planlauf

Statisches und dynamisches Verhalten einer Portalfräsmaschine für den Modellbau

- Ausgangszustand und Empfehlungen -

Dr.-Ing. Rouven Meidlinger

planlauf GmbH

Gliederung

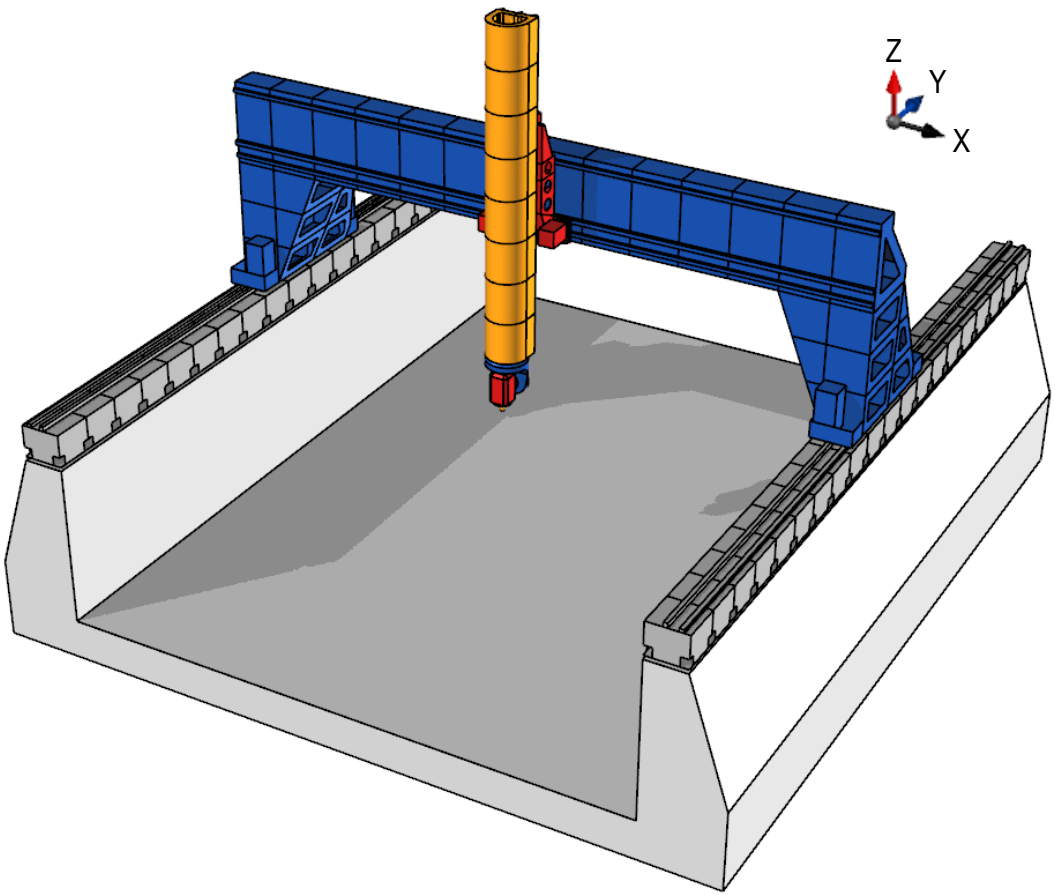
- Einleitung und Aufgabenstellung
- Statisches Verhalten
- Dynamisches Verhalten
- Zusammenfassung und Empfehlungen

© planlauf GmbH

Einleitung und Aufgabenstellung

Einleitung

- Der Auftraggeber entwickelt derzeit eine 5-achsige Portalfräsmaschine für den Modellbau (Verfahrbereiche X = 6.000 mm, Y = 8.000 mm, Z = 2.500 mm).
- Die Zielsteifigkeit in der Arbeitsraummitte liegt bei 5 N/µm. Die maximale dynamische Nachgiebigkeit sollte im Frequenzbereich von 0 bis 100 Hz einen Wert von 4 µm/N nicht überschreiten.
- Erfahrungsgemäß ermöglicht die Einhaltung dieser Werte leichte Fräsbearbeitungen in Holz und Kunststoff.

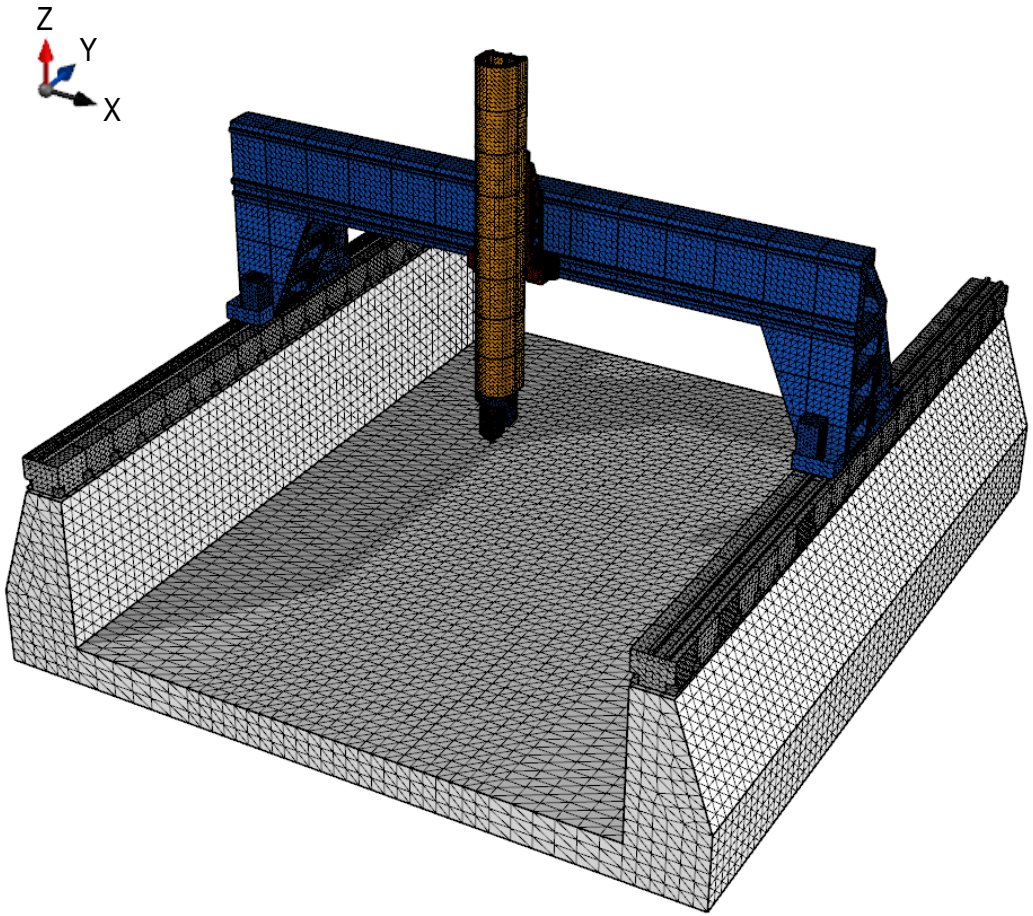


Aufgabenstellung

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

© planlauf GmbH

Aufbau des Finite-Elemente-Modells



- Führungen
  - X-Achse: INA RUE 45 E (8 Wagen / 2 Schienen)
  - Y-Achse: INA RUE 55 E (8 Wagen / 2 Schienen)
  - Z-Achse: INA RUE 45 E (6 Wagen / 2 Schienen)
- Antriebe: elektrisch verspannte Ritzel/Zahnstangen-Antrieben in allen Achsen
- Hauptspindel (//\ M Z)
  - Vorne: 3x FAG HCB7016E.UL
  - Hinten: Zylinderrollenlager FAG N1914K mit halber Rollenanzahl
  - Werkzeug: ∅50x80
- B-Achse: INA YRT 150 mit Klemmung
- C-Achse: INA YRT 260 mit Klemmung
- Werkstoffe
  - Fundament: Beton
  - Kopf- und Spindelgehäuse: Aluminiun
  - alle anderen Bauteile: Stahl

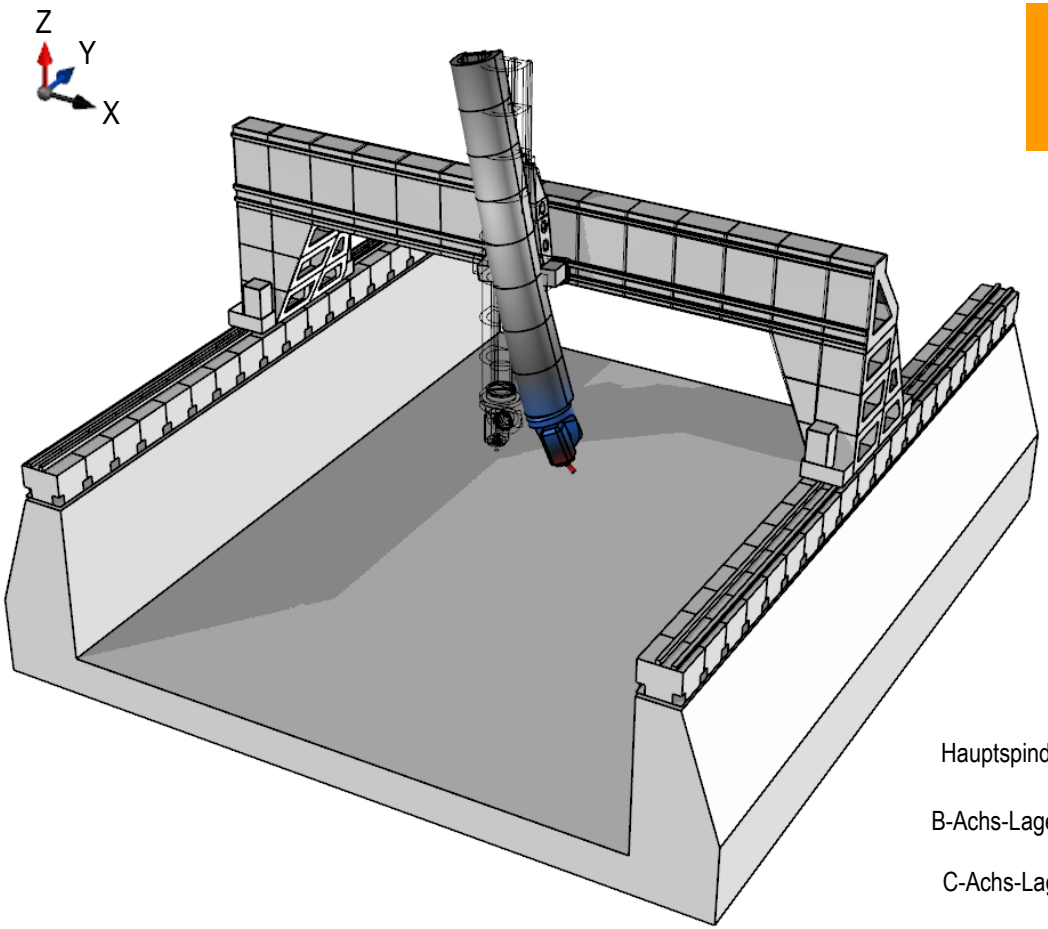
© planlauf GmbH

Gliederung

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

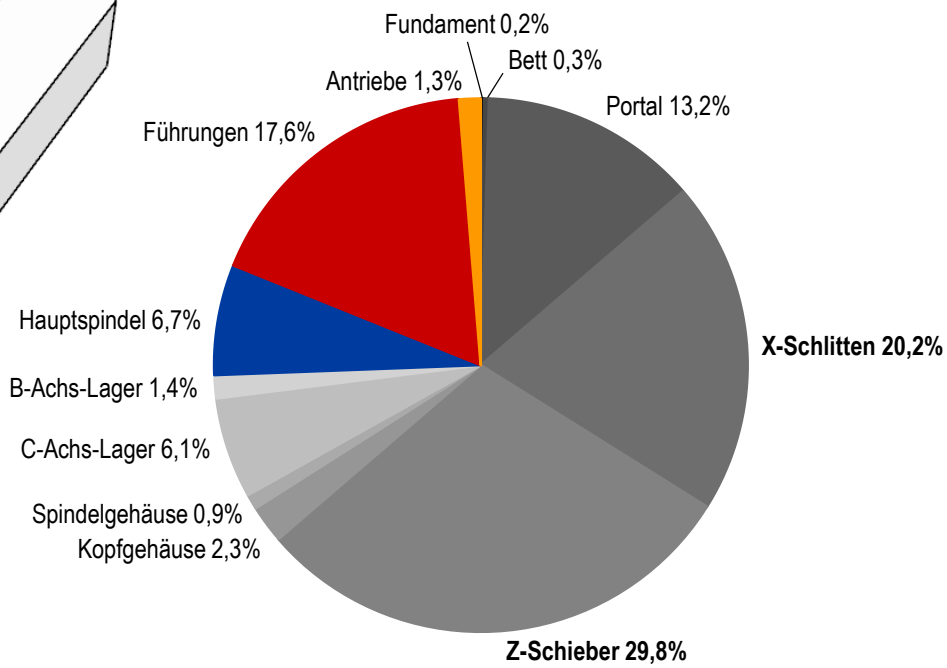
© planlauf GmbH

Statische Steifigkeit in X-Richtung



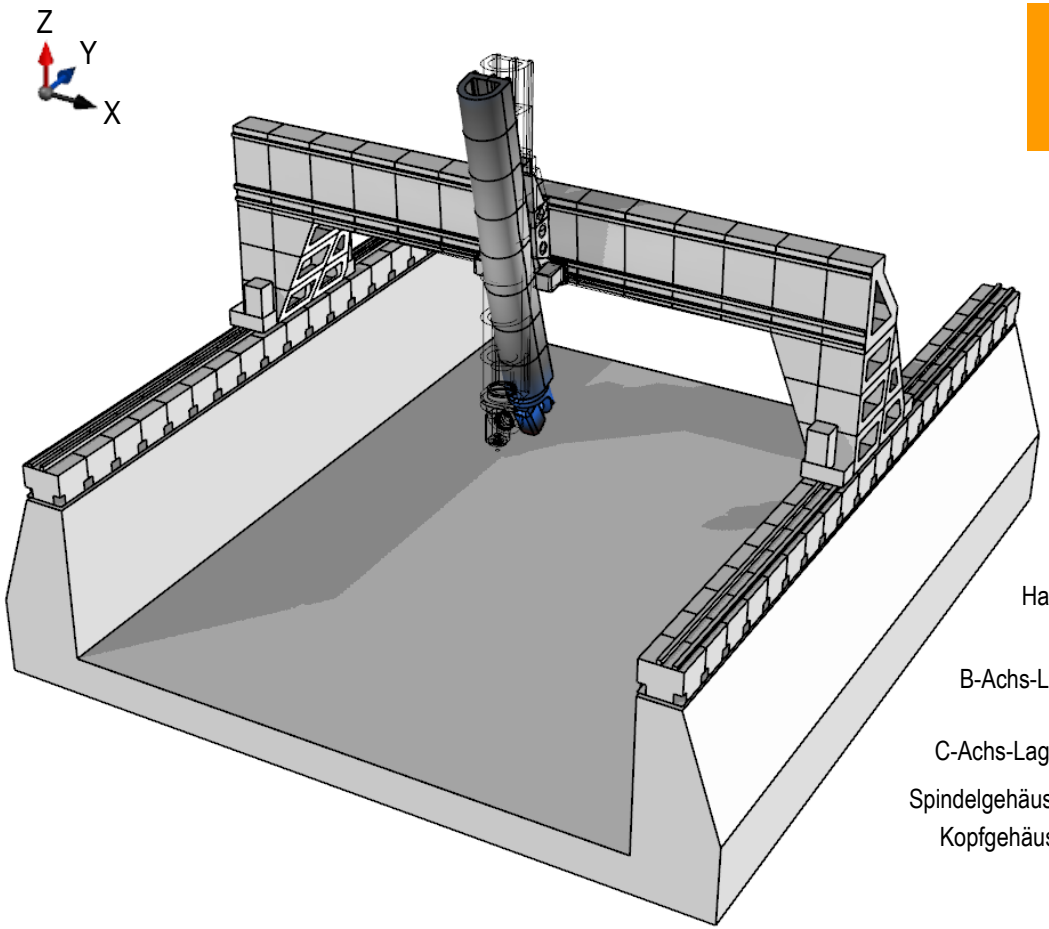
Statische Steifigkeit in X-Richtung
k_{XX} = 5,0 N/µm

