planlauf

Statisches und dynamisches Verhalten eines Bohrwerks

- Berechnung der 1. Entwurfs -

Dr.-Ing. Rouven Meidlinger

planlauf GmbH

Gliederung

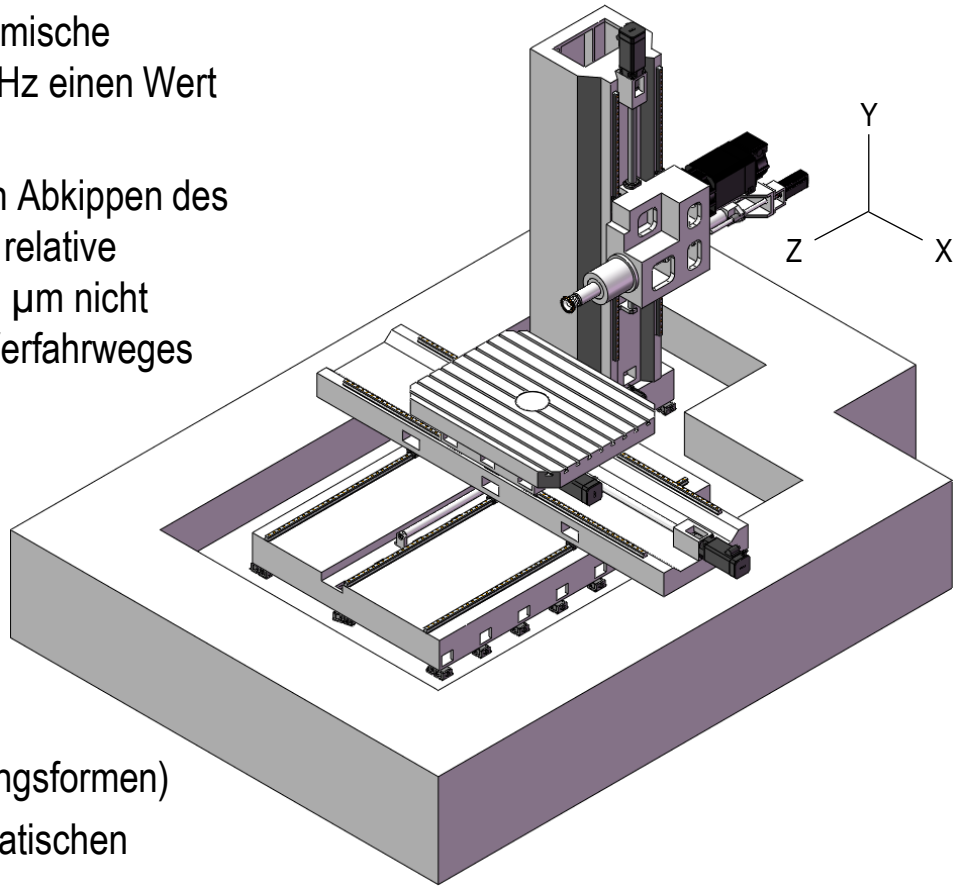
- Einleitung und Aufgabenstellung
- Statisches Verhalten
- Dynamisches Verhalten
- Zusammenfassung und Empfehlungen

© 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.
- Durch die Tischbauweise ist bei voller Tischbeladung ein Abkippen des X-Schlittens in den äußeren X-Position zu erwarten. Die relative Verlagerung zwischen Werkzeug und Werkstück darf 10 µm nicht überschreiten. Eventuell ist eine Einschränkung des X-Verfahrweges und eine Verkleinerung der Palette erforderlich.

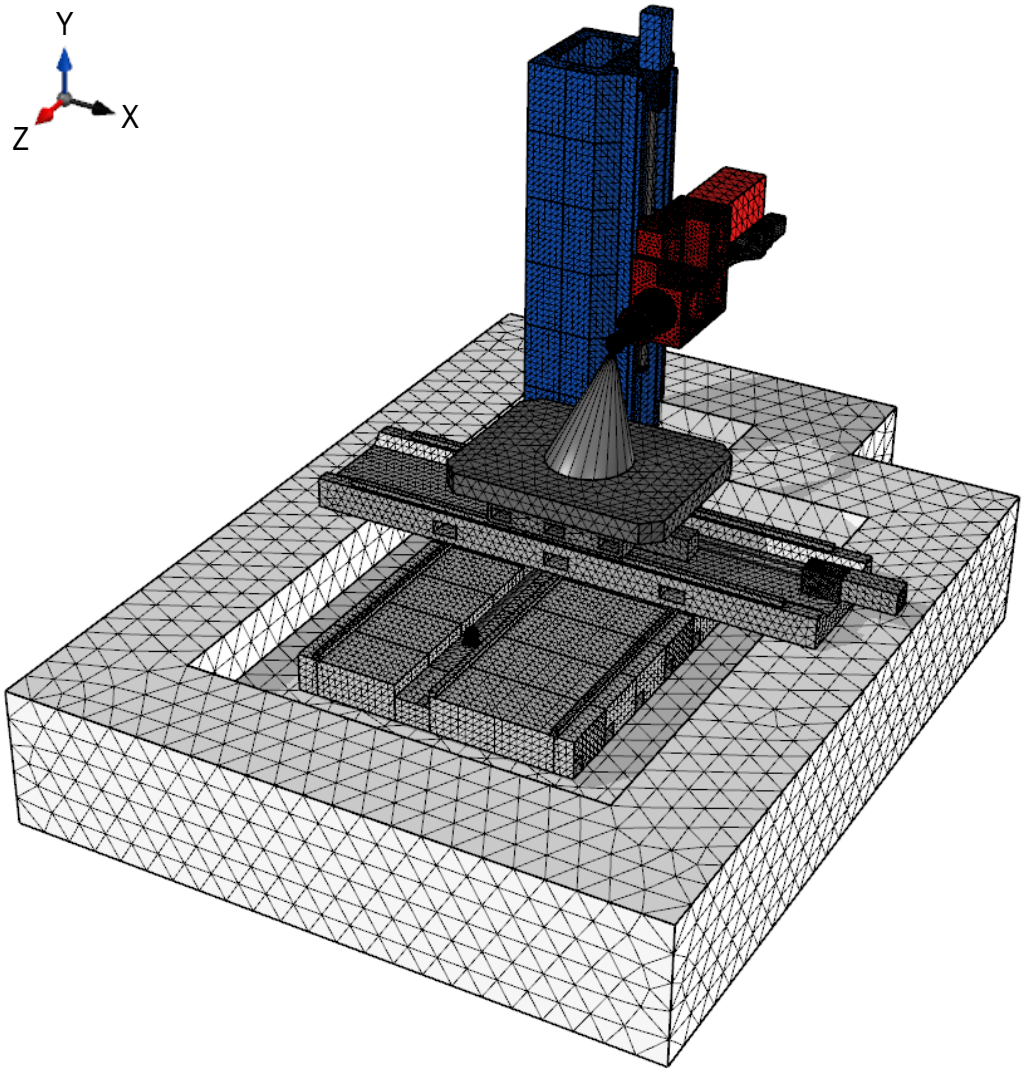


Aufgabenstellung

- Statisches Verhalten inkl. Schwachstellenanalyse
- Verformung unter Wanderlast der X-Achse
- Dynamisches Verhalten (Frequenzgänge und Schwingungsformen)
- Erarbeitung von Empfehlungen zur Verbesserung des statischen und dynamischen Verhaltens

© 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: ∅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 (1.600 x 1.250 mm²): EN-GJL-250
  - Bett, Ständer, Z-Schlitten, X-Schlitten: EN-GJL-300
  - Y-Schlitten: EN-GJS-400
  - alle anderen Bauteile: Stahl
- Verankerte Aufstellung mit 27 Fixatoren BWF RK II

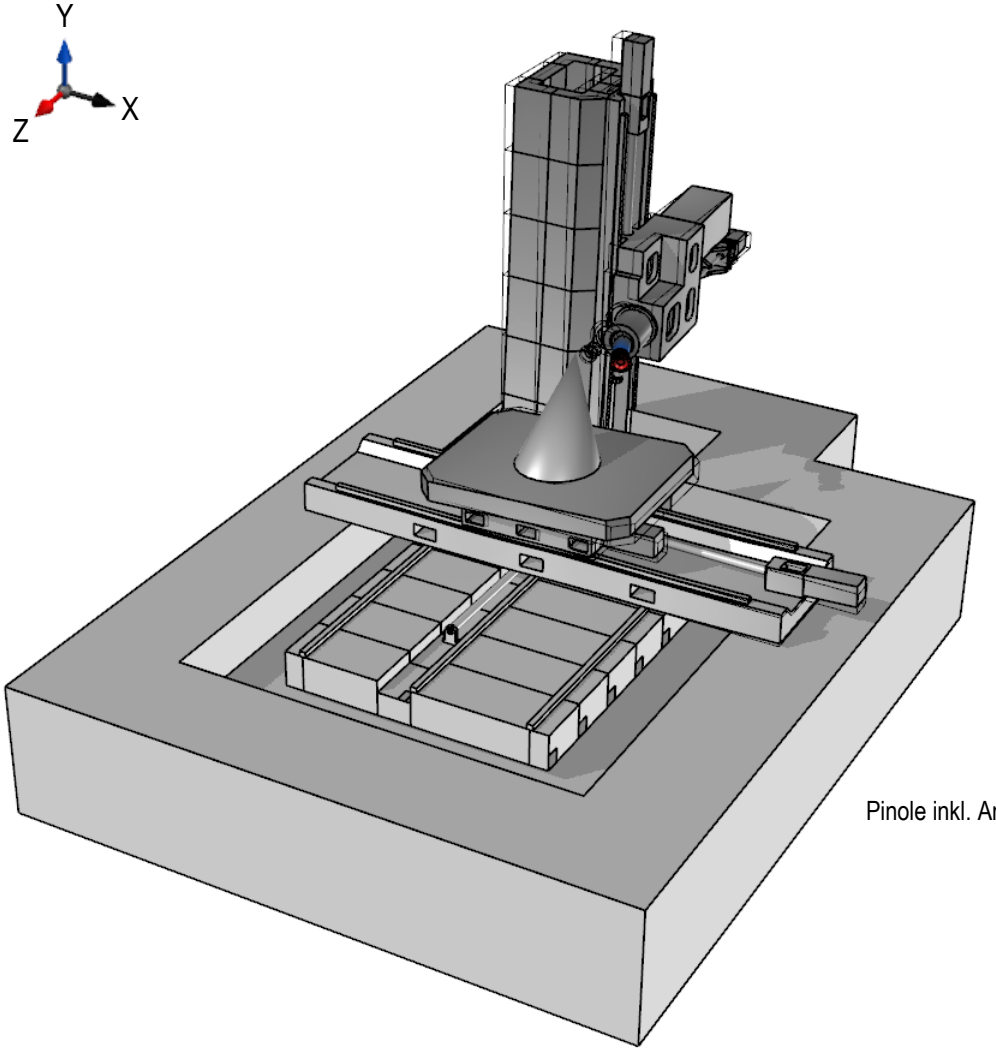
© planlauf GmbH

Gliederung

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

© planlauf GmbH

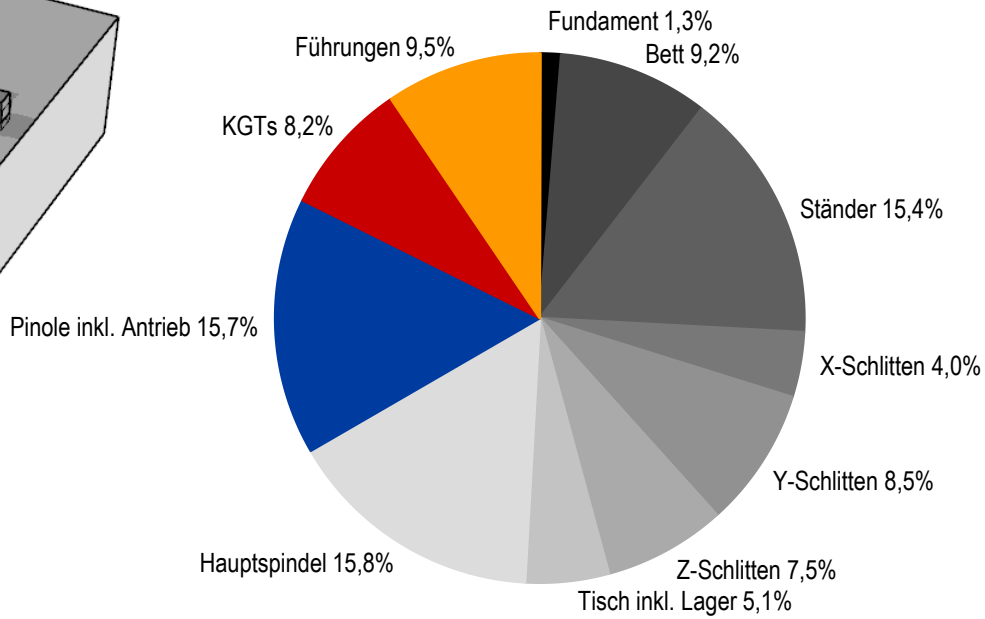
Statische Belastung in X-Richtung (X0 Y0 Z0 W0, Mitte)



Statische Steifigkeit in X-Richtung
$k_{XX,REL}$ = 20,4 N/µm

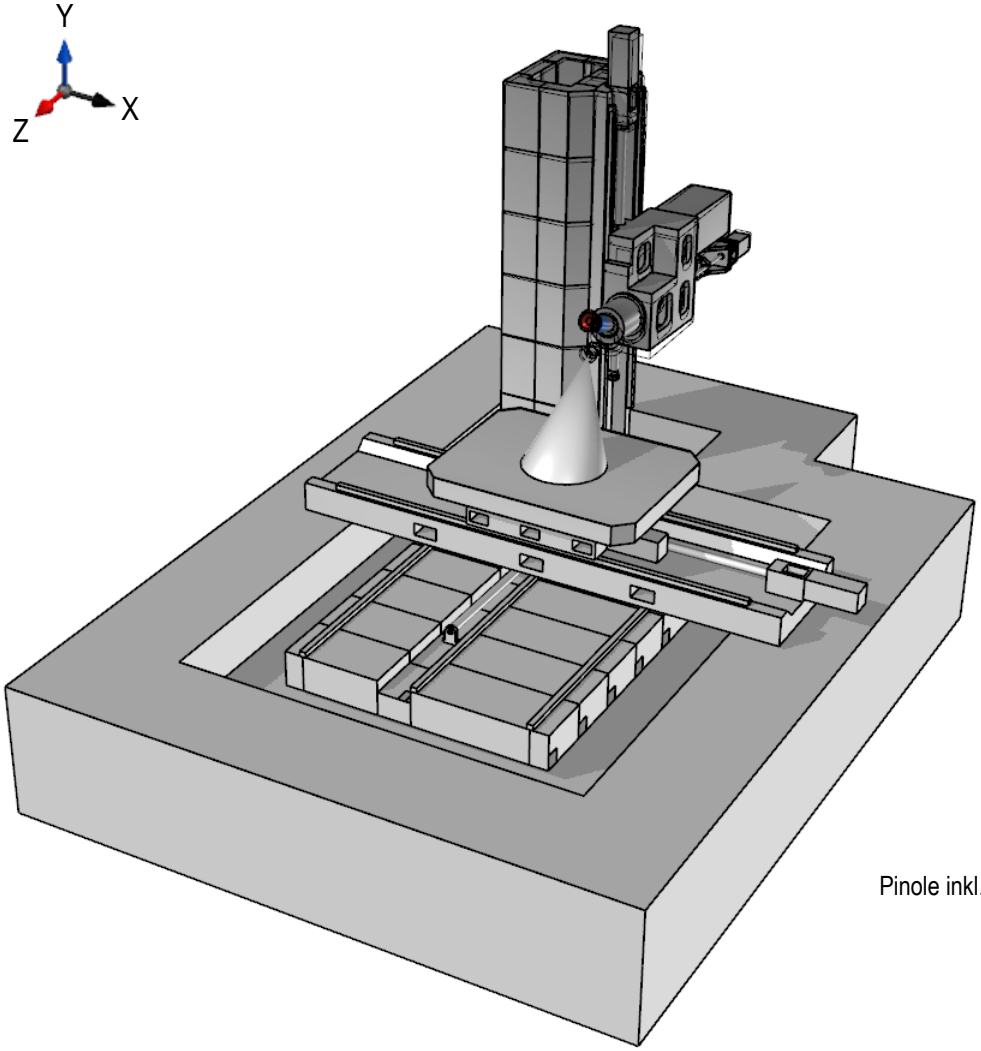
$k_{XX,WZG}$ = 27,5 N/µm
$k_{XX,WST}$ = 79,5 N/µm

Anteile der einzelnen Komponenten an der Gesamtverformung



© planlauf GmbH

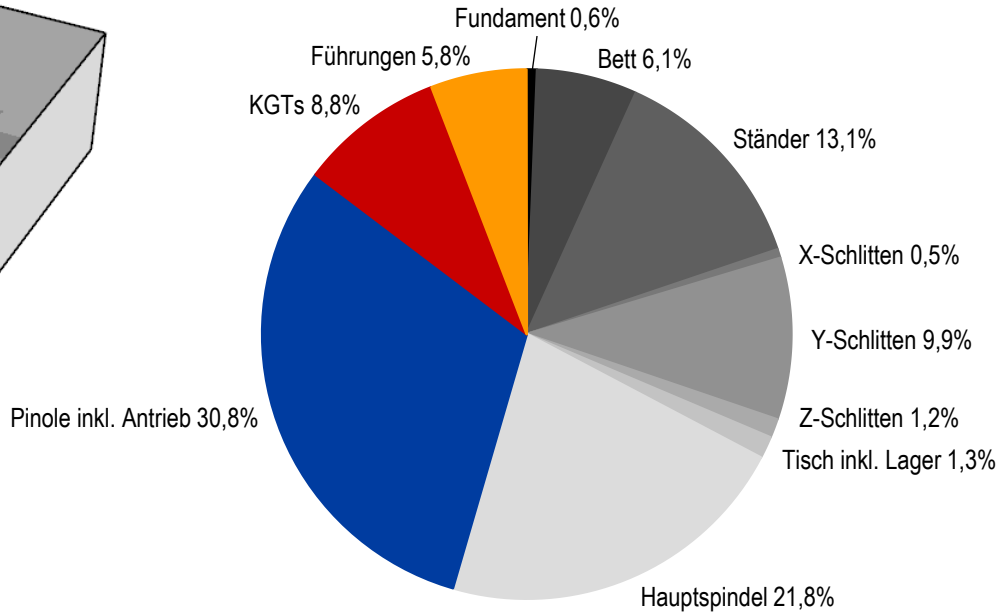
Statische Belastung in Y-Richtung (X0 Y0 Z0 W0, Mitte)



Statische Steifigkeit in Y-Richtung
$k_{YY,REL}$ = 30,7 N/µm

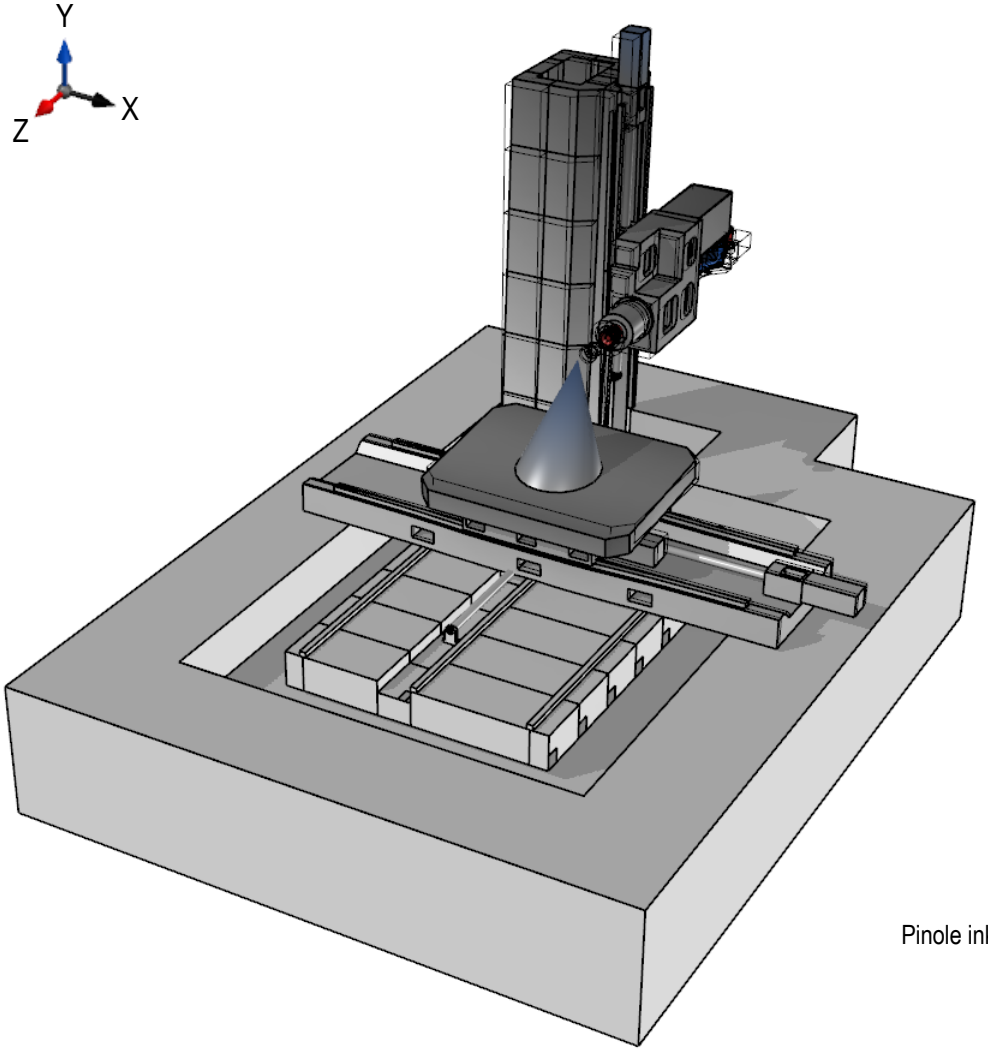
$k_{YY,WZG}$ = 32,0 N/µm
$k_{YY,WST}$ = 738,6 N/µm

Anteile der einzelnen Komponenten an der Gesamtverformung



© planlauf GmbH

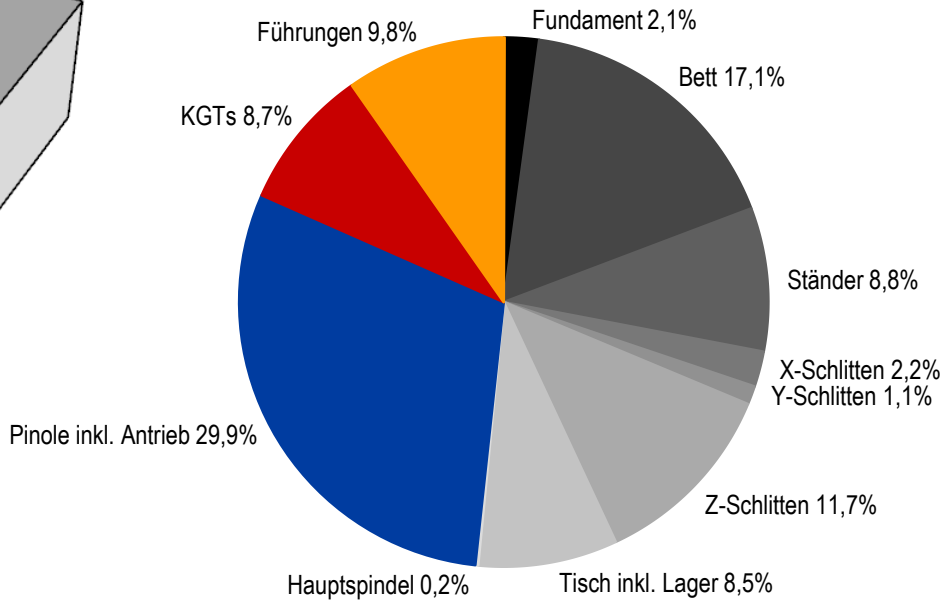
Statische Belastung in Z-Richtung (X0 Y0 Z0 W0, Mitte)



