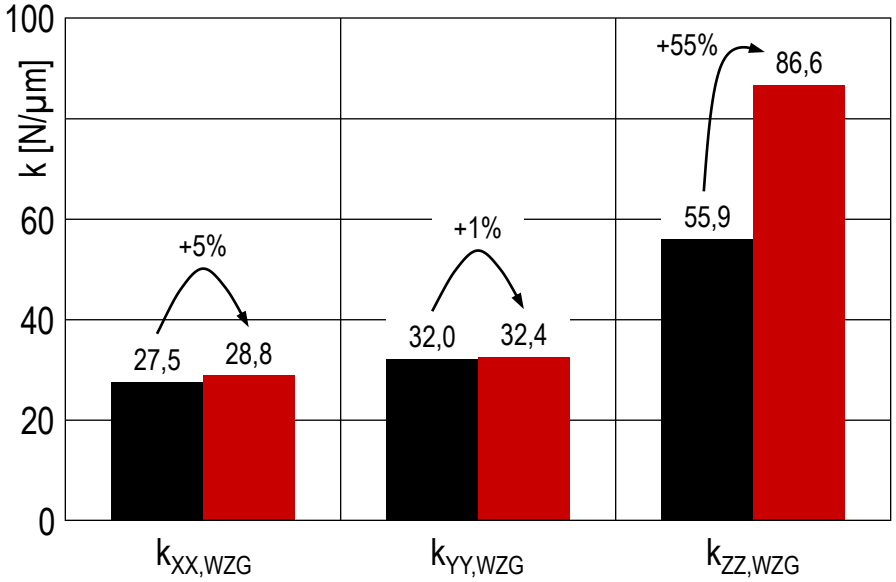
Anteile der einzelnen Komponenten an der Gesamtverformung

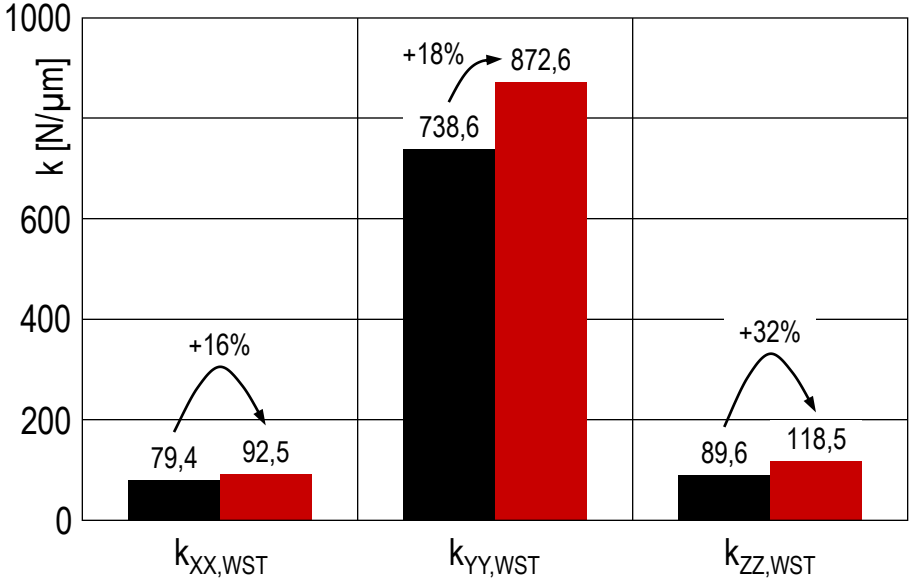


© planlauf GmbH

Gegenüberstellung der statischen Steifigkeiten zum ersten Entwurf







- Gegenüber dem ersten Entwurf kann die werkzeugseitige Steifigkeit in Z-Richtung um 55% gesteigert werden (uniaxiale Anordnung von Pinole und W-KGT).
- Die werkseitigen Steifigkeiten können um 16% bis 32% angehoben werden (Werkstoffwechsel von X- und Z-Schlitten, zwei KGTs in der Z-Achse).