Anteile der einzelnen Komponenten an der Gesamtverformung



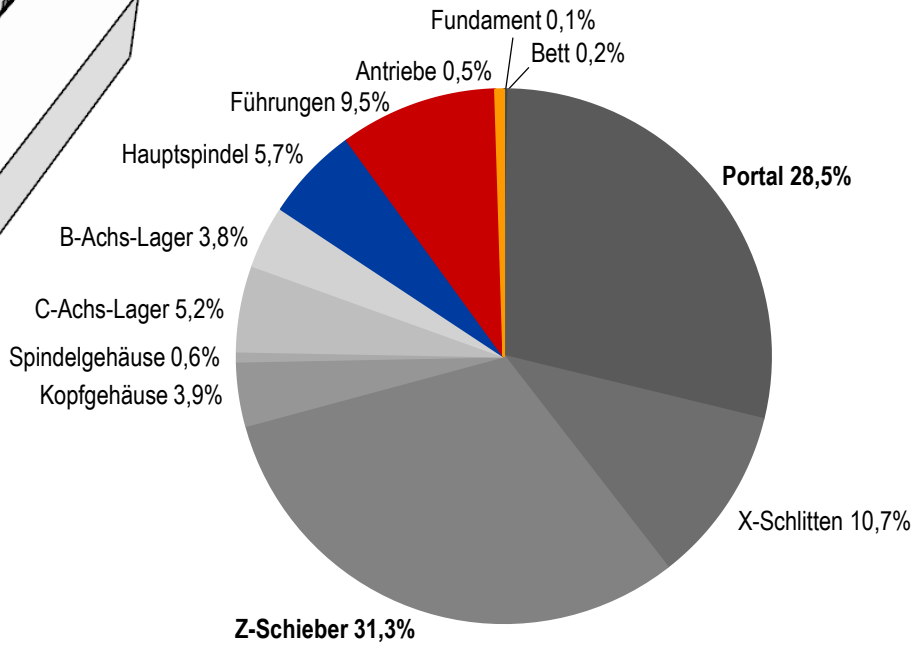
© planlauf GmbH

Statische Steifigkeit in Y-Richtung



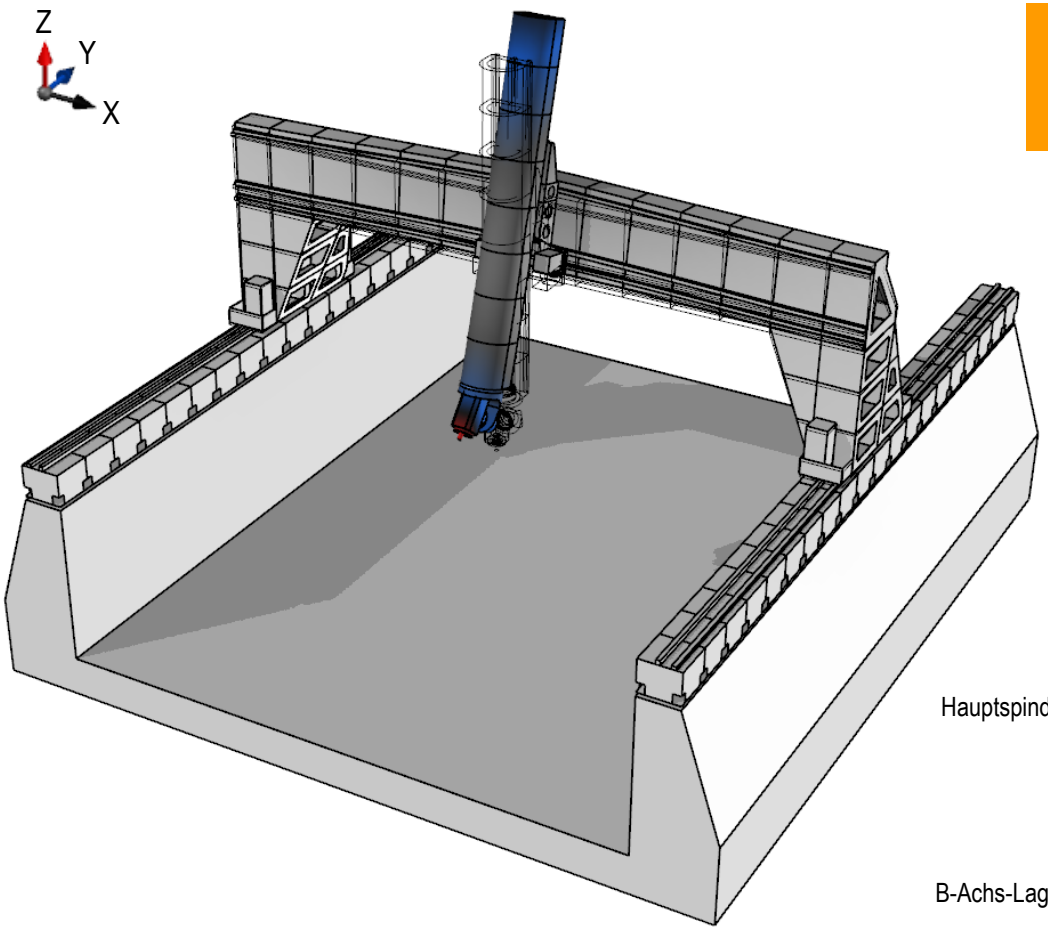
Statische Steifigkeit in Y-Richtung
k_{YY} = 4,2 N/µm

Anteile der einzelnen Komponenten
an der Gesamtverformung



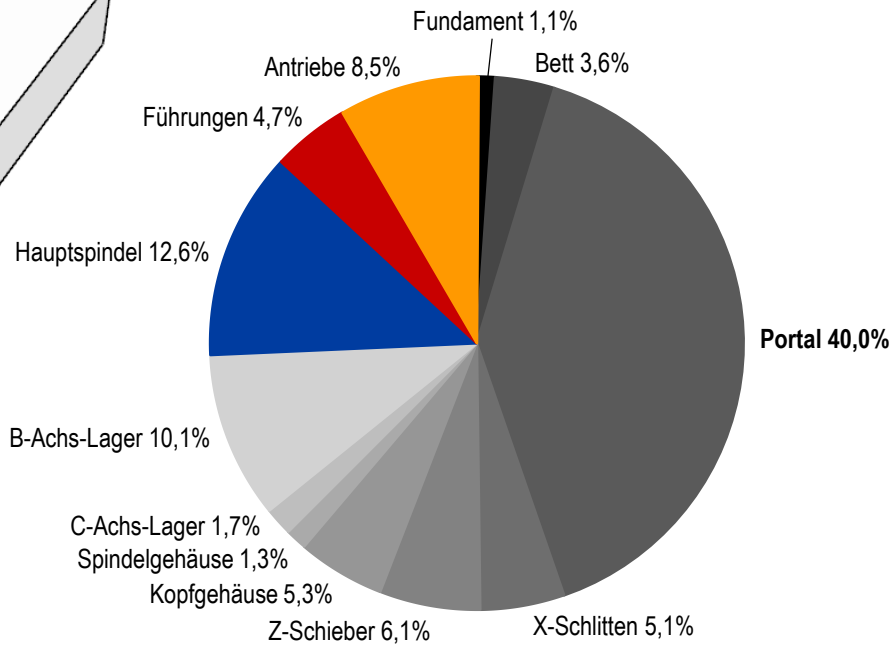
© planlauf GmbH

Statische Steifigkeit in Z-Richtung



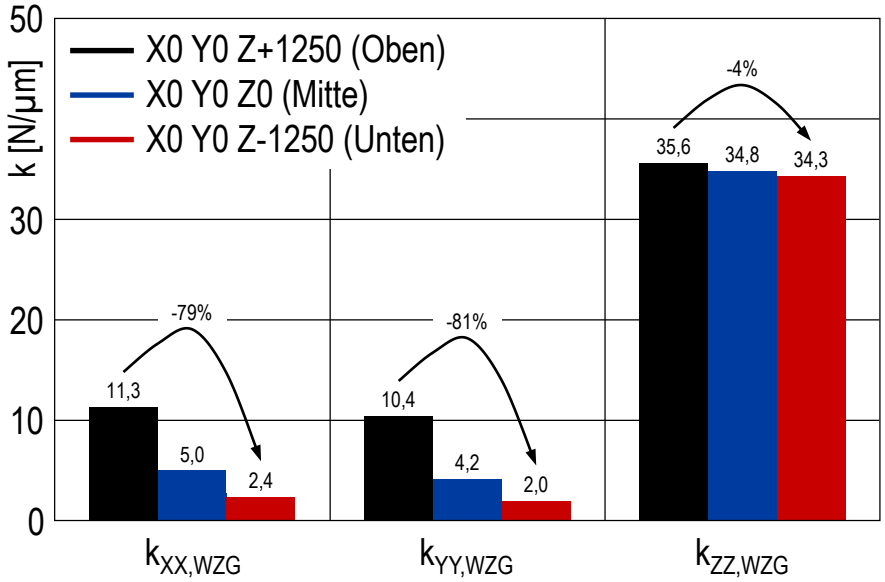
Statische Steifigkeit in Z-Richtung
k_{ZZ} = 34,8 N/µm

Anteile der einzelnen Komponenten
an der Gesamtverformung



© planlauf GmbH

Gegenüberstellung der statischen Steifigkeiten in Abhängigkeit der Z-Position



- Die werkzeugseitigen Steifigkeiten in X- und Y-Richtung sinken bei maximaler Auskragung auf 1/5 der Werte der eingefahrenen Z-Position ab.
- Die geforderte **Mindeststeifigkeit in Arbeitsraummitte von 5 N/µm** wird in X-Richtung erreicht. In Y-Richtung liegt die Steifigkeit allerdings mit 4,2 N/µm deutlich unter dem Zielwert (16%).

© planlauf GmbH

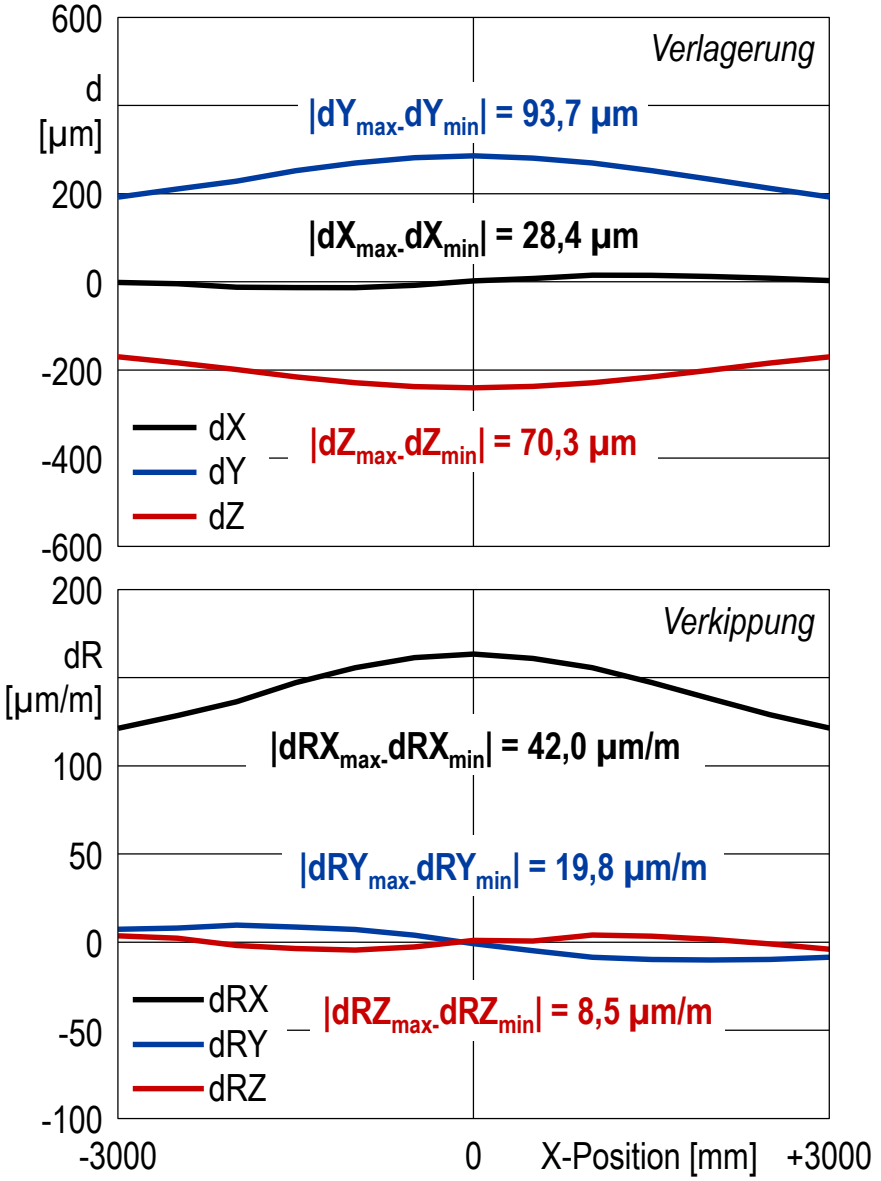
Gliederung

- Einleitung und Aufgabenstellung
- Statisches Verhalten – *Verformung unter Eigengewicht der X-Achse*
- Dynamisches Verhalten
- Zusammenfassung und Empfehlungen

© planlauf GmbH

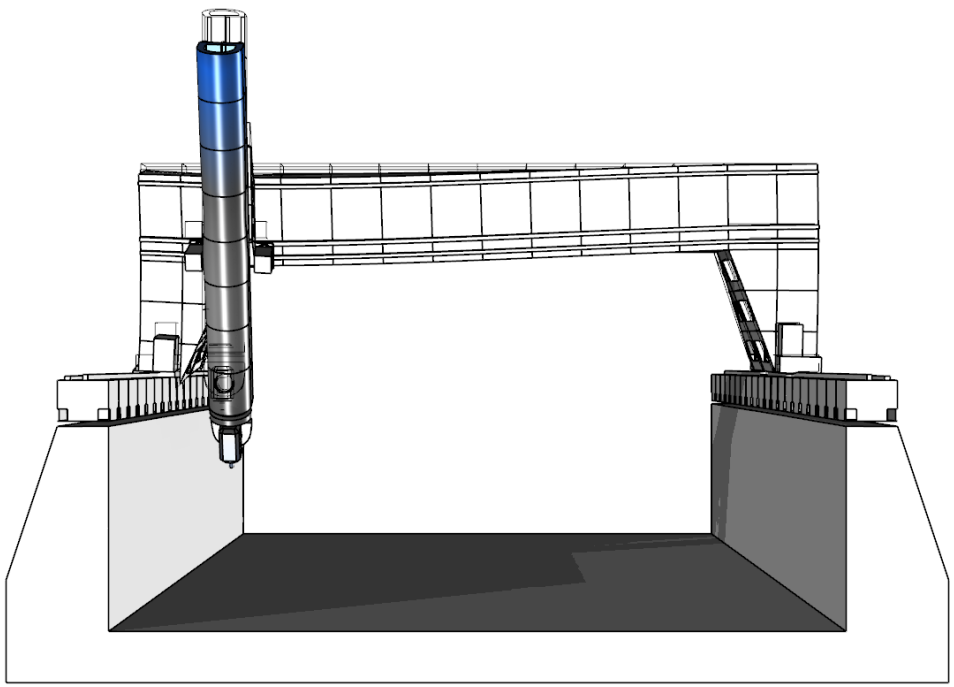
Verformung unter dem Eigengewicht der X-Achse Zusammenfassung

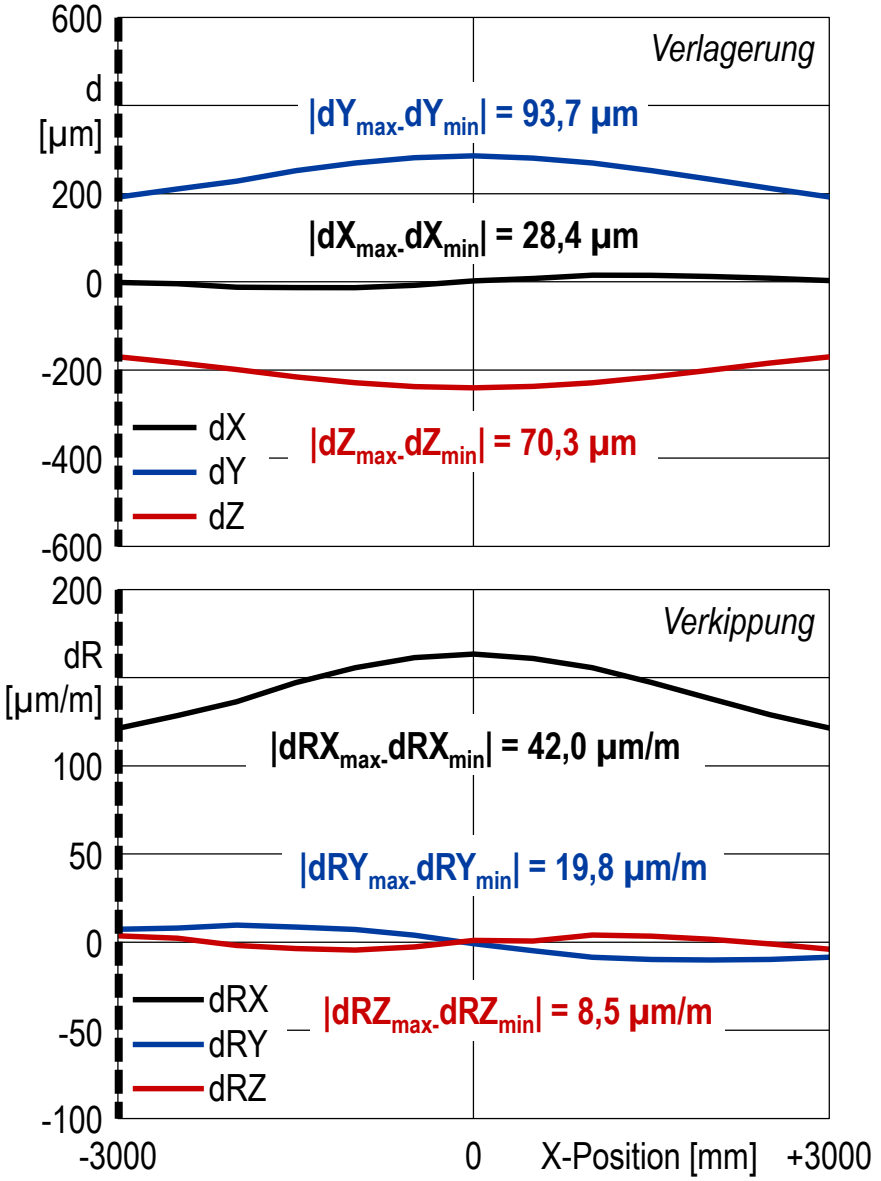
- Die maximalen Verlagerungen treten mit 94 µm in der Y-Richtung auf. Die Ursache liegt in einer Torsion des Querbalkens mit einer entsprechenden Schiefstellung der Z-Schiebers.
- Diese Schiefstellung zeigt sich auch in der Verkippung um die X-Achse von 42 µm/m. Bei einem voll auskragenden Z-Schieber liegt die Verlagerung in Y-Richtung bei 94 µm + 1,25 m * 42 µm/m = 146 µm.
- **Die Torsionssteifigkeit des Querbalkens und damit die Verformung unter Eigengewicht der X-Achse kann durch eine Vergrößerung des Querschnitts (vor allem im oberen abgeschrägten Bereich) verbessert werden.**