Statische Steifigkeit in Z-Richtung
$k_{ZZ,REL}$ = 34,4 N/µm

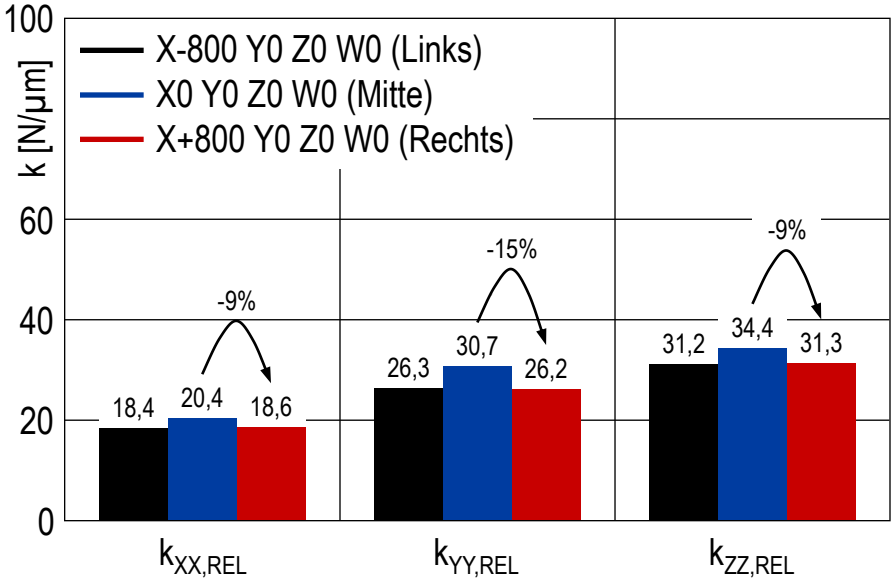
$k_{ZZ,WZG}$ = 55,9 N/µm
$k_{ZZ,WST}$ = 89,6 N/µm

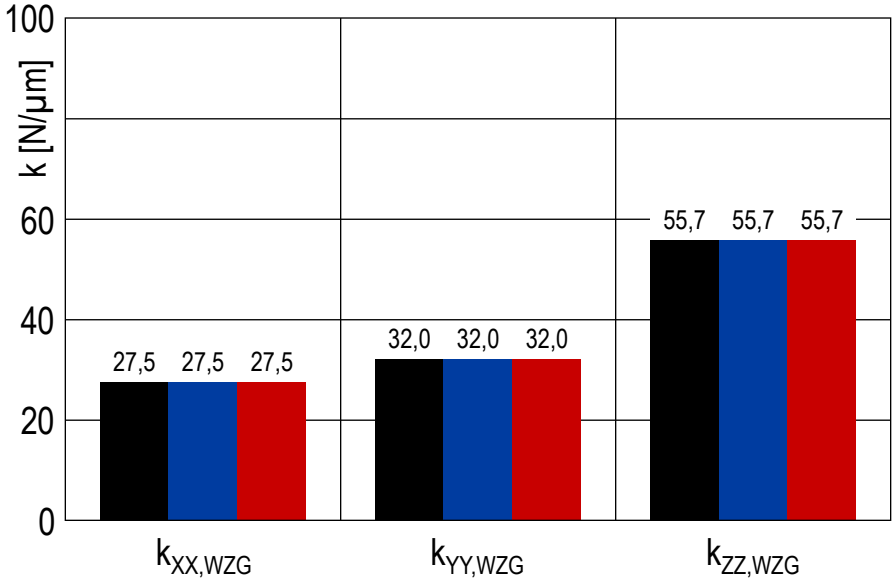
Anteile der einzelnen Komponenten an der Gesamtverformung

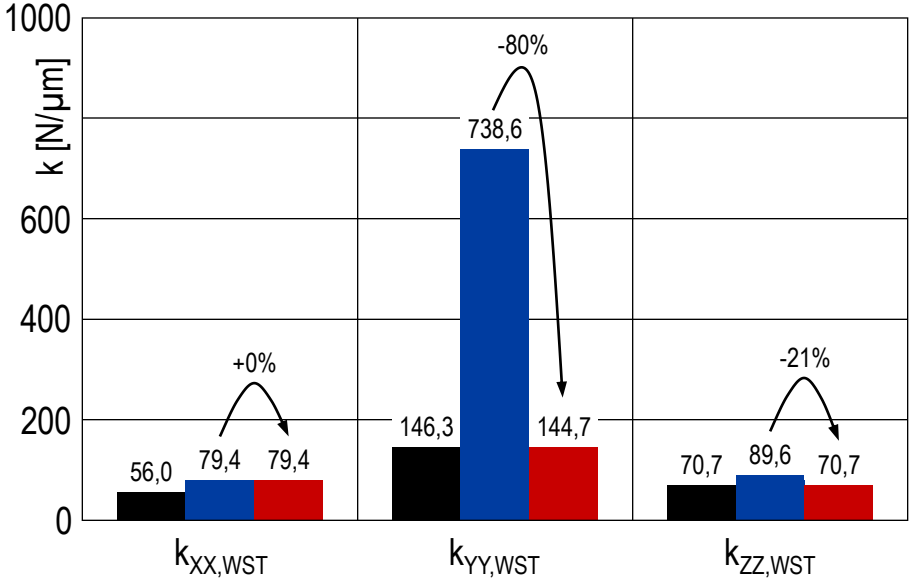


© planlauf GmbH

Gegenüberstellung der statischen Steifigkeiten in Abhängigkeit der X-Position (Tisch)



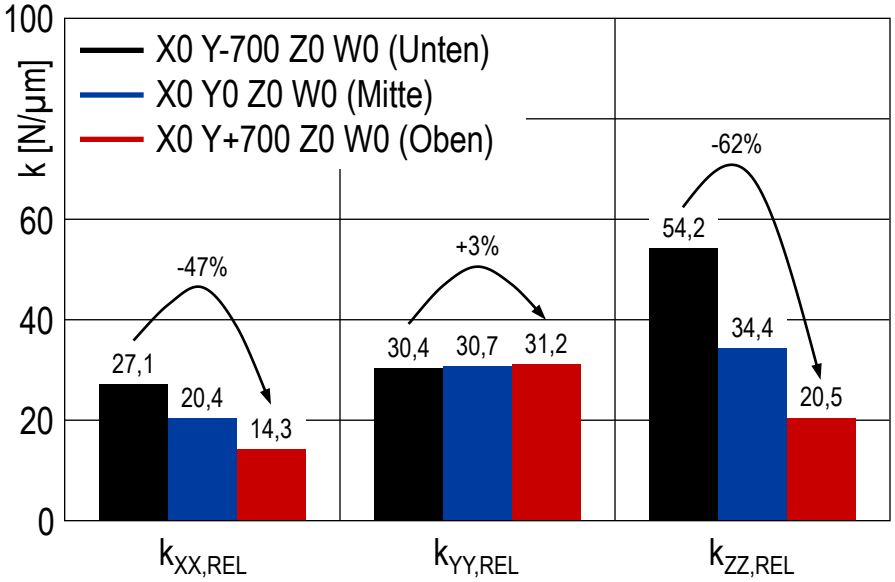


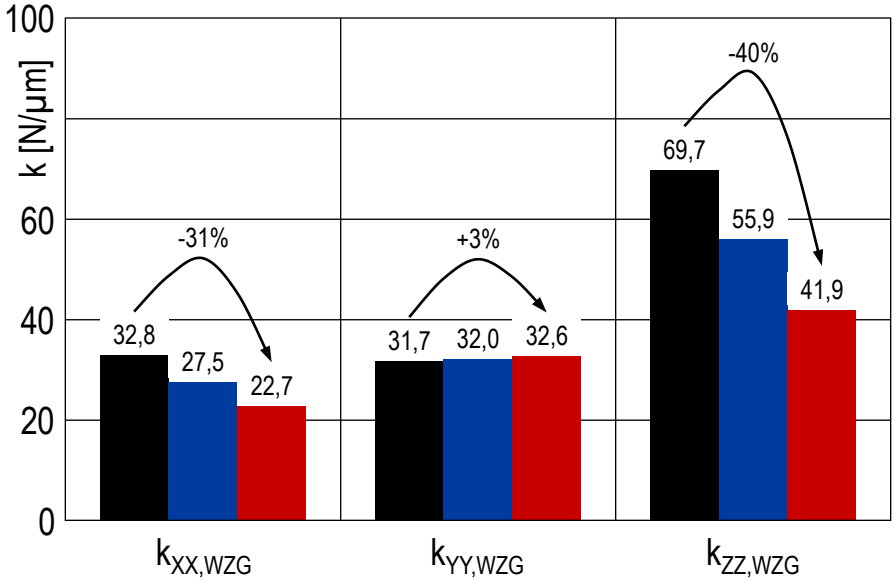


- Die werkstückseitige Steifigkeit in X-Richtung fällt mit zunehmenden Abstand des X-Schlittens vom X-KGT-Festlager ab. In der linken Position liegt der Wert um 30% niedriger im Vergleich zur Arbeitsraummitte.
- Da die relativen Steifigkeiten von der Werkzeugseite dominiert werden, ist die Abhängigkeit von der X-Position mit einem Unterschied von 15% vergleichsweise gering.
- **Die relative Zielsteifigkeit von 20 N/µm in Arbeitsraummitte wird in allen Richtungen erreicht.**

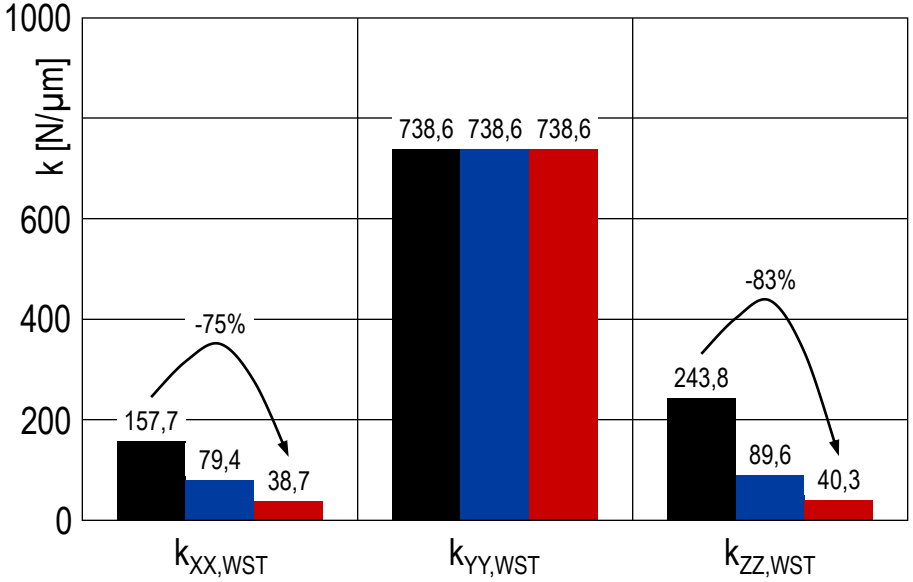
© planlauf GmbH

Gegenüberstellung der statischen Steifigkeiten in Abhängigkeit der Y-Position (Spindelkasten)



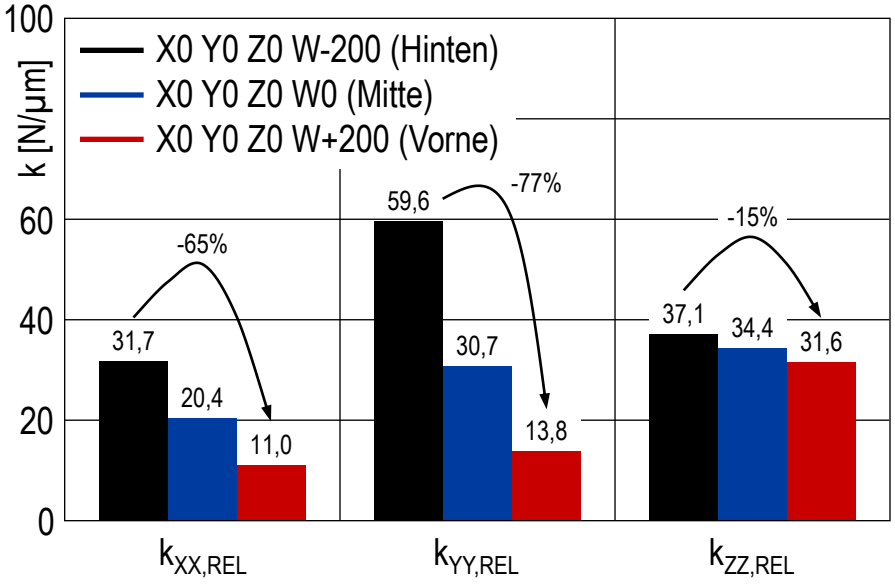


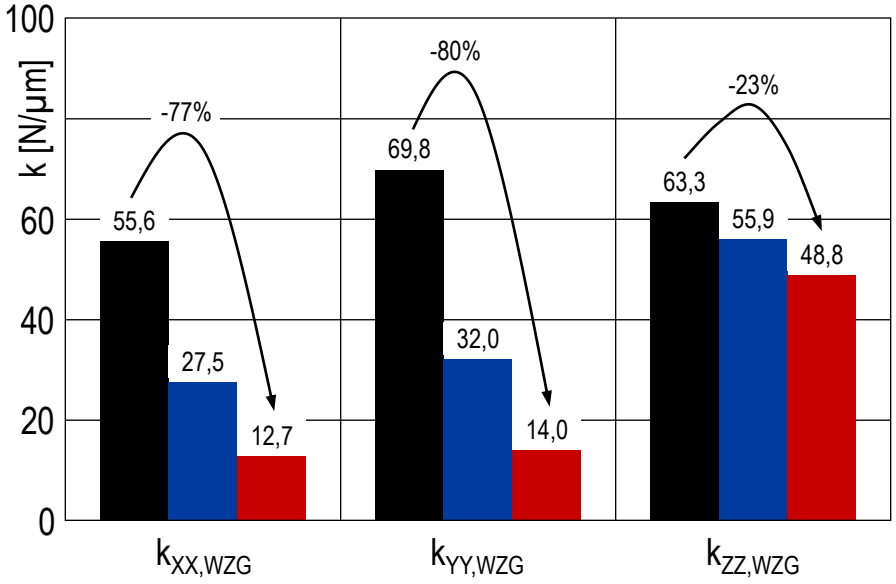
- Die werkzeugseitigen Steifigkeiten fallen in X-Richtung mit zunehmender Y-Position ab. In der obereren Position liegt der Steifigkeitswert um 31% unter dem Wert in der unteren Position.
- Die werkstückseitigen Steifigkeiten sinken aufgrund der begrenzten Steifigkeit des Tischlagers mit zunehmender Höhe des Kraftangriffs stark ab (X-Richtung: -75%, Z-Richtung: -83%).
- Bereits leicht oberhalb der Arbeitsraummitte wird die Zielsteifigkeit von 20 N/µm in X-Richtung unterschritten.

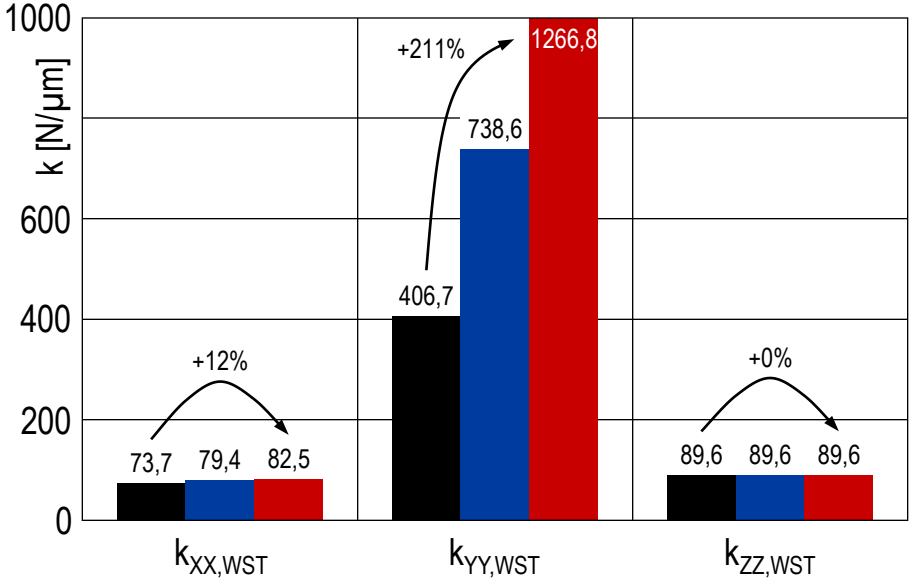


© planlauf GmbH

Gegenüberstellung der statischen Steifigkeiten in Abhängigkeit der W-Position (Pinole)







- Mit zunehmender Auskragung der Pinole sinken die werkzeugseitigen Steifigkeiten aufgrund der Biegung der Pinole sowie des größeren Hebelarms zur Lagerung der Hauptspindel sehr stark ab.
- In der voll ausgefahrenen W-Position liegt die werkzeugseitige Steifigkeit nur noch bei 13 N/µm. Zusammen mit der Nachgiebigkeit der Werkstückseite ergibt sich eine relative Steifigkeit von 11 N/µm.

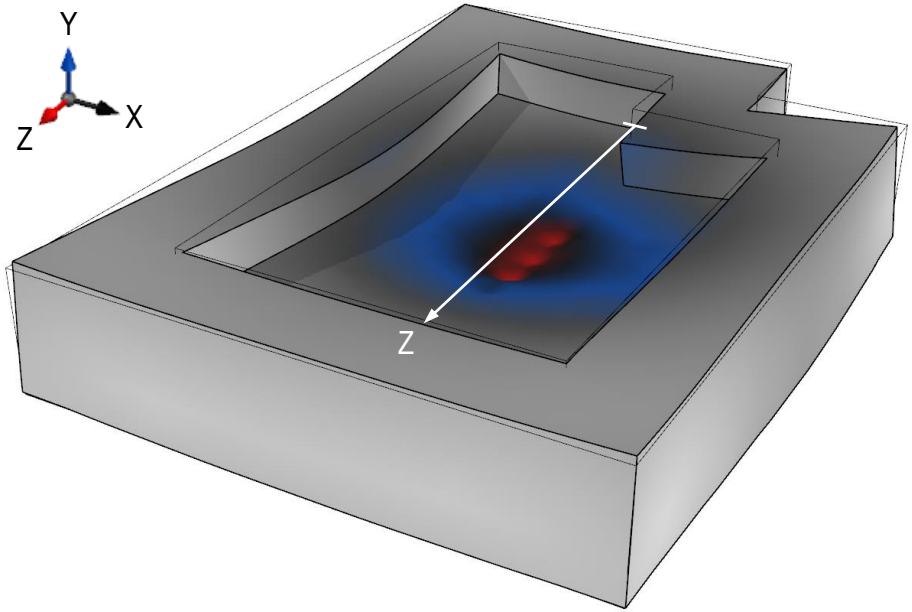
© planlauf GmbH

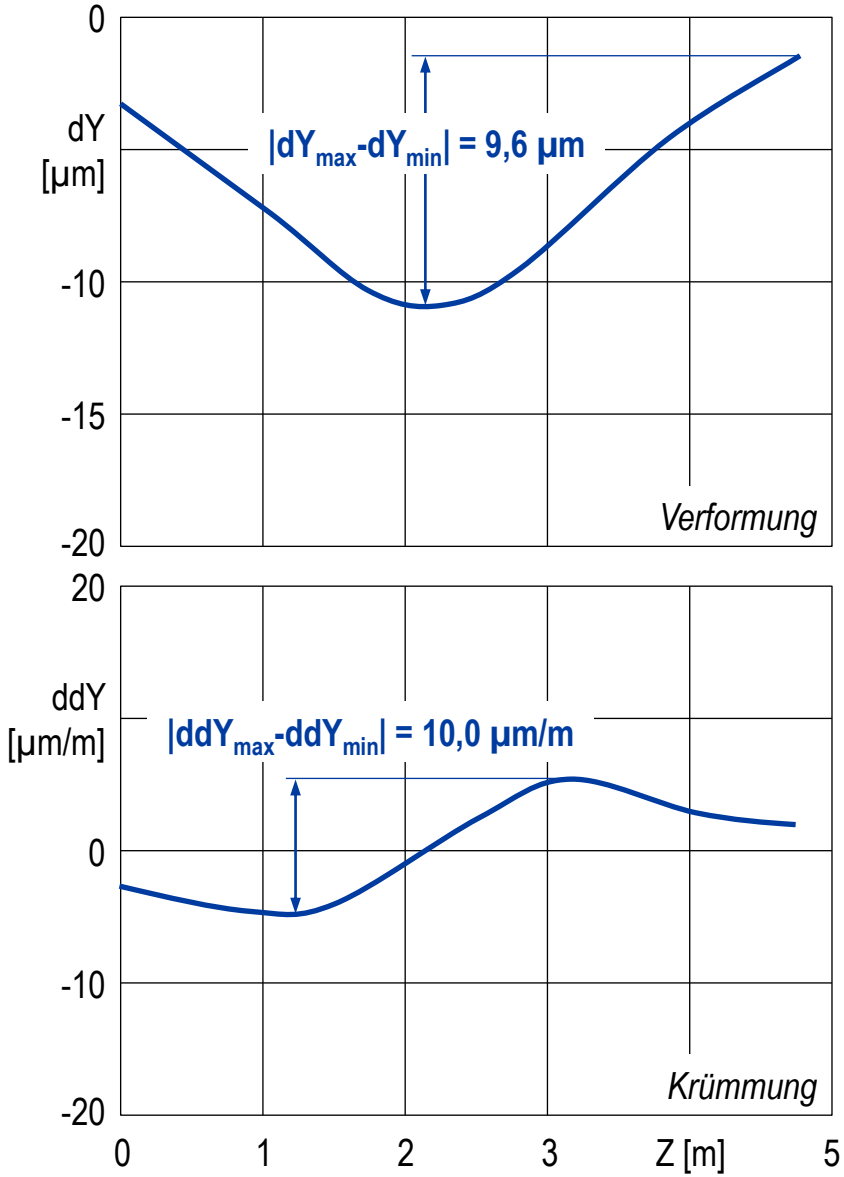
Gliederung

- Einleitung und Aufgabenstellung
- Statisches Verhalten – *Vorauslegung des Fundaments*
- Dynamisches Verhalten
- Zusammenfassung und Empfehlungen

© planlauf GmbH

Verformung und Krümmung des Fundaments unter der Gewichtsbelastung der Werkstückeinheit (Werkstück 5.000 kg)





- Großwerkzeugmaschinen wie das hier betrachtete Bohrwerk benötigen in der Regel ein entsprechend dimensioniertes Fundament. Als Auslegungskriterium wird in der Regel die Krümmung des Fundament unter Belastung (Eigengewicht sowie Beschleunigungs- und Zerspankräfte) herangezogen.
- Da zum aktuellen Zeitpunkt keine Angaben zum Baugrund am Aufstellort vorliegen, wird das Fundament für die Berechnungen auf Basis des Fundamentoberseitenplans so dimensioniert, dass die **Grenze der maximalen Krümmung von 10 µm/m** eingehalten wird.