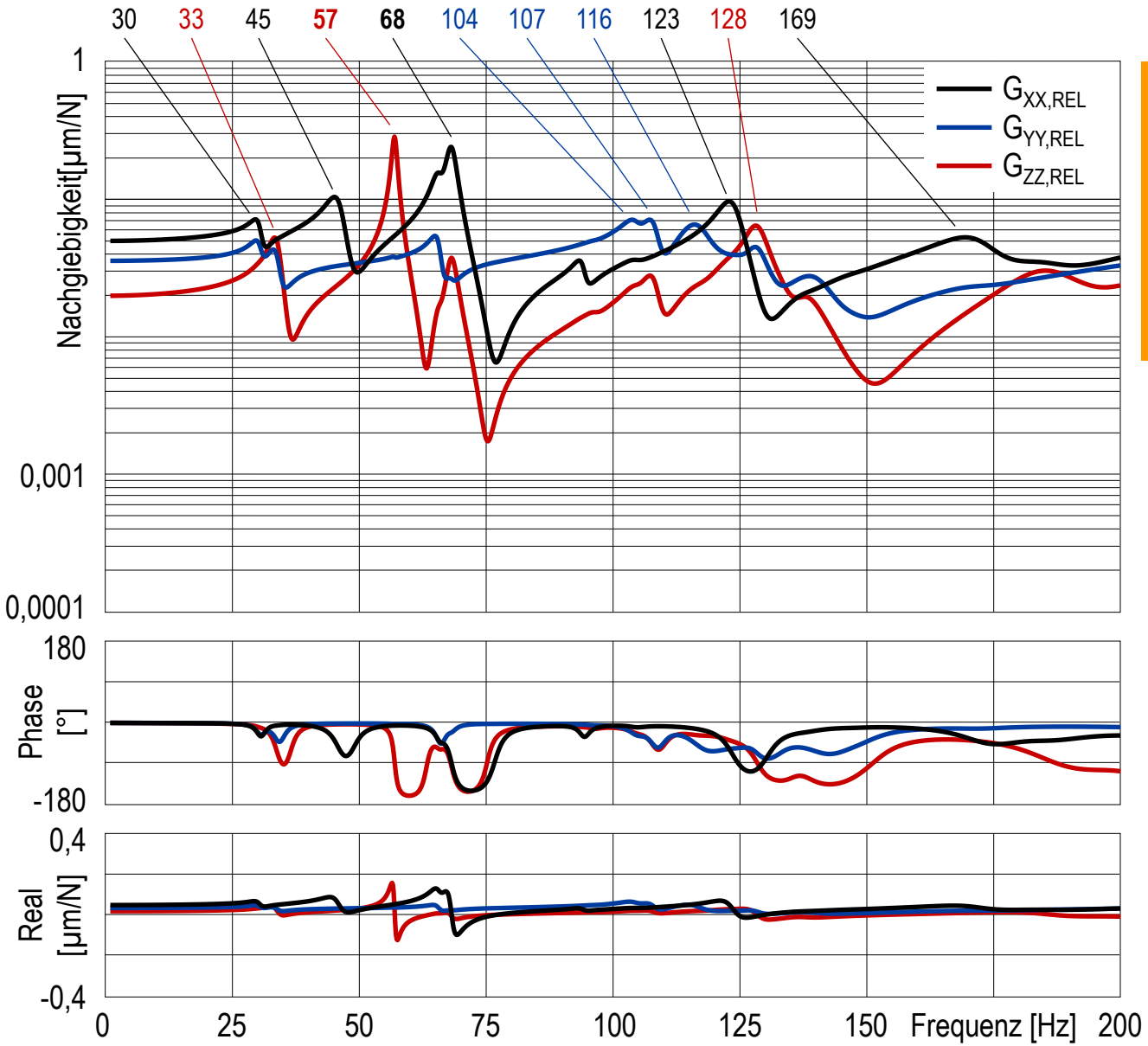
© planlauf GmbH

Gliederung

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

© planlauf GmbH

Relative Nachgiebigkeitsfrequenzgänge



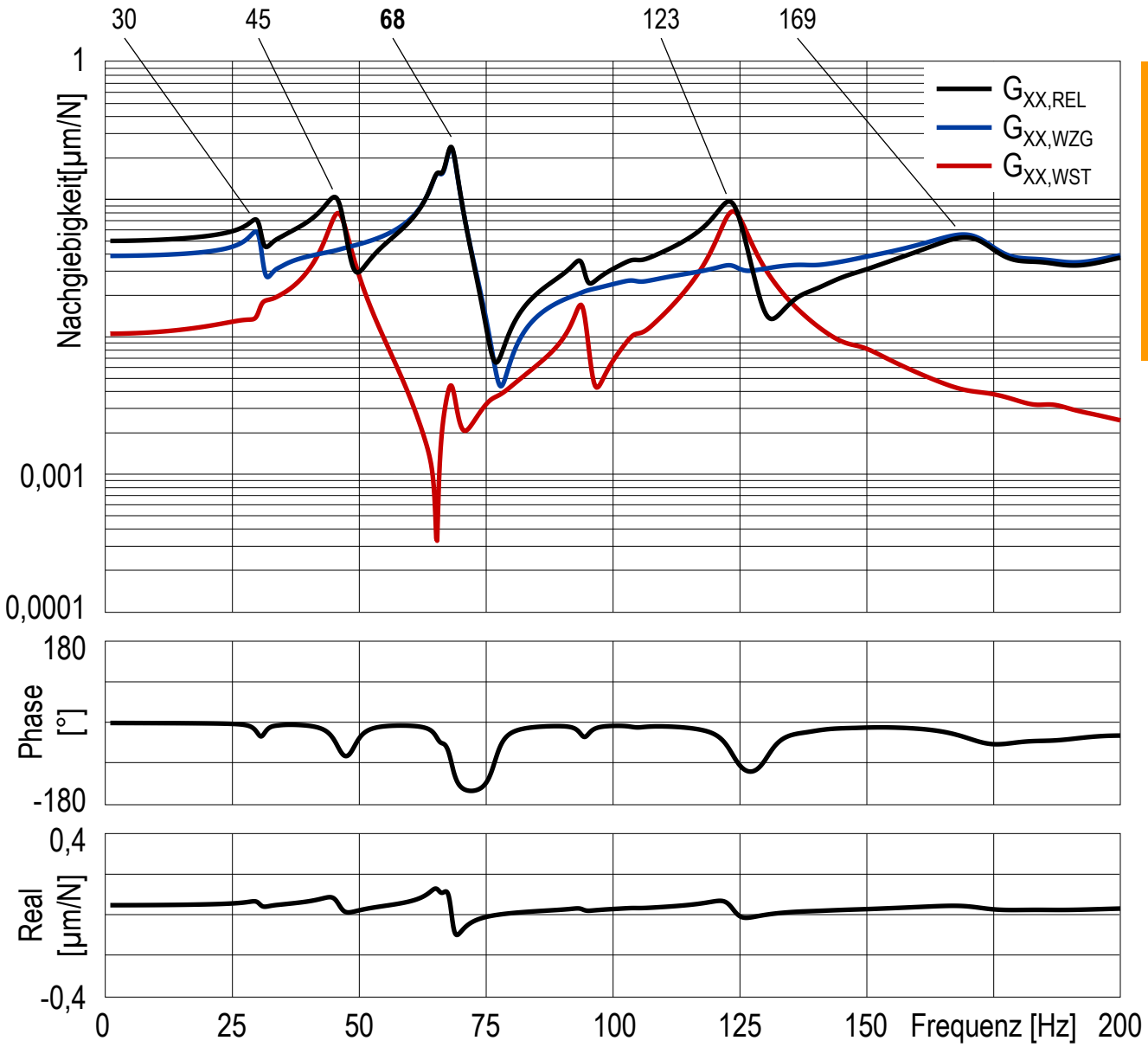
Dominante Resonanzfrequenzen

57 Hz
- Schieben der Werkstückseite in Z-Richtung
- Biegung und Torsion des Z-Schlittens

68 Hz
- Torsion des Ständers
- Schwingung der W-KGT-Konsole in X-Richtung

© planlauf GmbH

Nachgiebigkeitsfrequenzgänge in X-Richtung



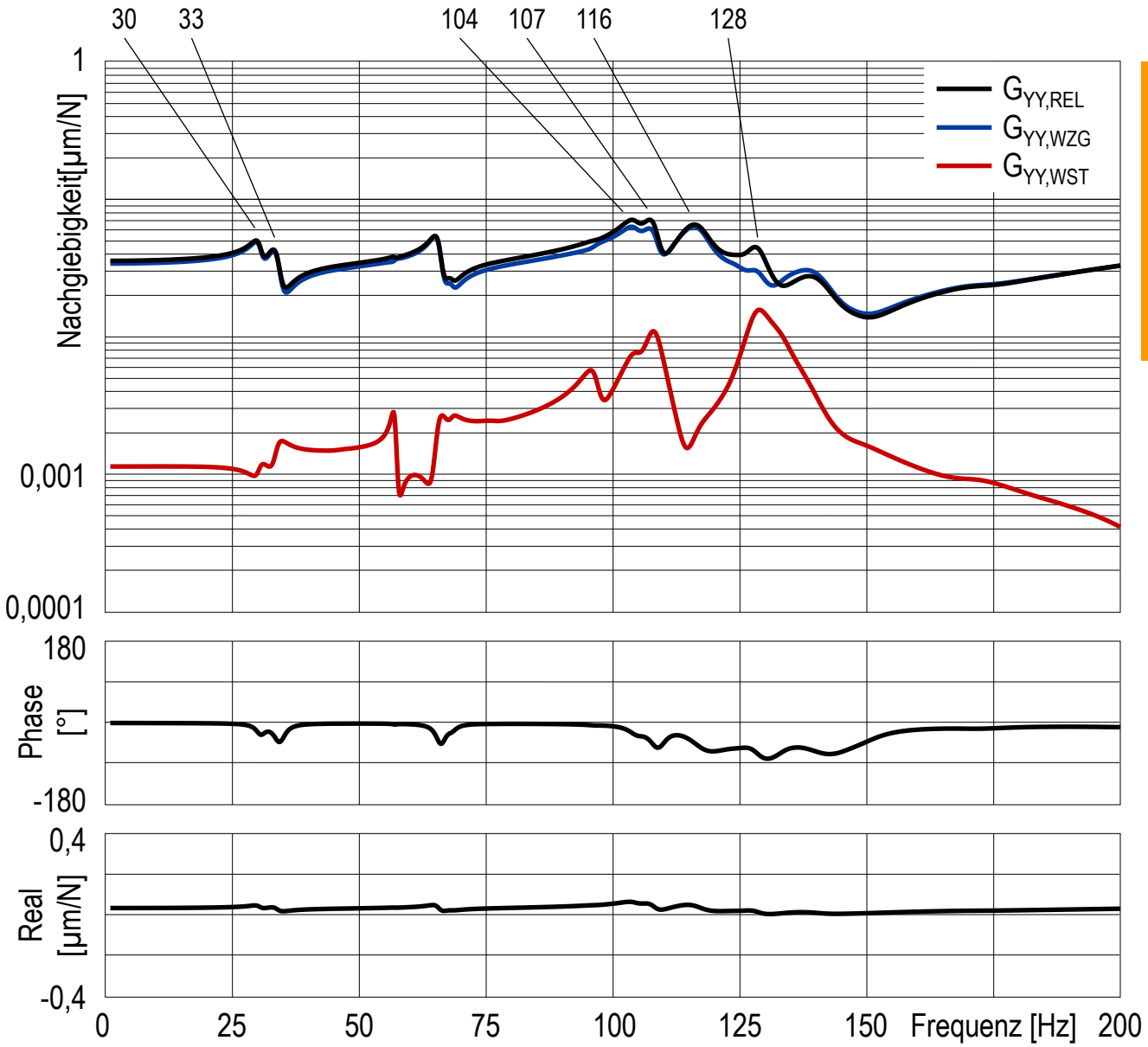
Dominante Resonanzfrequenzen

57 Hz
- Schieben der Werkstückseite in Z-Richtung
