planlauf

Statisches und dynamisches Verhalten eines fünfachsigen Bearbeitungszentrums mit Schwenktisch

- Ausgangszustand und Empfehlungen -

Dr.-Ing. Rouven Meidlinger

planlauf GmbH

Gliederung

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

© planlauf GmbH

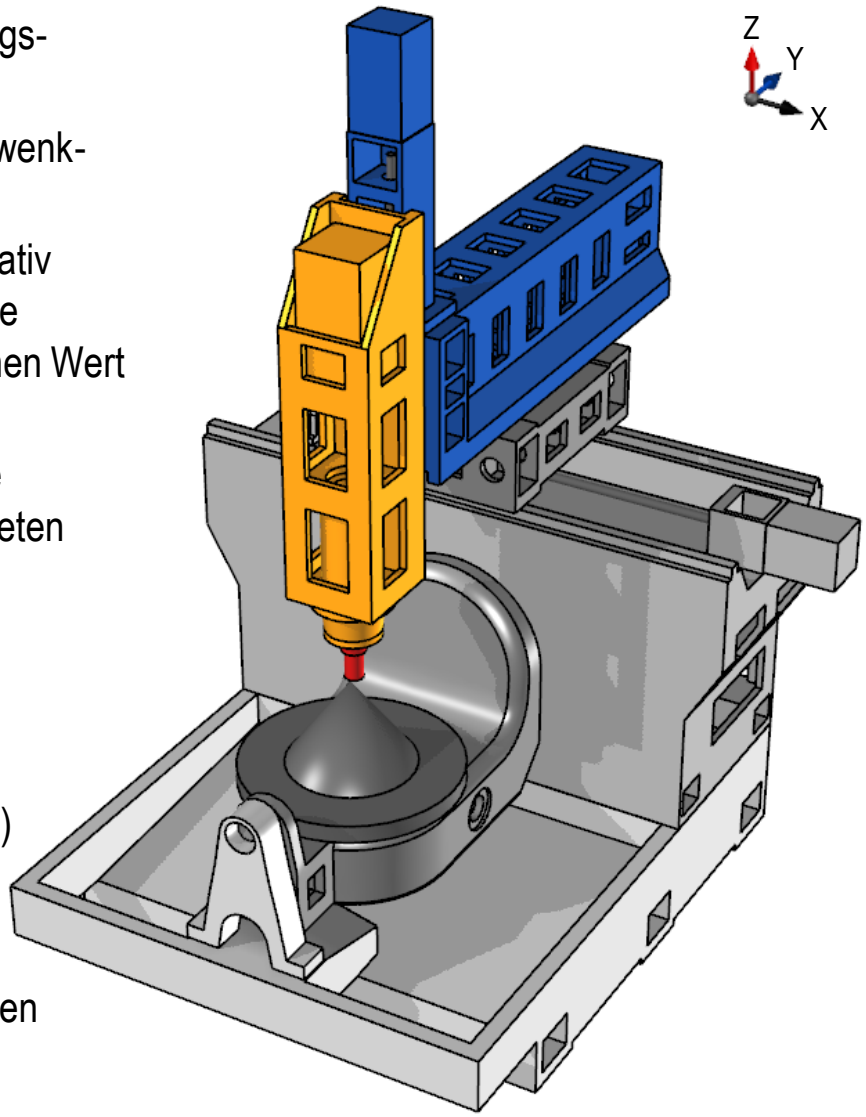
Einleitung und Aufgabenstellung

Einleitung

- Der Auftraggeber entwickelt derzeit ein 5-achsiges Bearbeitungszentrum mit einem Schwenktisch.
- Zur Erhöhung der werkstückseitigen Steifigkeit ist für den Schwenktisch ein spielfreies Nadellager als Gegenlager vorgesehen.
- Die Zielsteifigkeit in der Arbeitsraummitte liegt bei 10 N/µm relativ zwischen Werkzeug und Werkstück. Die maximale dynamische Nachgiebigkeit sollte im Frequenzbereich von 0 bis 200 Hz einen Wert von 0,5 µm/N nicht überschreiten.
- Erfahrungsgemäß ermöglicht die Einhaltung dieser Werte eine Ausnutzung der vorgesehenen Spindelleistung ohne das Auftreten von regenerativen Schwingungen (Rattern).