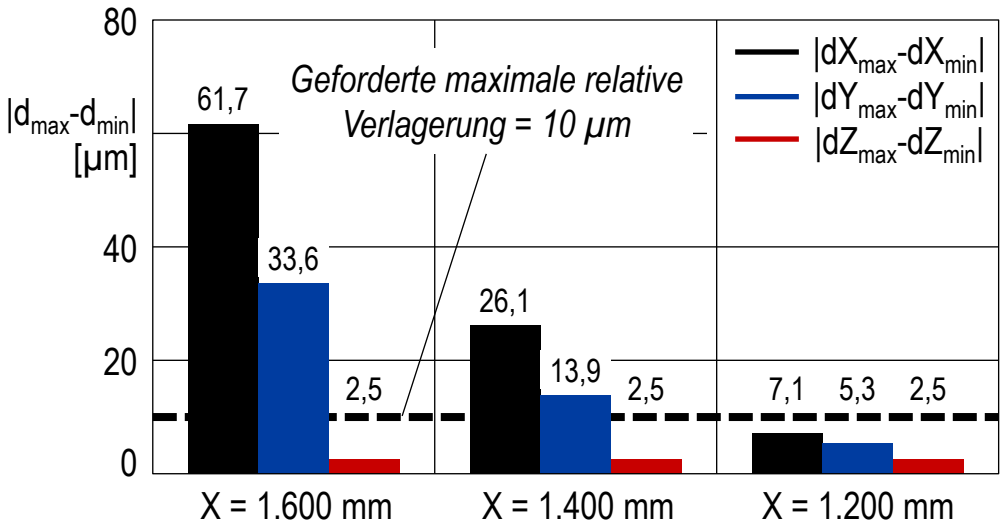
© planlauf GmbH

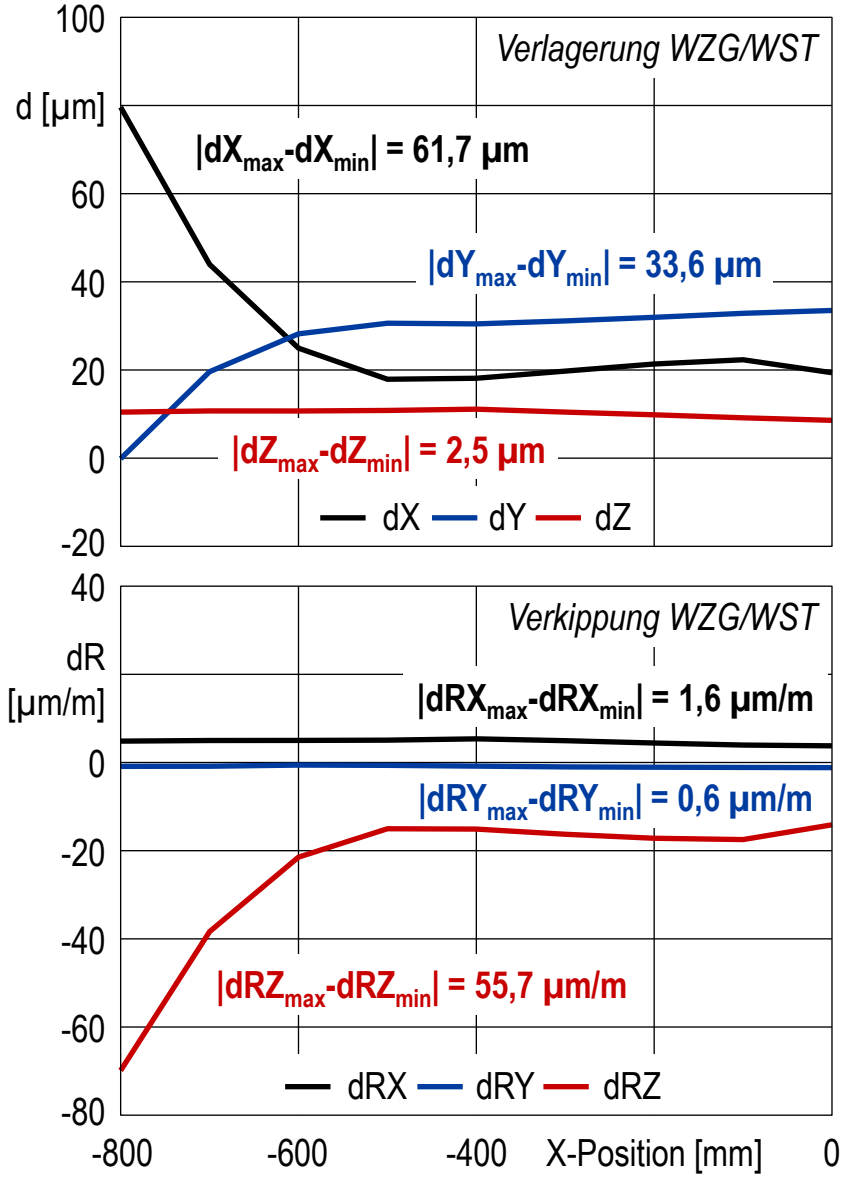
Gliederung

- Einleitung und Aufgabenstellung
- Statisches Verhalten – *Wanderlast der X-Achse*
- Dynamisches Verhalten
- Zusammenfassung und Empfehlungen

© planlauf GmbH

Relative Verlagerungen und Verkippungen zwischen Werkzeug und Werkstück unter der Wanderlast der X-Achse (Werkstück 5.000 kg)

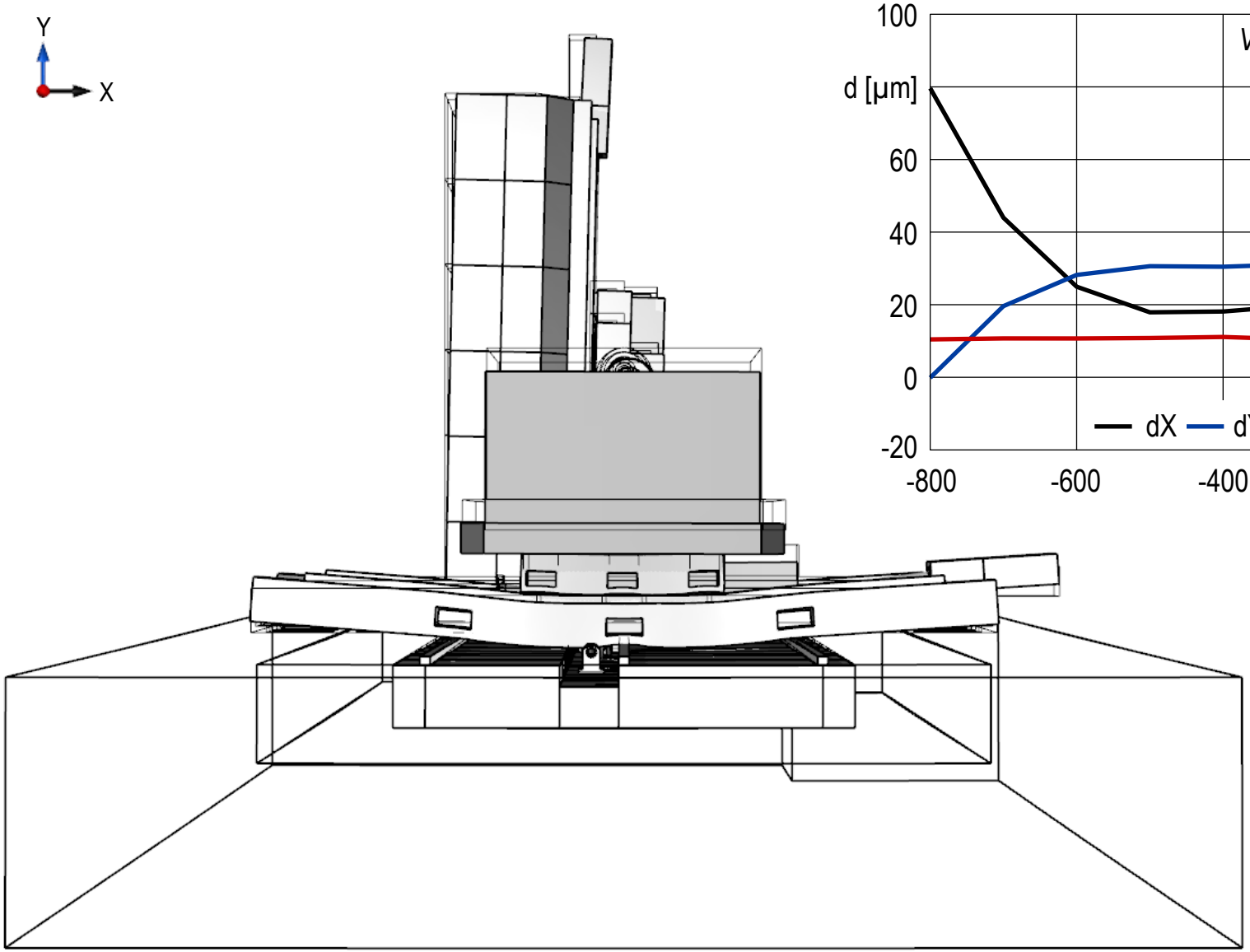


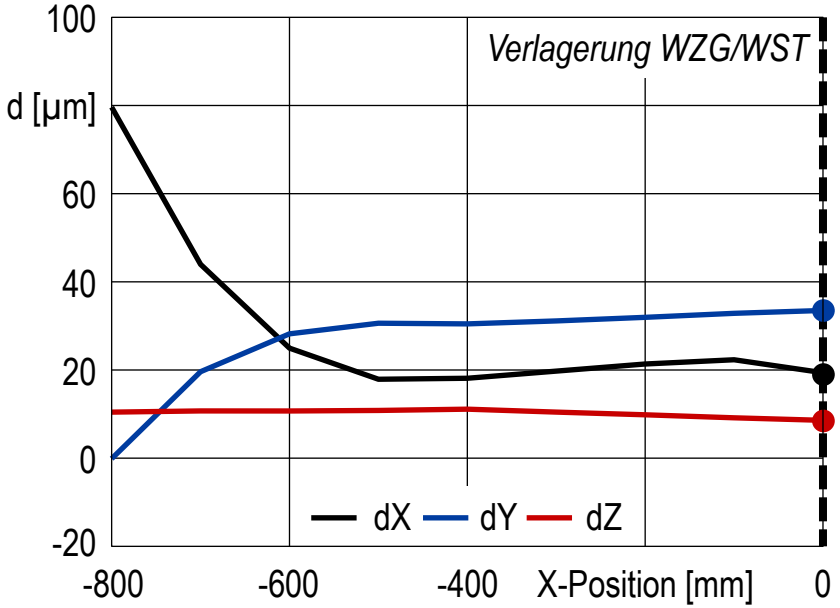


- Die Ausnutzung des vollen Verfahrwegs von X = 1.600 mm führt zu einem starken Abkippen des X-Schlittens. In der äußeren Position (X = -800 mm) liegt die relative Verlagerung zwischen Werkzeug und Werkstück bei mehr als 60 µm in X- und mehr als 30 µm in Y-Richtung.
- Die geforderte maximale relative Verlagerung von 10 µm wird bei einem reduzierten **Verfahrweg von X = 1.250 mm** erreicht, so dass eine **Reduzierung der Palettengröße** von 1.600 x 1.250 mm² auf 1.250 x 1.250 mm² sinnvoll erscheint.
- Alternativ könnte natürlich auch das Bett um ca. 400 mm verbreitert werden.

© planlauf GmbH

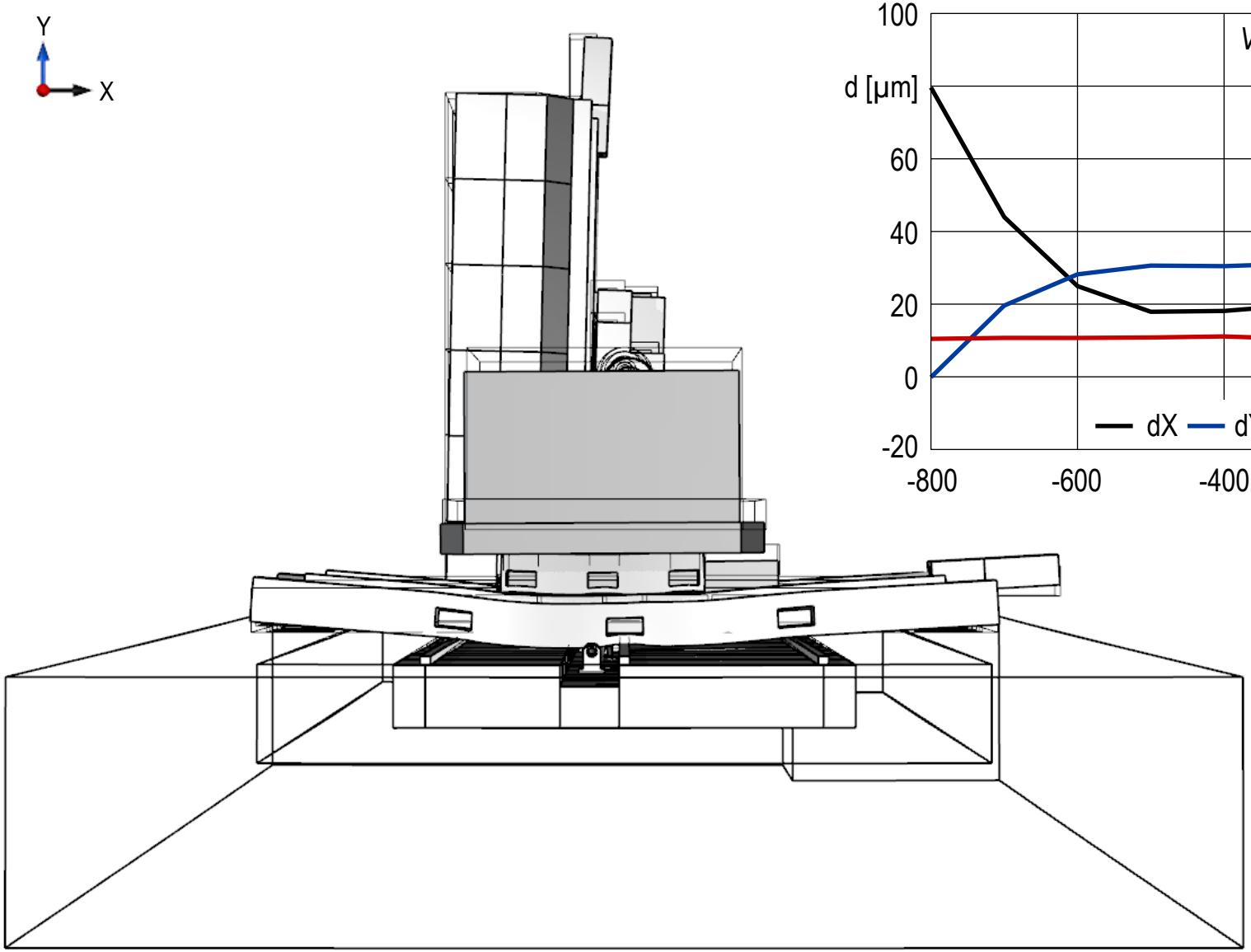
Wanderlast der X-Achse
Position X = 0 mm

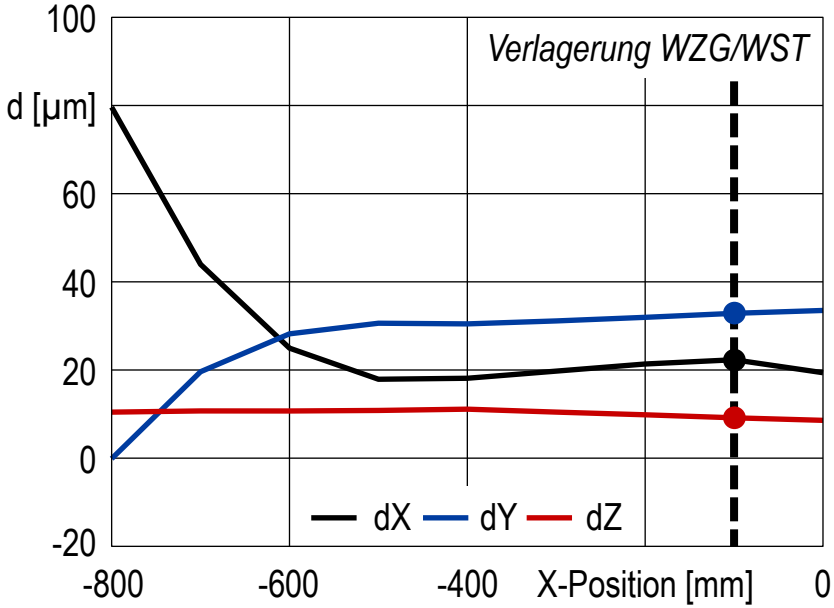




© planlauf GmbH

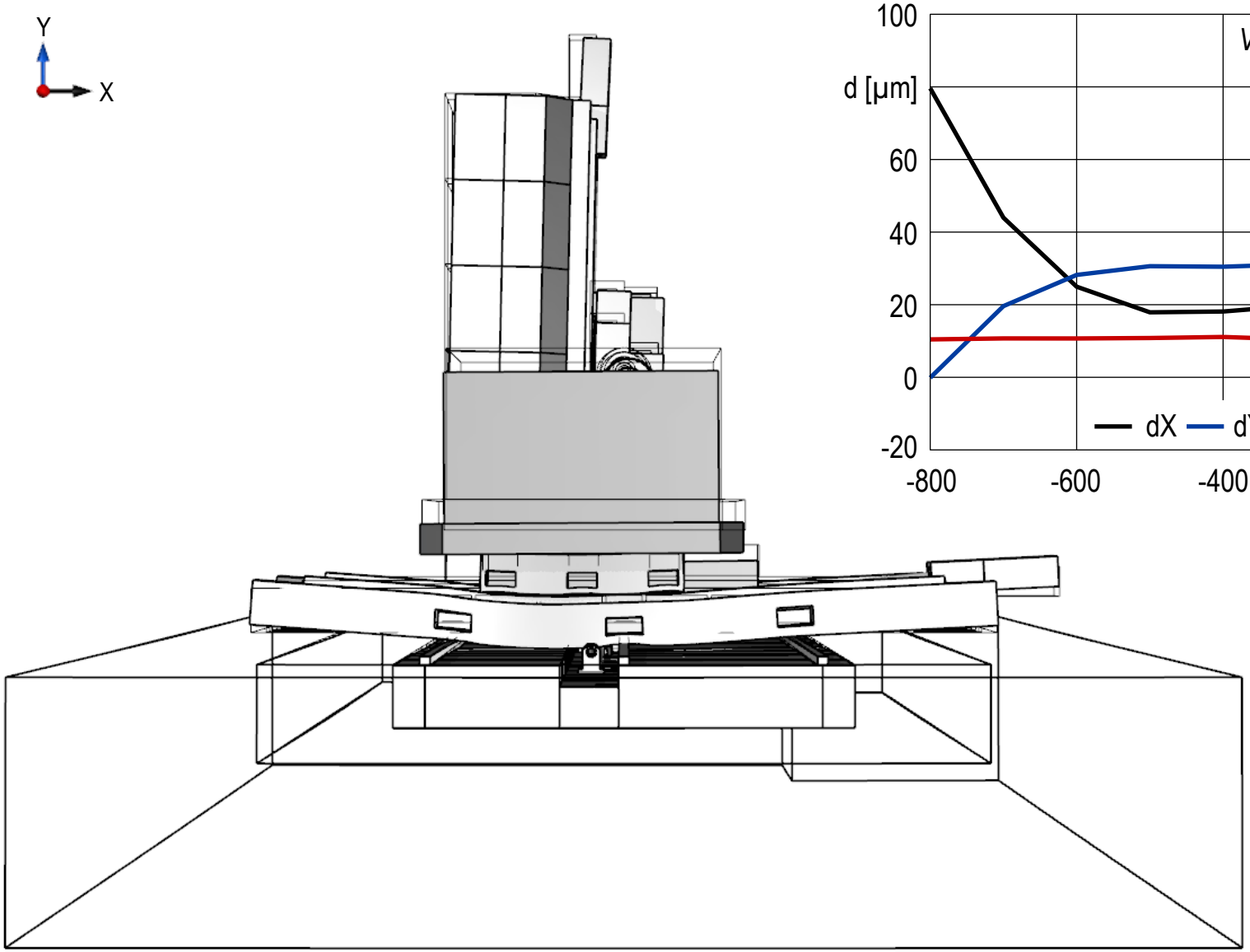
Wanderlast der X-Achse
Position X = -100 mm