- Biegung und Torsion des Z-Schlittens

68 Hz
- Torsion des Ständers
- Schwingung der W-KGT-Konsole in X-Richtung

© planlauf GmbH

Nachgiebigkeitsfrequenzgänge in Y-Richtung



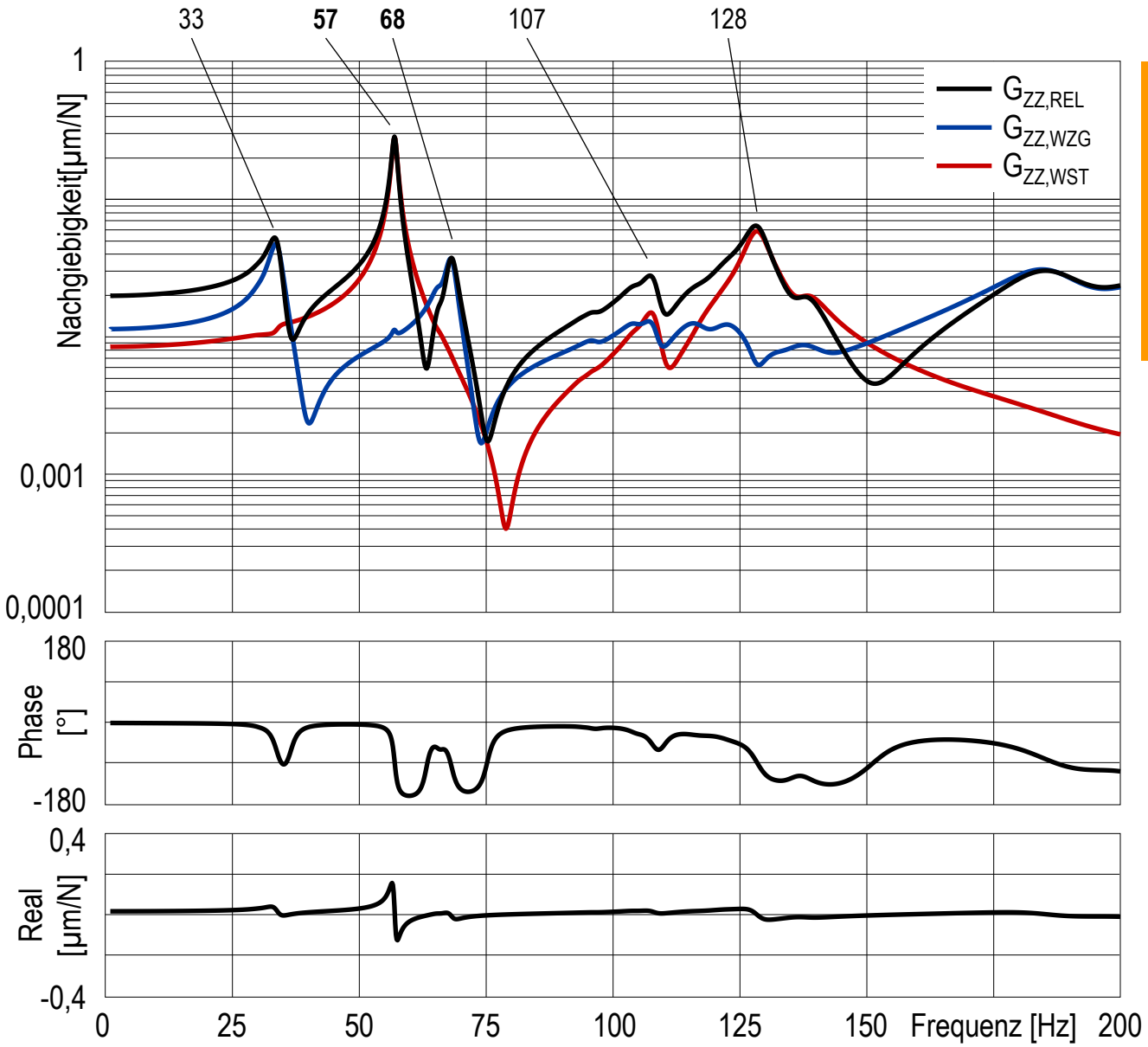
Dominante Resonanzfrequenzen

57 Hz
- Schieben der Werkstückseite in Z-Richtung
- Biegung und Torsion des Z-Schlittens

68 Hz
- Torsion des Ständers
- Schwingung der W-KGT-Konsole in X-Richtung

© planlauf GmbH

Nachgiebigkeitsfrequenzgänge in Z-Richtung



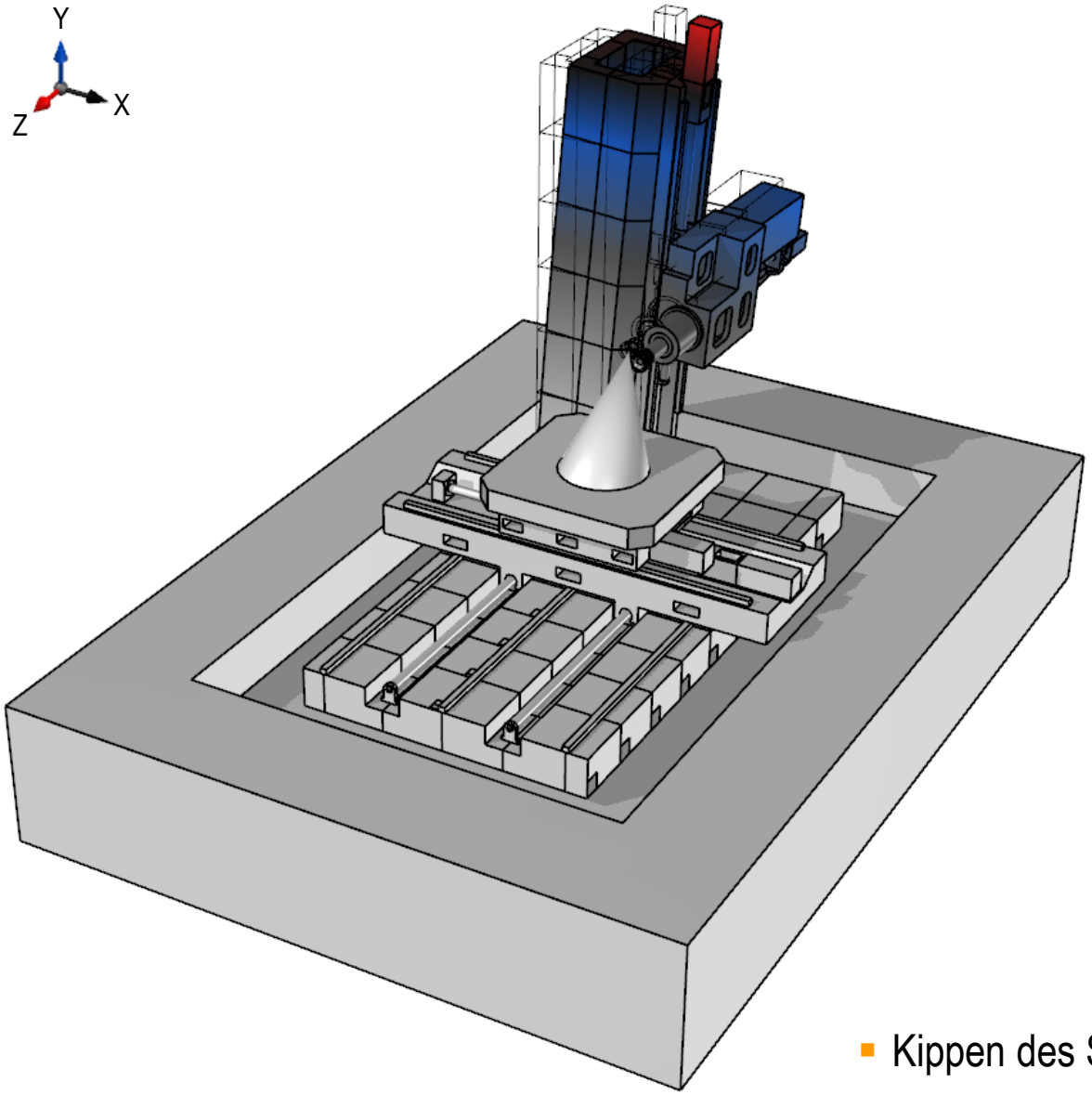
Dominante Resonanzfrequenzen

57 Hz
- Schieben der Werkstückseite in Z-Richtung
- Biegung und Torsion des Z-Schlittens