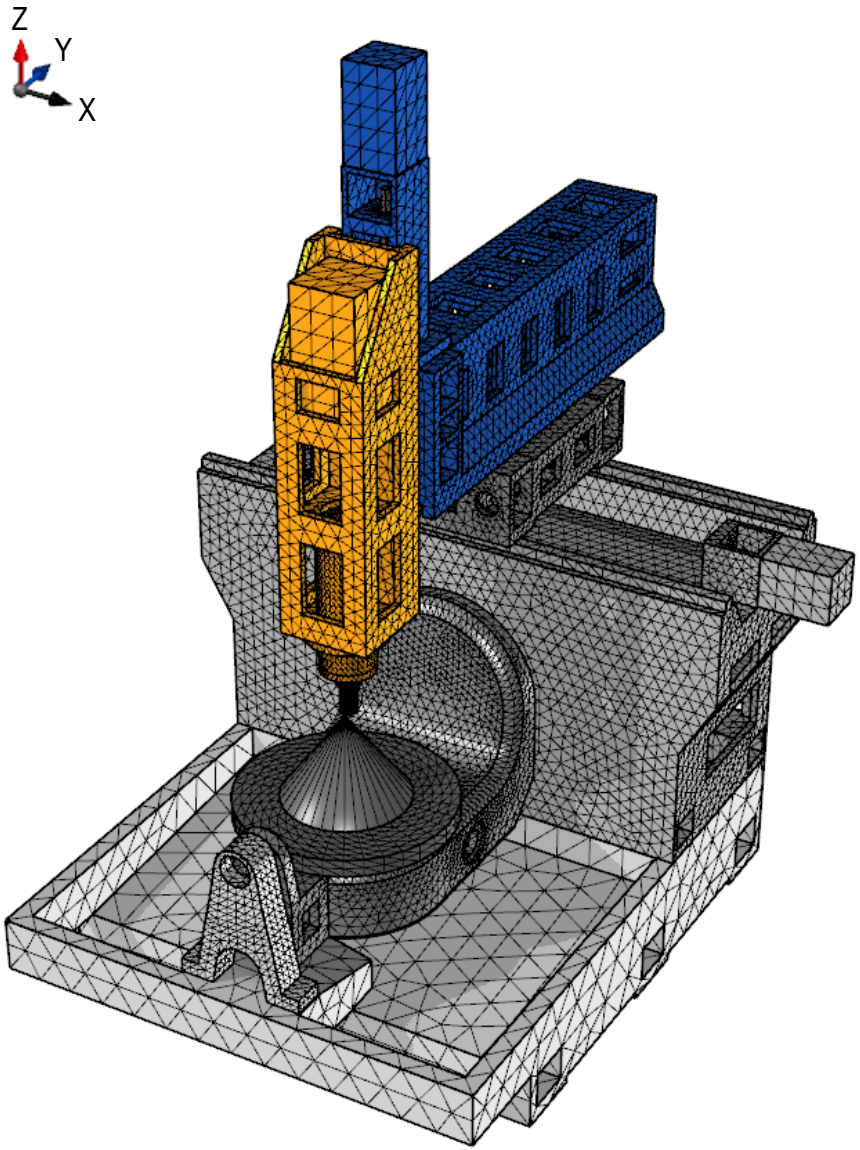
Aufgabenstellung

- Statisches Verhalten inkl. Schwachstellenanalyse
- Verformung unter Eigengewicht
- Dynamisches Verhalten (Frequenzgänge/Schwingungsformen)
- Positionsabhängigkeit
- Abhängigkeit von der Tischbeladung (maximal 450 kg)
- Erarbeitung von Empfehlungen zur Verbesserung des statischen und dynamischen Verhaltens



© planlauf GmbH

Aufbau des Finite-Elemente-Modells



- Führungen
  - X-Achse: INA RUE 35 E (4 Wagen / 2 Schienen)
  - Y-Achse: INA RUE 35 E (4 Wagen / 2 Schienen)
  - Z-Achse: INA RUE 35 E (4 Wagen / 2 Schienen)
- Kugelgewindespindeln:
  - X-Achse: ∅32x10 mit INA ZKLF 2575
  - Y-Achse: ∅32x10 mit INA ZKLF 2575
  - Z-Achse: ∅32x10 mit INA ZKLF 2575-2AP
- Hauptspindel (/\ Z, Kupplung, Motor)
  - Vorne: 2x FAG B71914E.UL
  - Hinten: Zylinderrollenlager FAG N1913K
  - Werkzeug: ∅50x80
- B-Achse: INA YRT 325 mit Klemmung und Gegenlager FAG NKS 50
- C-Achse: INA YRT 260 mit Klemmung
- Werkstoffe
  - Bett: Mineralguss
  - alle anderen Bauteile: EN-GJL-250
- Verankerungsfreie 6-Punkt-Aufstellung mit Isoloc UMS8-ASF/30