© planlauf GmbH

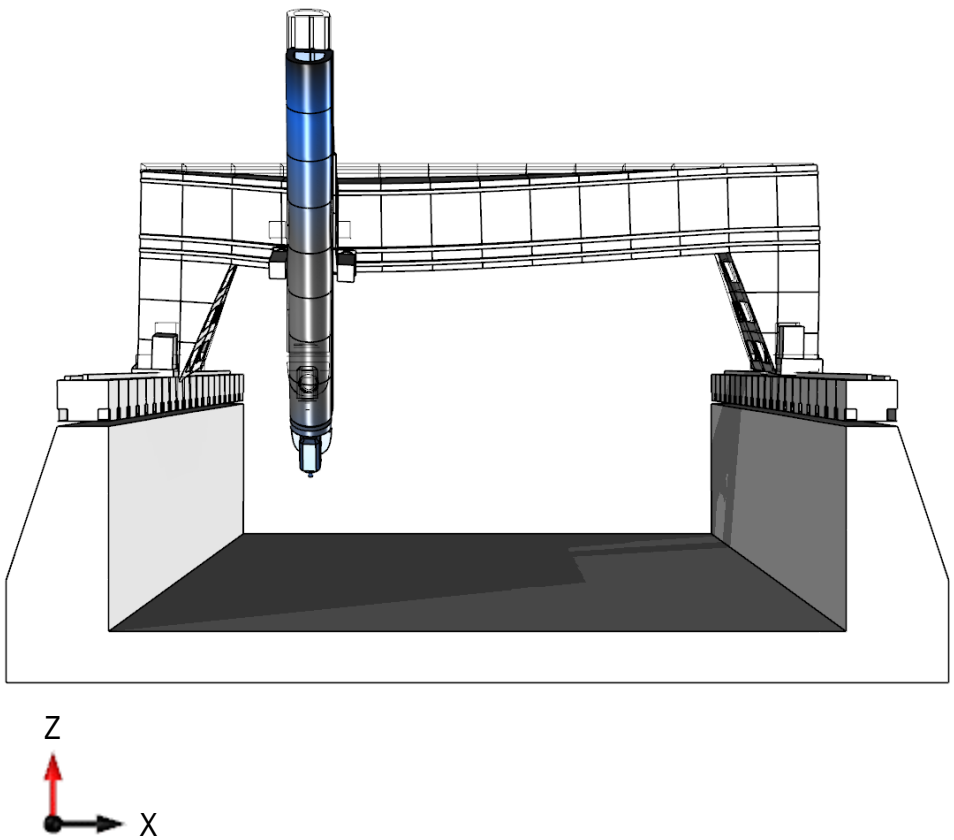
Verformung unter dem Eigengewicht der X-Achse
X-Position -3.000 mm

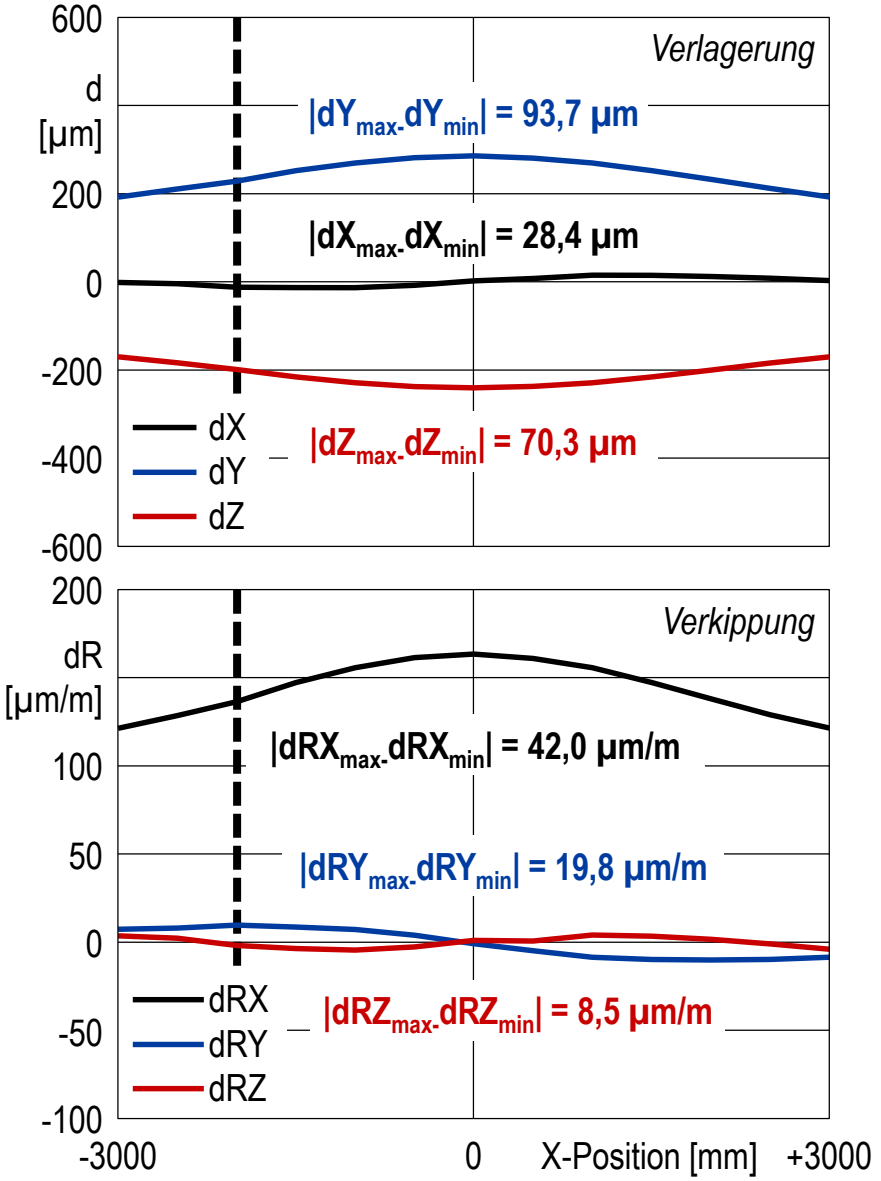




© planlauf GmbH

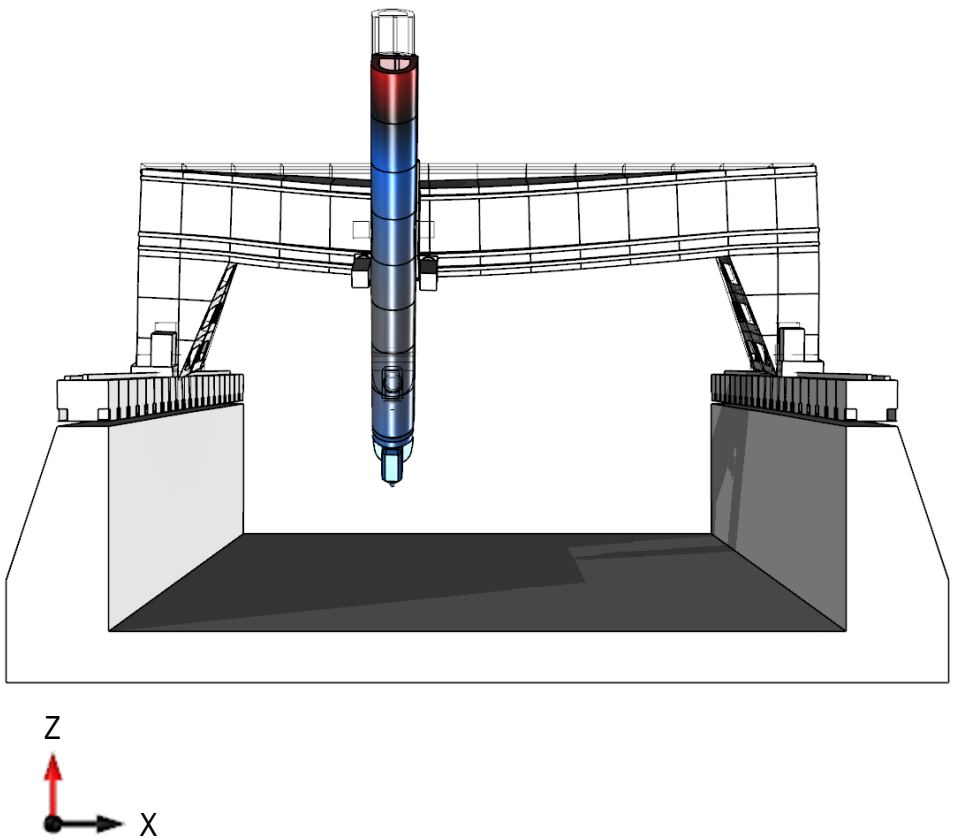
Verformung unter dem Eigengewicht der X-Achse
X-Position -2.000 mm

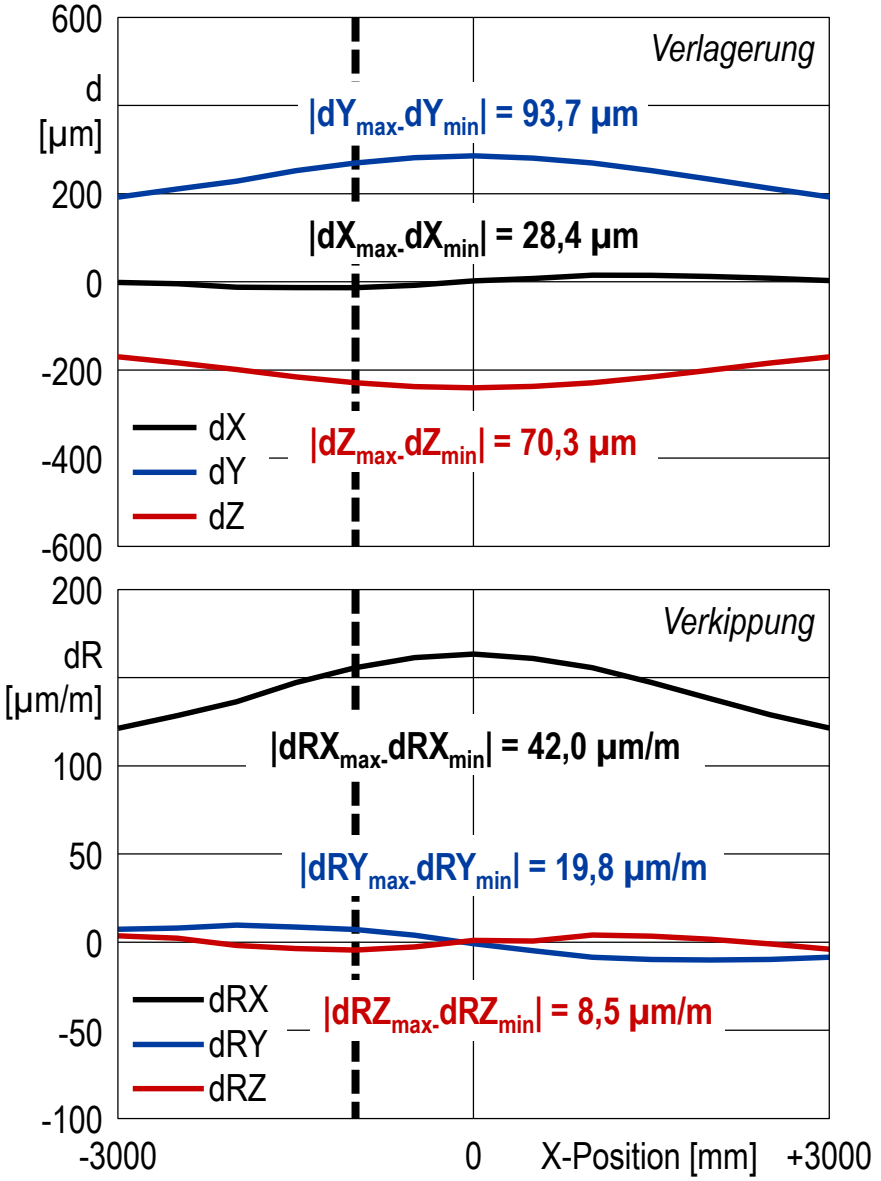




© planlauf GmbH

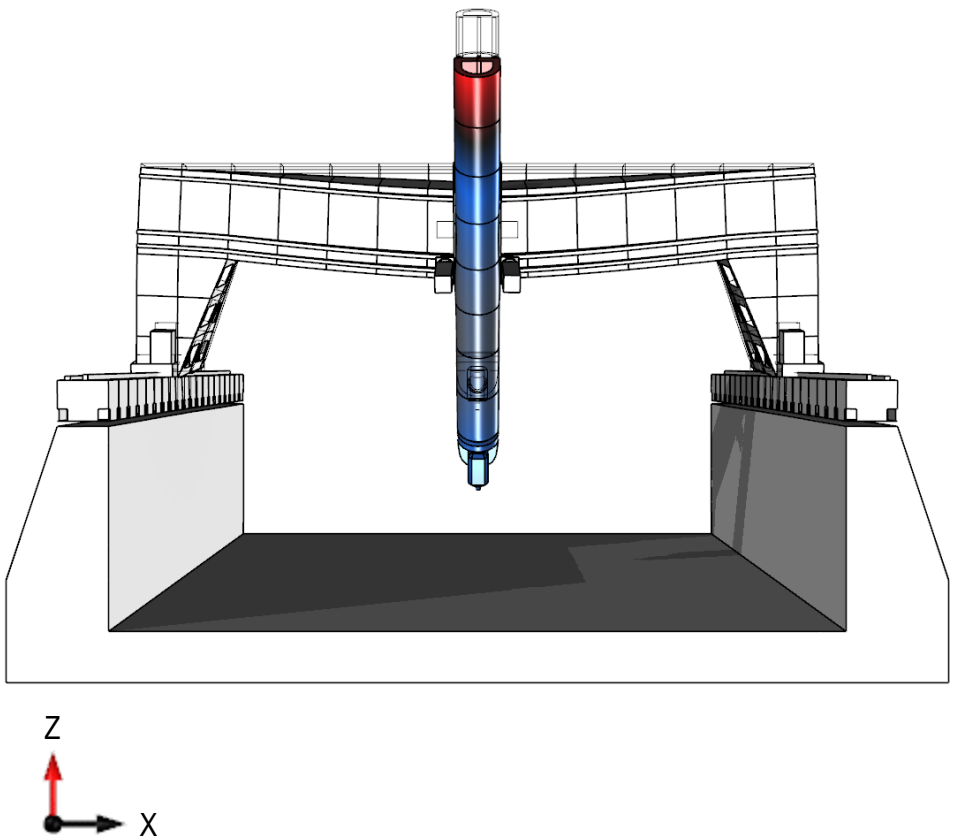
Verformung unter dem Eigengewicht der X-Achse
X-Position -1.000 mm

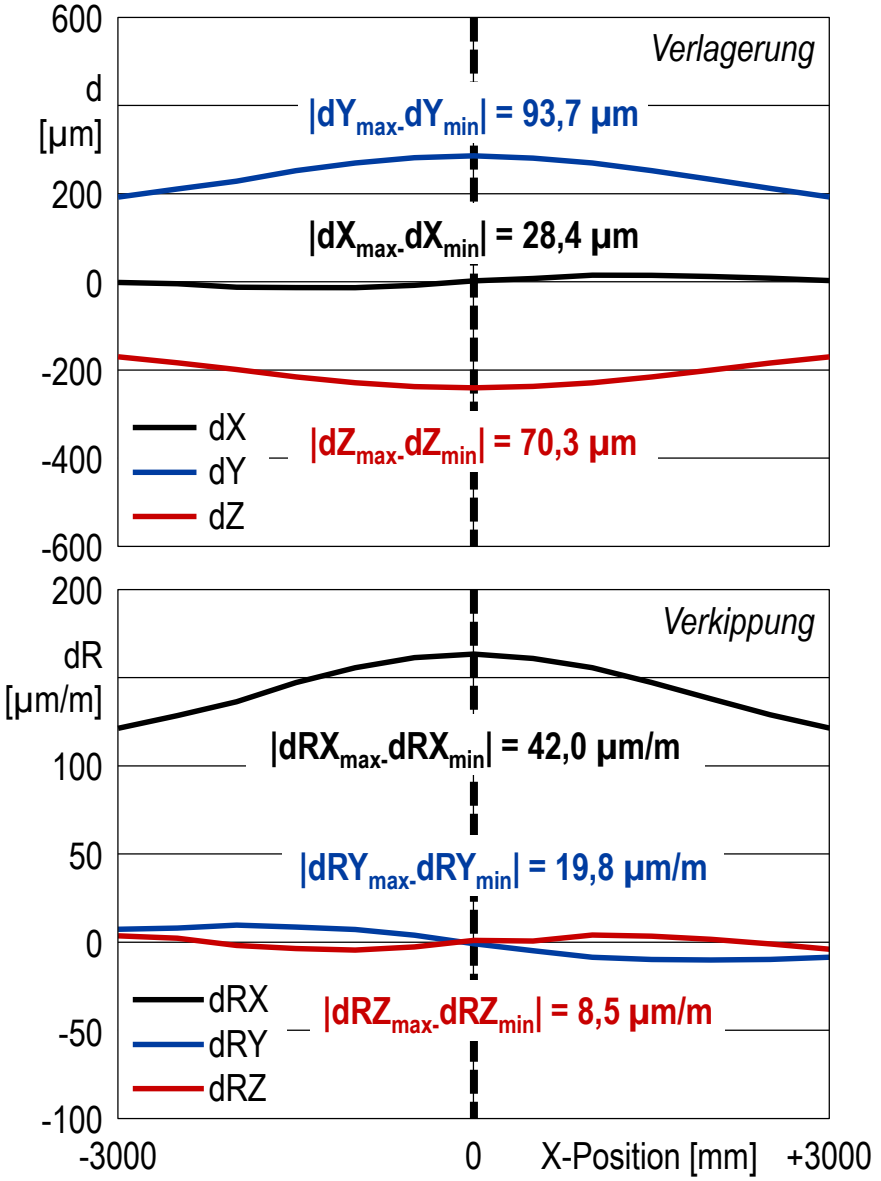




© planlauf GmbH

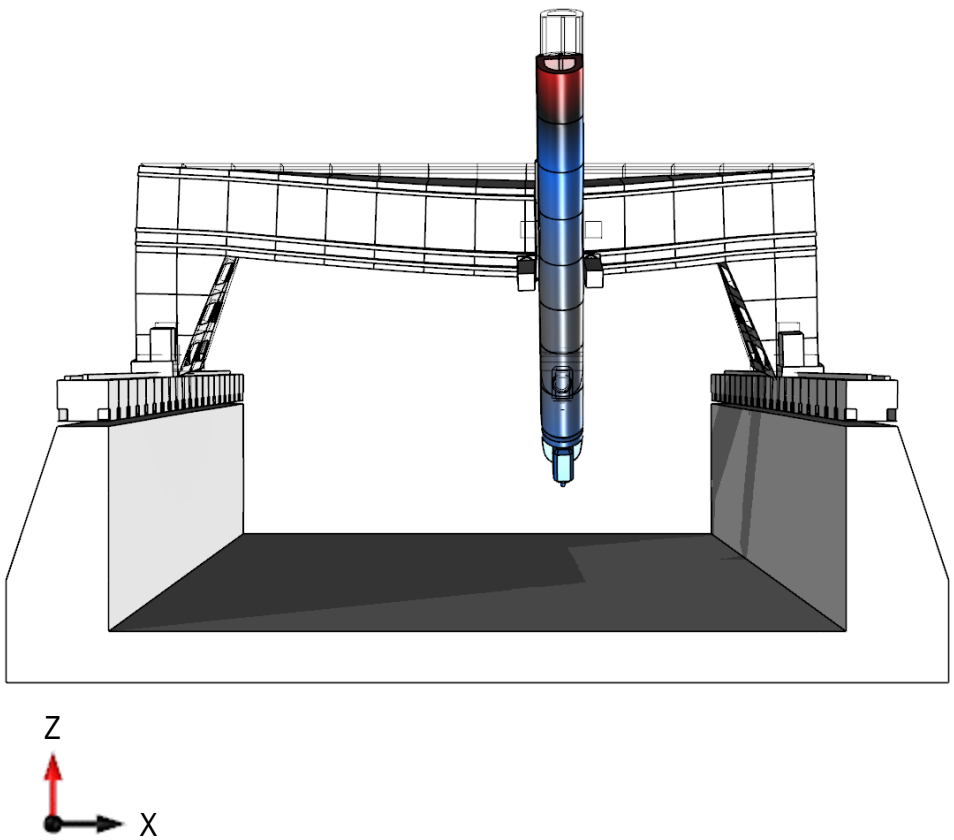
Verformung unter dem Eigengewicht der X-Achse
X-Position 0 mm