68 Hz
- Torsion des Ständers
- Schwingung der W-KGT-Konsole in X-Richtung

© planlauf GmbH

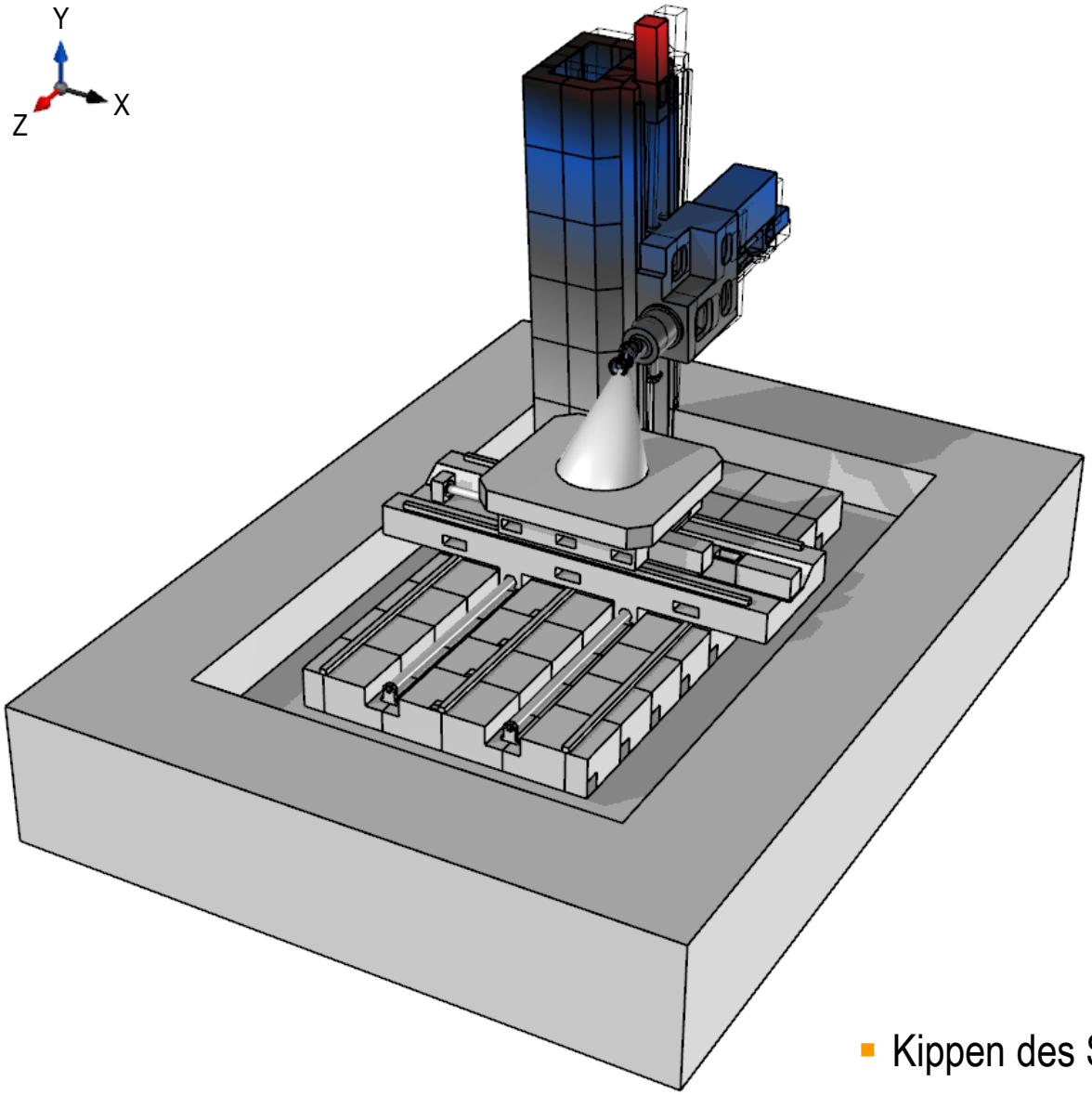
Schwingungsform bei 30 Hz



- Kippen des Ständers in X-Richtung

© planlauf GmbH

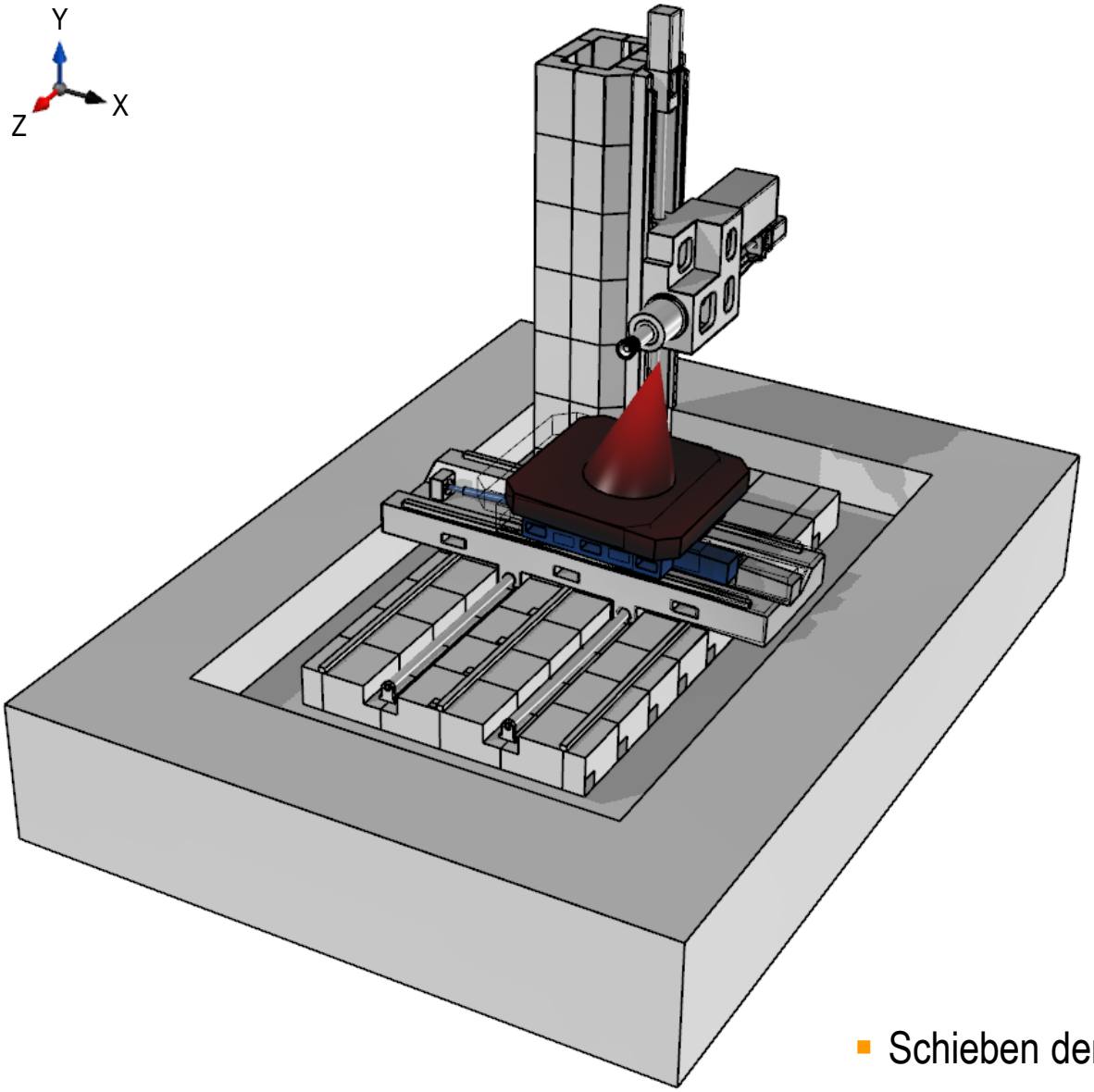
Schwingungsform bei 33 Hz



- Kippen des Ständers in Z-Richtung

© planlauf GmbH

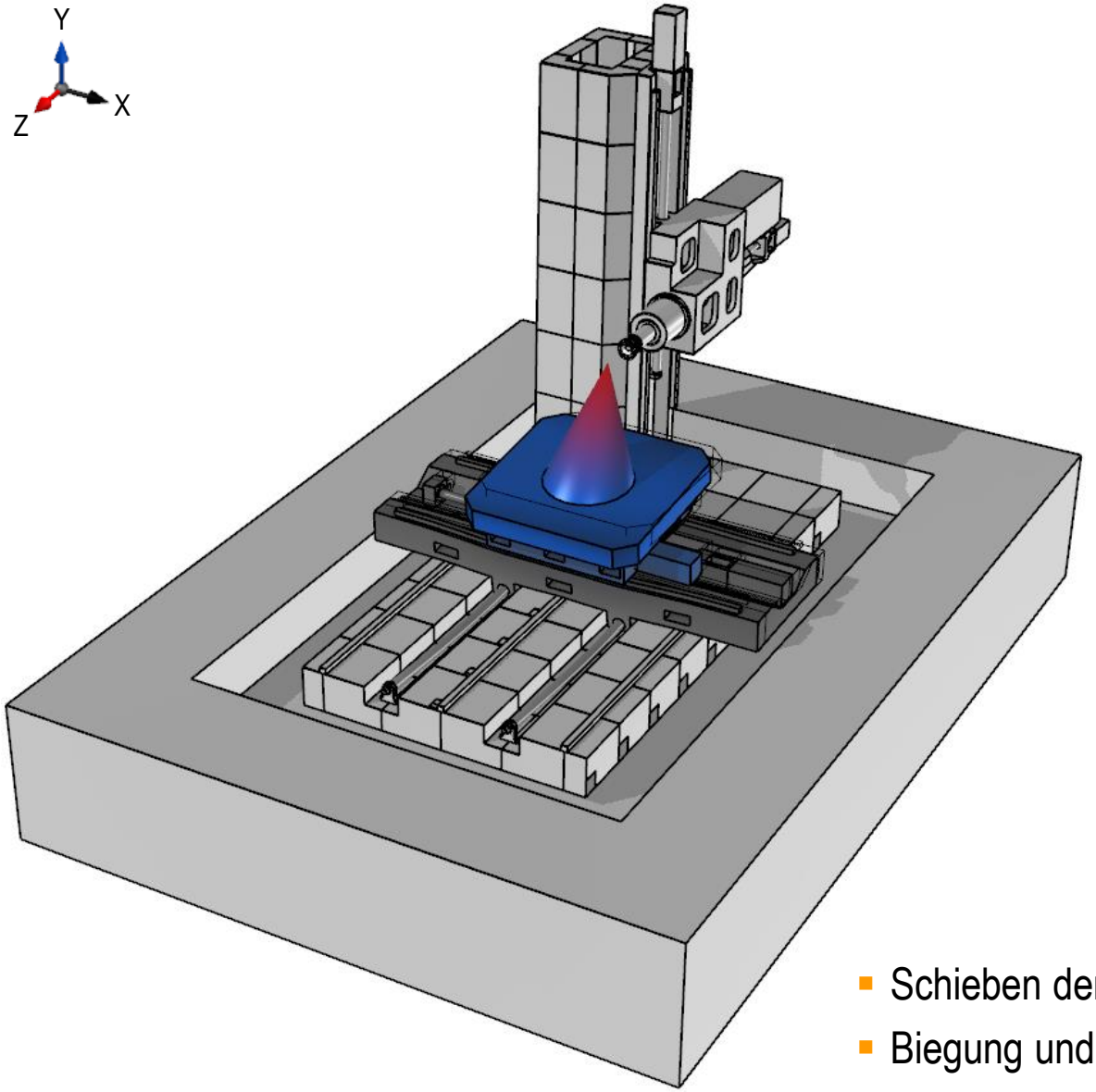
Schwingungsform bei 45 Hz



- Schieben der Tischeinheit in X-Richtung

© planlauf GmbH

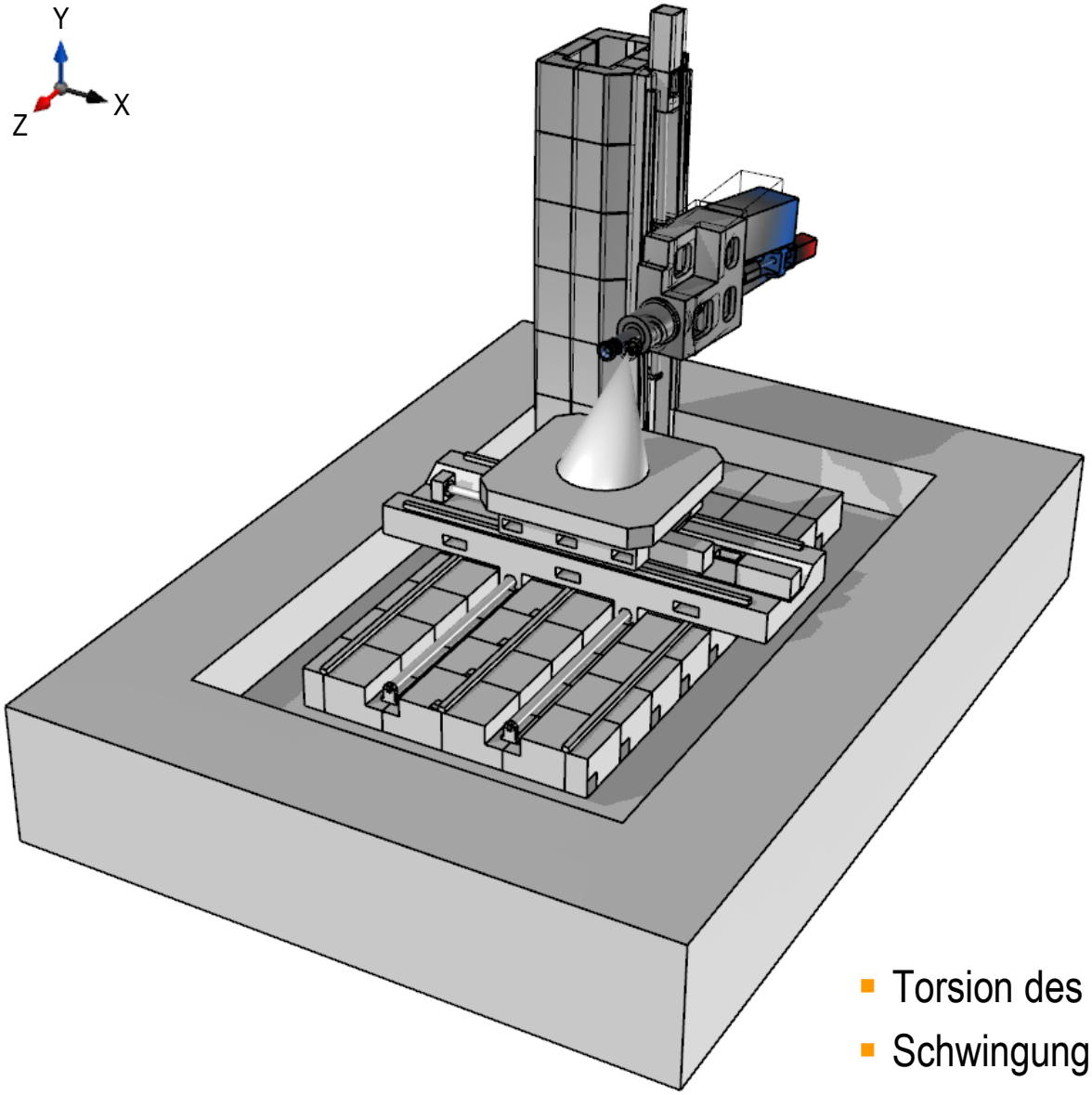
Schwingungsform bei 57 Hz



- Schieben der Werkstückseite in Z-Richtung
- Biegung und Torsion des Z-Schlittens