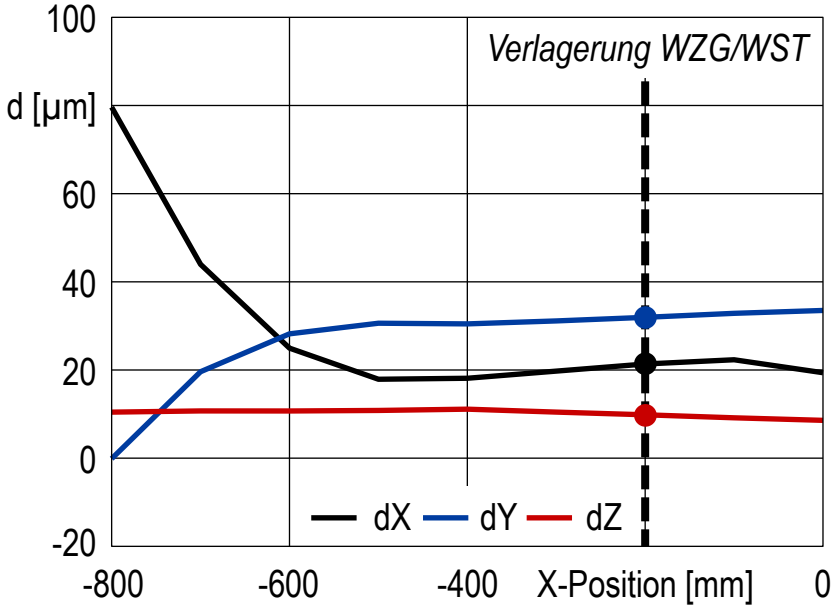




© planlauf GmbH

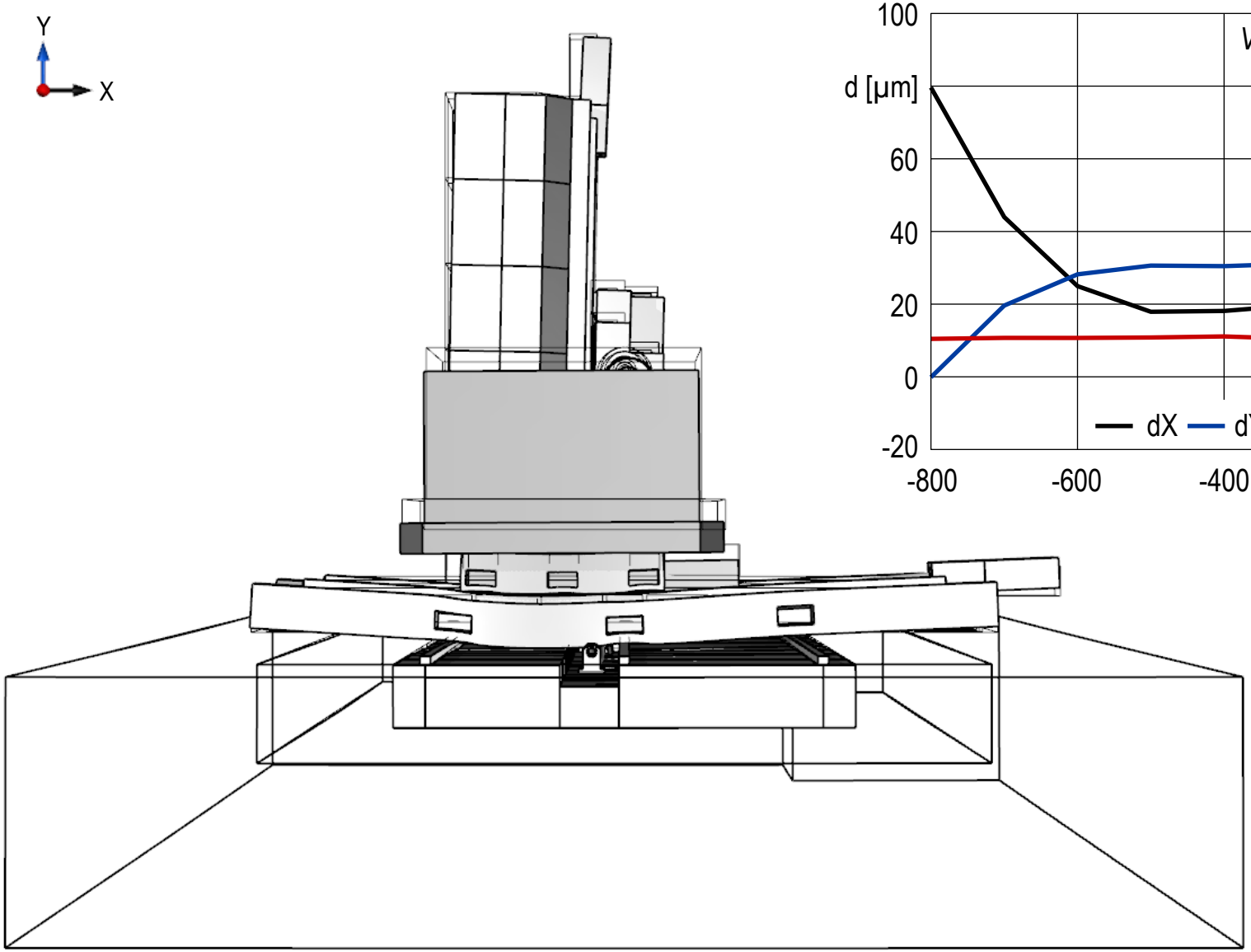
Wanderlast der X-Achse
Position X = -200 mm

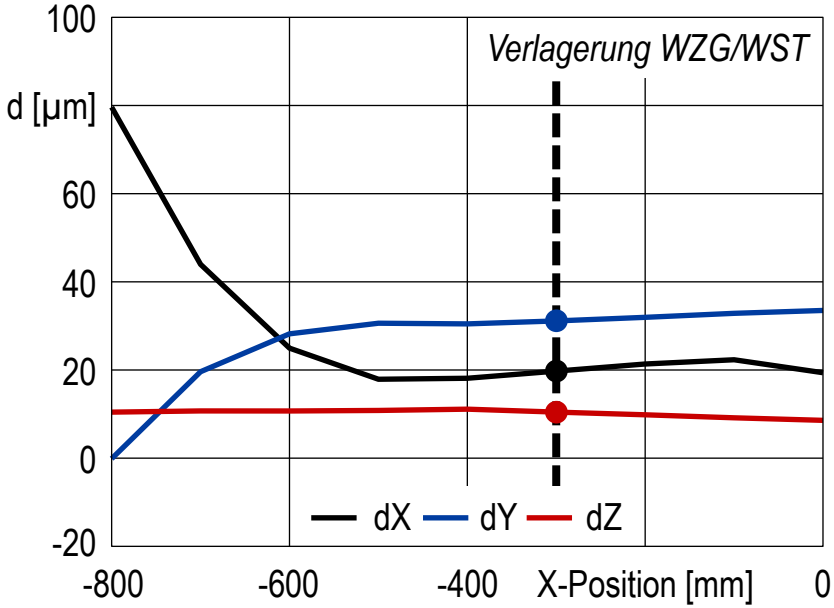




© planlauf GmbH

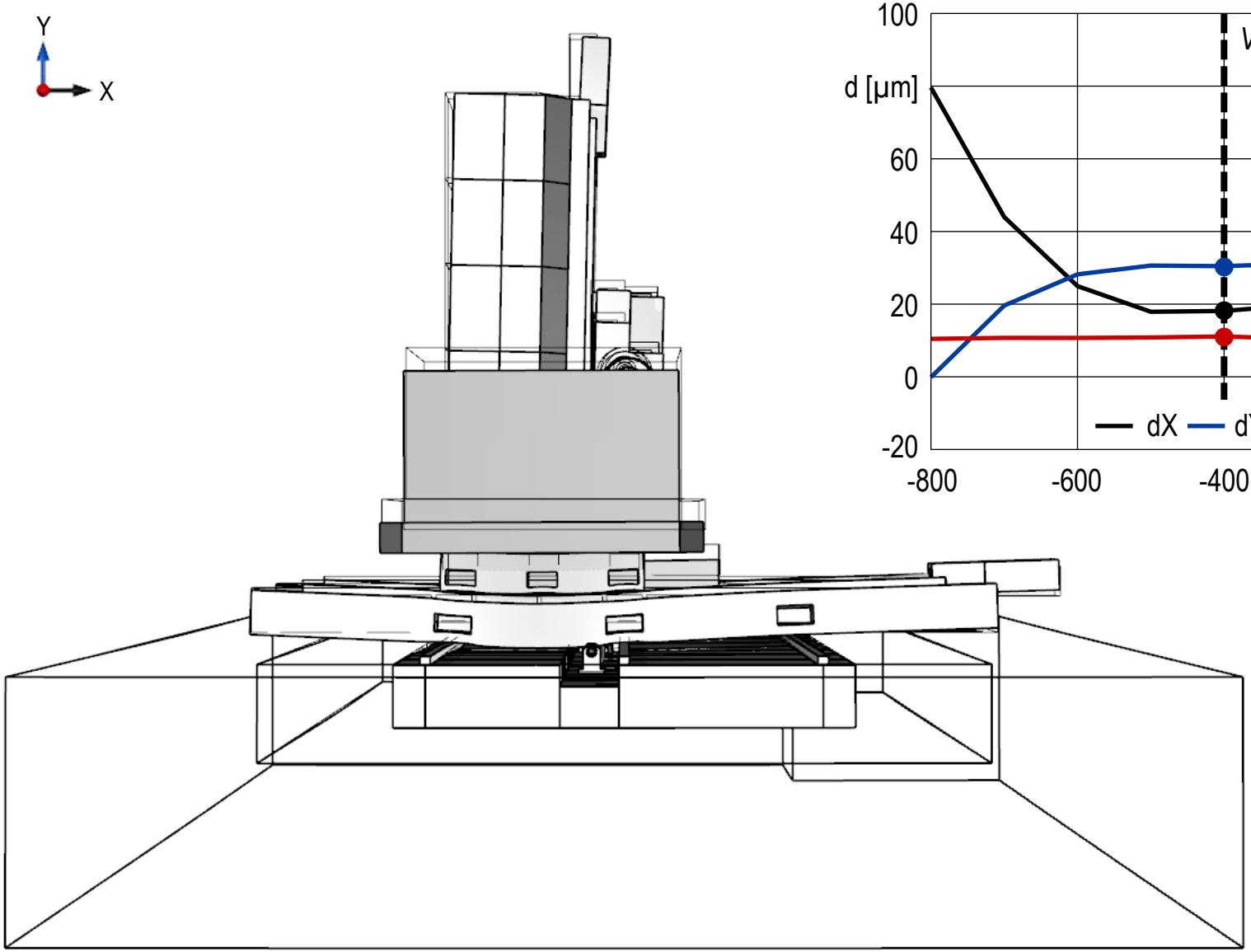
Wanderlast der X-Achse
Position X = -300 mm

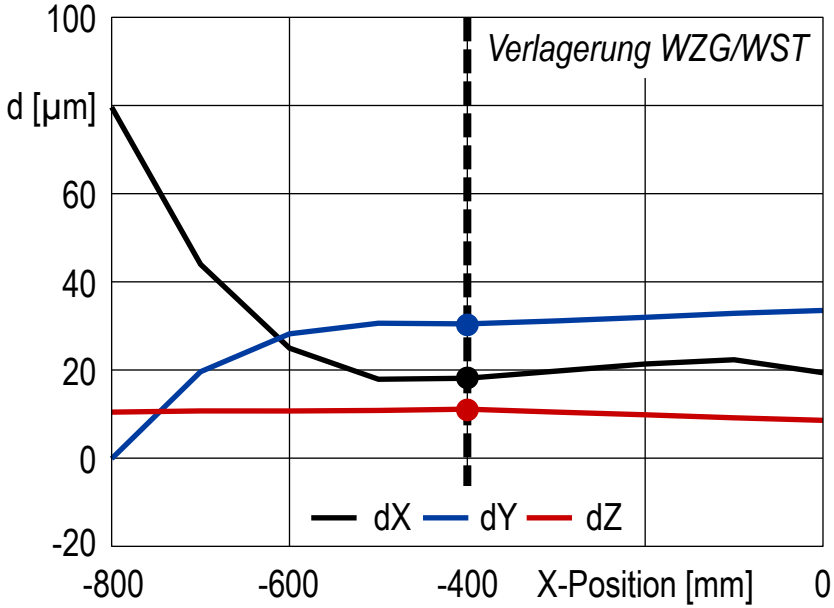




© planlauf GmbH

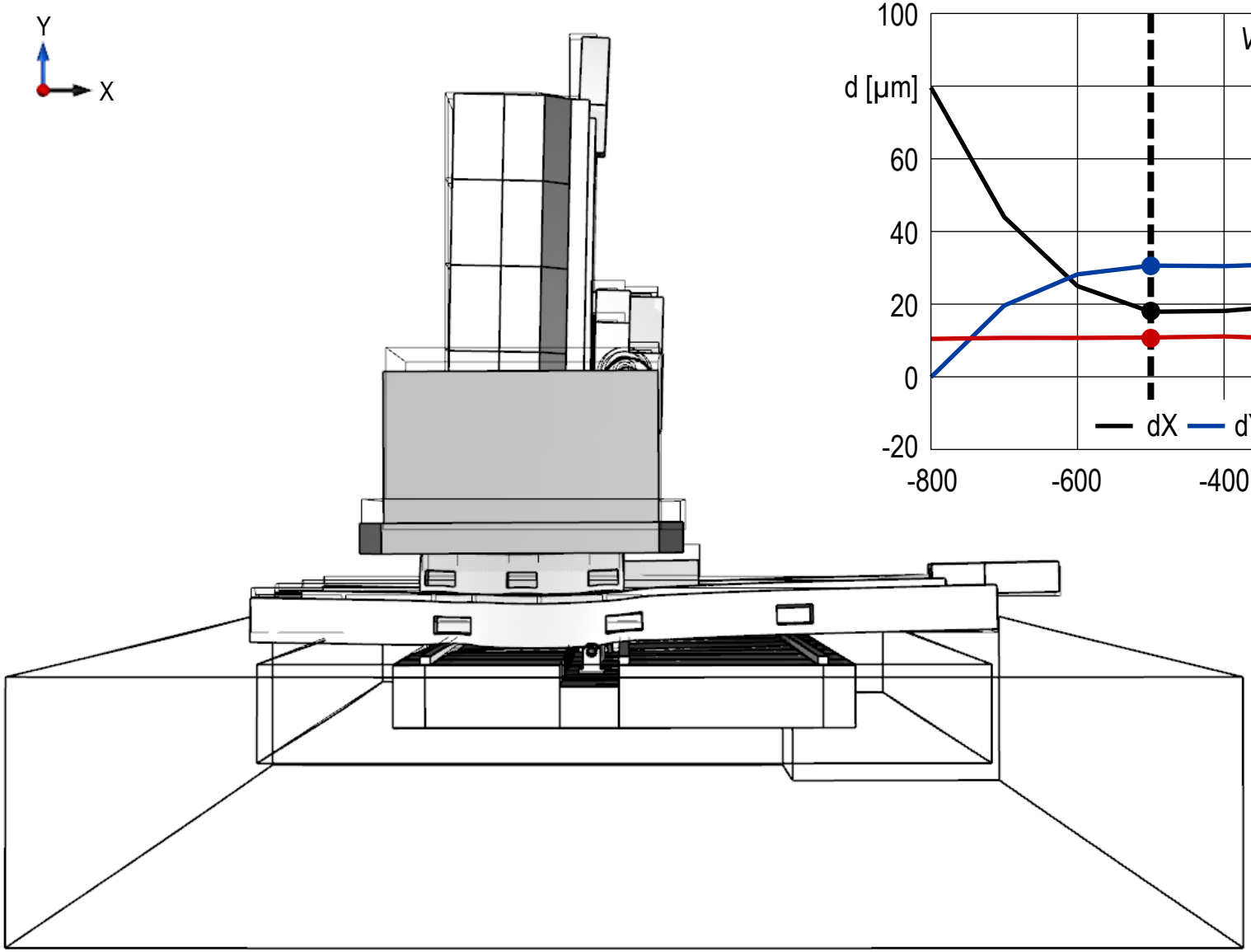
Wanderlast der X-Achse
Position X = -400 mm

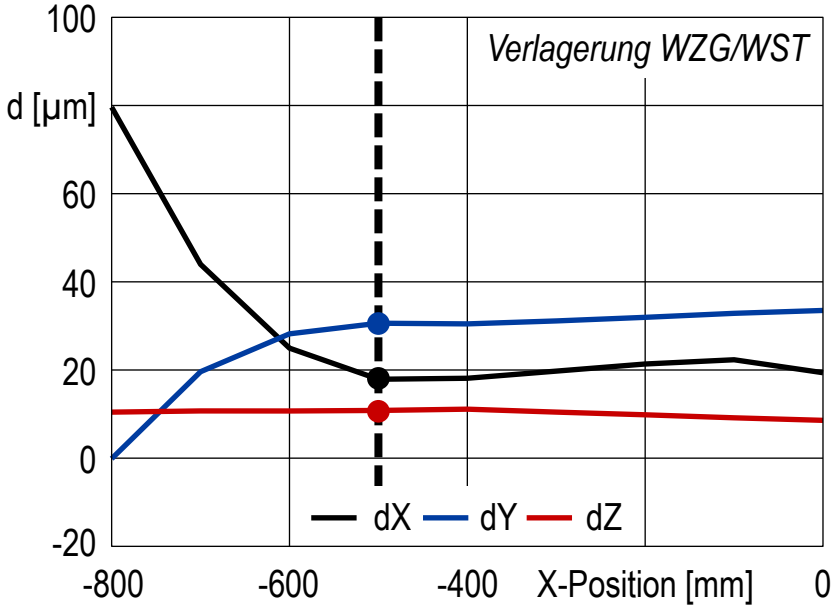




© planlauf GmbH

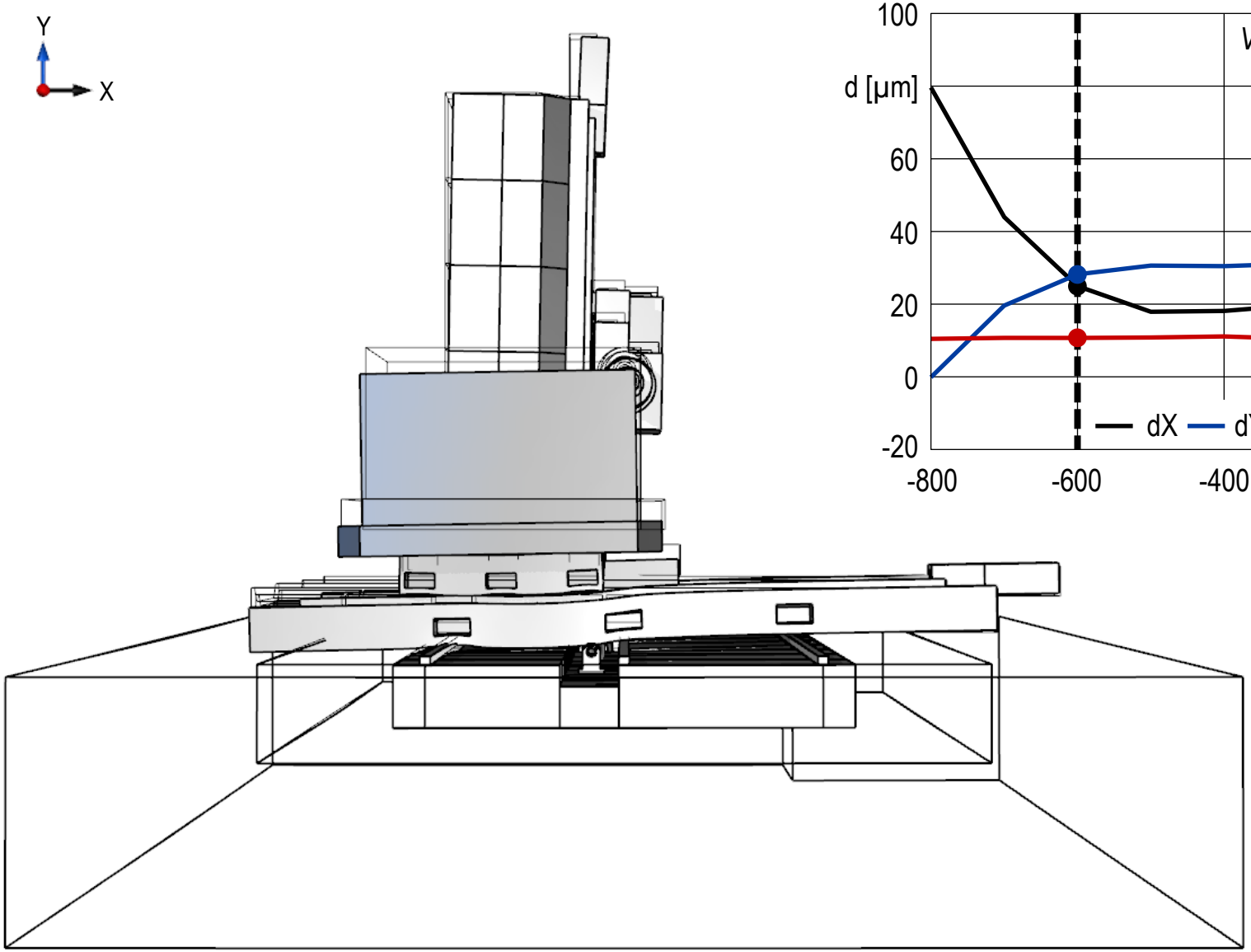
Wanderlast der X-Achse
Position X = -500 mm

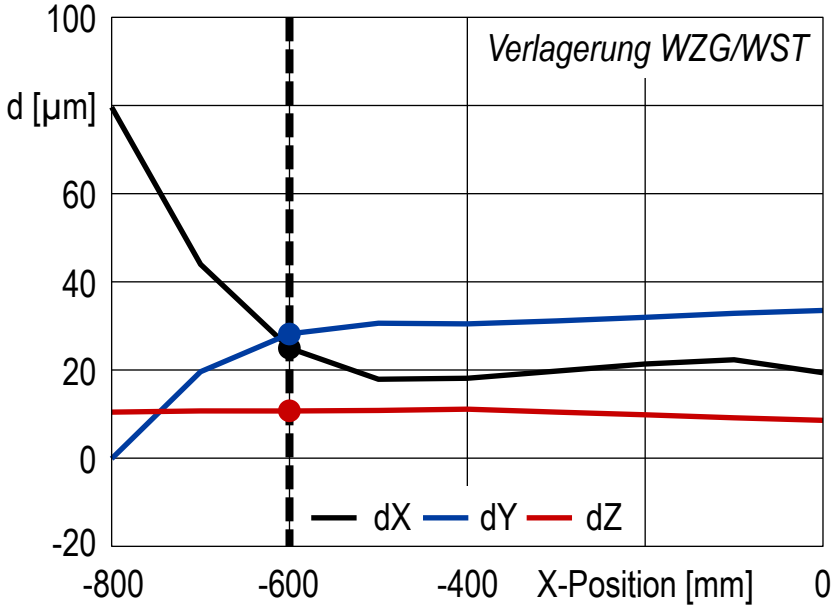




© planlauf GmbH

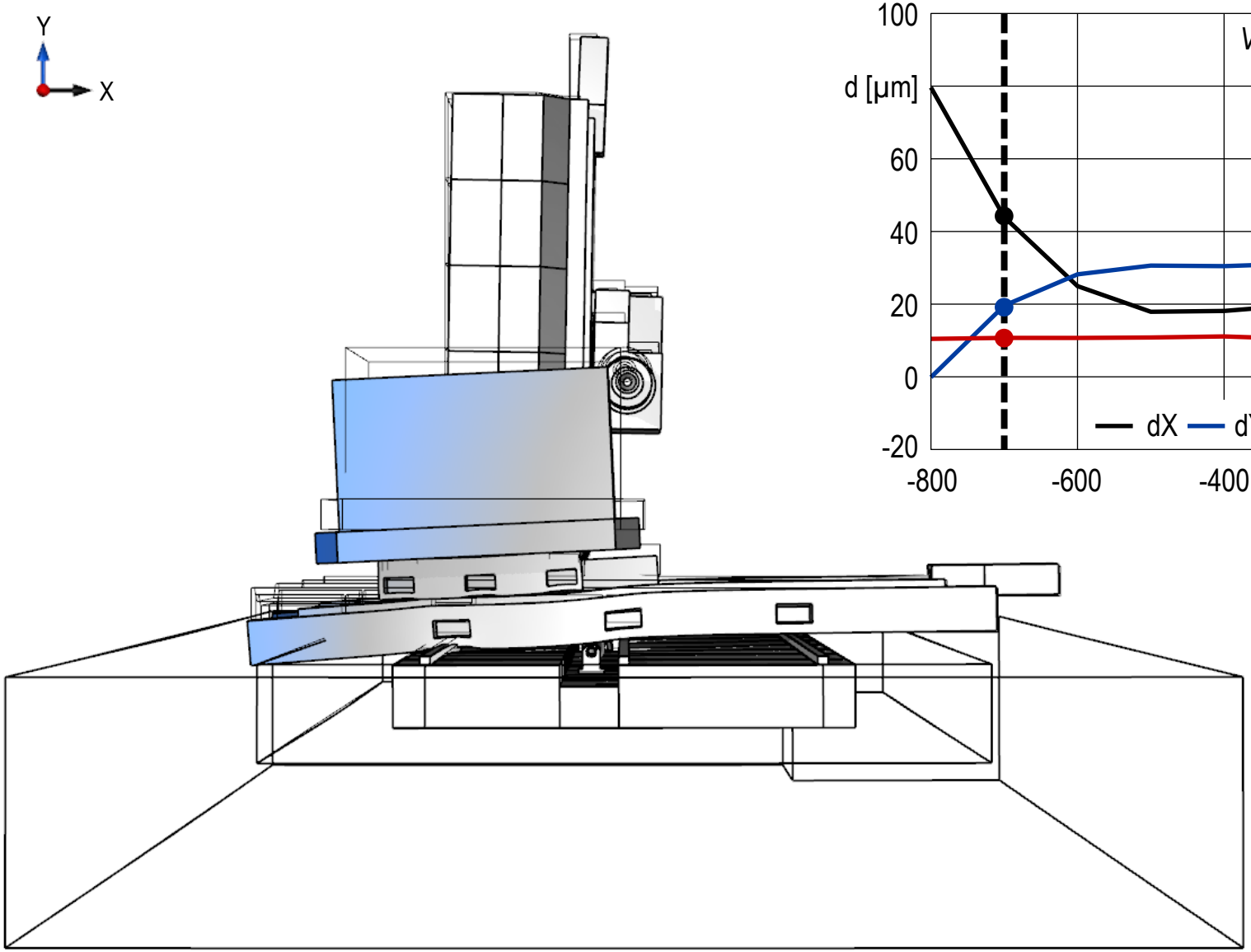
Wanderlast der X-Achse
Position X = -600 mm