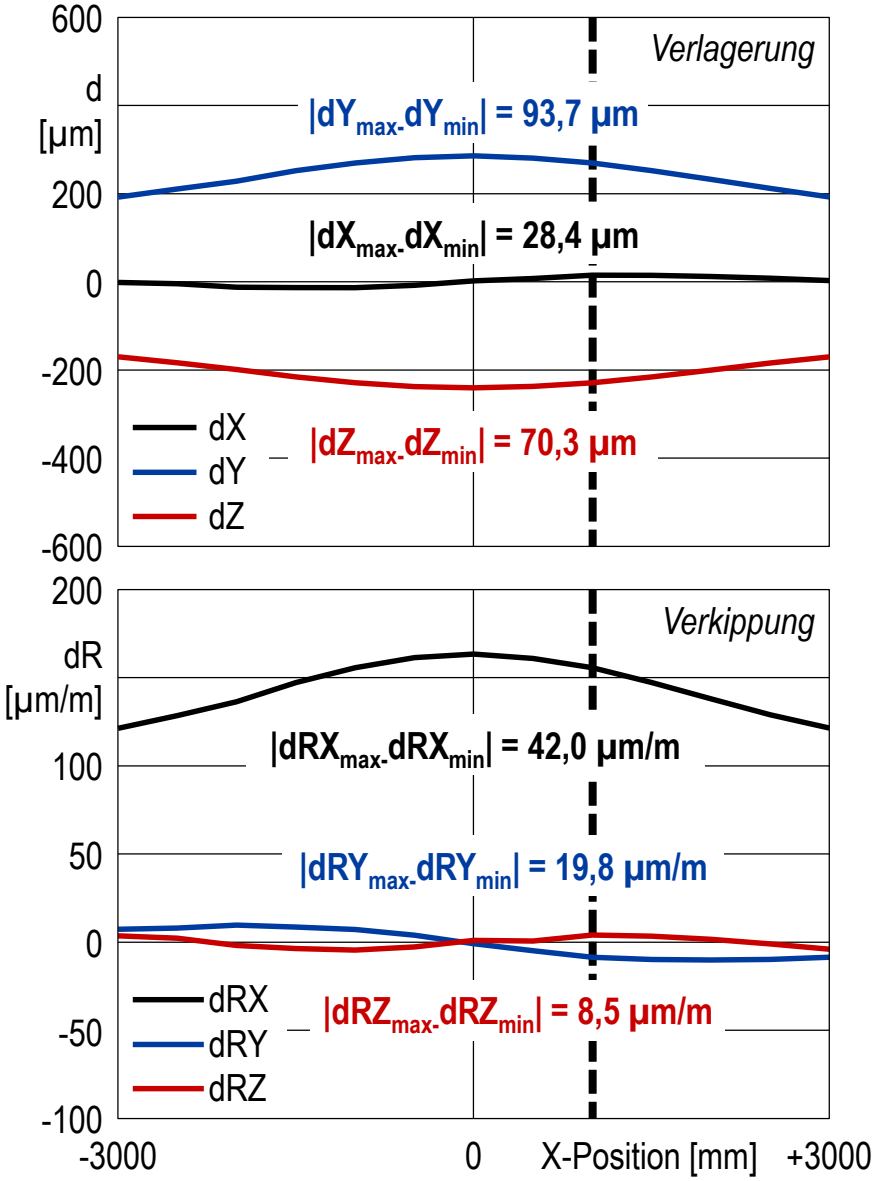




© planlauf GmbH

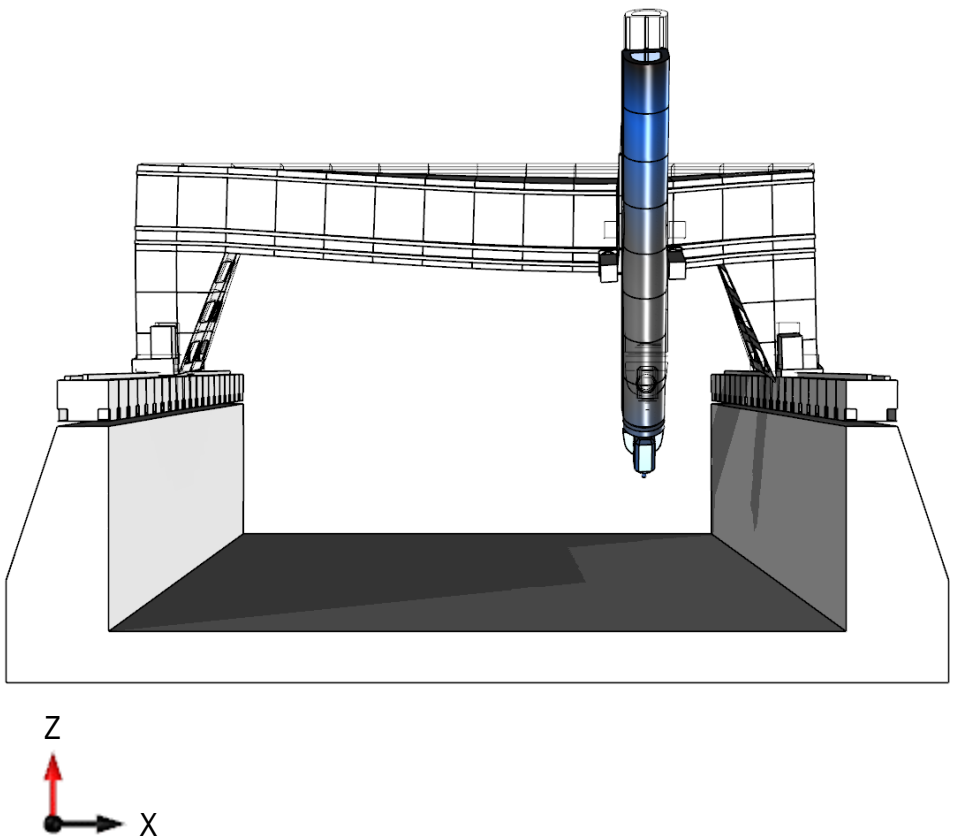
Verformung unter dem Eigengewicht der X-Achse
X-Position +1.000 mm

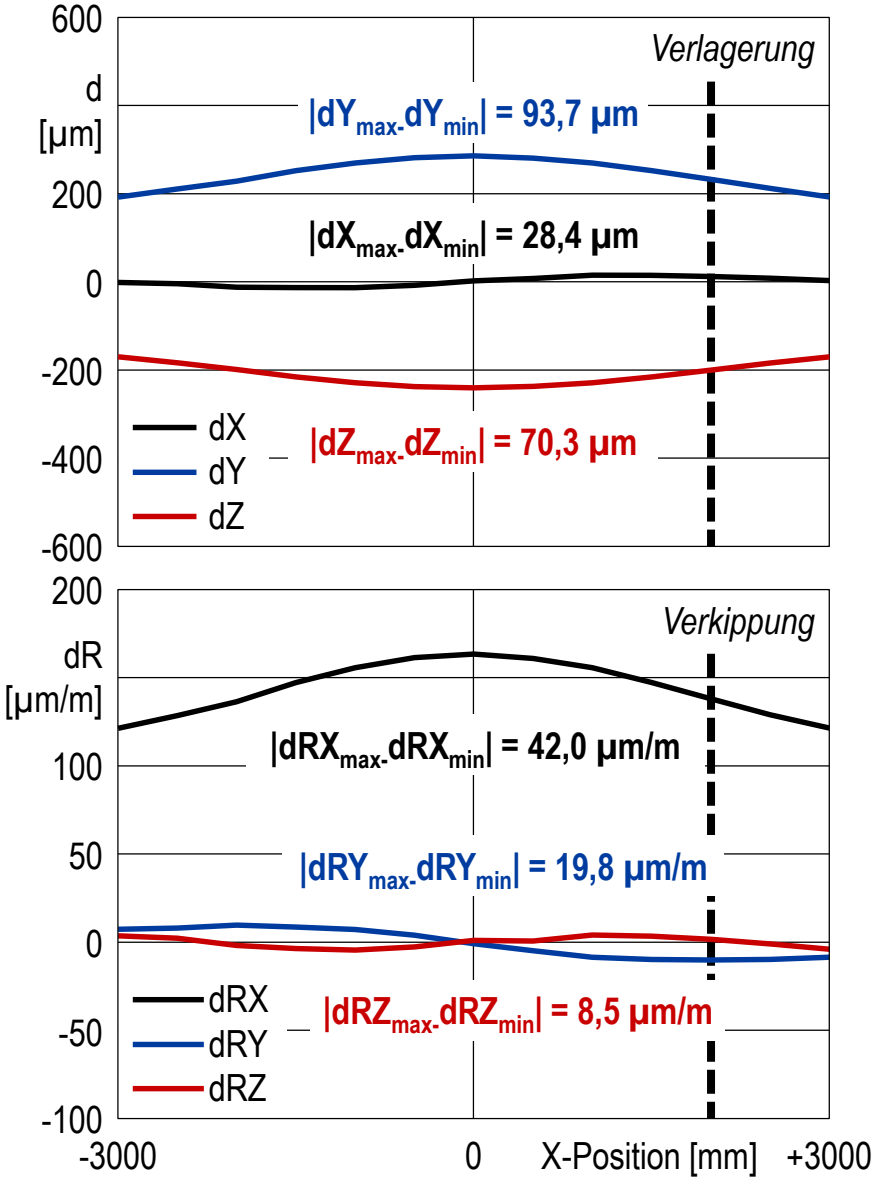




© planlauf GmbH

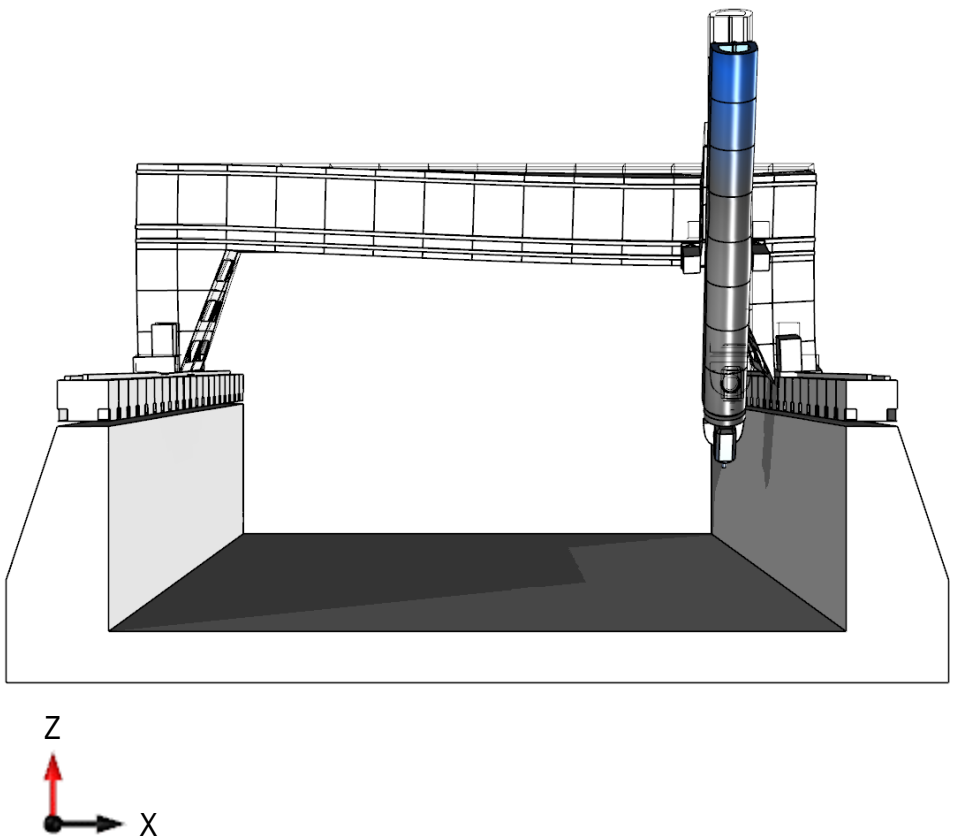
Verformung unter dem Eigengewicht der X-Achse
X-Position +2.000 mm