© planlauf GmbH

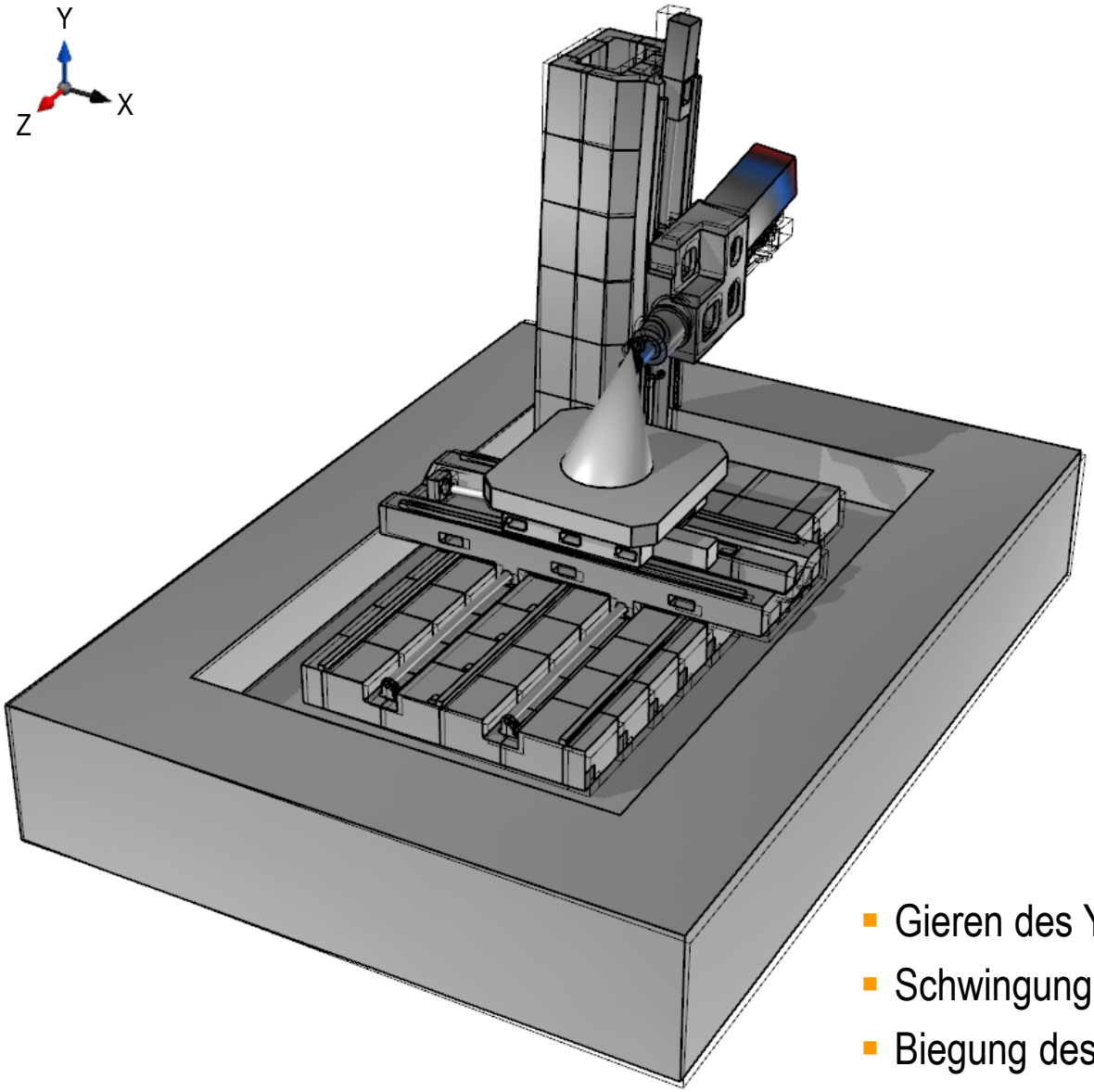
Schwingungsform bei 68 Hz



- Torsion des Ständers
- Schwingung der W-KGT-Konsole in X-Richtung

© planlauf GmbH

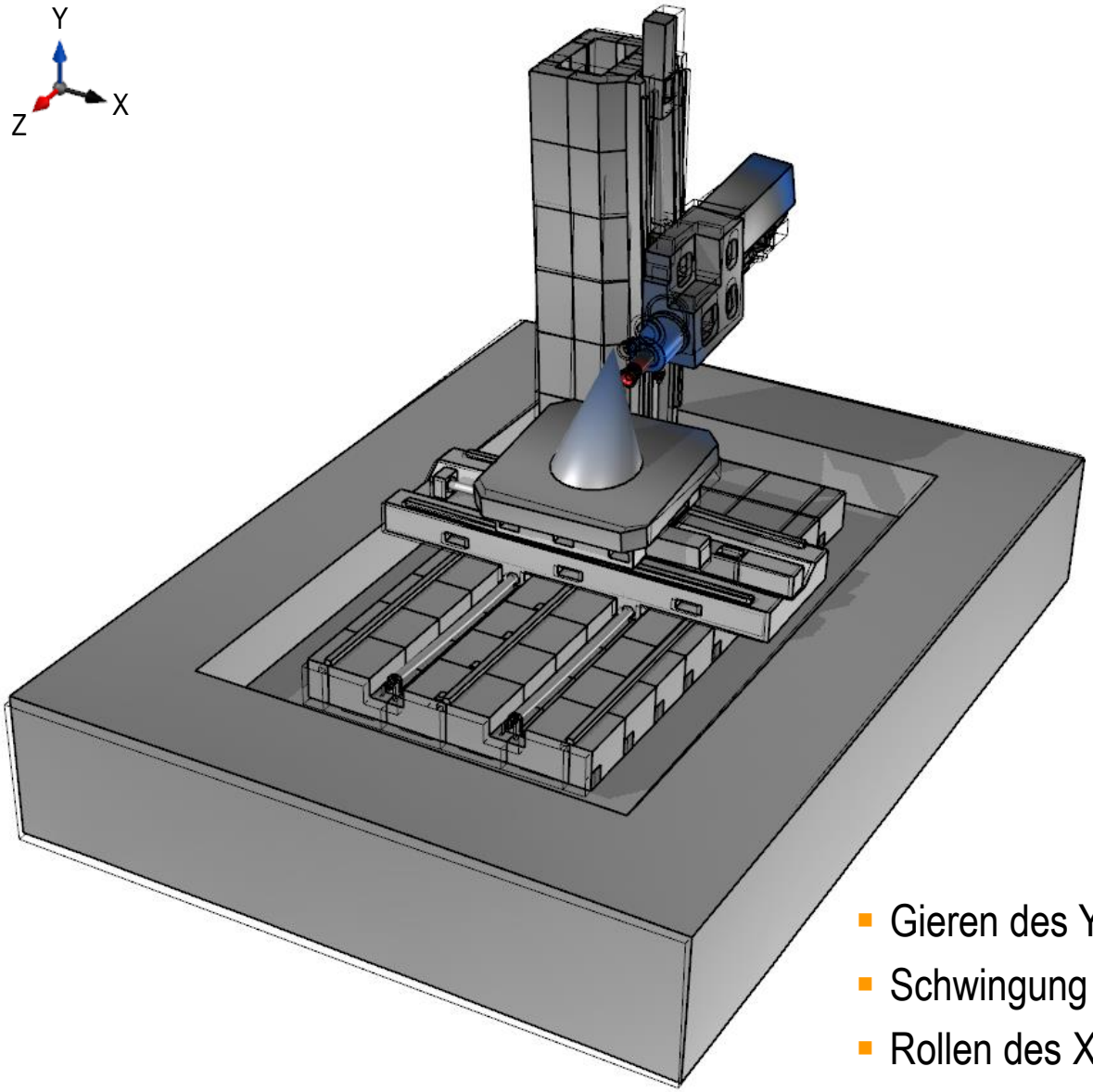
Schwingungsform bei 104 Hz



- Gieren des Y-Schlittens
- Schwingung der W-KGT-Konsole
- Biegung des Ständers

© planlauf GmbH

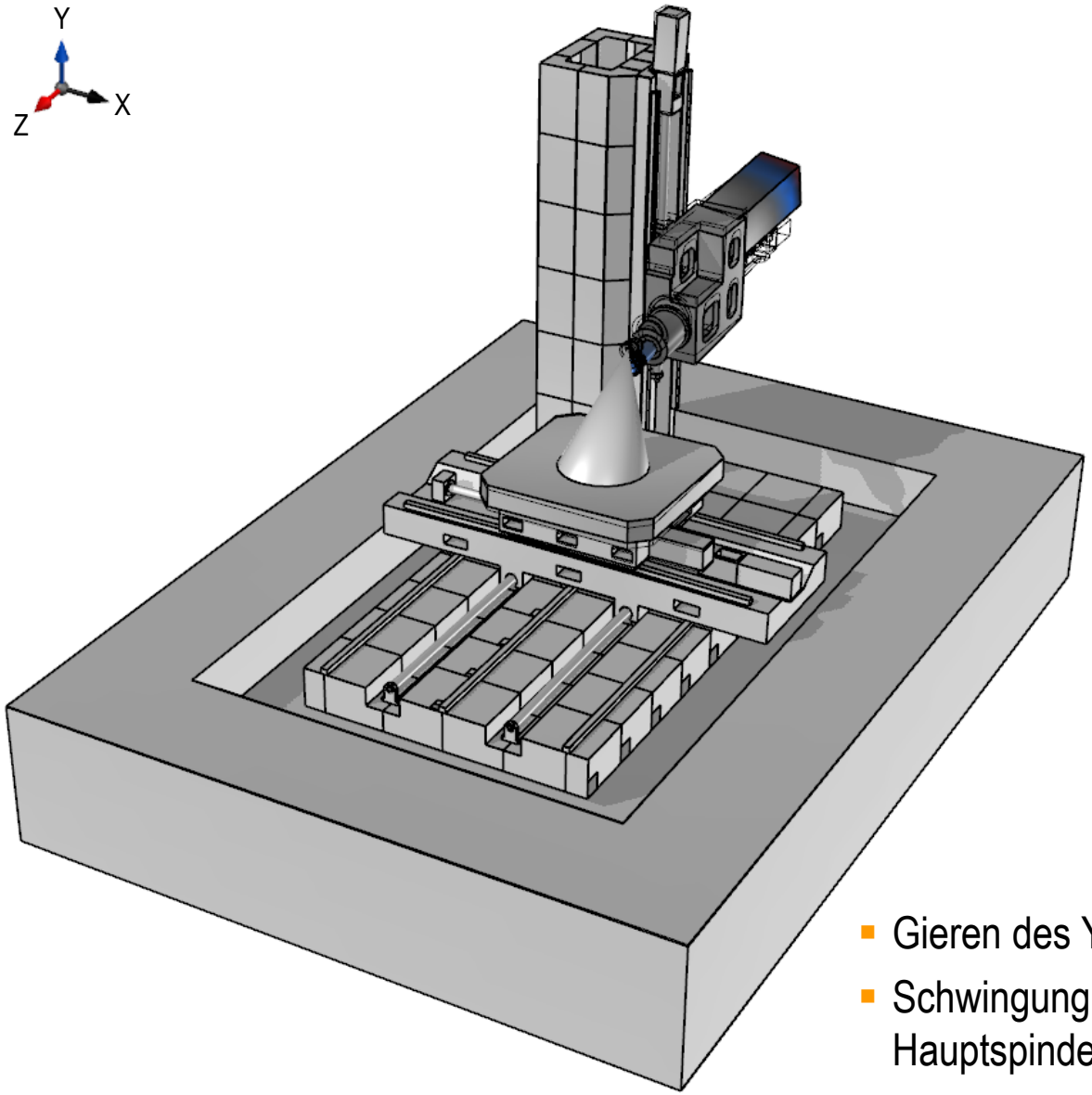
Schwingungsform bei 107 Hz



- Gieren des Y-Schlittens
- Schwingung der W-KGT-Konsole
- Rollen des X-Schlittens