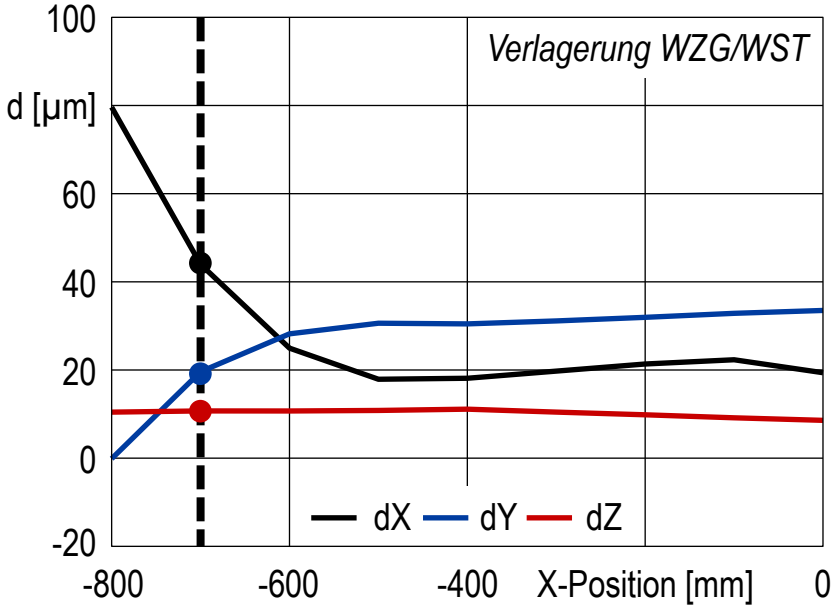




© planlauf GmbH

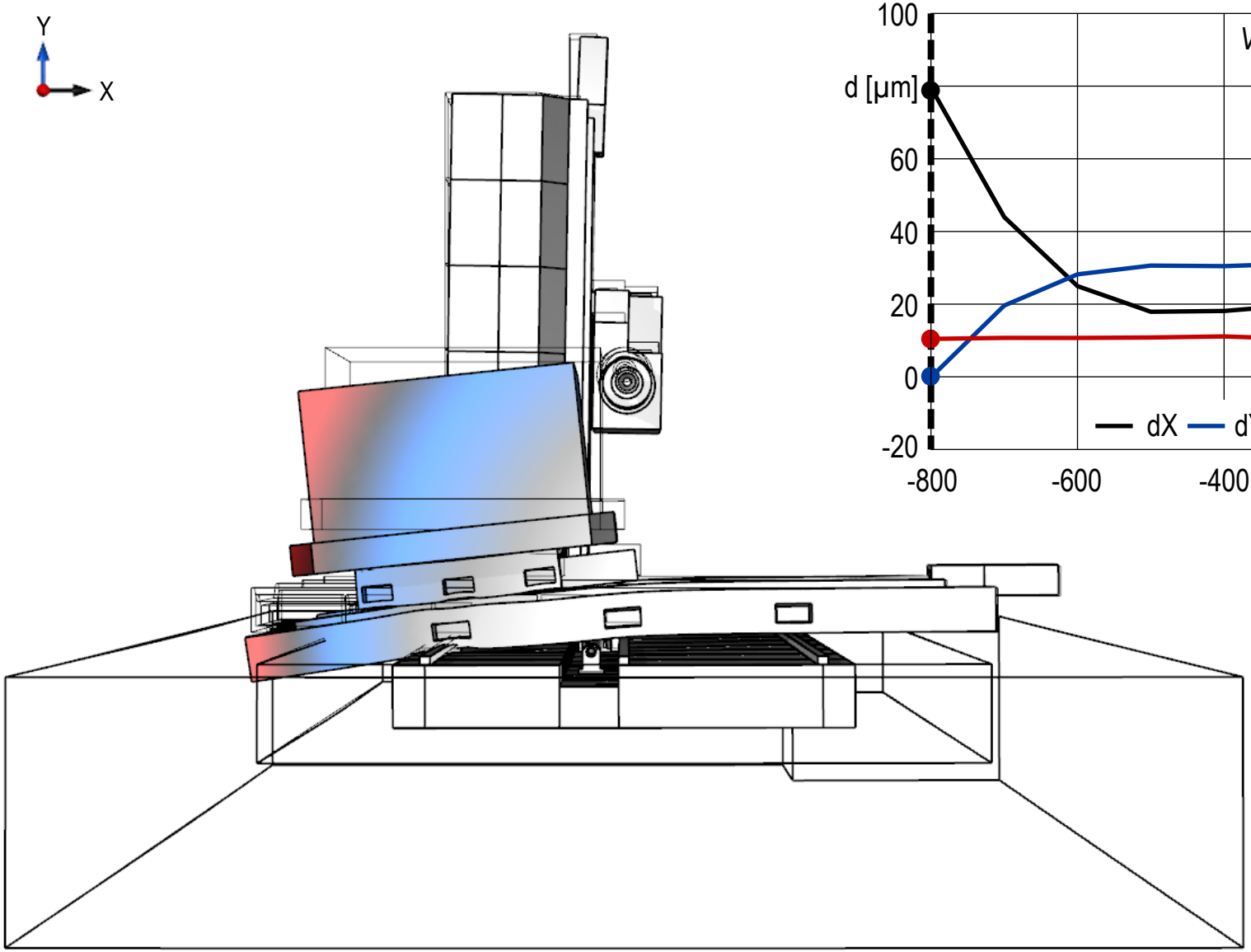
Wanderlast der X-Achse
Position X = -700 mm

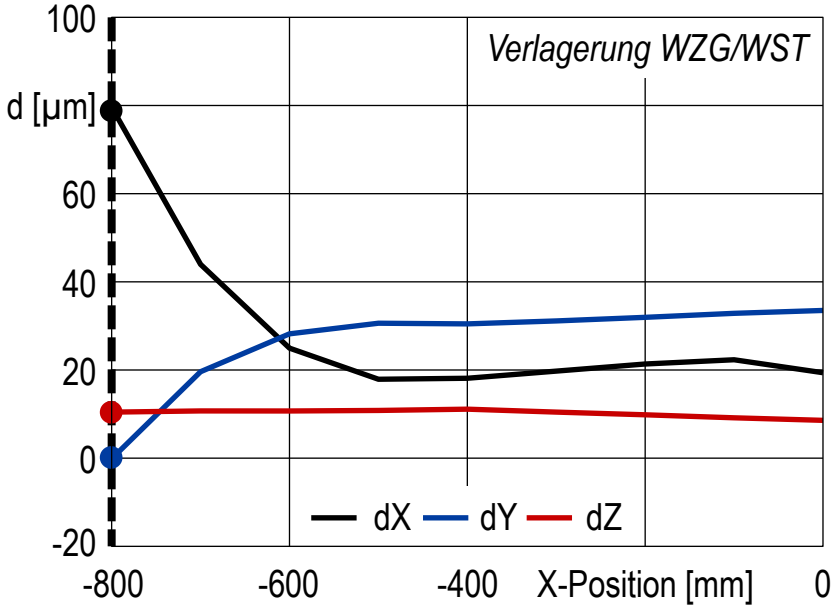




© planlauf GmbH

Wanderlast der X-Achse
Position X = -800 mm





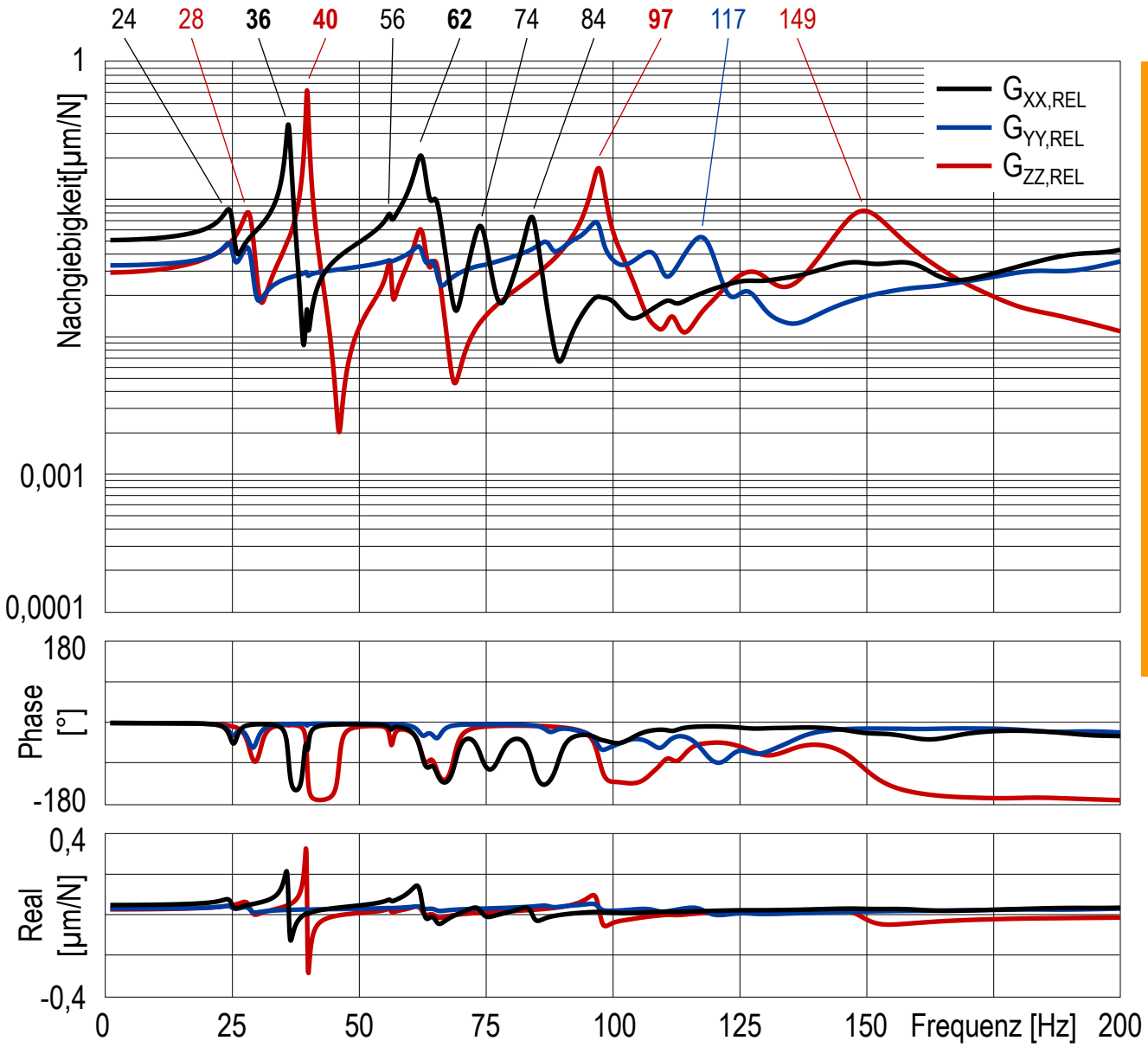
© planlauf GmbH

Gliederung

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

© planlauf GmbH

Relative Nachgiebigkeitsfrequenzgänge



Dominante Resonanzfrequenzen

36 Hz
- Schieben der Tischeinheit in X-Richtung
- Biegung des Z-Schlittens im Bereich des X-KGT-Festlagers

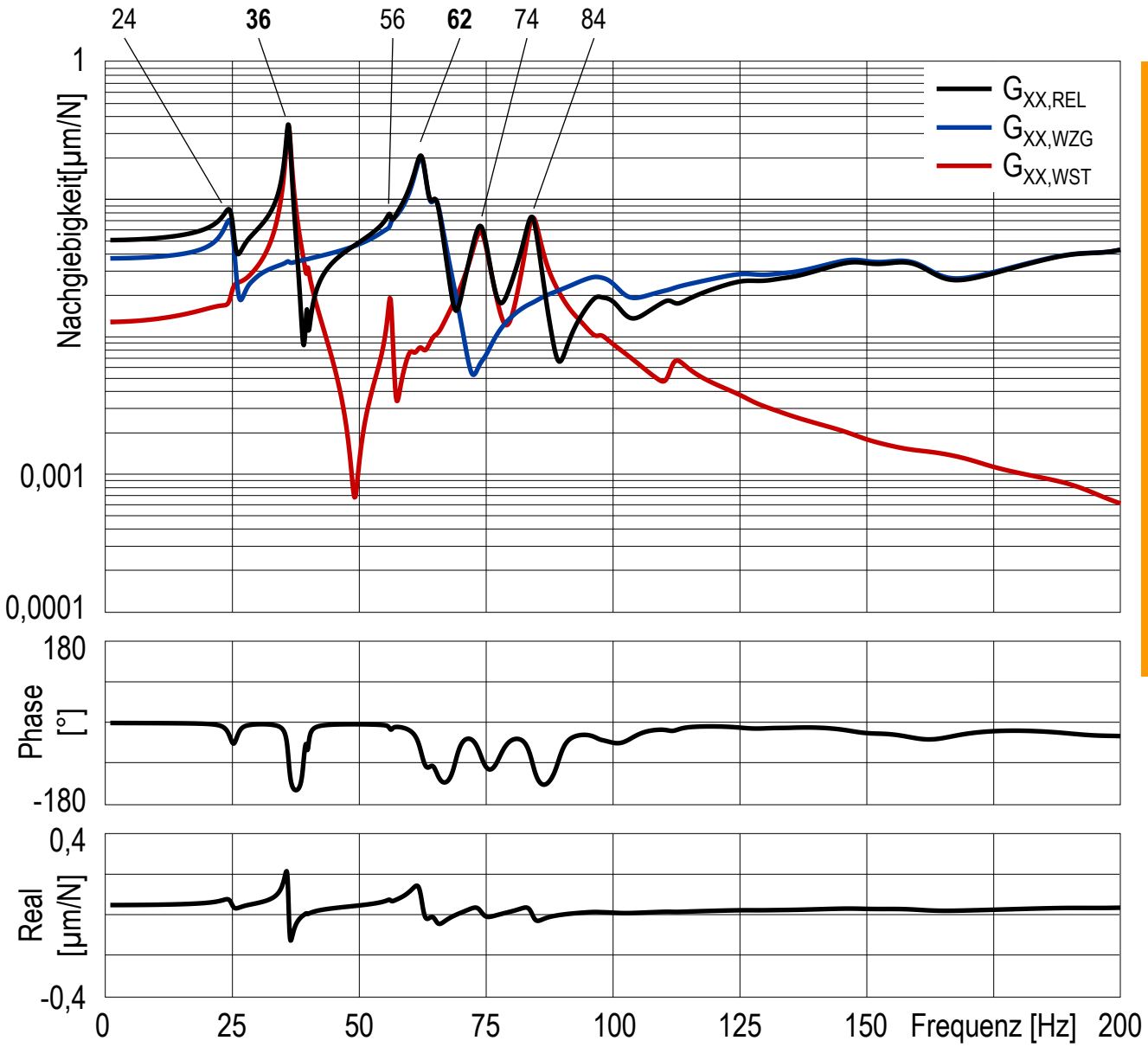
40 Hz
- Schieben der Werkstückseite in Z-Richtung
- Biegung und Torsion des Z-Schlittens

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

97 Hz
- Torsion des Z-Schlittens
- Kippen des Tischs in Z-Richtung
- Schwingung der W-KGT-Konsole

© planlauf GmbH

Nachgiebigkeitsfrequenzgänge in X-Richtung



Dominante Resonanzfrequenzen

36 Hz
- Schieben der Tischeinheit in X-Richtung
- Biegung des Z-Schlittens im Bereich des X-KGT-Festlagers

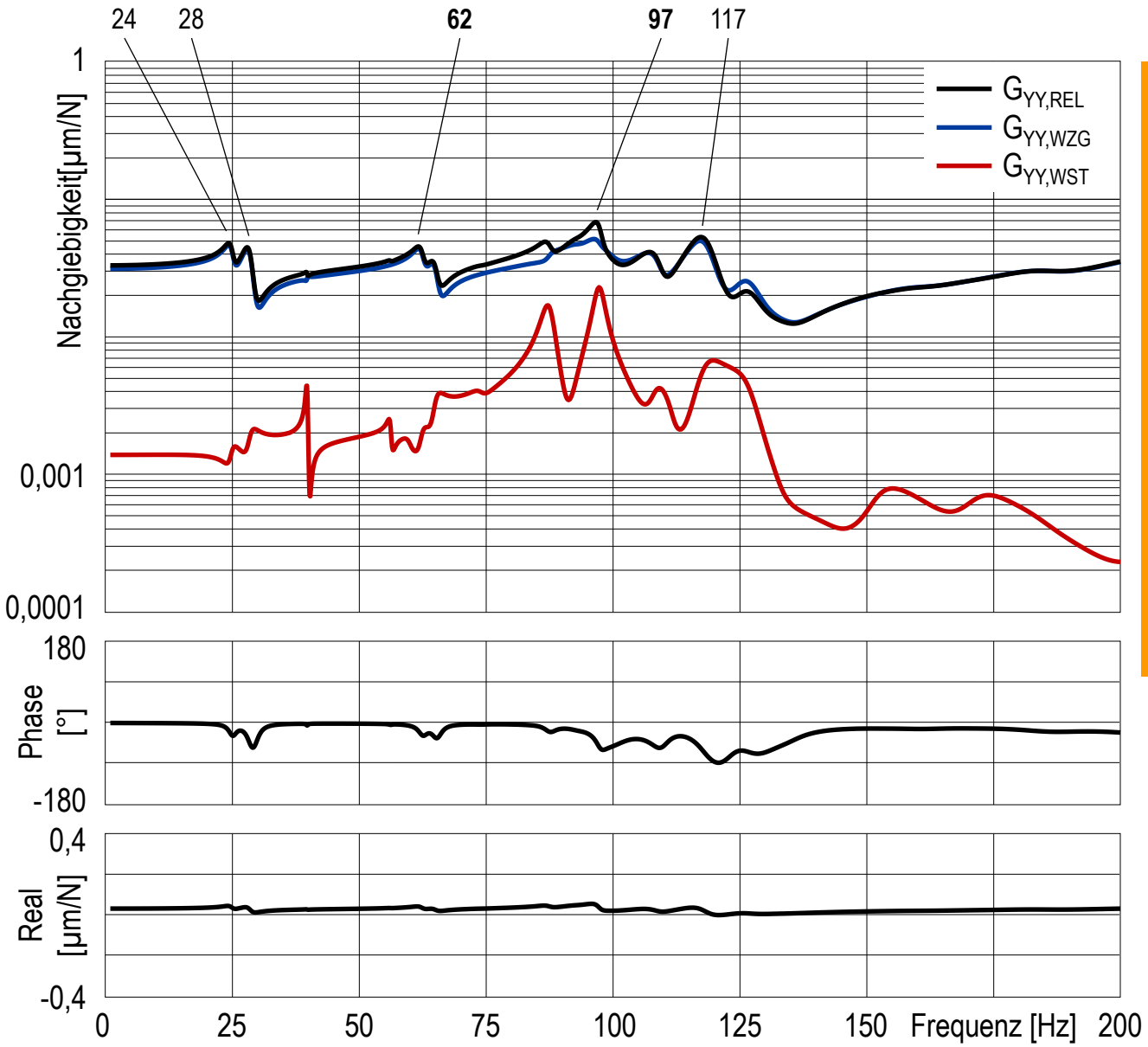
40 Hz
- Schieben der Werkstückseite in Z-Richtung
- Biegung und Torsion des Z-Schlittens

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

97 Hz
- Torsion des Z-Schlittens
- Kippen des Tischs in Z-Richtung
- Schwingung der W-KGT-Konsole

© planlauf GmbH

Nachgiebigkeitsfrequenzgänge in Y-Richtung



Dominante Resonanzfrequenzen

36 Hz
- Schieben der Tischeinheit in X-Richtung
- Biegung des Z-Schlittens im Bereich des X-KGT-Festlagers

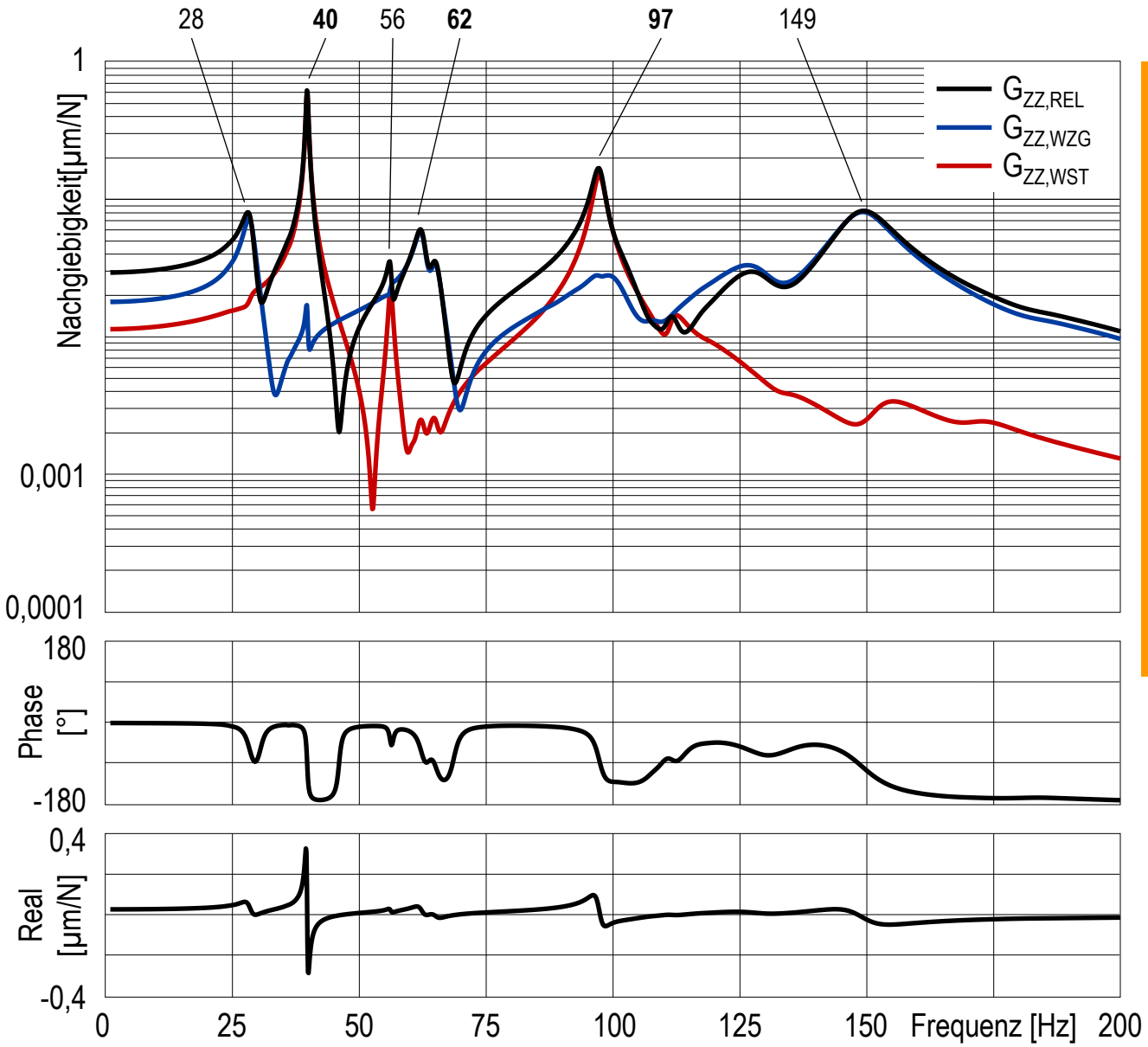
40 Hz
- Schieben der Werkstückseite in Z-Richtung
- Biegung und Torsion des Z-Schlittens