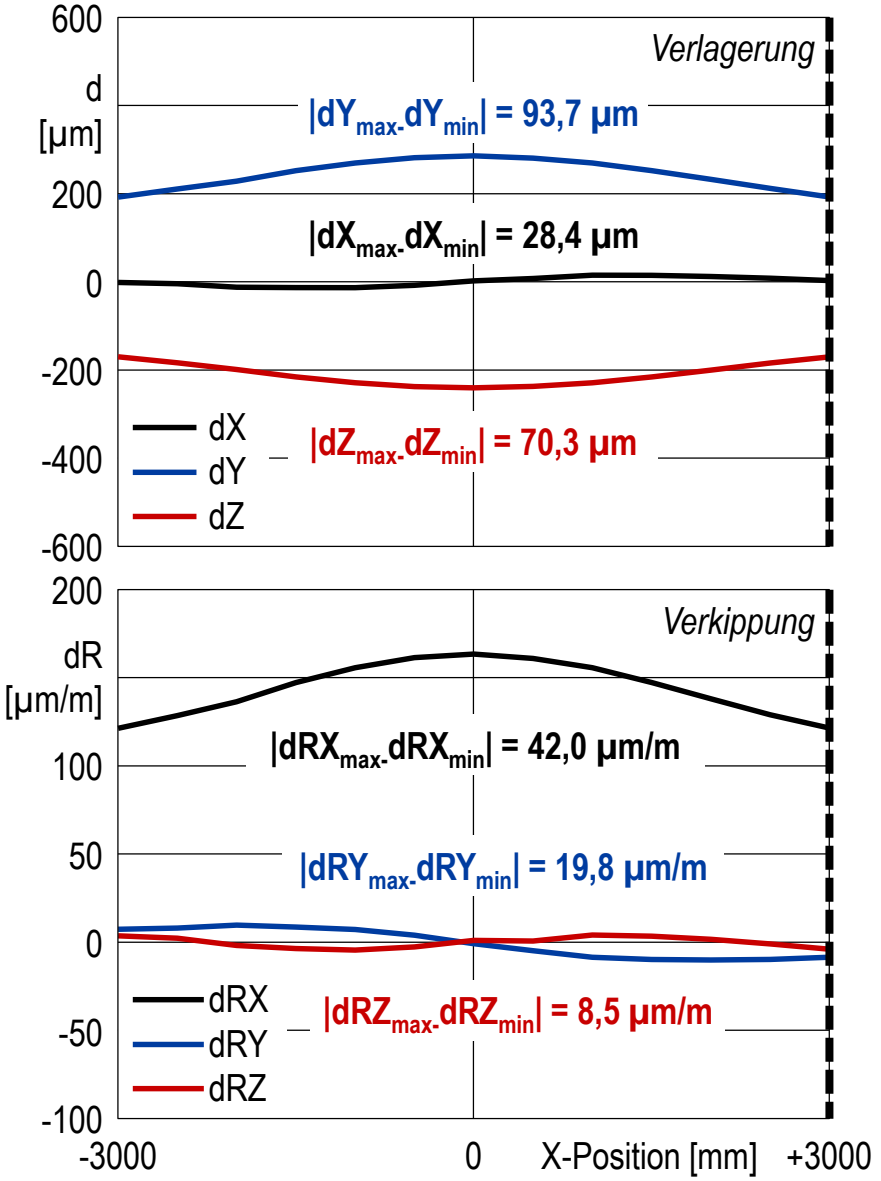




© planlauf GmbH

Verformung unter dem Eigengewicht der X-Achse
X-Position +3.000 mm





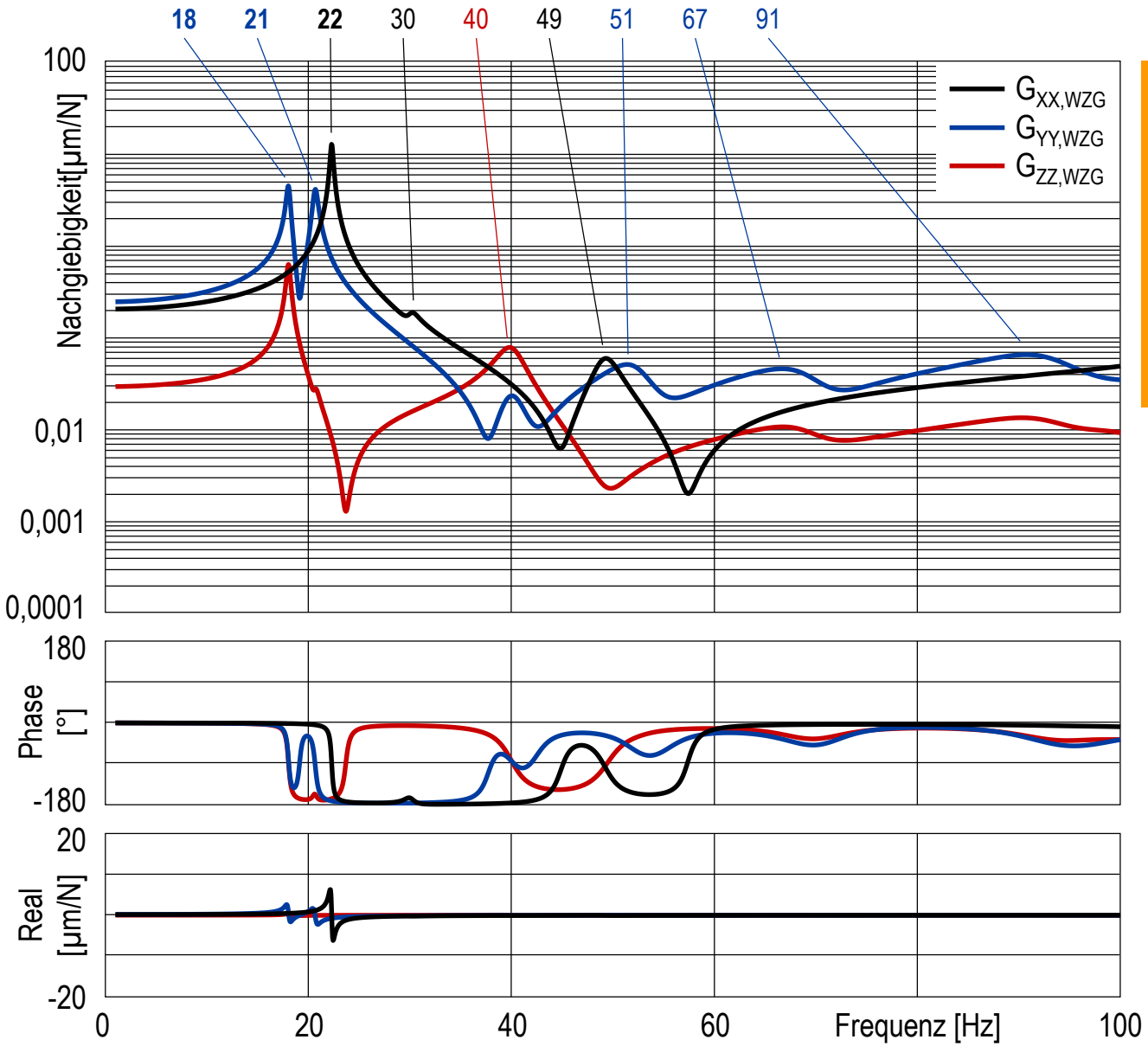
© planlauf GmbH

Gliederung

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

© planlauf GmbH

Nachgiebigkeitsfrequenzgänge



Dominante Resonanzfrequenzen

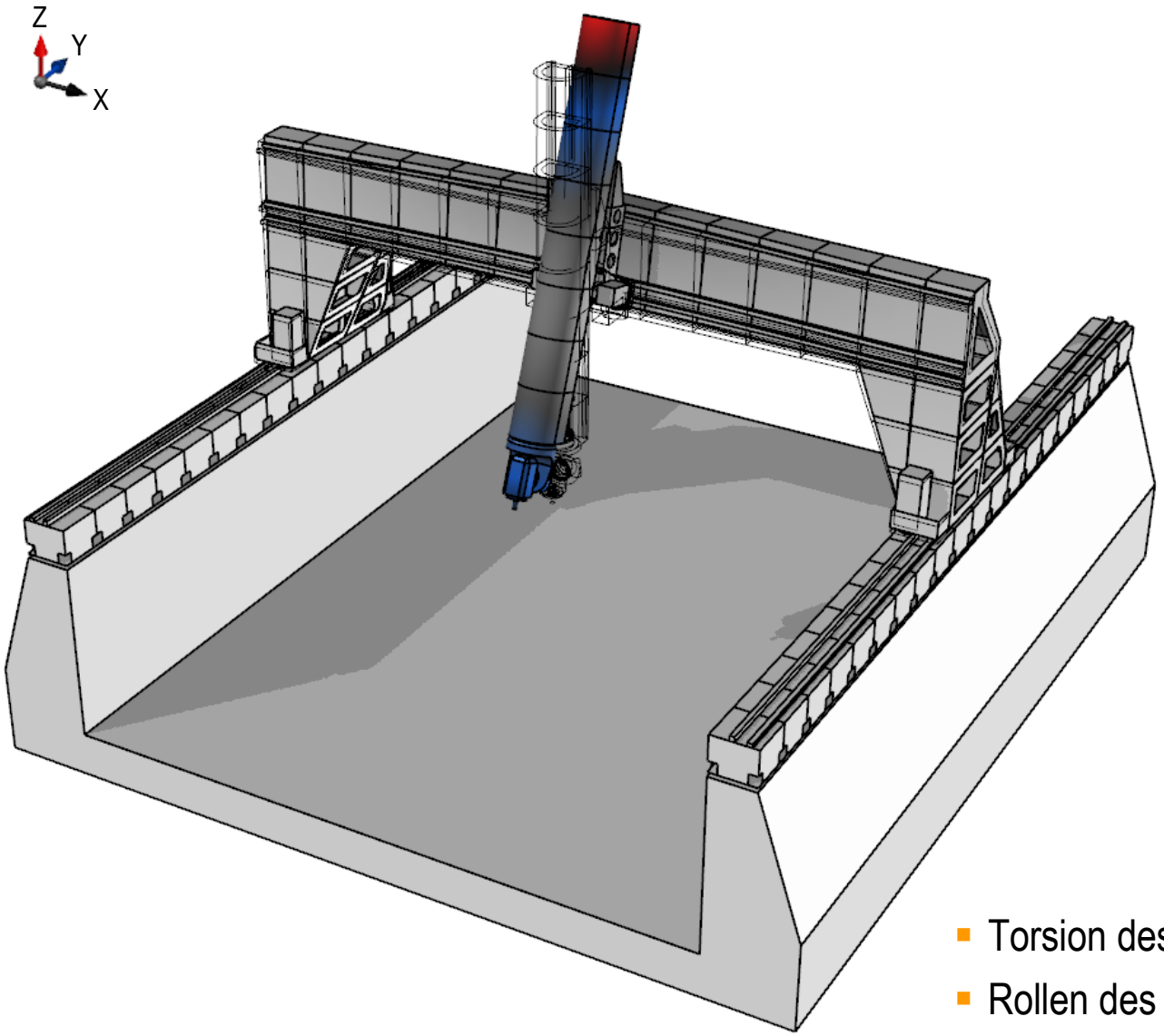
18 Hz
- Torsion des Querbalkens
- Rollen des X-Schlittens

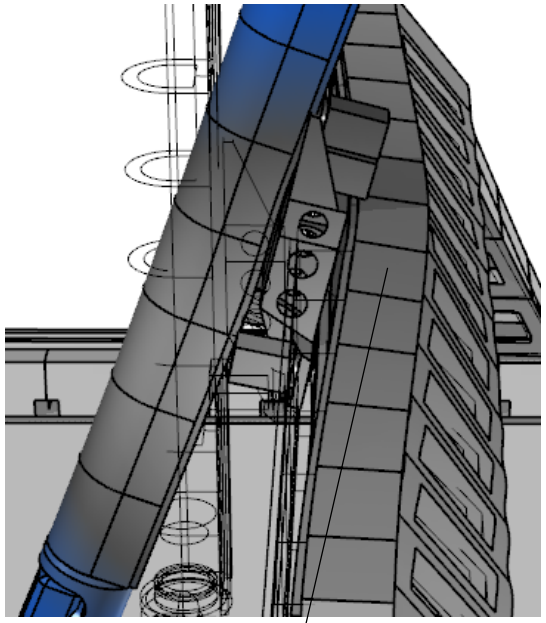
21 Hz
- Biegung des Querbalkens
- Biegung des Z-Schiebers