© planlauf GmbH

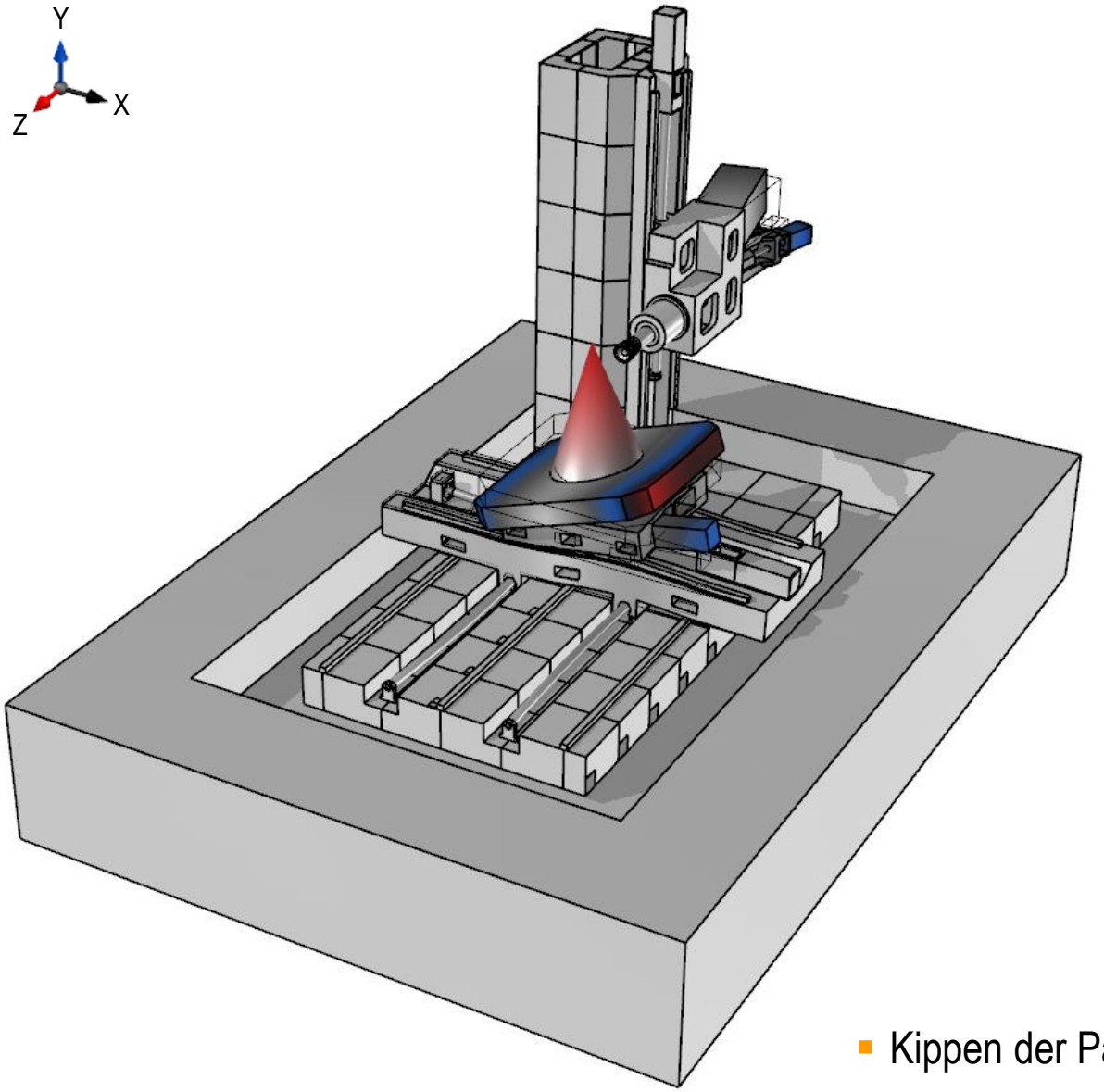
Schwingungsform bei 116 Hz



- Gieren des Y-Schlittens
- Schwingung der W-KGT-Konsole und des Hauptspindelmotors