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

97 Hz
- Torsion des Z-Schlittens
- Kippen des Tischs in Z-Richtung
- Schwingung der W-KGT-Konsole

© planlauf GmbH

Nachgiebigkeitsfrequenzgänge in Z-Richtung



Dominante Resonanzfrequenzen

36 Hz
- Schieben der Tischeinheit in X-Richtung
- Biegung des Z-Schlittens im Bereich des X-KGT-Festlagers

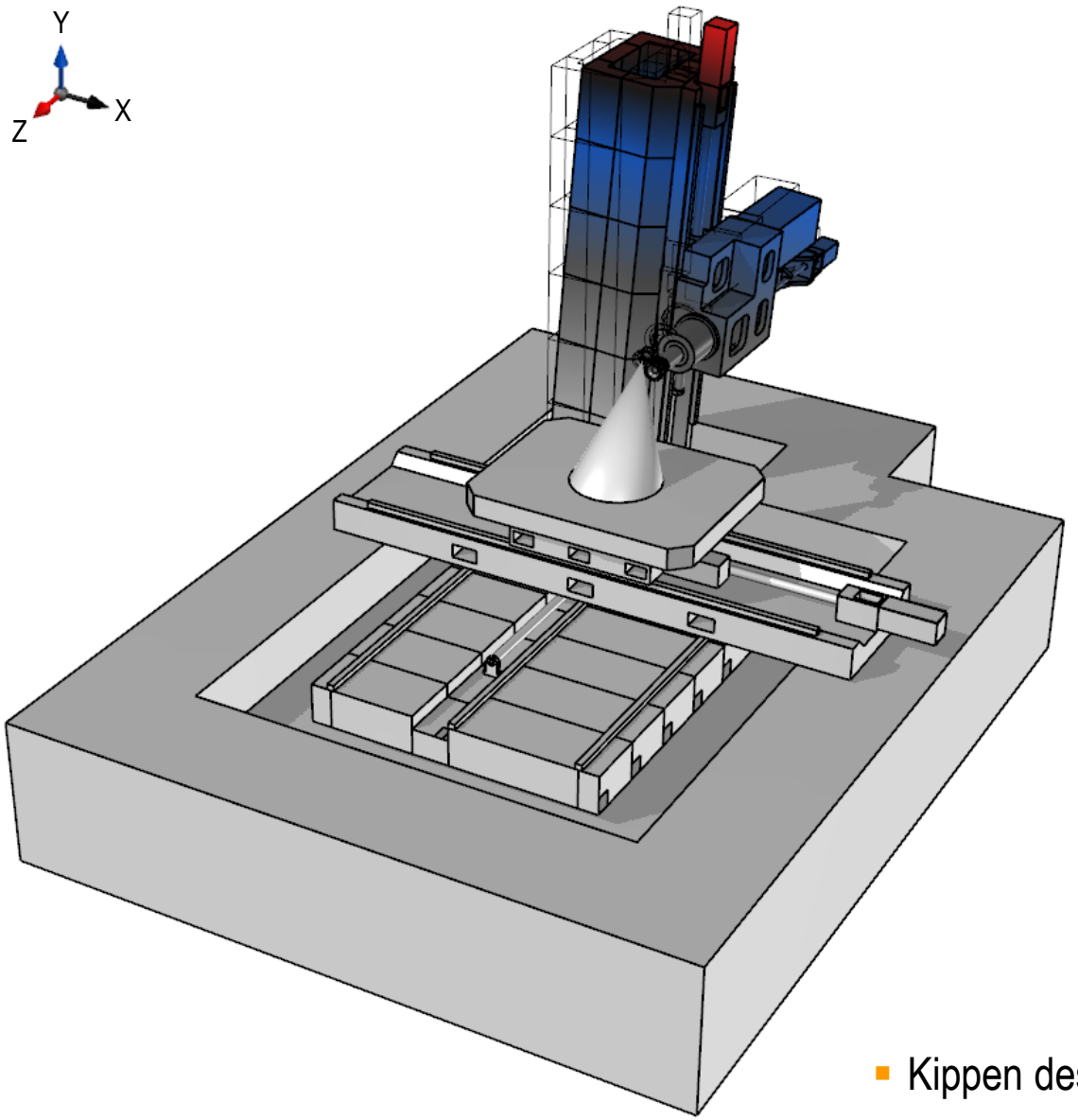
40 Hz
- Schieben der Werkstückseite in Z-Richtung
- Biegung und Torsion des Z-Schlittens

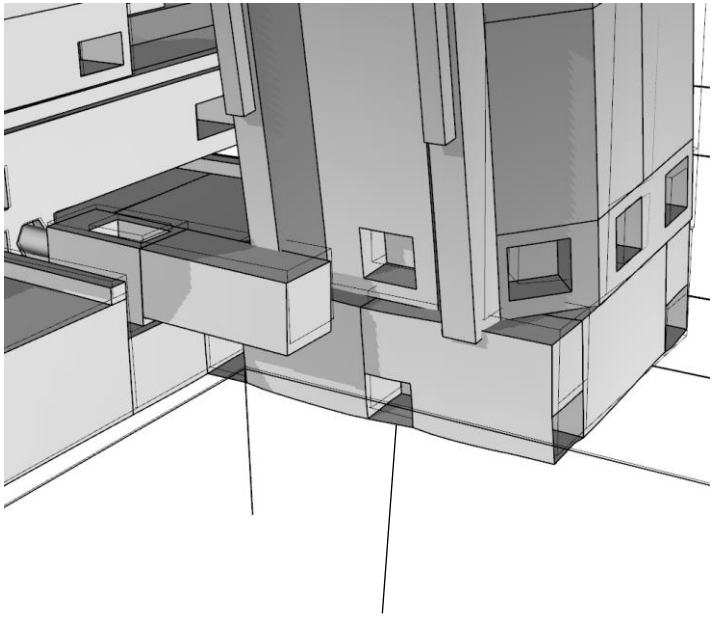
62 Hz
- Torsion des Ständers
- Biegung und Schwingung der W-KGT-Konsole in X-Richtung

97 Hz
- Torsion des Z-Schlittens
- Kippen des Tischs in Z-Richtung
- Schwingung der W-KGT-Konsole

© planlauf GmbH

Schwingungsform bei 24 Hz



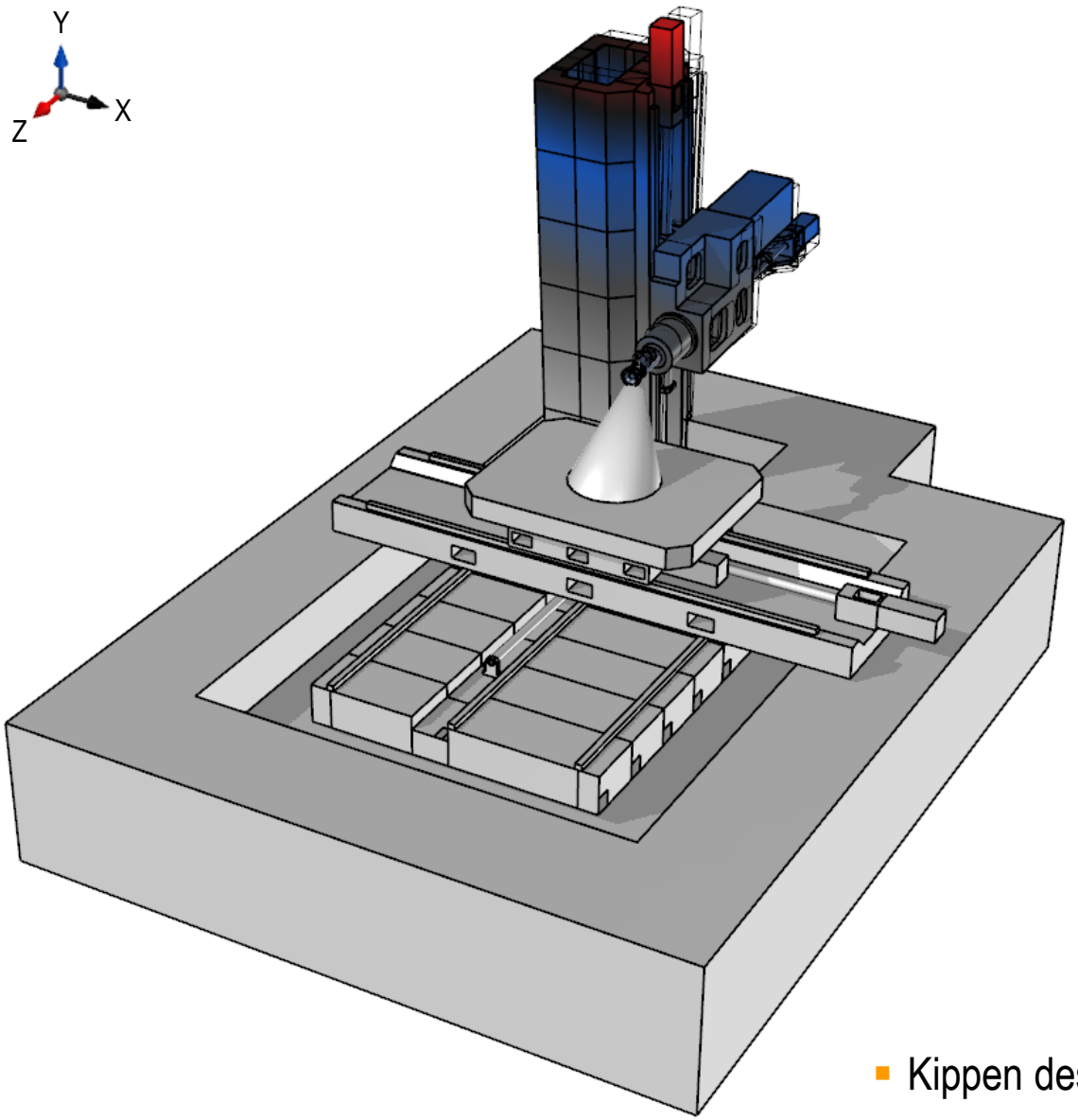


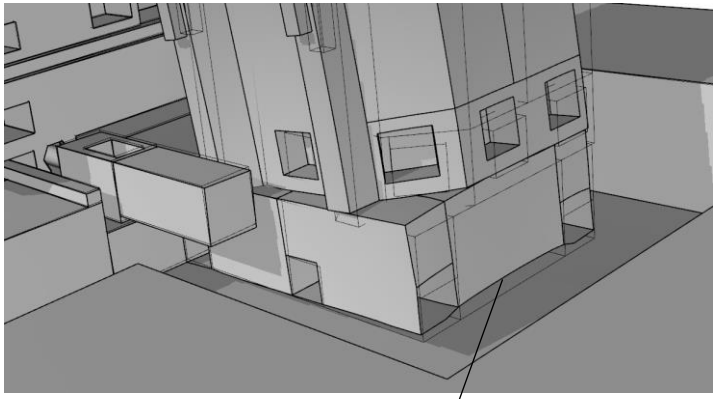
Torsion des Betts und
Einfedern in den Fixatoren

- Kippen des Ständers in X-Richtung

© planlauf GmbH

Schwingungsform bei 28 Hz



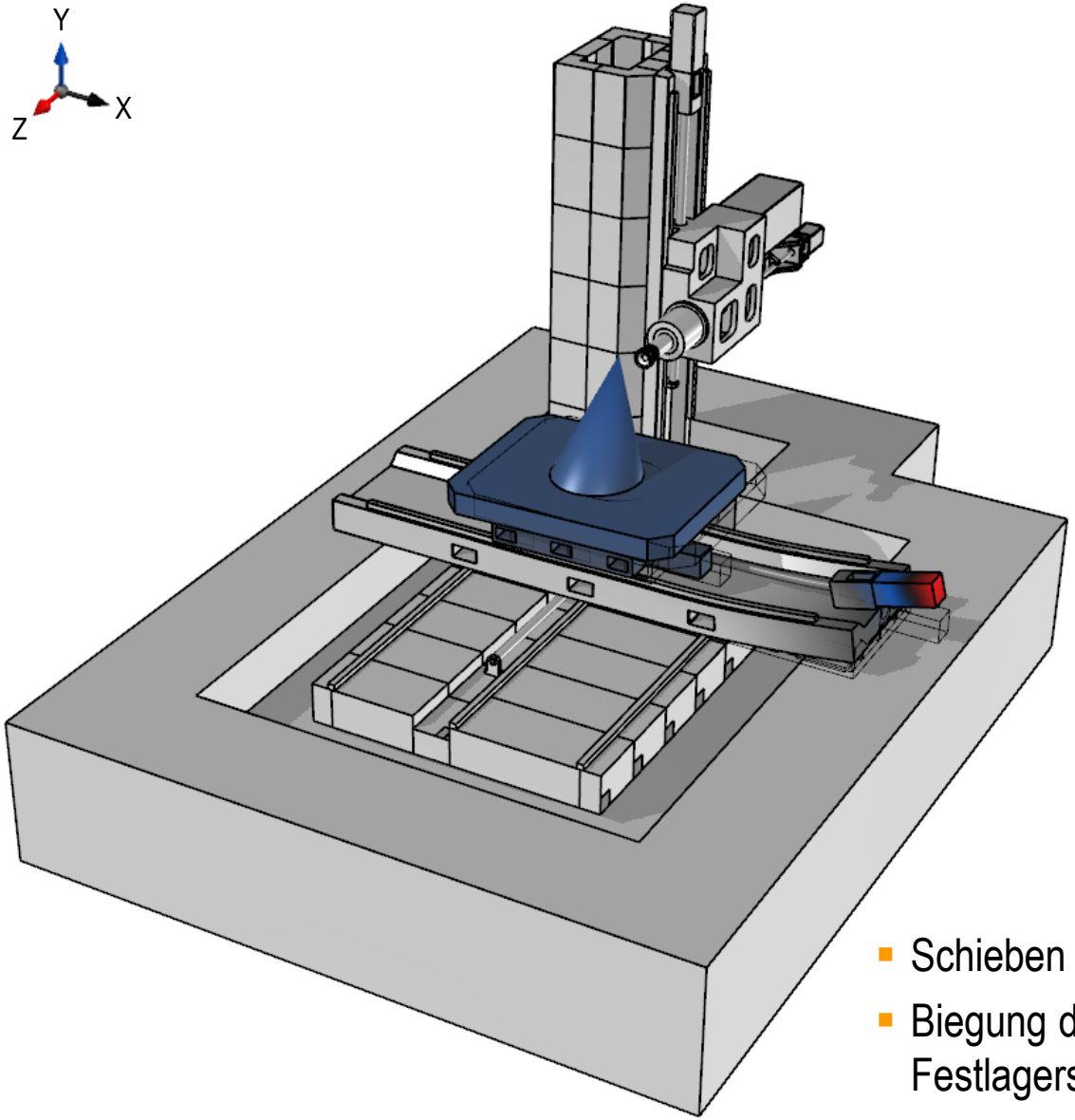


Biegung des Betts und
Einfedern in den Fixatoren

- Kippen des Ständers in Z-Richtung

© planlauf GmbH

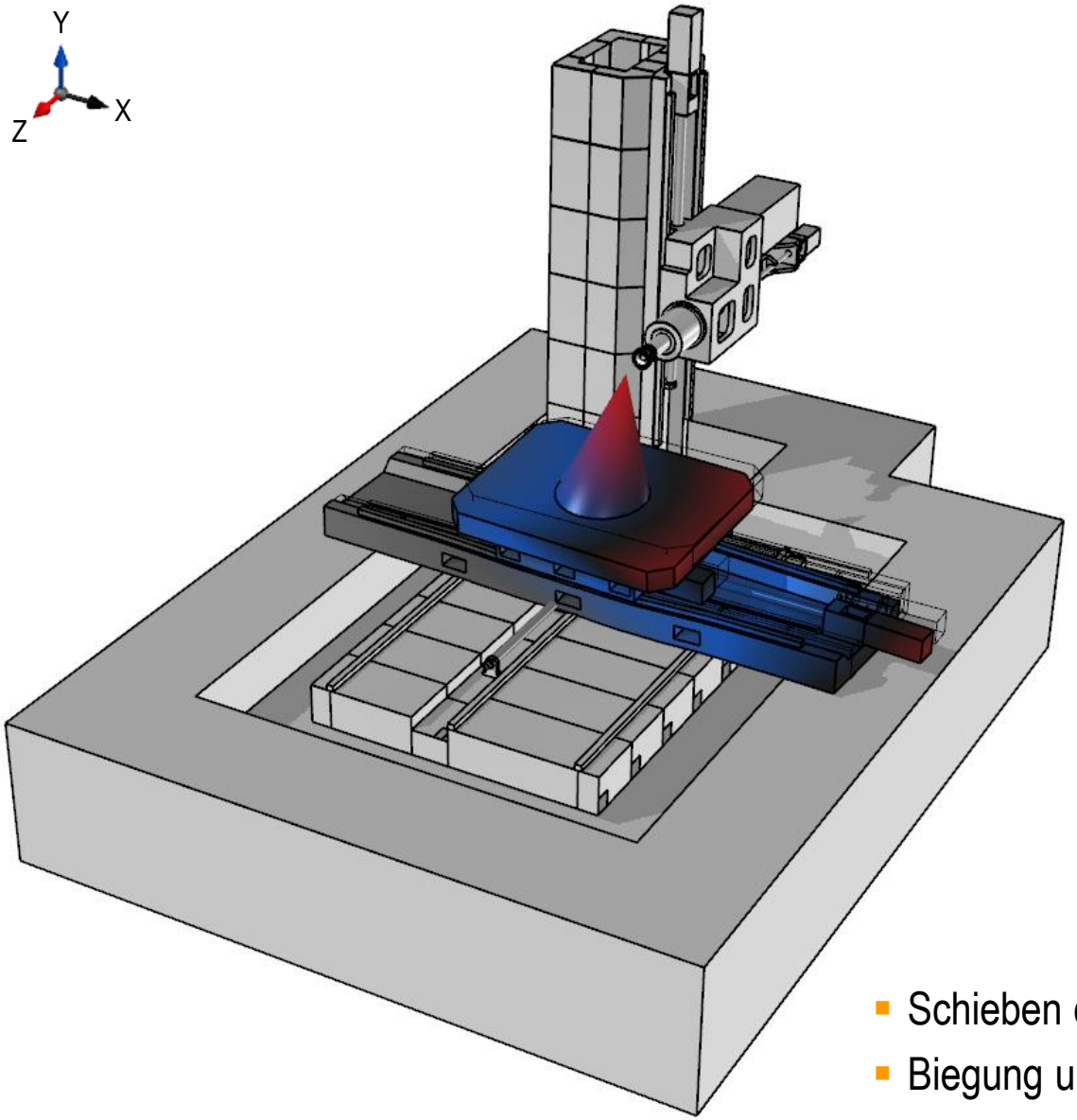
Schwingungsform bei 36 Hz

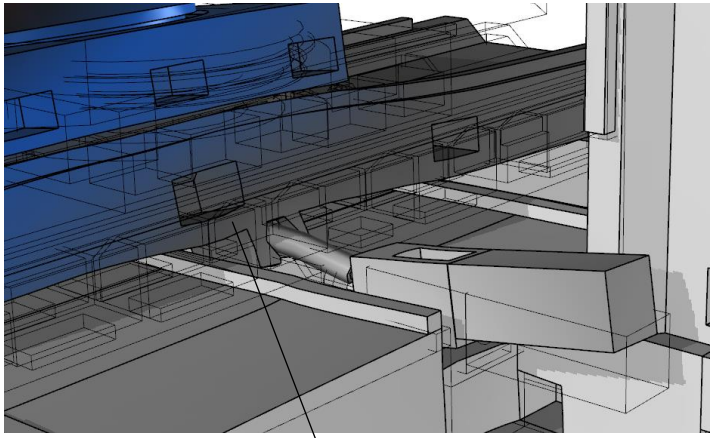


- Schieben der Tischeinheit in X-Richtung
- Biegung des Z-Schlittens im Bereich des X-KGT-Festlagers