22 Hz
- Pendeln des Z-Schiebers in X-Richtung
- Biegung und Torsion des X-Schlittens

© planlauf GmbH

Schwingungsform bei 18 Hz



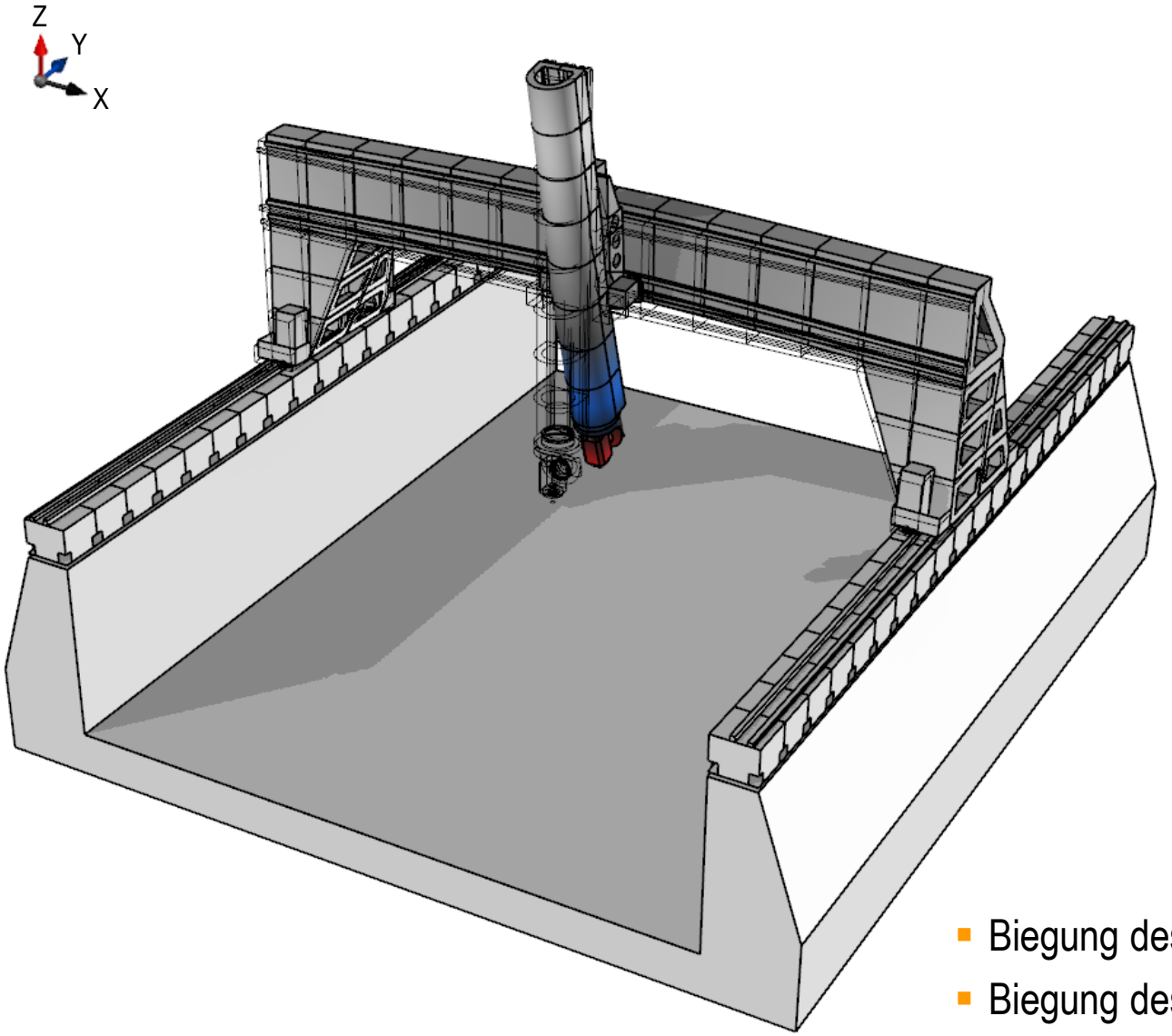


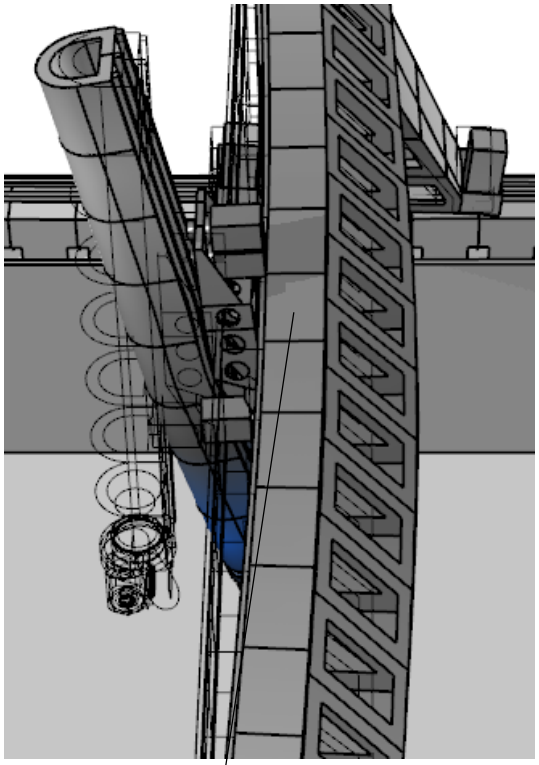
Torsion des Querbalkens

- Torsion des Querbalkens
- Rollen des X-Schlittens

© planlauf GmbH

Schwingungsform bei 21 Hz



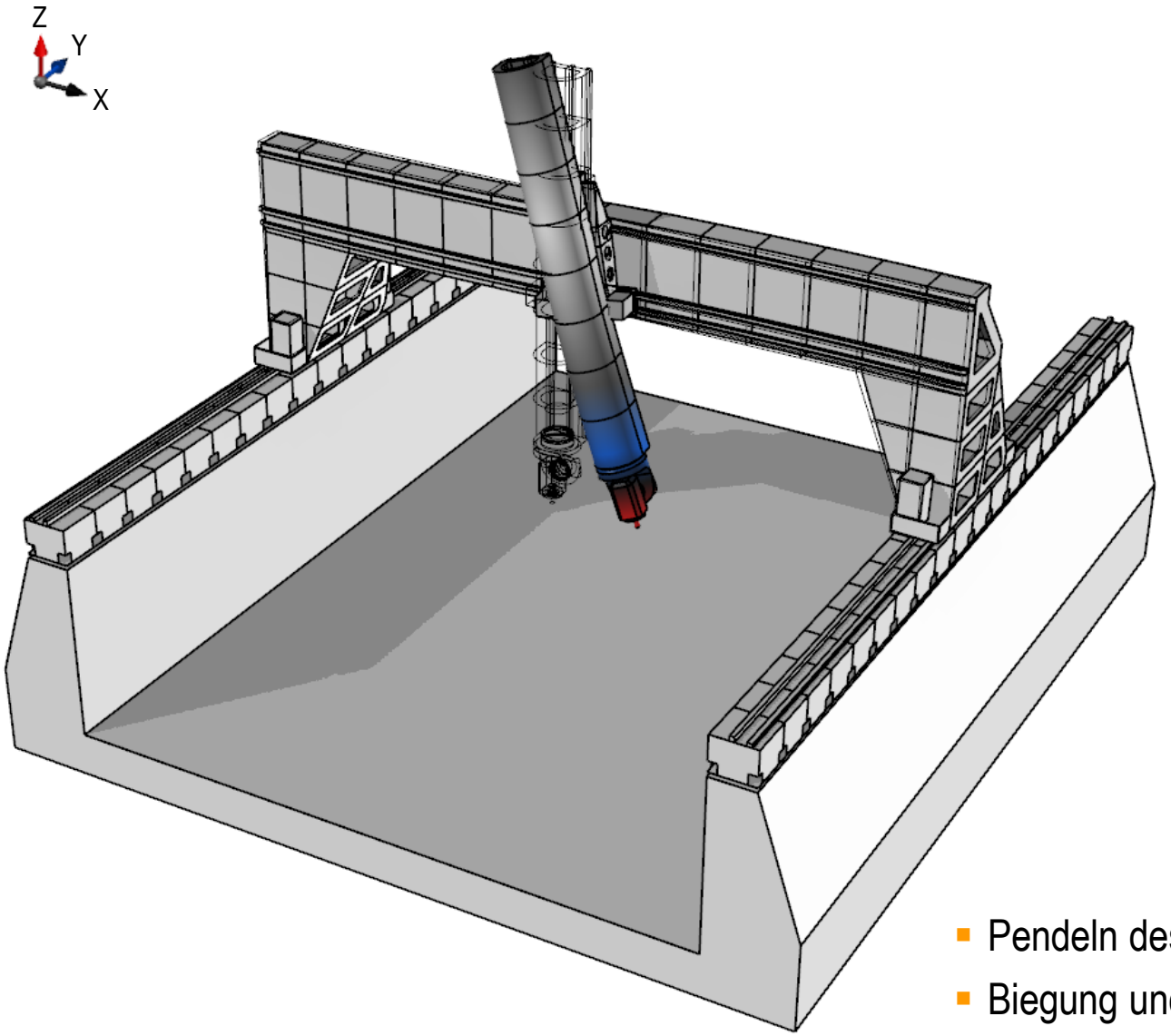


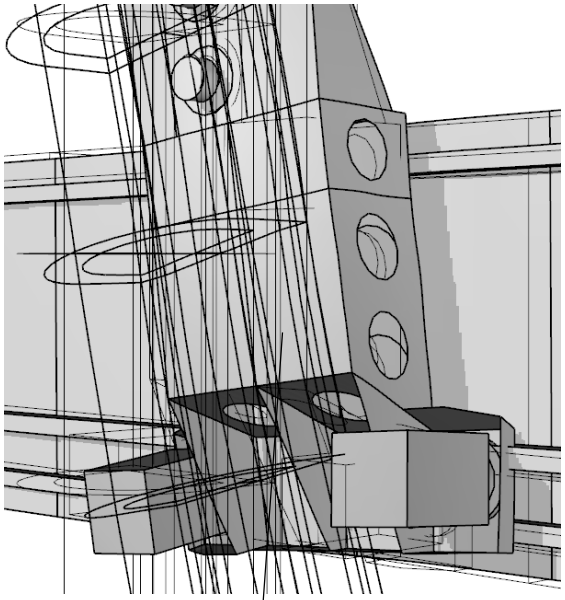
Biegung des Querbalkens

- Biegung des Querbalkens
- Biegung des Z-Schiebers

© planlauf GmbH

Schwingungsform bei 22 Hz



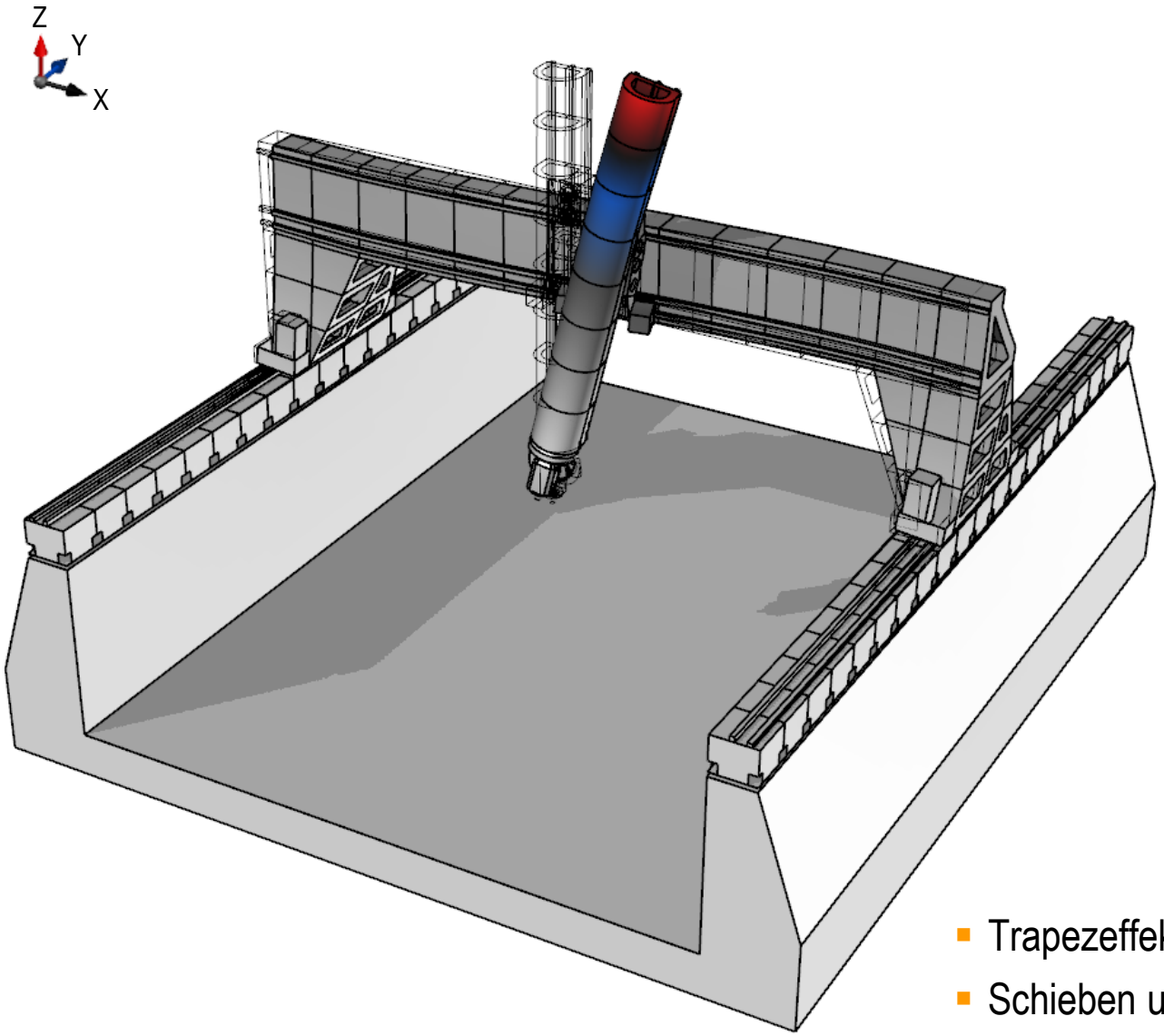


Biegung und Torsion des X-Schlittens

- Pendeln des Z-Schiebers in X-Richtung
- Biegung und Torsion des X-Schlittens

© planlauf GmbH

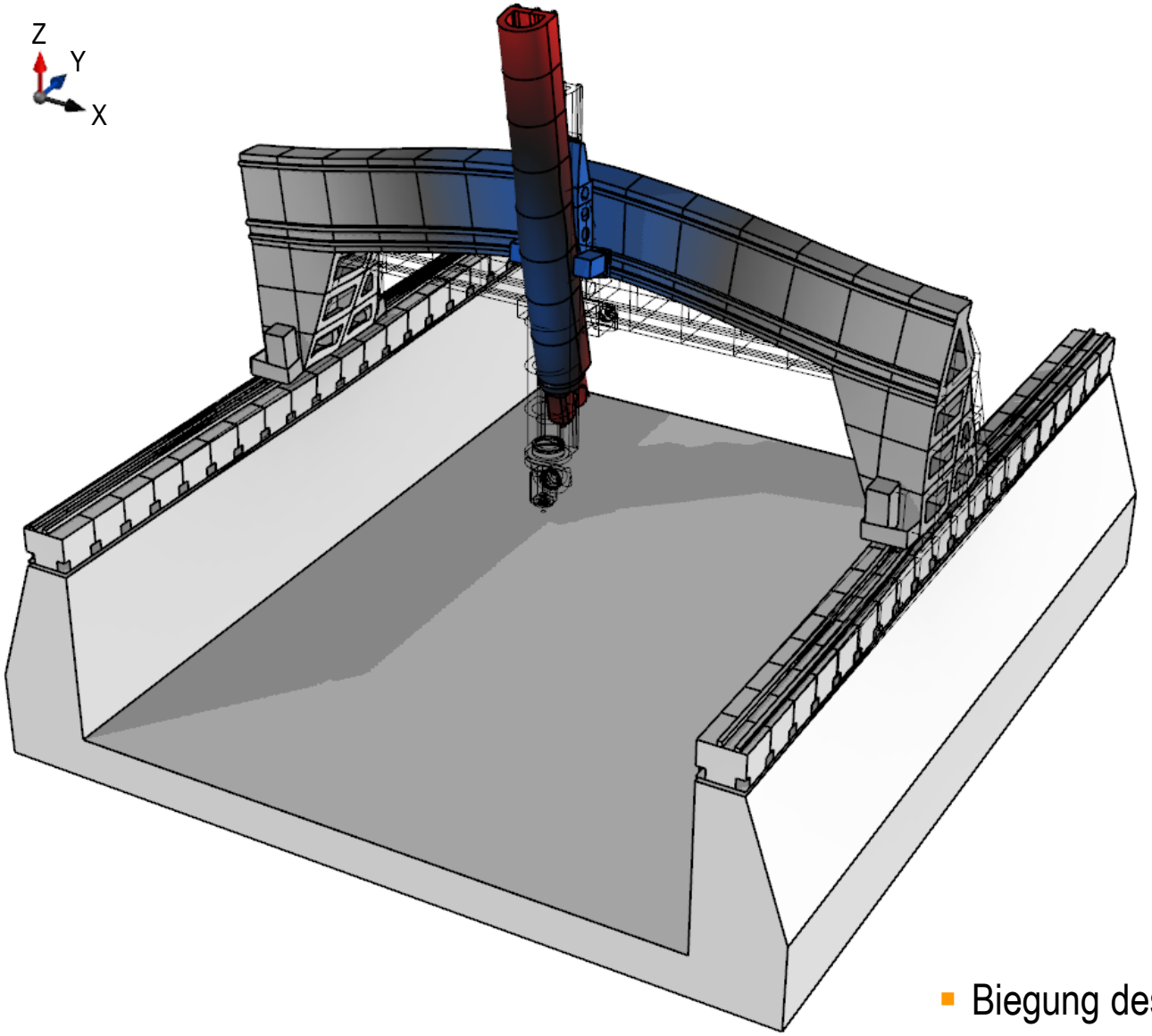
Schwingungsform bei 30 Hz



- Trapezeffekt des Portals
- Schieben und Gieren des X-Schlittens

© planlauf GmbH

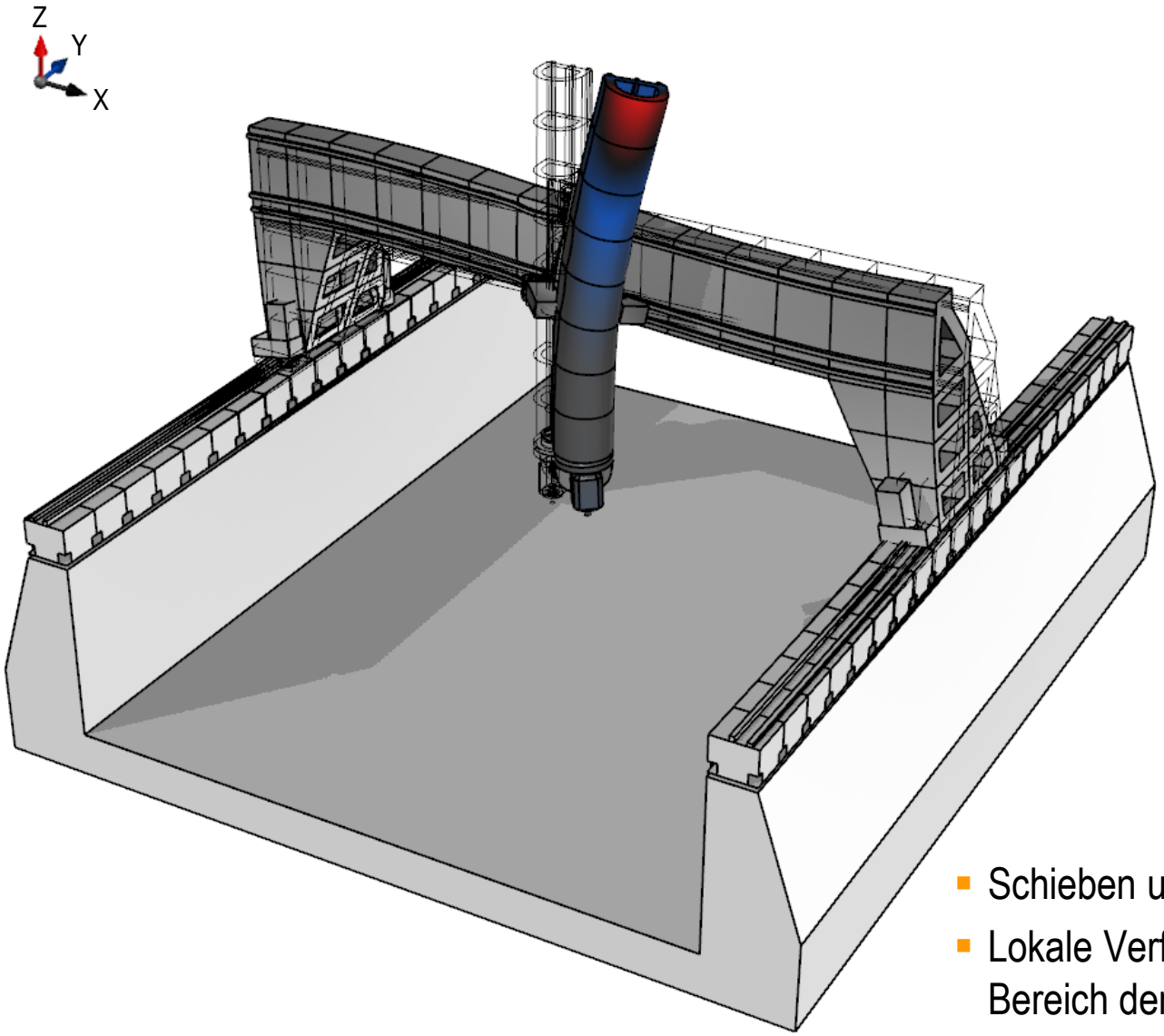
Schwingungsform bei 40 Hz

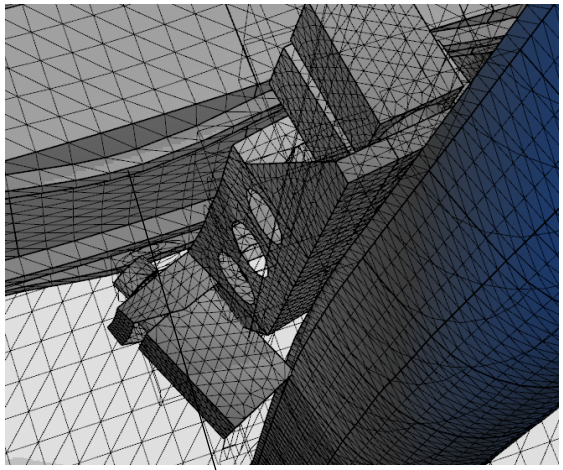


- Biegung des Querbalkens

© planlauf GmbH

Schwingungsform bei 49 Hz



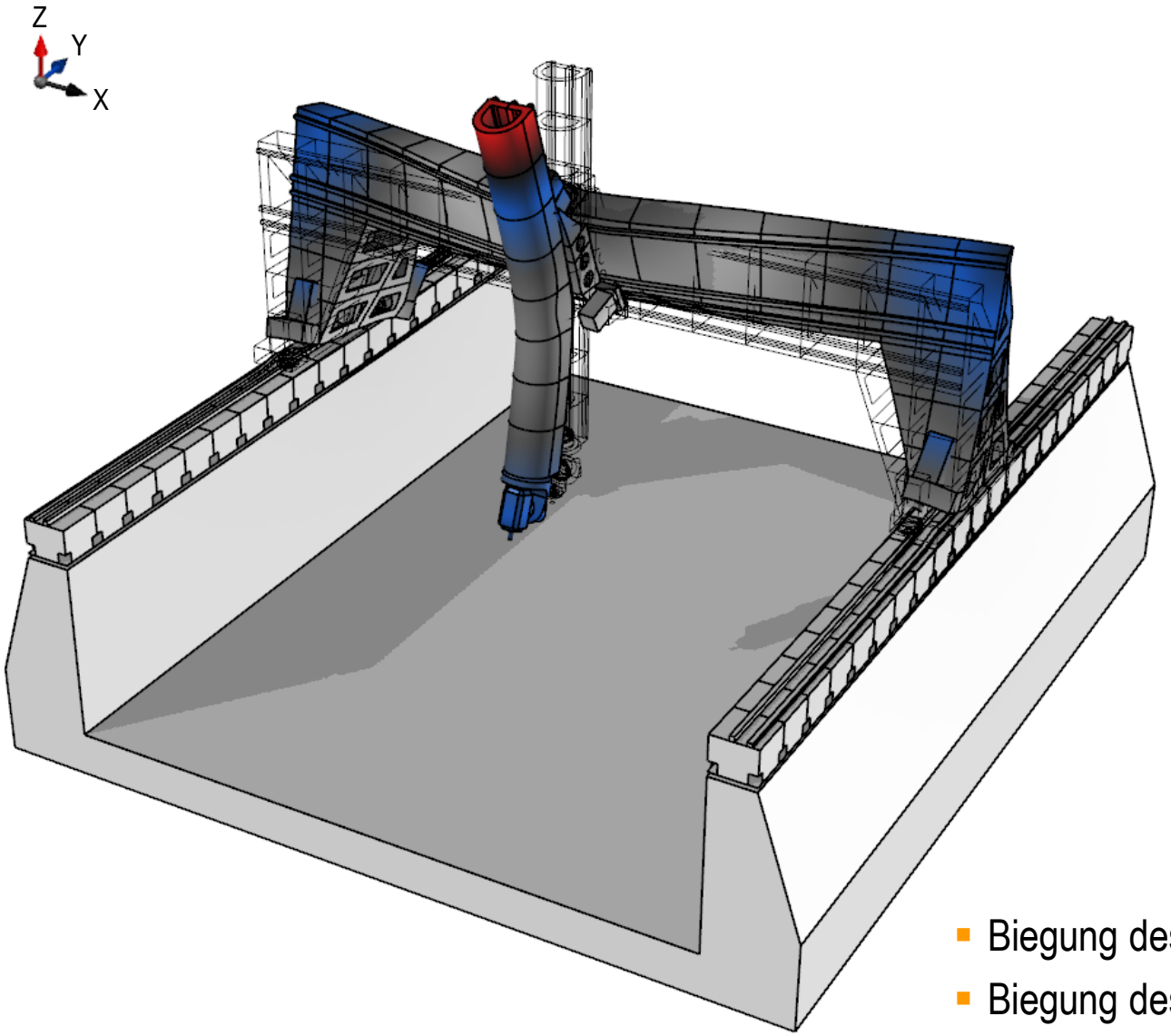


Lokale Verformung

- Schieben und Nicken des X-Schlittens
- Lokale Verformung des Querbalkens im Bereich der Führungsbahnen