© planlauf GmbH

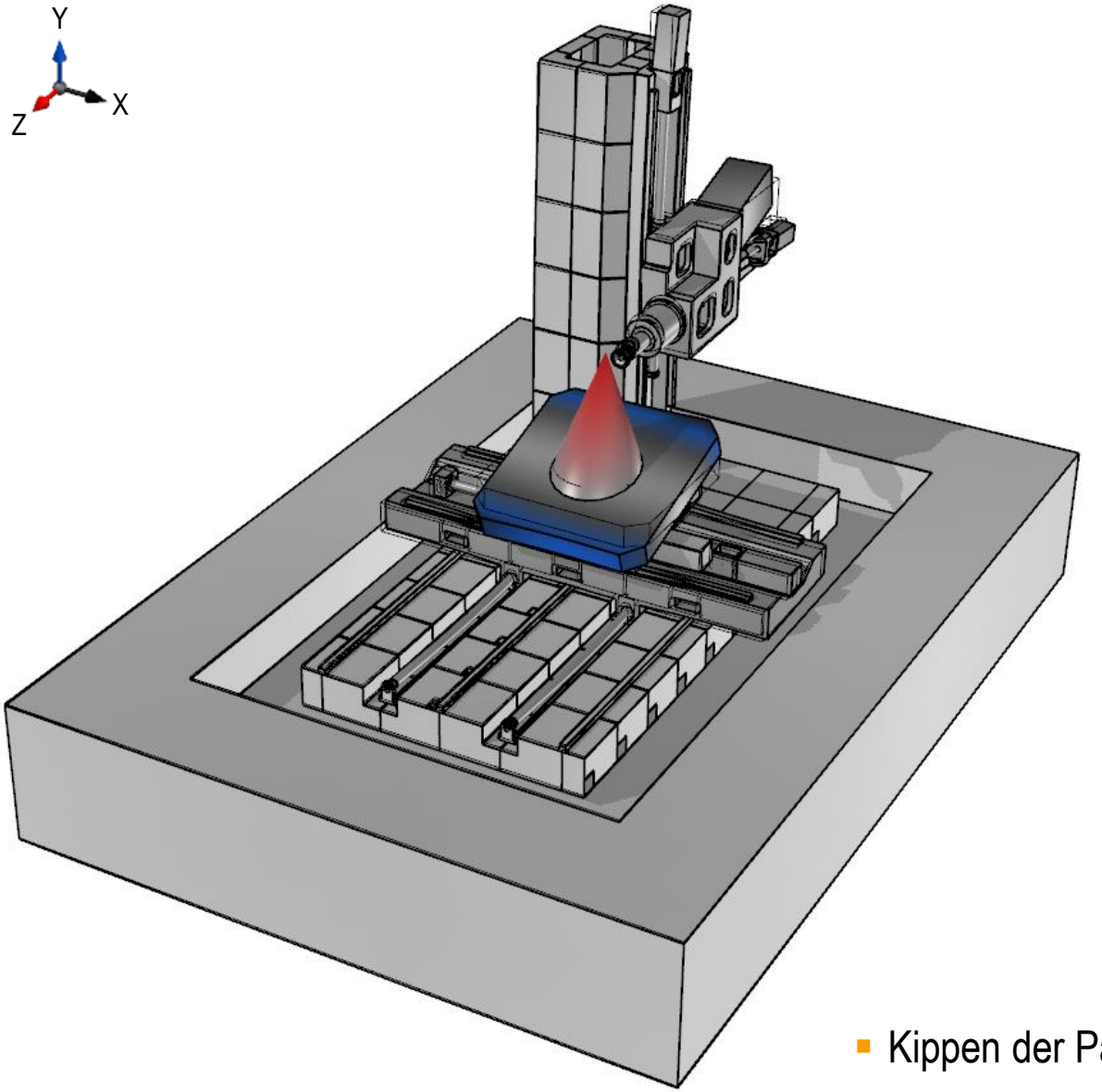
Schwingungsform bei 123 Hz



- Kippen der Palette in X-Richtung

© planlauf GmbH

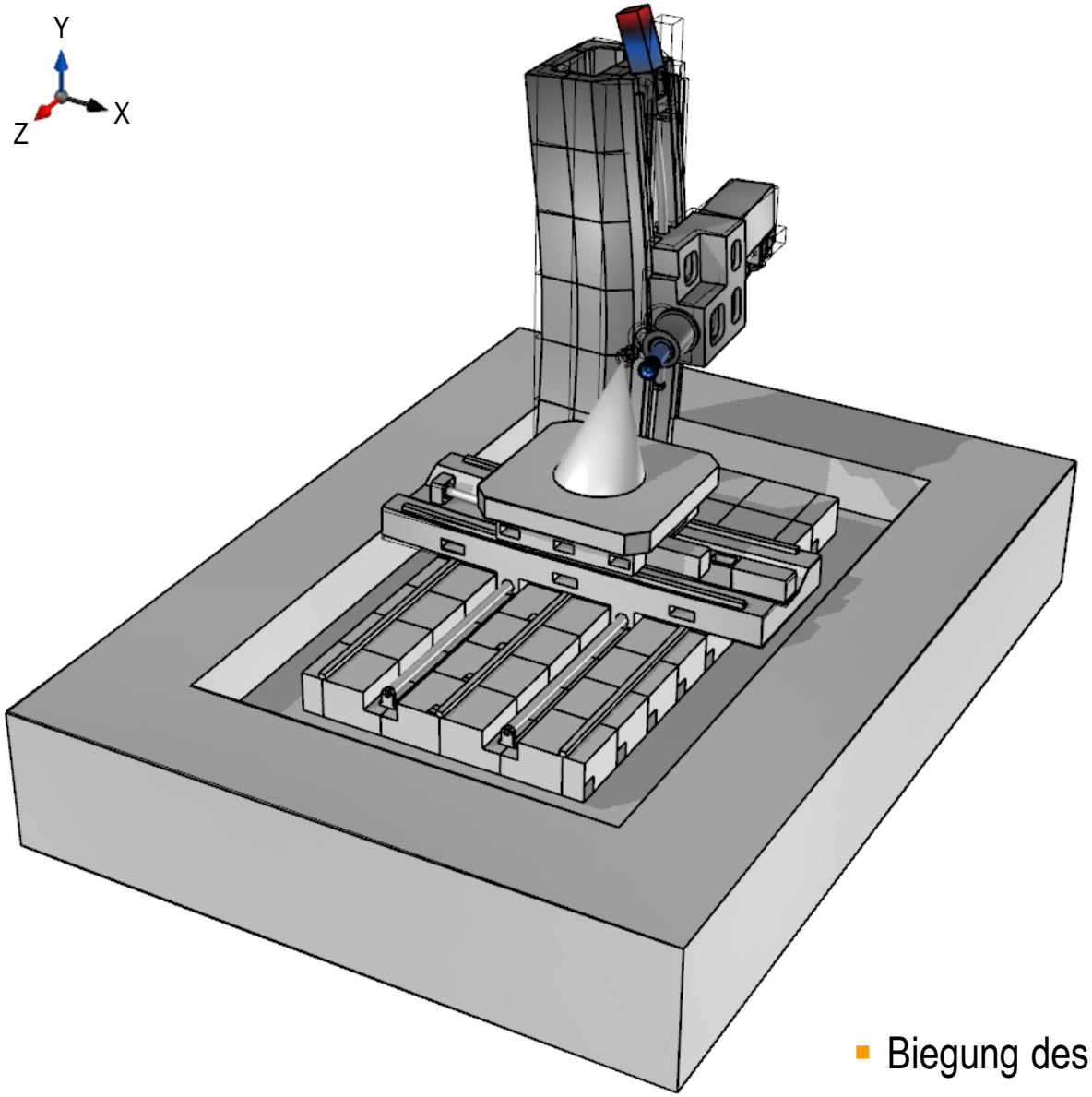
Schwingungsform bei 128 Hz



- Kippen der Palette in Z-Richtung

© planlauf GmbH

Schwingungsform bei 169 Hz



- Biegung des Ständers

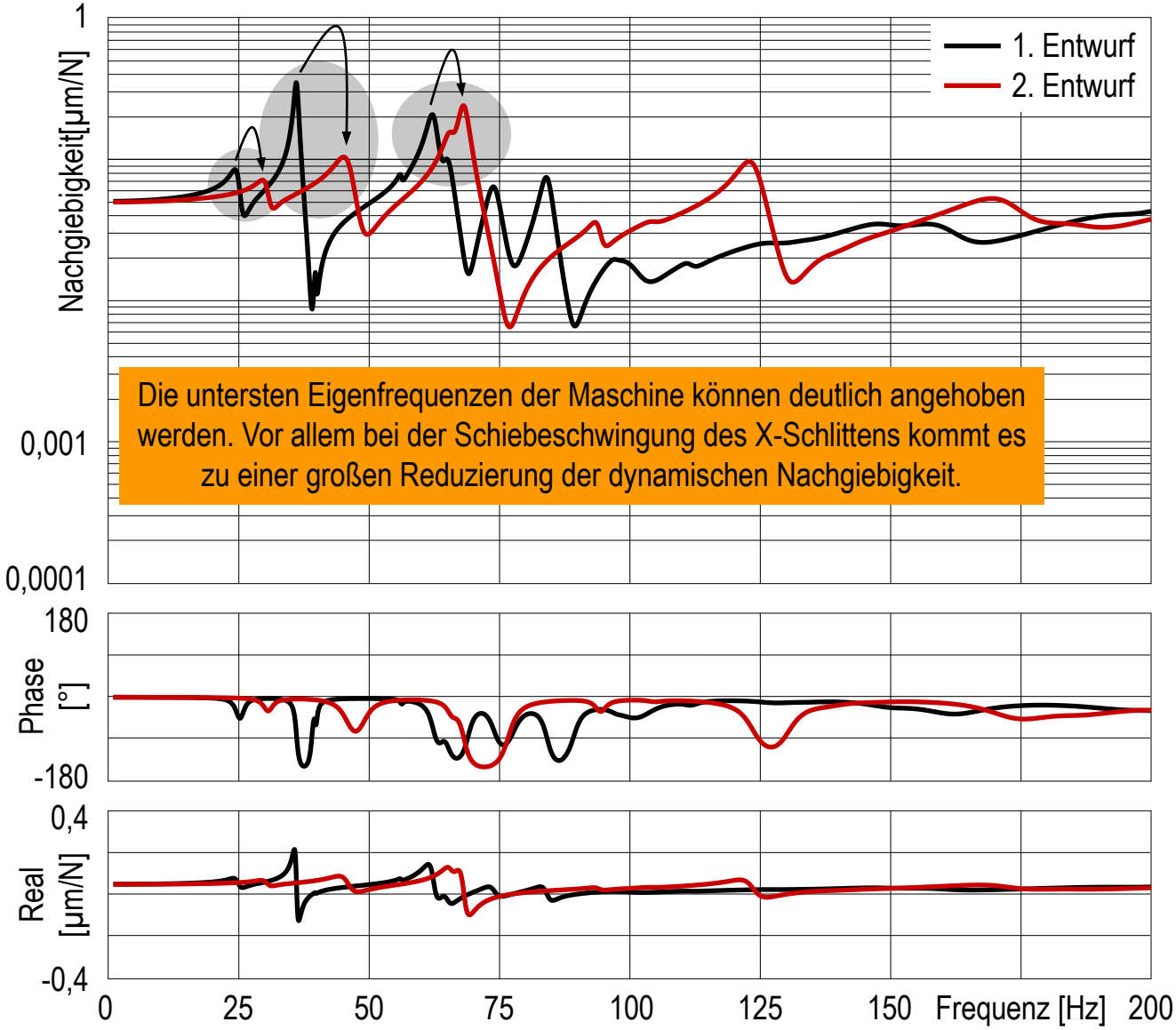
© planlauf GmbH

Gliederung

- Einleitung und Aufgabenstellung
- Statisches Verhalten
- Dynamisches Verhalten – *Gegenüberstellung zum ersten Entwurf*
- Zusammenfassung und Empfehlungen

© planlauf GmbH

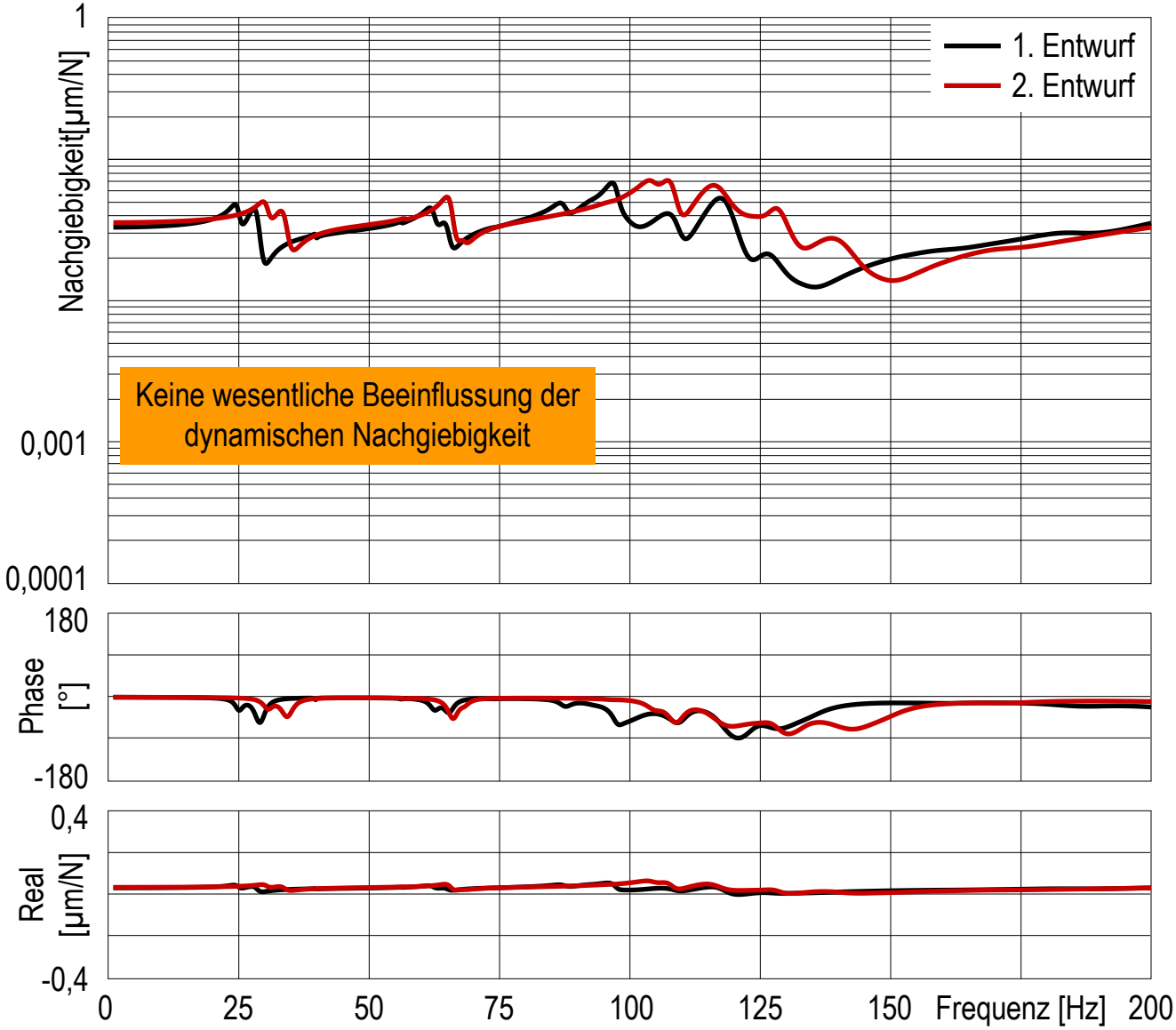
Relative Nachgiebigkeitsfrequenzgänge in X-Richtung



Die untersten Eigenfrequenzen der Maschine können deutlich angehoben werden. Vor allem bei der Schiebeschwingung des X-Schlittens kommt es zu einer großen Reduzierung der dynamischen Nachgiebigkeit.

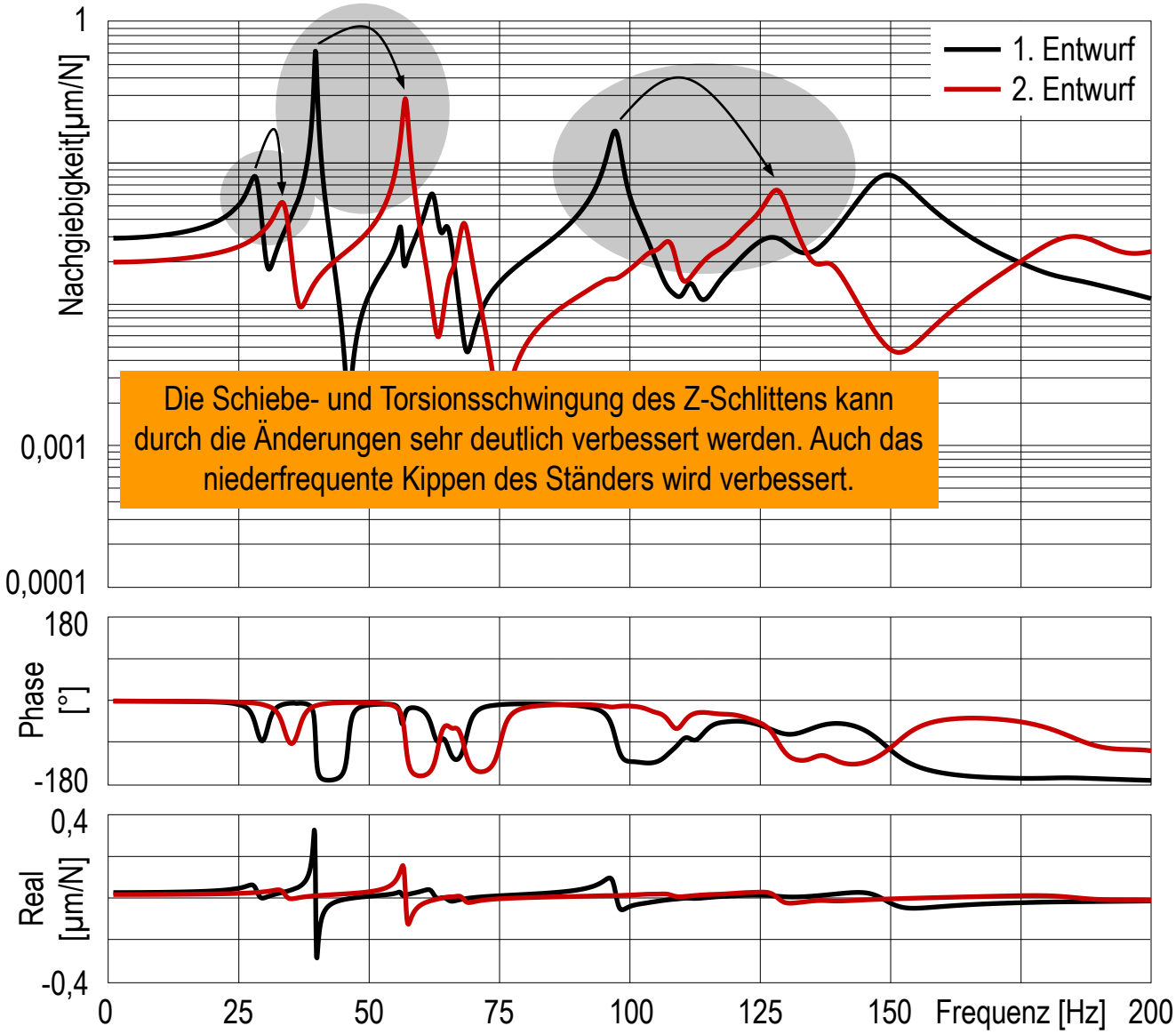
© planlauf GmbH

Relative Nachgiebigkeitsfrequenzgänge in Y-Richtung



© planlauf GmbH

Relative Nachgiebigkeitsfrequenzgänge in Z-Richtung



Die Schiebe- und Torsionsschwingung des Z-Schlittens kann durch die Änderungen sehr deutlich verbessert werden. Auch das niederfrequente Kippen des Ständers wird verbessert.