© planlauf GmbH

Schwingungsform bei 40 Hz



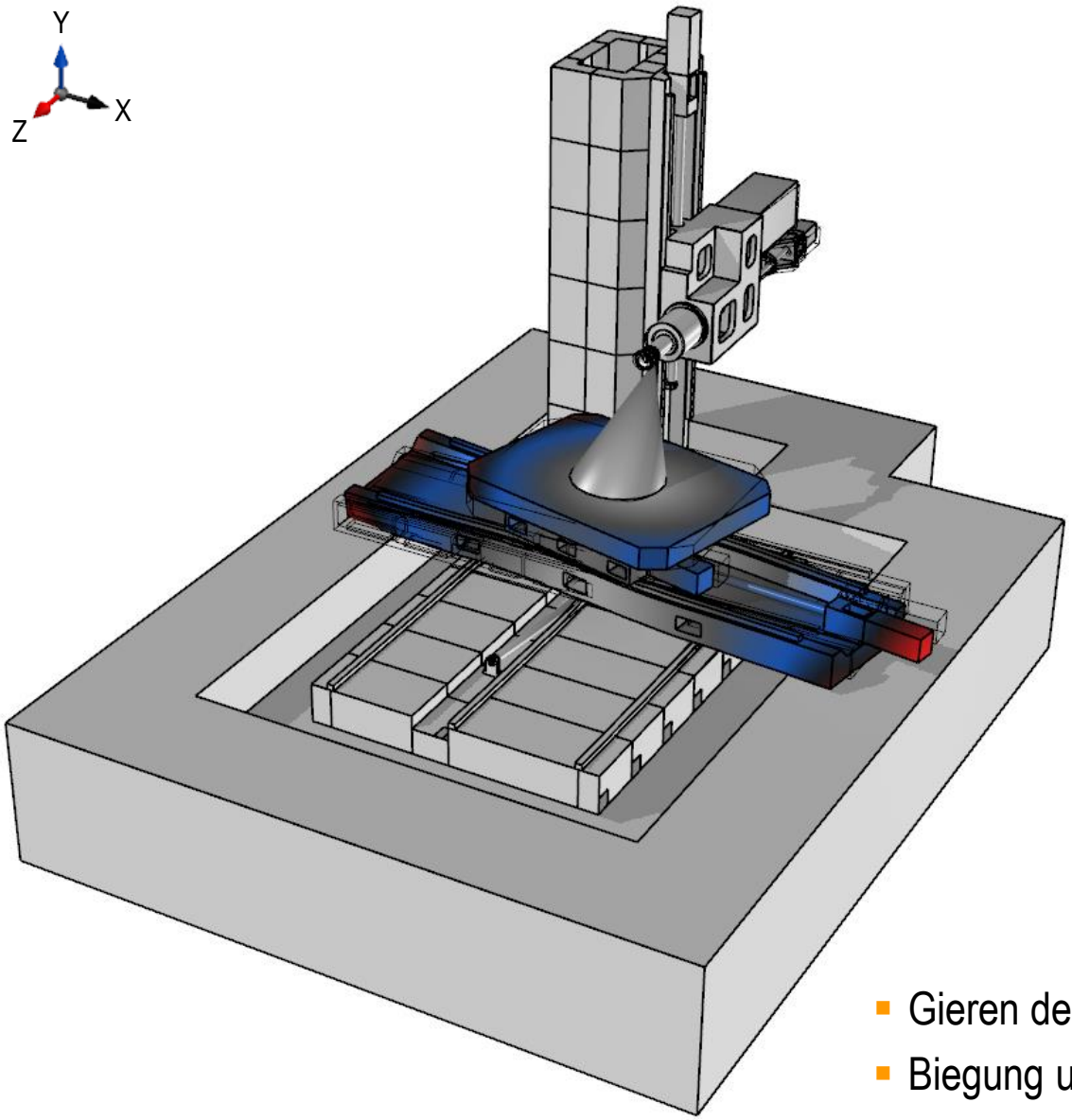


Torsion des Z-Schlittens

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

© planlauf GmbH

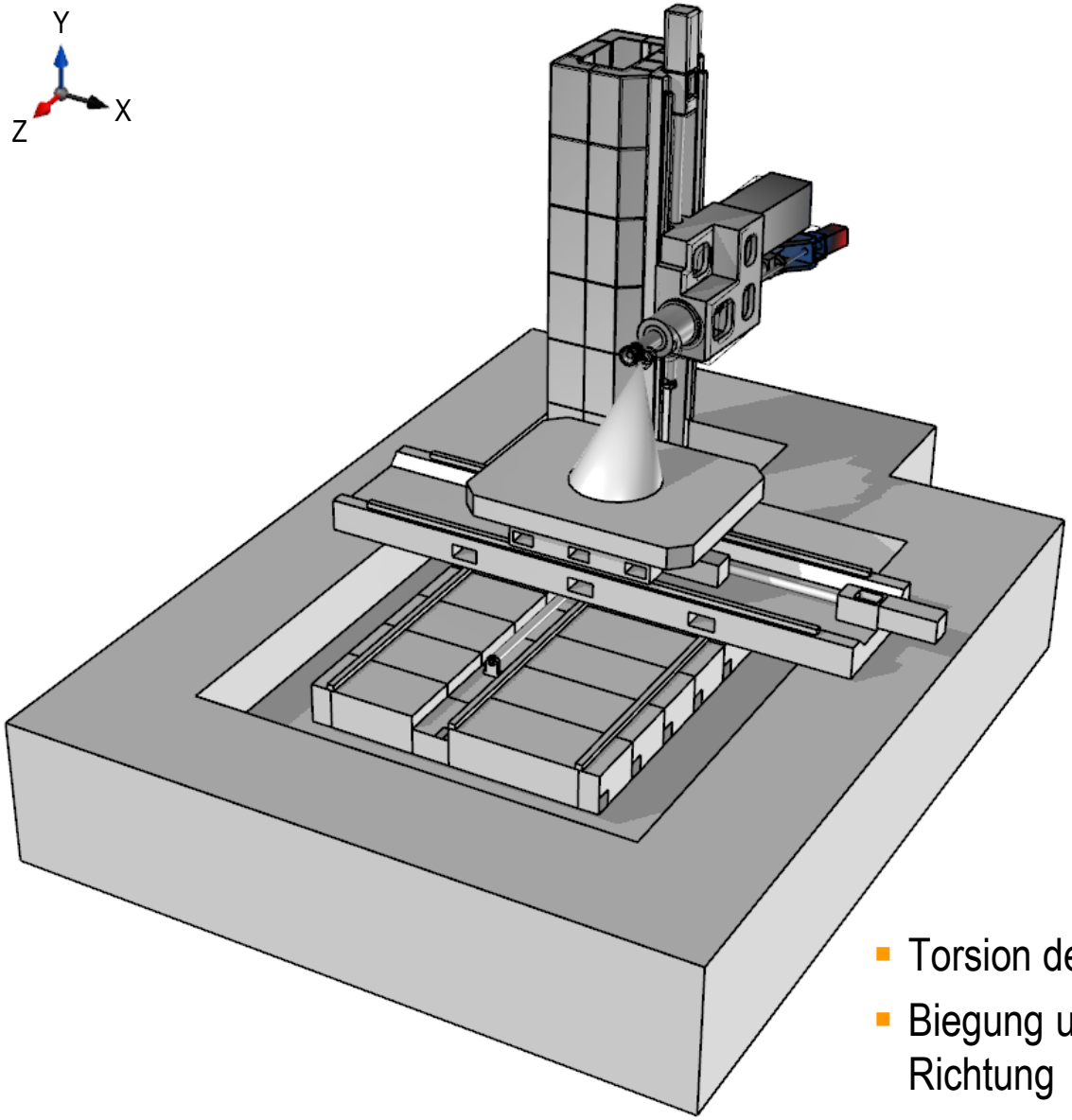
Schwingungsform bei 56 Hz

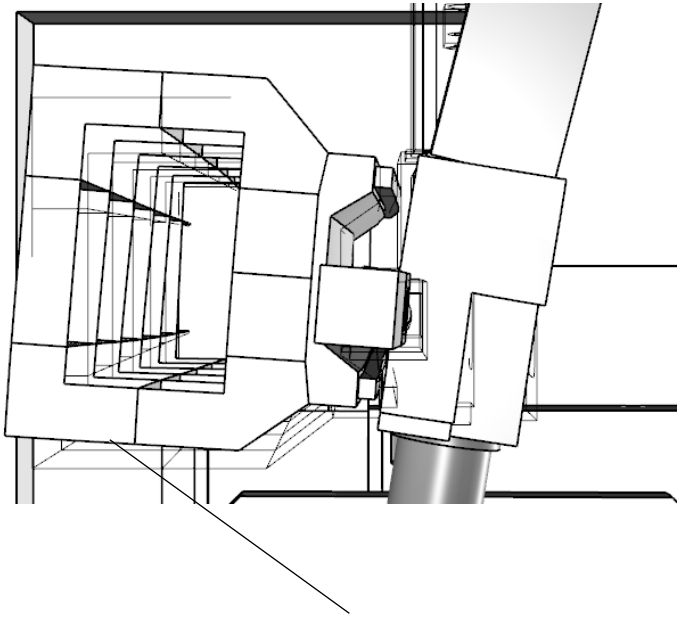


- Gieren der Werkstückseite
- Biegung und Torsion des Z-Schlittens

© planlauf GmbH

Schwingungsform bei 62 Hz

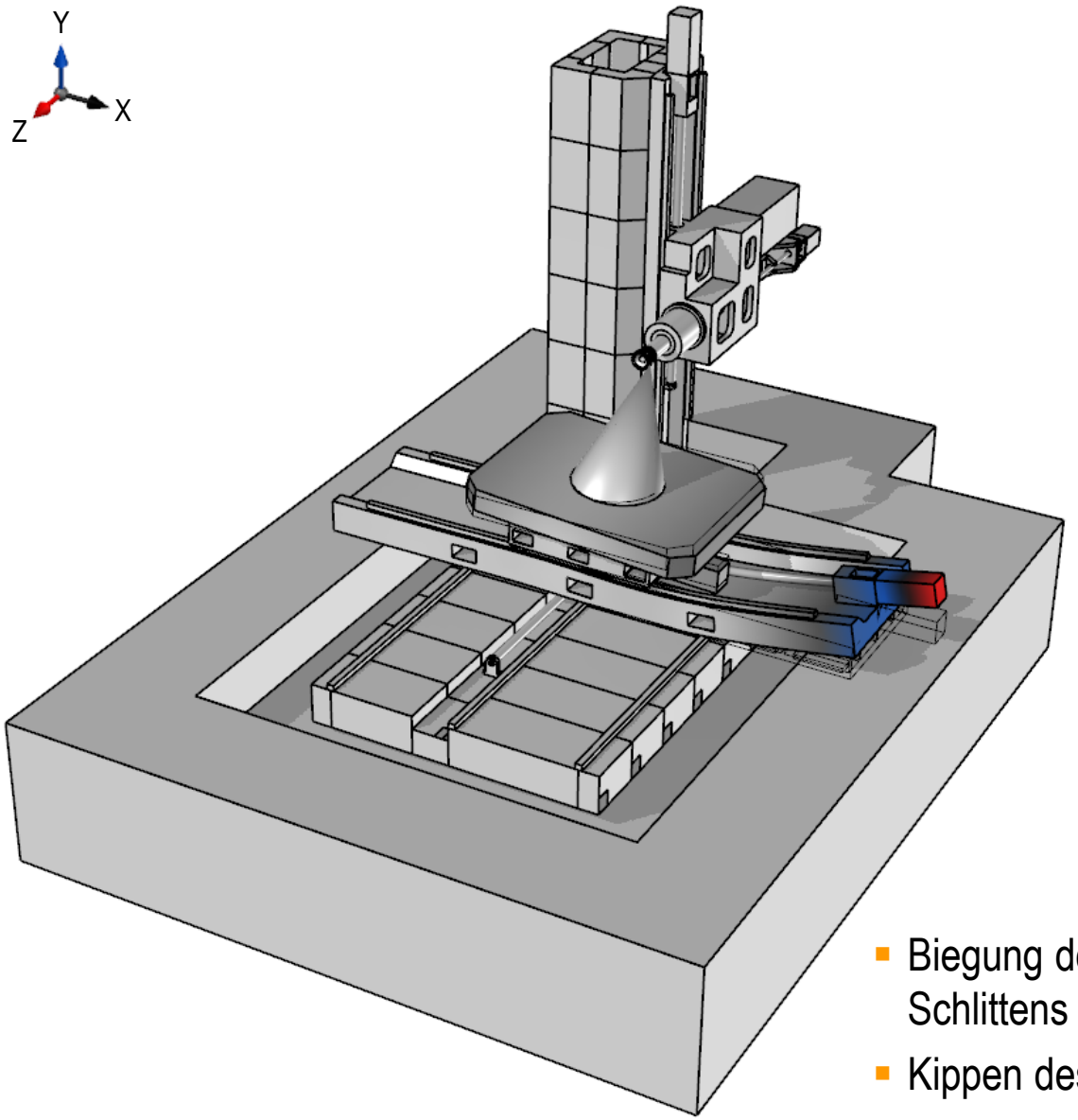




- Torsion des Ständers
- Biegung und Schwingung der W-KGT-Konsole in X-Richtung

© planlauf GmbH

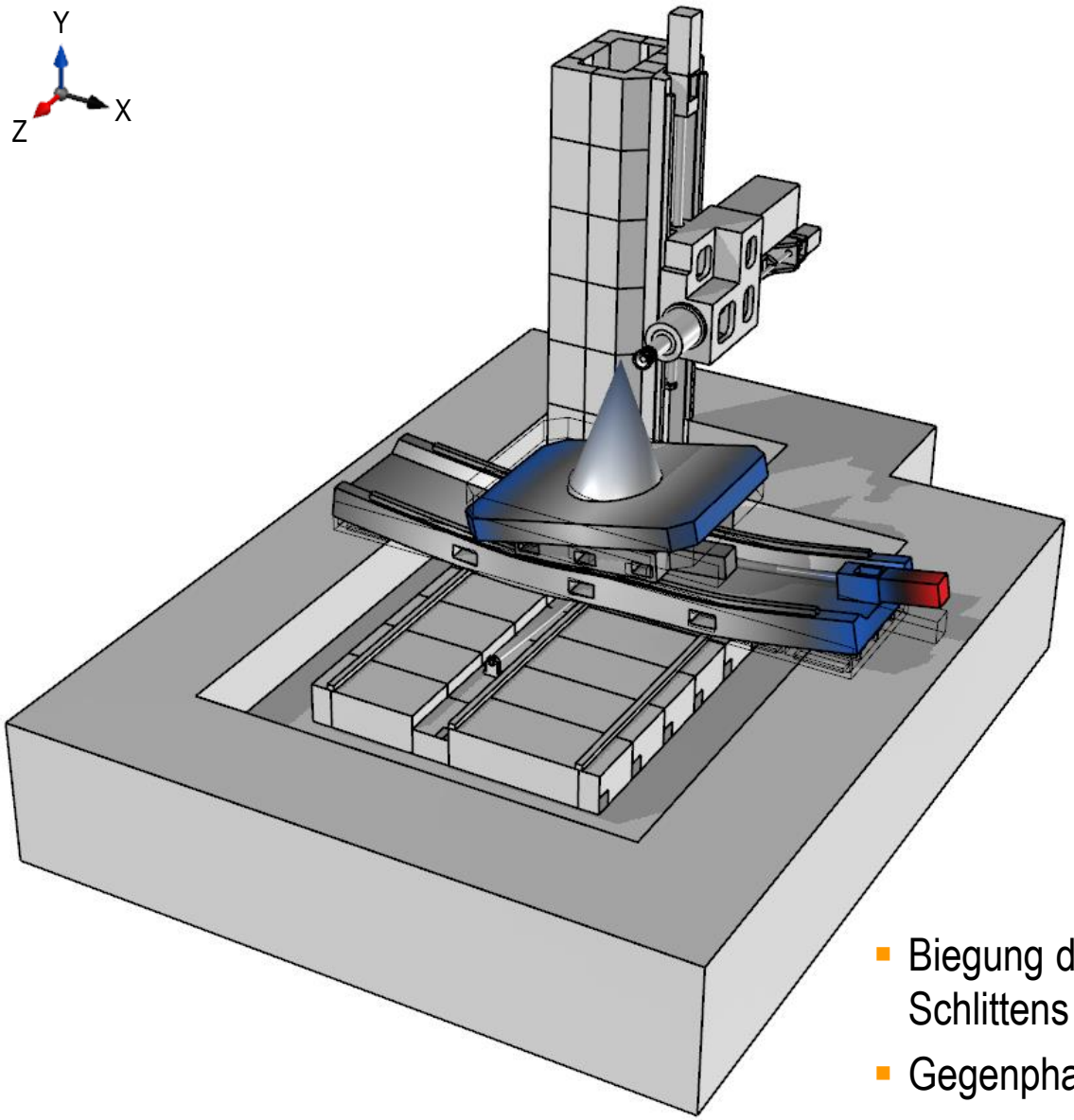
Schwingungsform bei 74 Hz



- Biegung des frei auskragenden Bereichs des Z-Schlittens
- Kippen des Tischs in X-Richtung

© planlauf GmbH

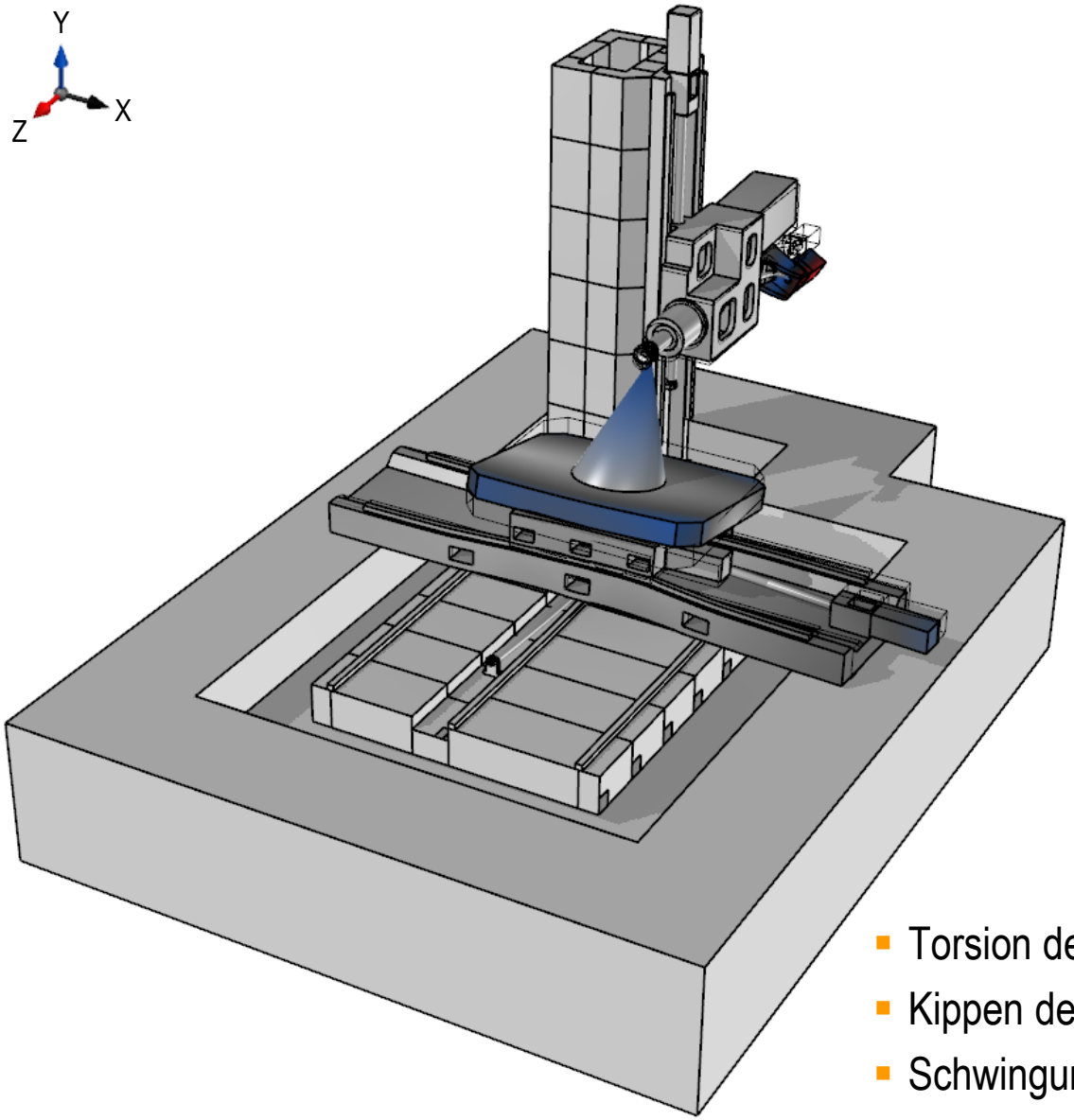
Schwingungsform bei 84 Hz

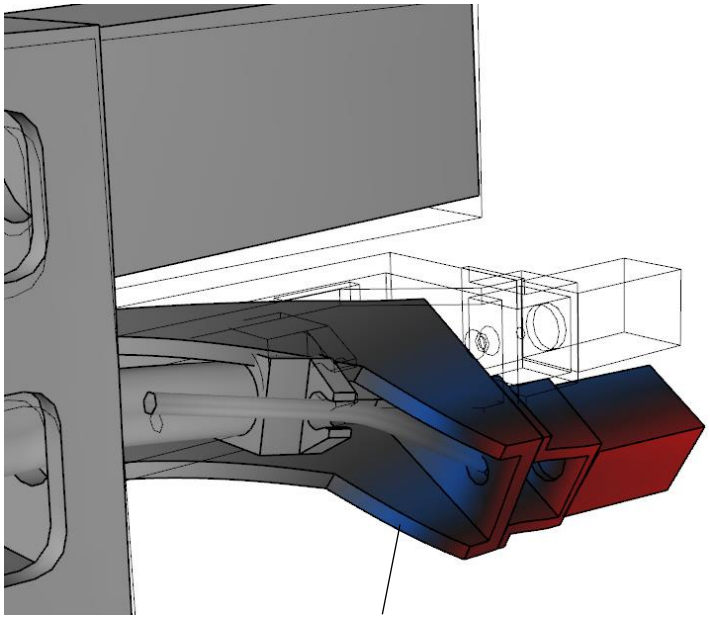


- Biegung der frei auskragenden Bereiche des Z-Schlittens
- Gegenphasiges Kippen des Tischs in X-Richtung

© planlauf GmbH

Schwingungsform bei 97 Hz



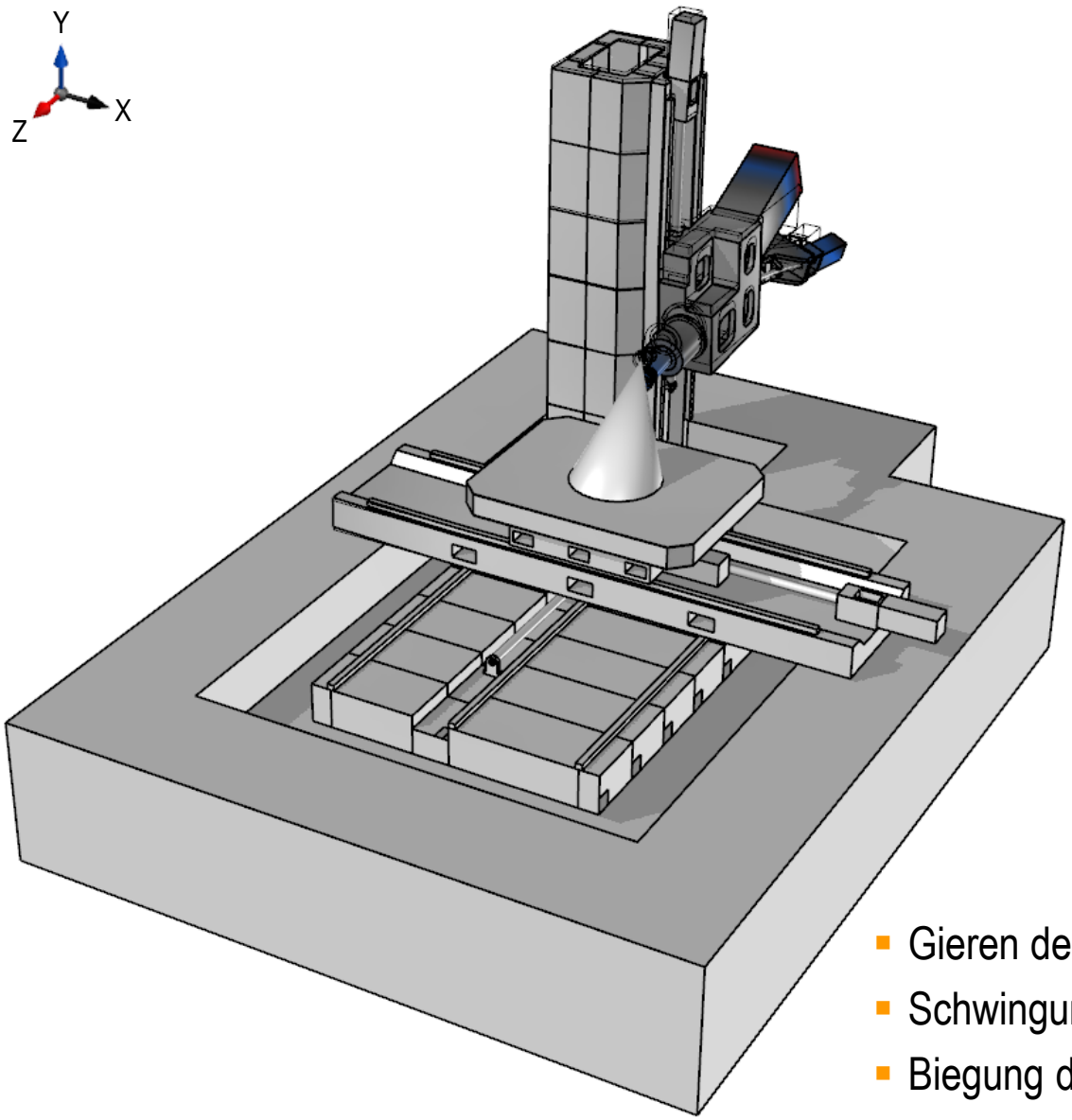


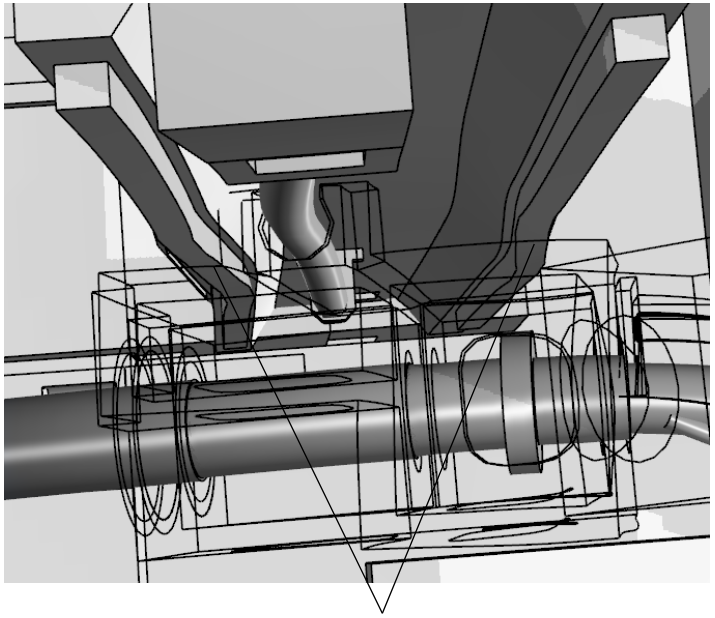
Schwingung der W-KGT-Konsole

- Torsion des Z-Schlittens
- Kippen des Tischs in Z-Richtung
- Schwingung der W-KGT-Konsole