© planlauf GmbH

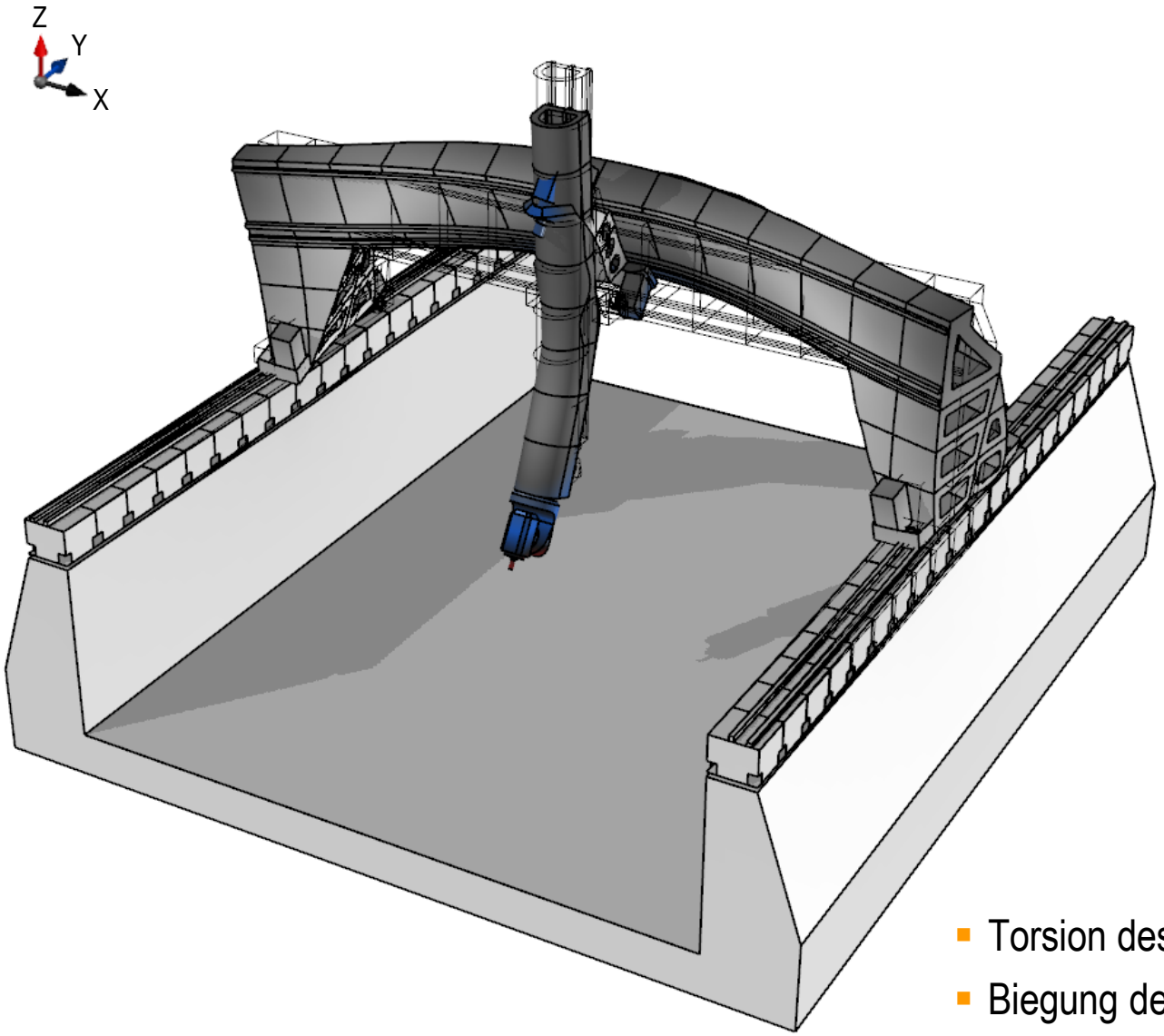
Schwingungsform bei 51 Hz



- Biegung des Querbalkens
- Biegung des Z-Schiebers

© planlauf GmbH

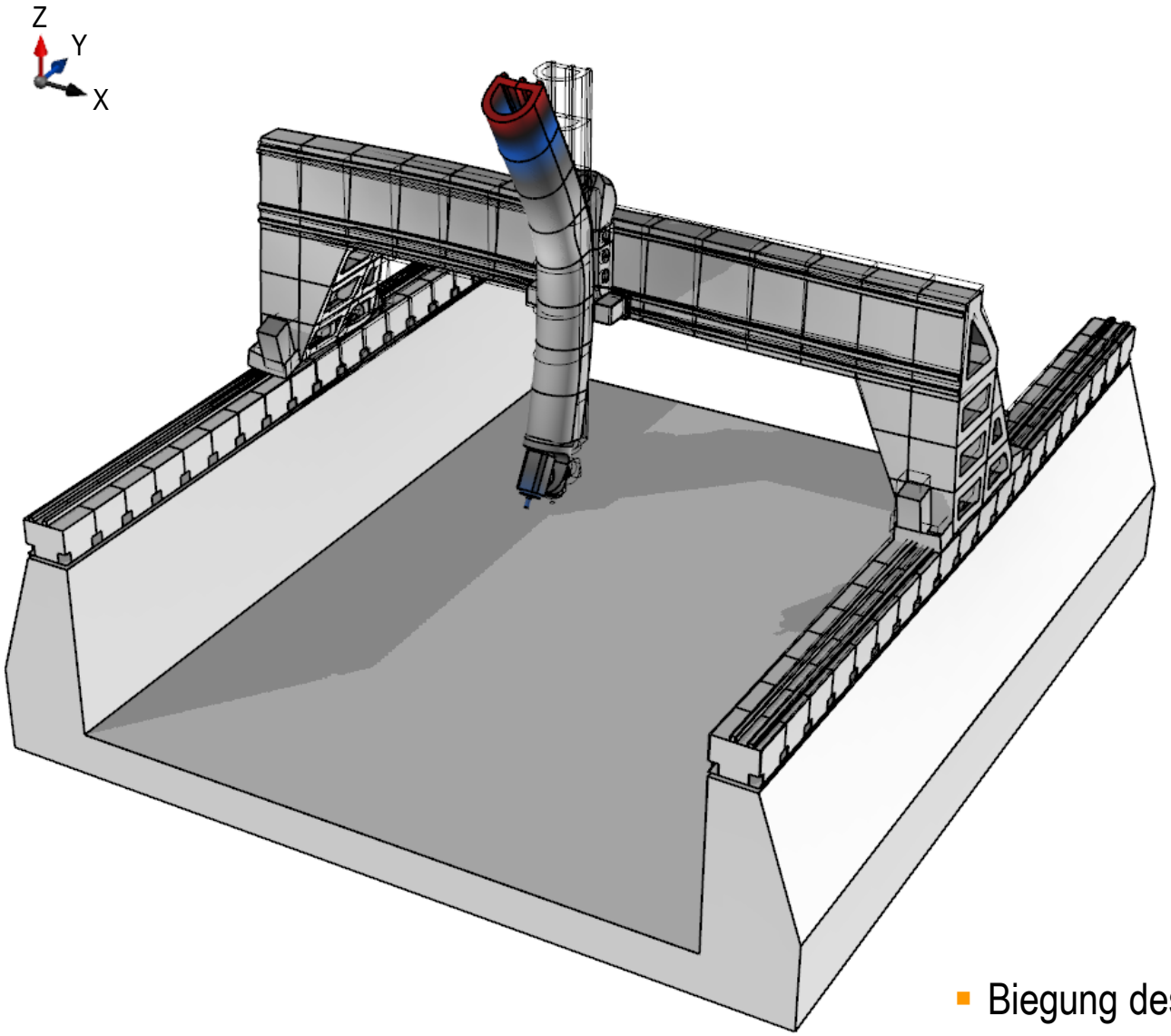
Schwingungsform bei 67 Hz



- Torsion des Querbalkens
- Biegung des Z-Schiebers

© planlauf GmbH

Schwingungsform bei 91 Hz



- Biegung des Z-Schiebers

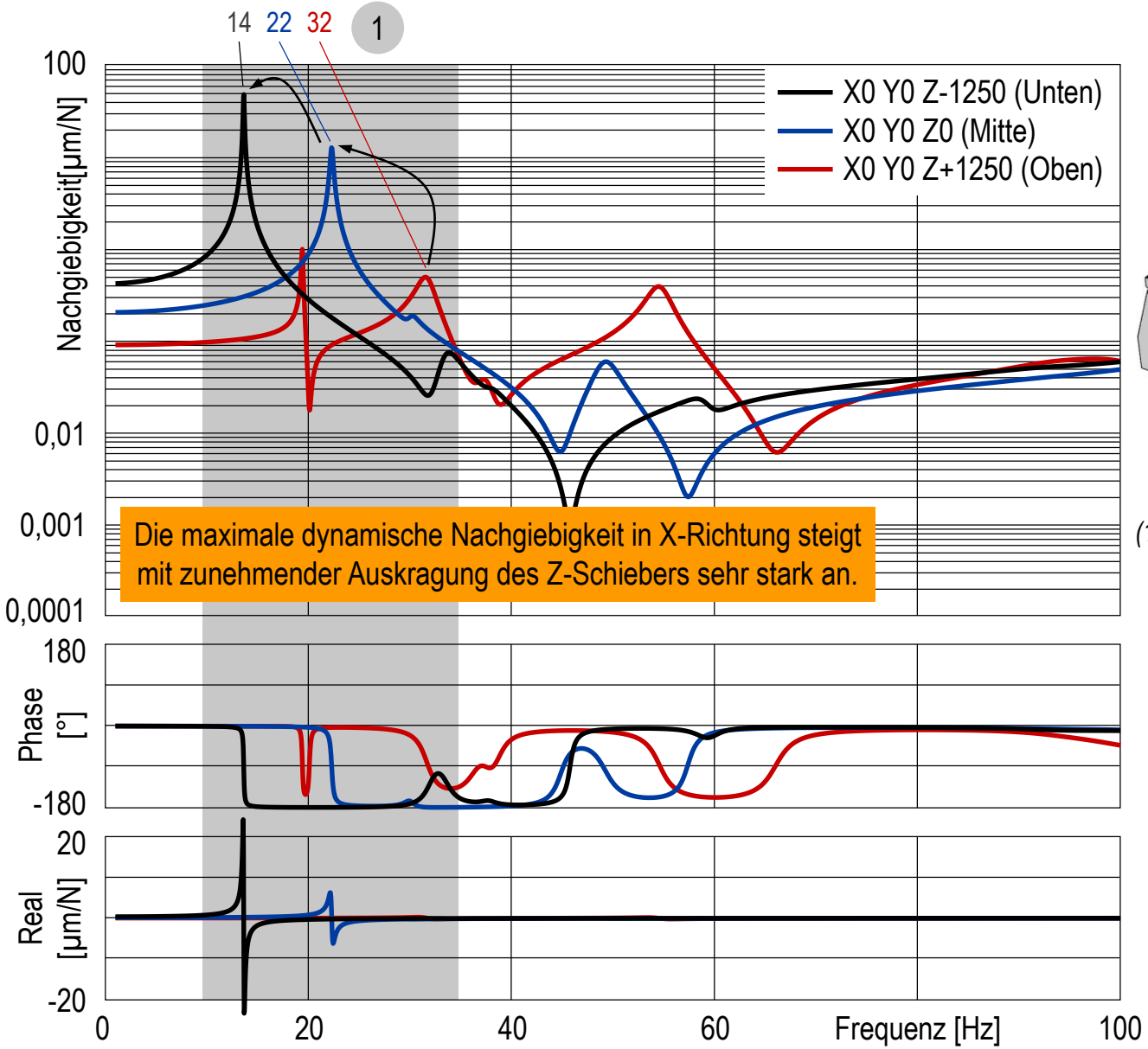
© planlauf GmbH

Gliederung

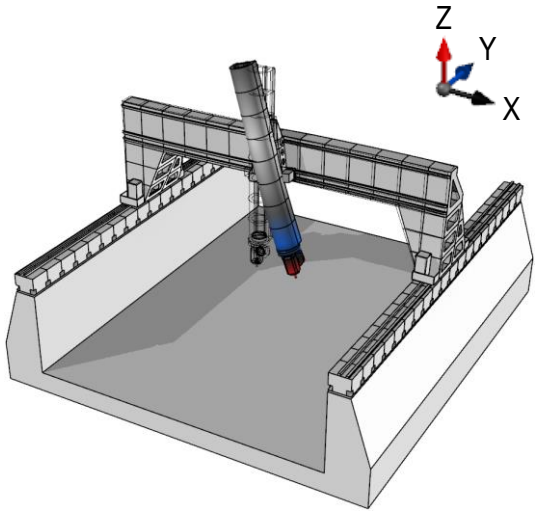
- Einleitung und Aufgabenstellung
- Statisches Verhalten
- Dynamisches Verhalten – *Variation der Z-Position*
- Zusammenfassung und Empfehlungen

© planlauf GmbH

Nachgiebigkeitsfrequenzgänge in X-Richtung



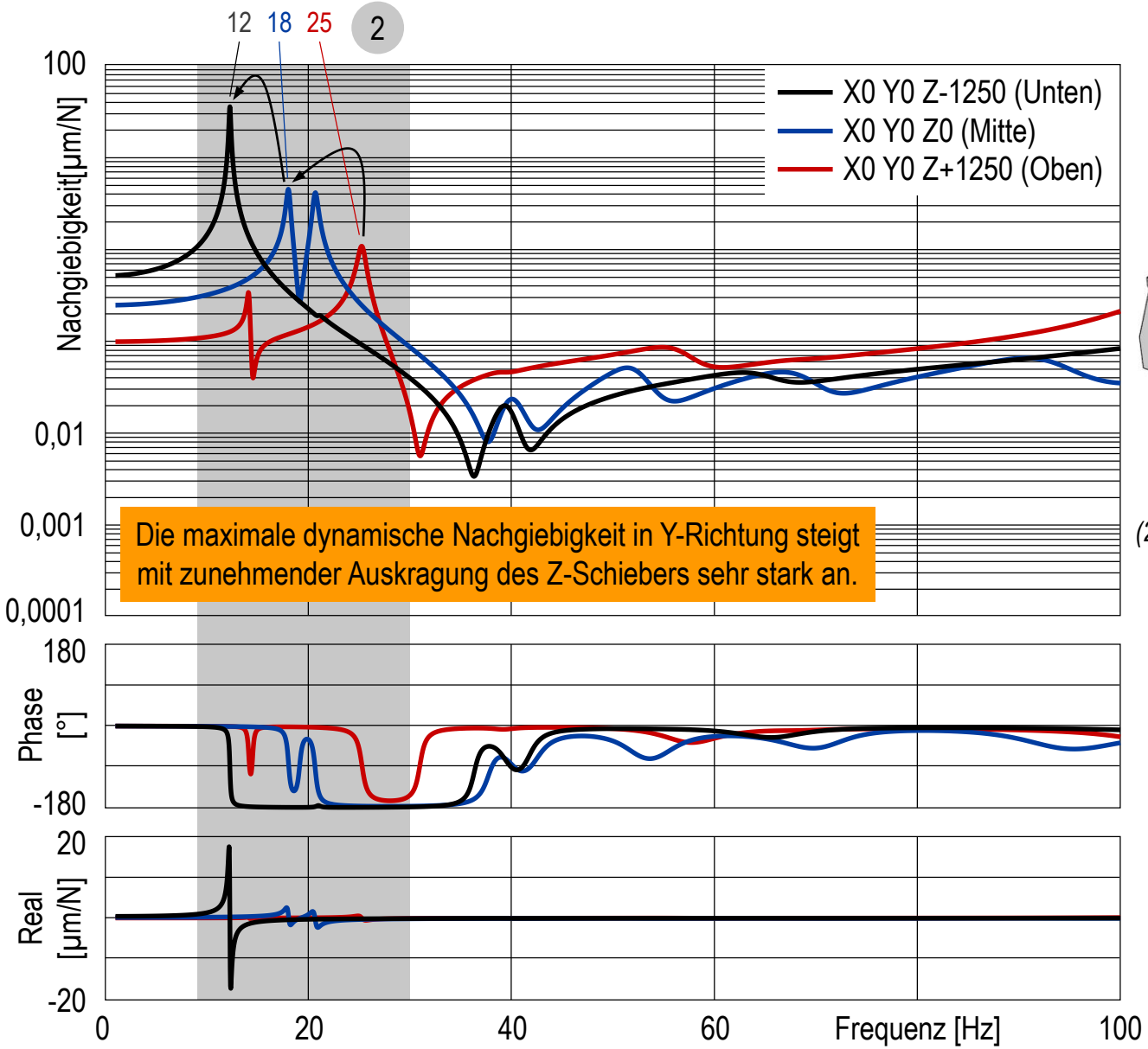
Die maximale dynamische Nachgiebigkeit in X-Richtung steigt mit zunehmender Auskragung des Z-Schiebers sehr stark an.