© planlauf GmbH

Gliederung

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

© planlauf GmbH

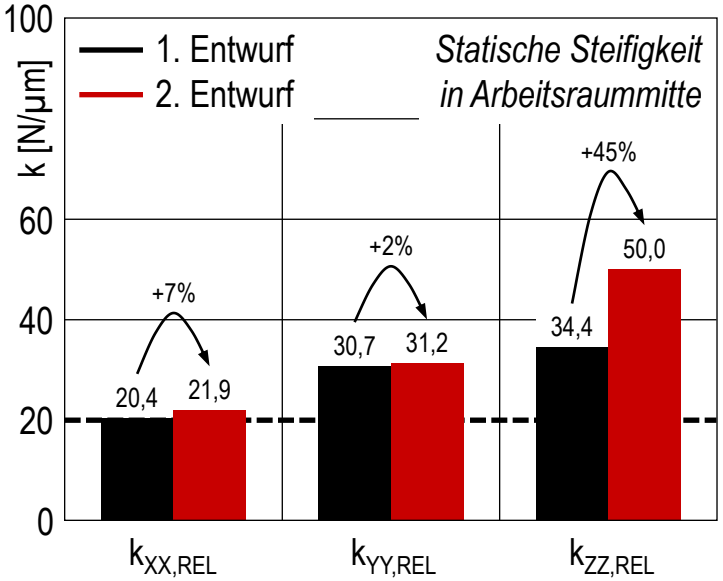
Zusammenfassung

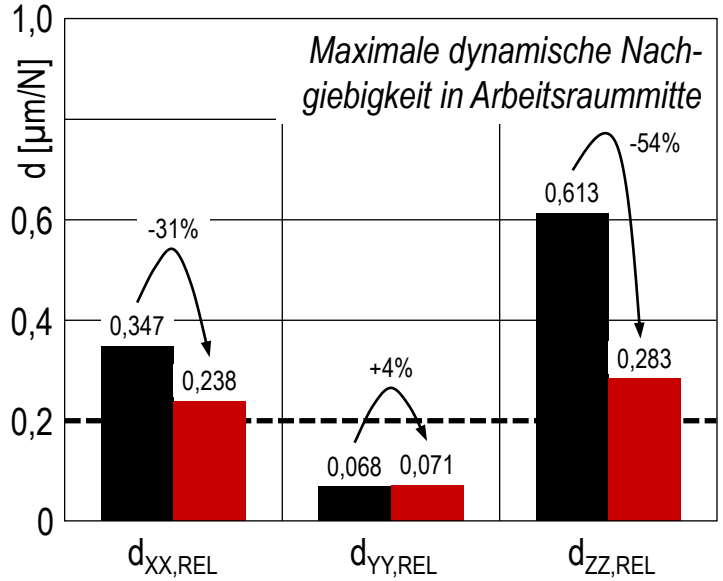
Statisches Verhalten

- Die **Zielsteifigkeit** von 20 N/µm relativ zwischen Werkzeug und Werkstück in der Arbeitsraummitte wurde bereits von dem ersten Maschinenentwurf **erreicht**.
- Die für anspruchsvolle Bohrbearbeitungen relevante Steifigkeit in Z-Richtung kann vor allem durch die uniaxiale Anordnung von Pinole und W-KGT stark angehoben werden.

Dynamisches Verhalten

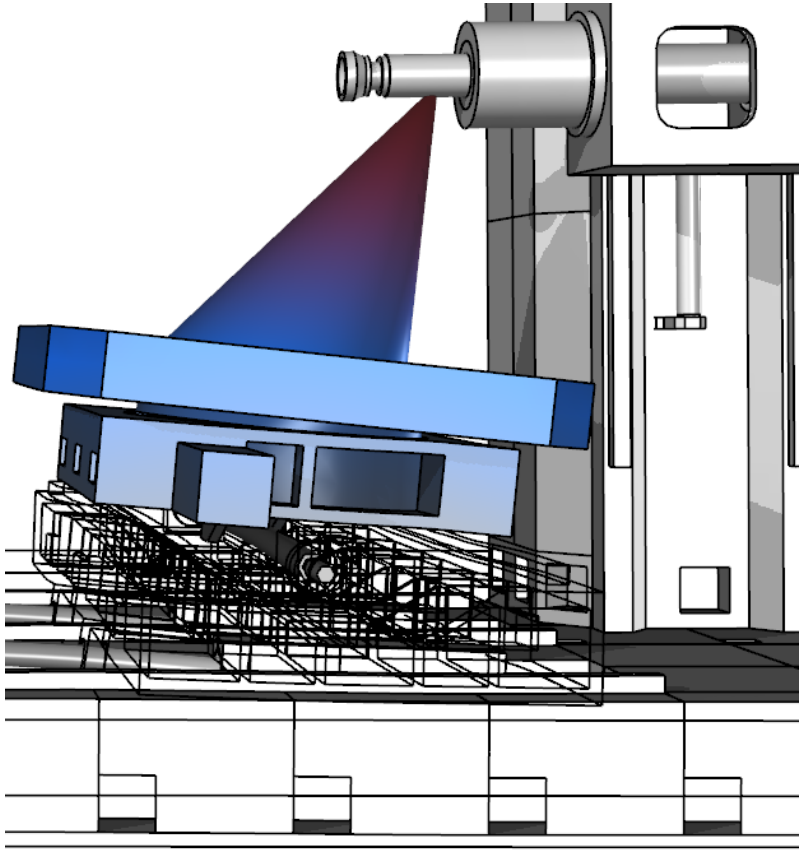
- Die **dynamischen Nachgiebigkeiten können** durch die umgesetzten Änderungen in X-Richtung um ein Drittel und in Z-Richtung um mehr als die Hälfte **reduziert werden**.
- Die geforderte maximale **dynamische Nachgiebigkeit** von 0,2 µm/N **wird in X- und Z-Richtung allerdings immer noch nicht erreicht**.
- Die verbleibenden dynamischen Schwachstellen werden auf den folgenden Seiten zusammen mit den Empfehlungen näher erläutert.





© planlauf GmbH

Empfehlungen (1/2)
Dynamische Schwachstelle bei 57 Hz



Schwingungsform

- Schieben der Werkstückseite in Z-Richtung
- Biegung und Torsion des Z-Schlittens

Ursache

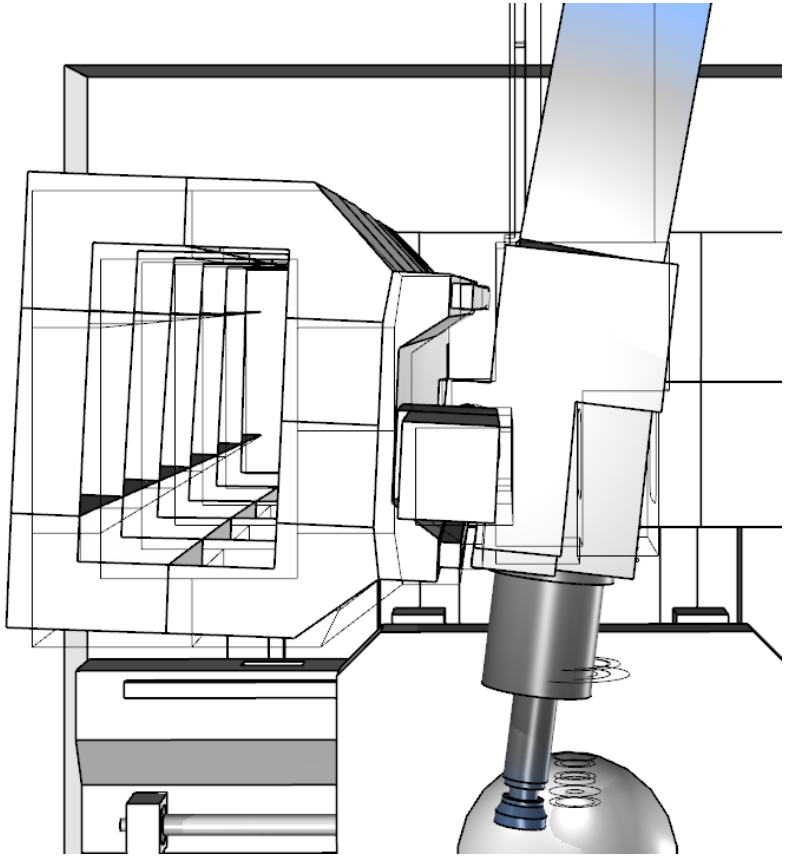
- Geringe Höhe und damit Flächenträgheitsmoment des Z-Schlittens

Empfehlung

- Vergrößerung der Höhe des Z-Schlittens
- Einsatz von zwei elektrisch verspannten Ritzel/Zahnstangen-Antrieben in der Z-Achse

© planlauf GmbH

Empfehlungen (2/2)
Dynamische Schwachstelle bei 68 Hz



Schwingungsform

- Torsion des Ständers
- Biegung und Schwingung der W-KGT-Konsole in X-Richtung

Ursache

- Geringer Abstand der Y-Führungsschienen in Z-Richtung
- Geringer Querschnitt des Ständers

Empfehlung

- Vergrößerung des Ständerquerschnitt und Vergrößerung des Y-Führungsschienenabstands in Z-Richtung
- Werkstoffwechsel für den Ständer von EN-GJL-300 zu Stahl

© planlauf GmbH