© planlauf GmbH

Schwingungsform bei 117 Hz



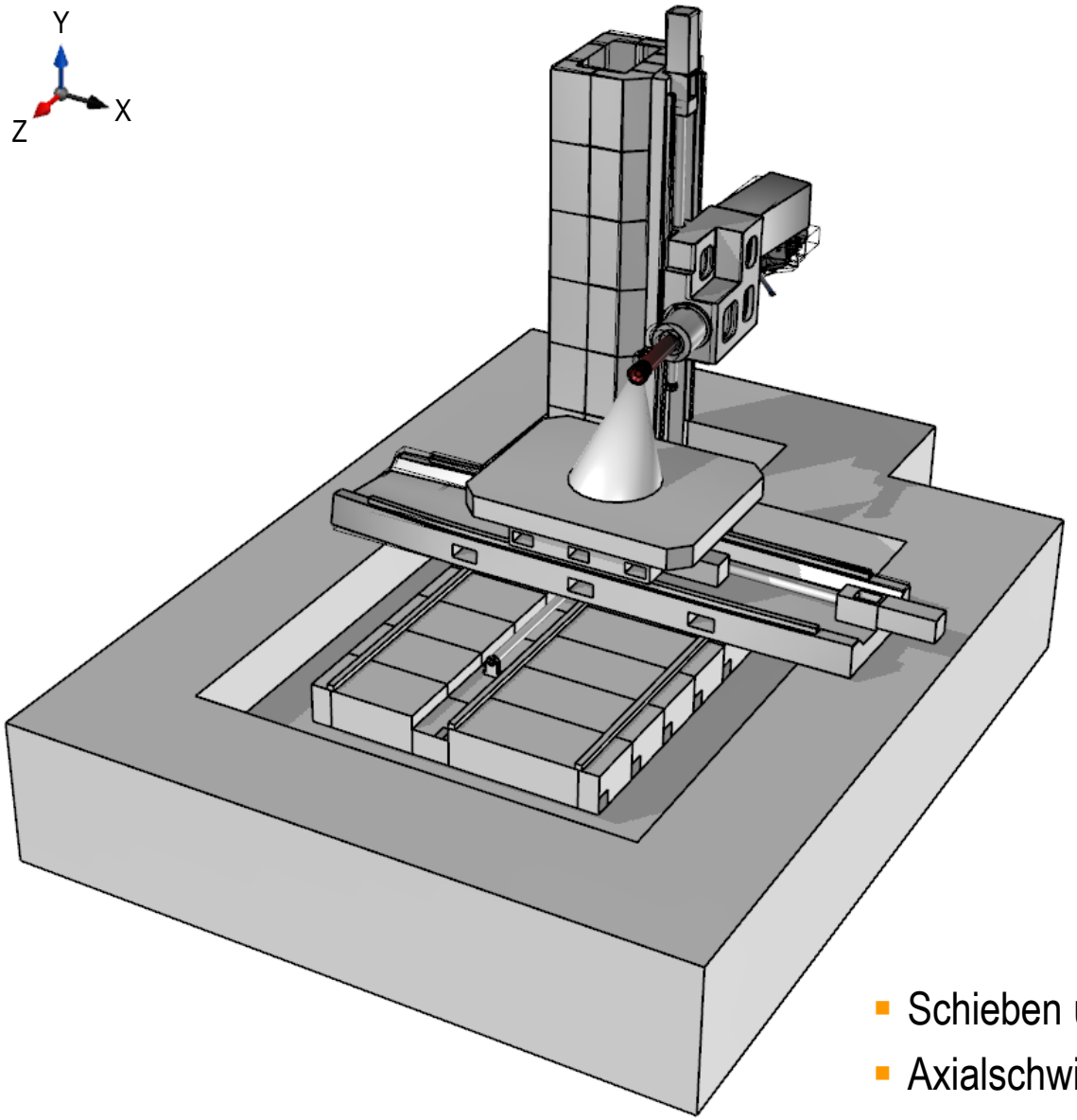


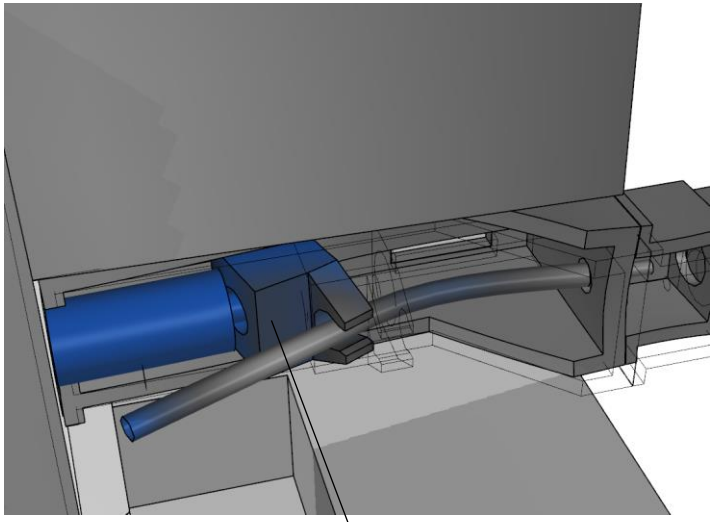
Biegung des Ständers im Bereich der Y-Führung

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

© planlauf GmbH

Schwingungsform bei 149 Hz





Schieben und Nicken des W-Schlittens

- Schieben und Nicken des W-Schlittens
- Axialschwingung der Pinole

© planlauf GmbH

Gliederung

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

© planlauf GmbH

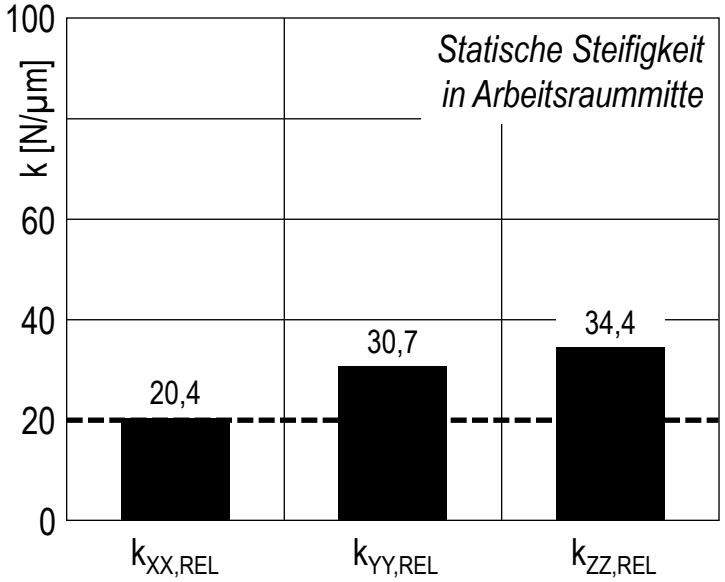
Zusammenfassung

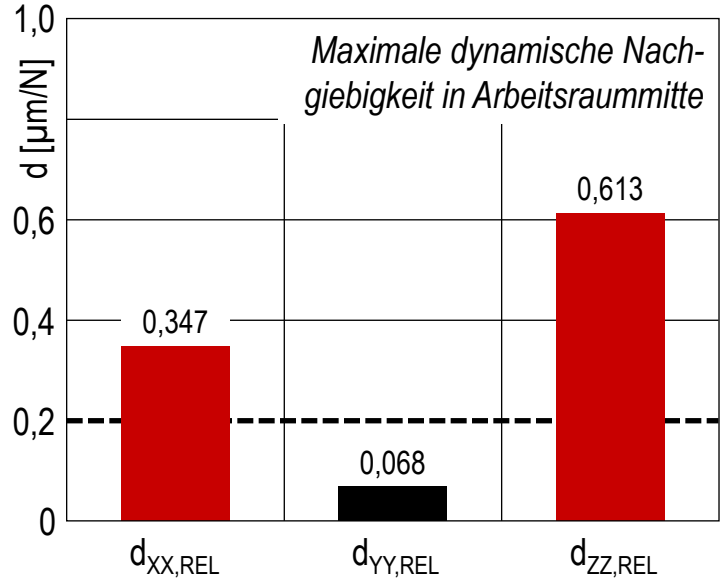
Statisches Verhalten

- Die **Zielsteifigkeit** von 20 N/µm relativ zwischen Werkzeug und Werkstück in der Arbeitsraummitte wird bereits von dem ersten Maschinenentwurf **erreicht**.
- In den höheren Y-Positionen oder mit einer weiter auskragenden Pinole ist dieser Steifigkeitswert allerdings nicht mehr erreichbar.
- Die Berechnungen der Wanderlast der X-Achse haben gezeigt, dass eine **Einschränkung des X-Verfahrwegs** von 1.600 mm auf 1.250 mm erforderlich ist, um die geforderte maximale relative Verlagerung zwischen Werkzeug und Werkstück von 10 µm einzuhalten. Alternativ könnte natürlich auch das Bett um ca. 400 mm verbreitert werden.

Dynamisches Verhalten

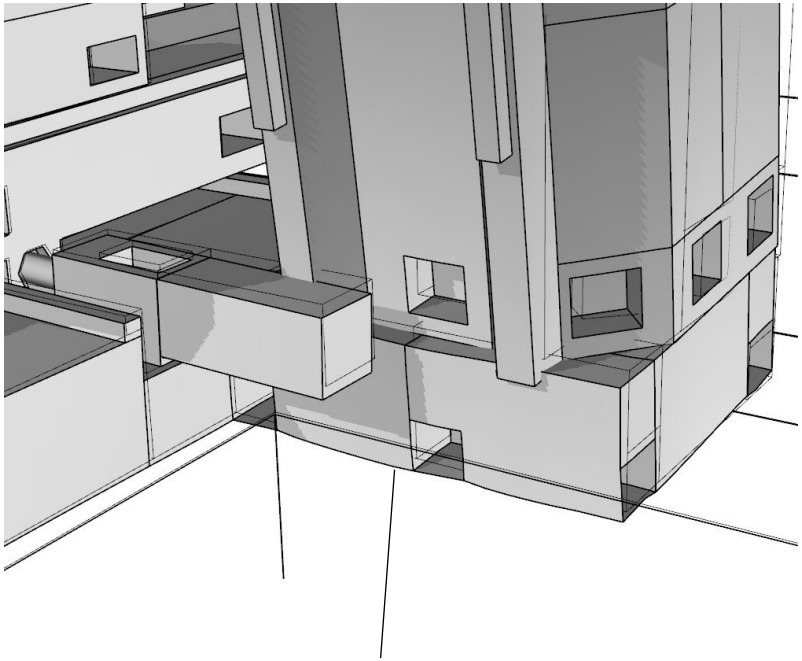
- Die geforderte maximale **dynamische Nachgiebigkeit** von 0,2 µm/N **wird in X- und Z-Richtung sehr eindeutig nicht erreicht**.
- Die identifizierten dynamischen Schwachstellen werden auf den folgenden Seiten zusammen mit den Empfehlungen näher erläutert.





© planlauf GmbH

Empfehlungen (1/6)
Dynamische Schwachstelle bei 24 Hz (X) bzw. 28 Hz (Z)



Torsion des Betts und
Einfedern in den Fixatoren

Schwingungsform

- Kippen des Ständers in X-Richtung (24 Hz)
- Kippen des Ständers in Z-Richtung (28 Hz)

Ursache

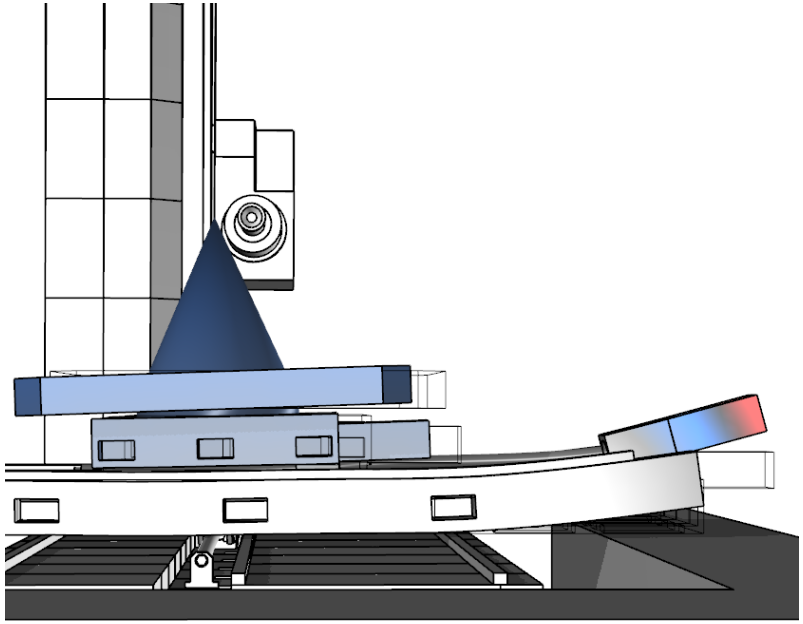
- Torsion des Betts und Einfedern in den Fixatoren

Empfehlung

- Verbreiterung des Betts im Bereich des Ständers
- Erhöhung der Fixatorenanzahl im Bereich des Ständers

© planlauf GmbH

Empfehlungen (2/6)
Dynamische Schwachstelle bei 36 Hz



Schwingungsform

- Schieben der Tischeinheit in X-Richtung
- Biegung des Z-Schlittens im Bereich des X-KGT-Festlagers

Ursache

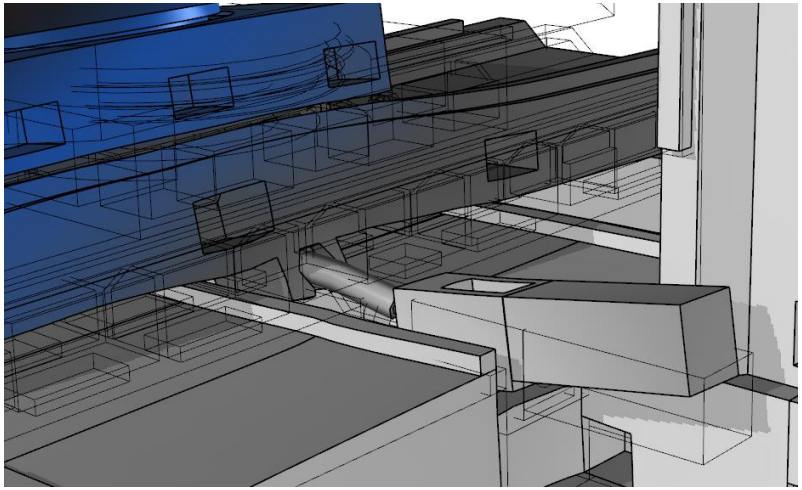
- Geringe Biegesteifigkeit des X-Schlittens bzw. großer Abstand zwischen äußerer Z-Führung und X-KGT-Festlager

Empfehlung

- Reduzierung des X-Verfahrwegs oder Verbreiterung des Betts
- Vertauschen von Fest- und Loslager
- Werkstoffwechsel für den X-Schlitten von EN-GJL-300 zu EN-GJS-400 oder Stahl

© planlauf GmbH

Empfehlungen (3/6)
Dynamische Schwachstelle bei 40 Hz



Schwingungsform

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

Ursache

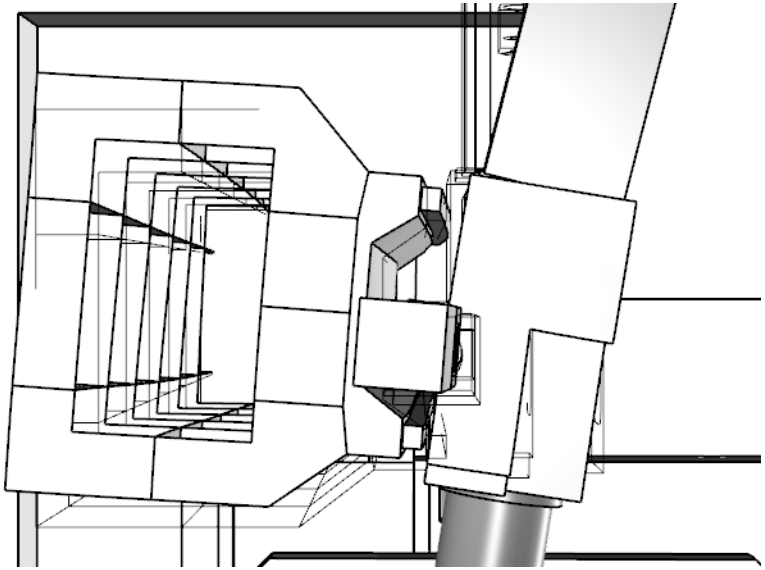
- Geringe Biegesteifigkeit des Z-Schlittens
- Beschränkung auf einen leicht außermittigen Z_KGT

Empfehlung

- Lokale Versteifung der Z-KGT-Mutternanbindung
- Werkstoffwechsel für den Z-Schlitten von EN-GJL-300 zu EN-GJS-400 oder Stahl
- Gantry-Antrieb für die Z-Achse mit 2 KGTs ∅63x20

© planlauf GmbH

Empfehlungen (4/6)
Dynamische Schwachstelle bei 62 Hz



Schwingungsform

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

Ursache

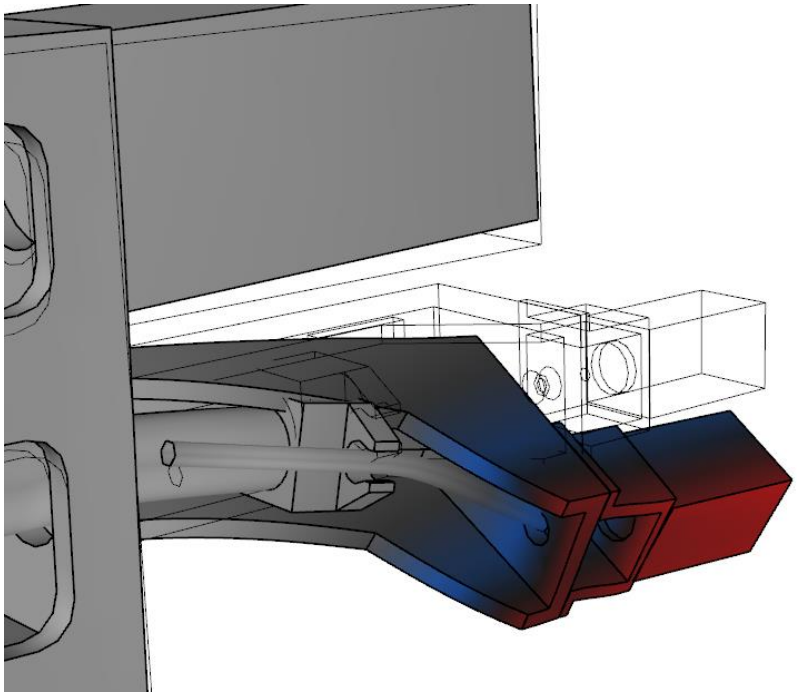
- Geringer Abstand der Y-Führungsschienen in Z-Richtung
- Geringer Querschnitt des Ständers

Empfehlung

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

© planlauf GmbH

Empfehlungen (5/6)
Dynamische Schwachstelle bei 97 Hz



Schwingungsform

- Torsion des Z-Schlittens
- Kippen des Tischs in Z-Richtung
- Schwingung der W-KGT-Konsole

Ursache

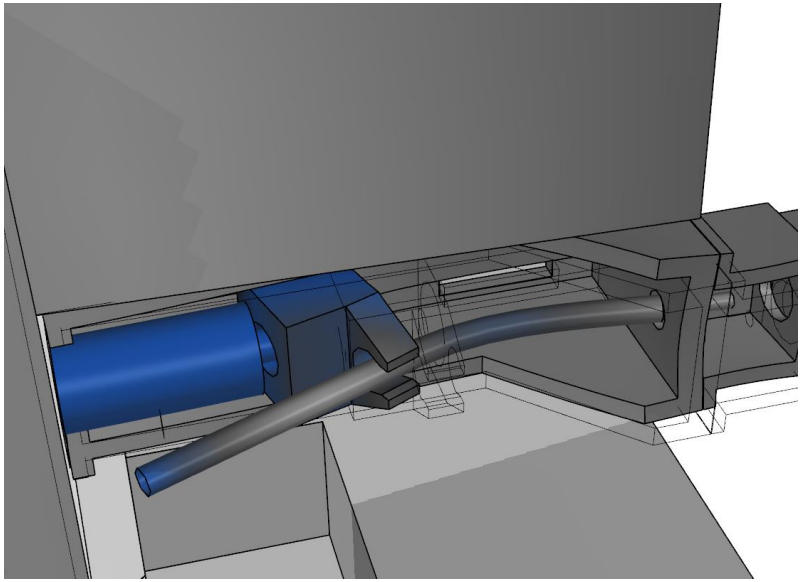
- Geringe Torsionssteifigkeit der W-KGT-Konsole

Empfehlung

- Zusätzliche Verrippung in der Y- und Z-Richtung

© planlauf GmbH

Empfehlungen (6/6)
Dynamische Schwachstelle bei 149 Hz



Schwingungsform

- Schieben und Nicken des W-Schlittens
- Axialschwingung der Pinole

Ursache

- Begrenzte Kippsteifigkeit des einzelnen W-Führungswagens
- Achsabstand zwischen der Pinole und dem W-KGT

Empfehlung

- Verwendung von zwei Führungwagen für die W-Achse
- Uniaxiale Anordnung von W-KGT und Pinole

© planlauf GmbH