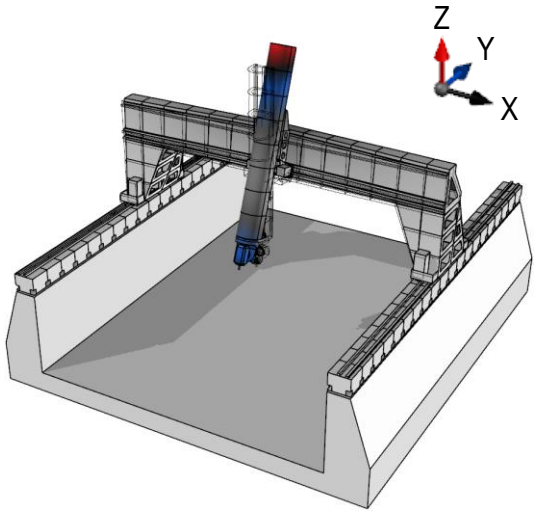
(1) Schwingungsform bei 22 Hz (Mitte)
- Pendeln des Z-Schiebers in X-Richtung
- Biegung und Torsion des X-Schlittens

© planlauf GmbH

Nachgiebigkeitsfrequenzgänge in Y-Richtung



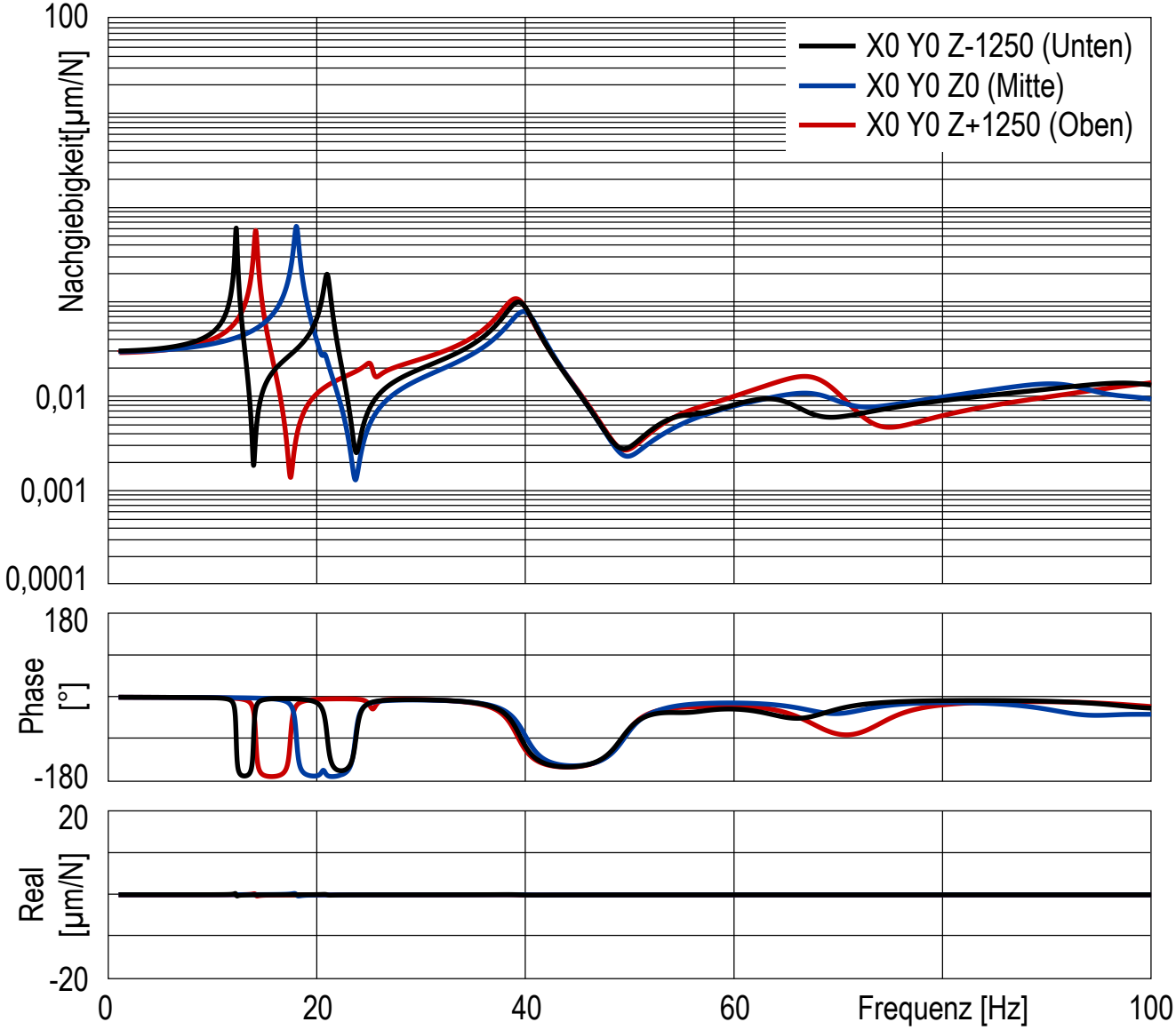
Die maximale dynamische Nachgiebigkeit in Y-Richtung steigt mit zunehmender Auskragung des Z-Schiebers sehr stark an.



(2) Schwingungsform bei 18 Hz (Mitte)
- Torsion des Querbalkens
- Rollen des X-Schlittens

© planlauf GmbH

Nachgiebigkeitsfrequenzgänge in Z-Richtung



© planlauf GmbH

Gliederung

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

© planlauf GmbH

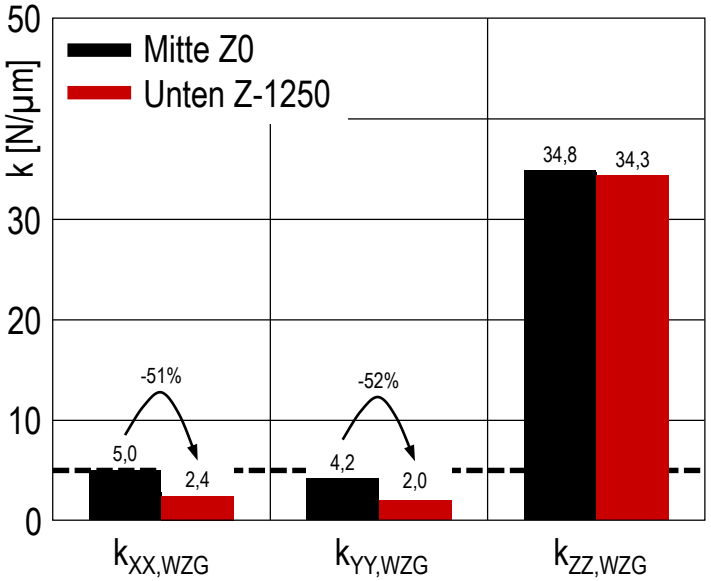
Zusammenfassung

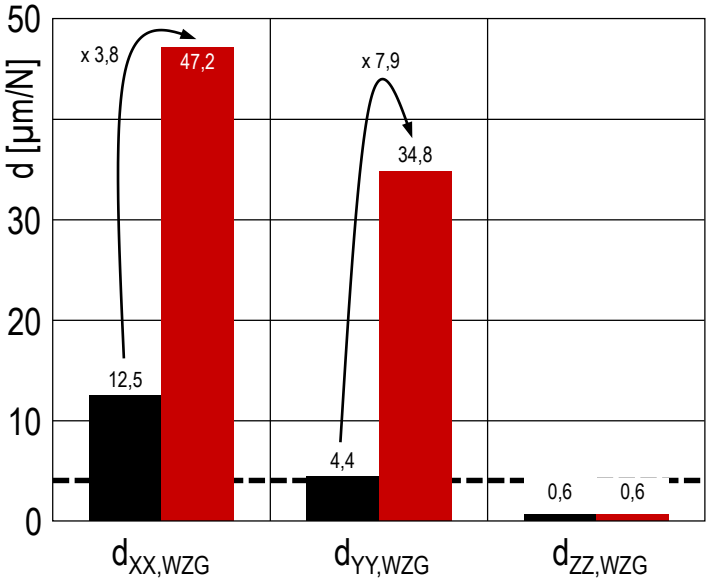
Statisches Verhalten

- Die **Zielsteifigkeit** von 5 N/µm **wird in Y-Richtung** um ca. 16% **verfehlt**.
- Die Verformungsanteile von **X-Schlitten, Z-Schieber und des Portals** sind vergleichsweise hoch, so dass an diesen Stellen entsprechendes **Verbesserungspotenzial** vorhanden ist.
- Die **Verformungen unter Eigengewicht** der X-Achse liegen ohne Kompensation im Bereich von 1/10-2/10 mm und sind damit recht hoch. Die Verstärkung des Querbalkens ist empfehlenswert.

Dynamisches Verhalten

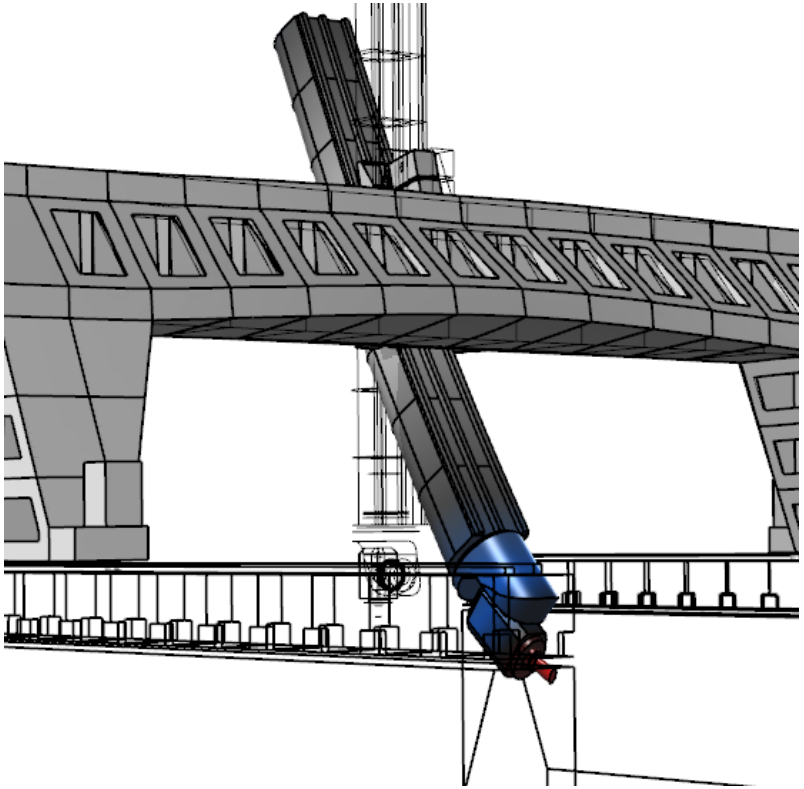
- Die geforderte maximale **dynamische Nachgiebigkeit** von 4 µm/N in der mittleren Z-Position **wird bei weitem nicht erreicht**.
- Bei **maximal auskragendem Z-Schieber** steigen die dynamischen Nachgiebigkeiten zudem auf das 4- bis 8-fache an.
- Die dominanten Schwachstellen werden auf den folgenden Seiten zusammen mit den Empfehlungen näher erläutert.





© planlauf GmbH

Empfehlungen (1/4)
Statische Schwachstelle in Y-Richtung



Verformungsanteile

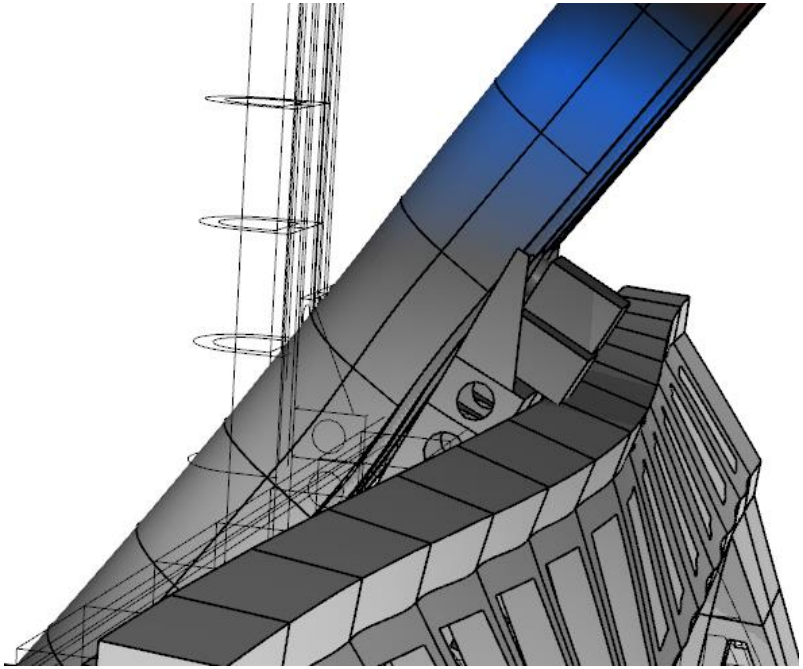
- Torsion des Querbalkens
- Biegung des Z-Schiebers unterhalb der Z-Führungen

Empfehlung

- Vergrößerung des Querschnitts des Querbalkens (Höhe, Tiefe, Entfall der Abschrägung)
- Vergrößerung des Abstandes der X-Führungsbahnen in Z-Richtung

© planlauf GmbH

Empfehlungen (2/4)
Dynamische Schwachstelle bei 18 Hz



Schwingungsform

- Torsion des Querbalkens
- Rollen des X-Schlittens

Ursache

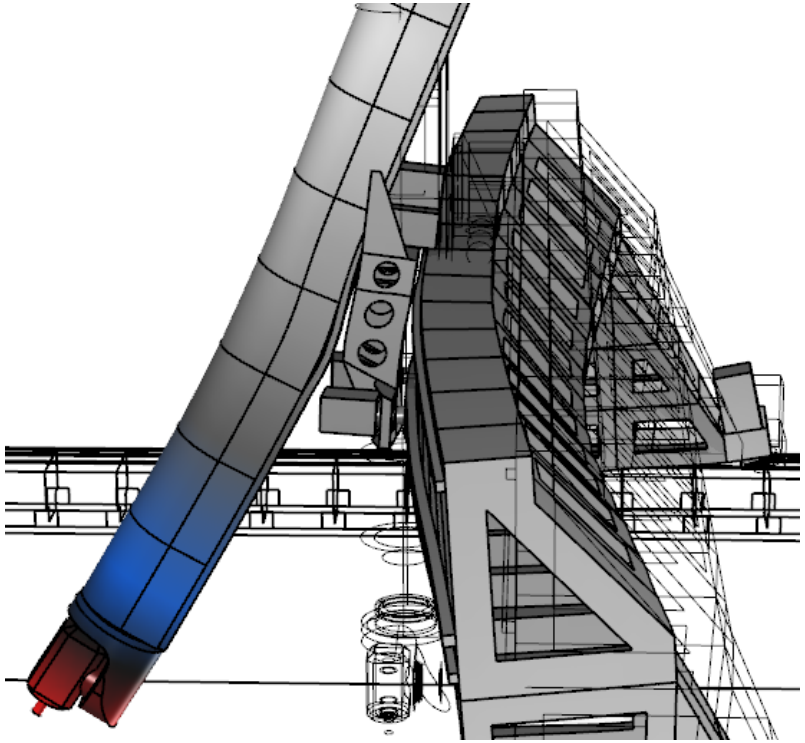
- Geringer Querschnitt des Querbalkens
- Geringer Abstand der X-Führungsschienen in Z-Richtung

Empfehlung

- Vergrößerung des Querschnitts des Querbalkens (Höhe, Tiefe, Entfall der Abschrägung)
- Vergrößerung des Abstandes der X-Führungsbahnen in Z-Richtung

© planlauf GmbH

Empfehlungen (3/4)
Dynamische Schwachstelle bei 21 Hz



Schwingungsform

- Biegung des Querbalkens
- Biegung des Z-Schiebers

Ursache

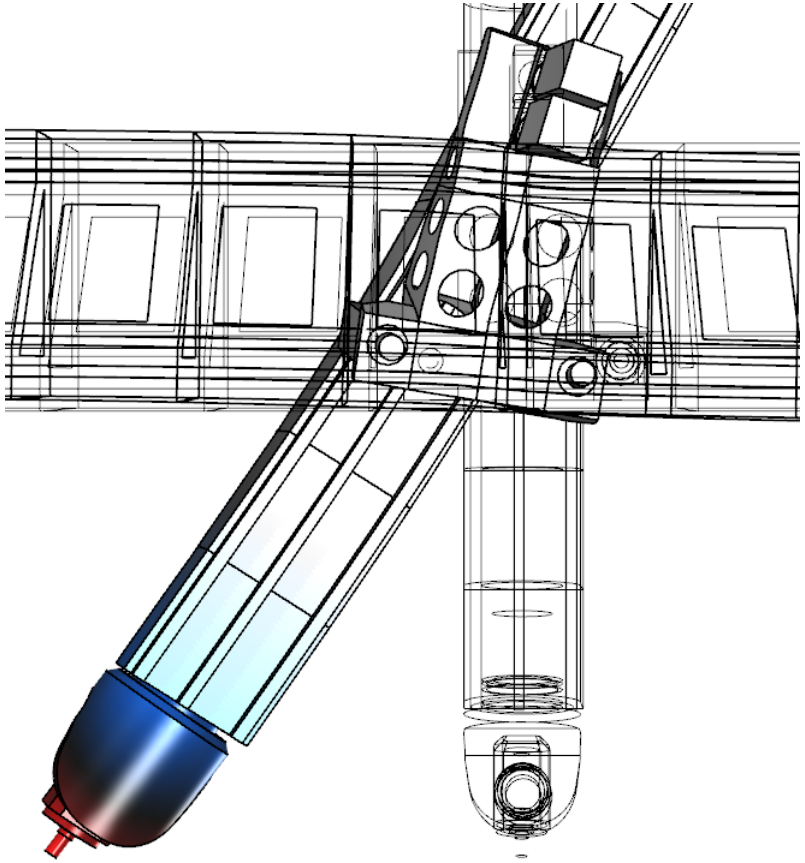
- Geringer Querschnitt des Querbalkens
- Geringe Steifigkeit des Z-Schiebers
- Geringer Abstand der Z-Führungswagen in Z-Richtung

Empfehlung

- Vergrößerung des Querschnitts des Querbalkens (Höhe, Tiefe, Entfall der Abschrägung)
- Vergrößerung des Querschnitts des Z-Schiebers (kombiniert mit einer Wandstärkenoptimierung)
- Vergrößerung des Abstandes der Z-Führungswagen in Z-Richtung
- Erhöhung der Anzahl der Z-Führungswagen von 6 auf 8

© planlauf GmbH

Empfehlungen (4/4)
Dynamische Schwachstelle bei 22 Hz



Schwingungsform

- Pendeln des Z-Schiebers in X-Richtung
- Biegung und Torsion des X-Schlittens

Ursache

- Geringer Abstand der X-Führungswagen in X-Richtung
- Geringer Abstand der Z-Führungswagen in Z-Richtung

Empfehlung

- Vergrößerung des Abstandes der X-Führungswagen in X-Richtung mit Verbreiterung des X-Schlittens
- Vergrößerung des Abstandes der Z-Führungswagen in Z-Richtung
- Erhöhung der Anzahl der Z-Führungswagen von 6 auf 8

© planlauf GmbH