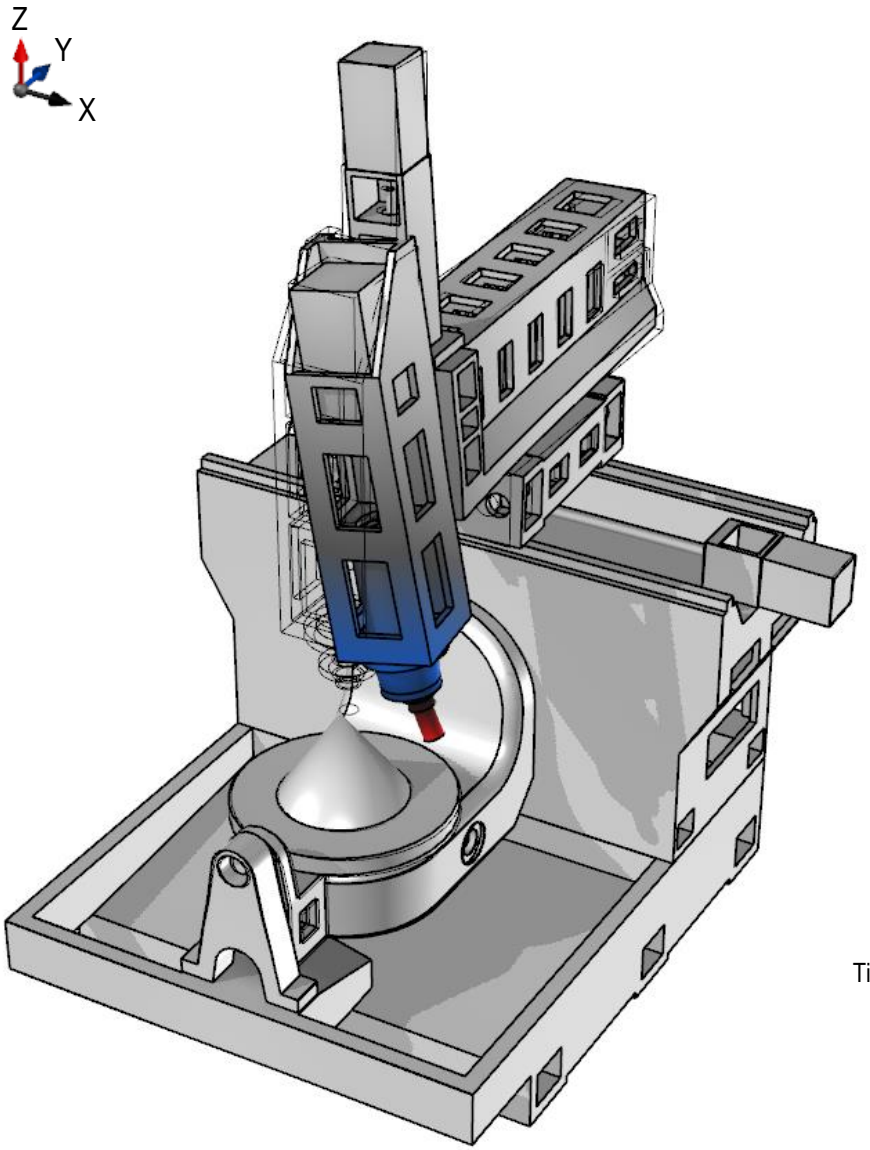
© planlauf GmbH

Gliederung

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

© planlauf GmbH

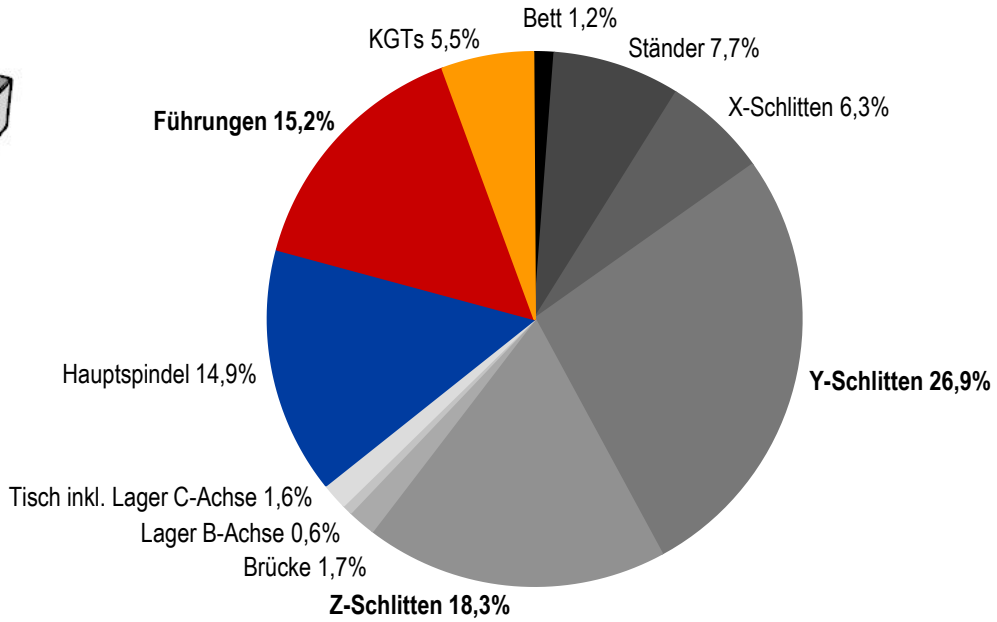
Statische Steifigkeit in X-Richtung



Statische Steifigkeit in X-Richtung
$k_{XX,REL}$ = 5,9 N/µm

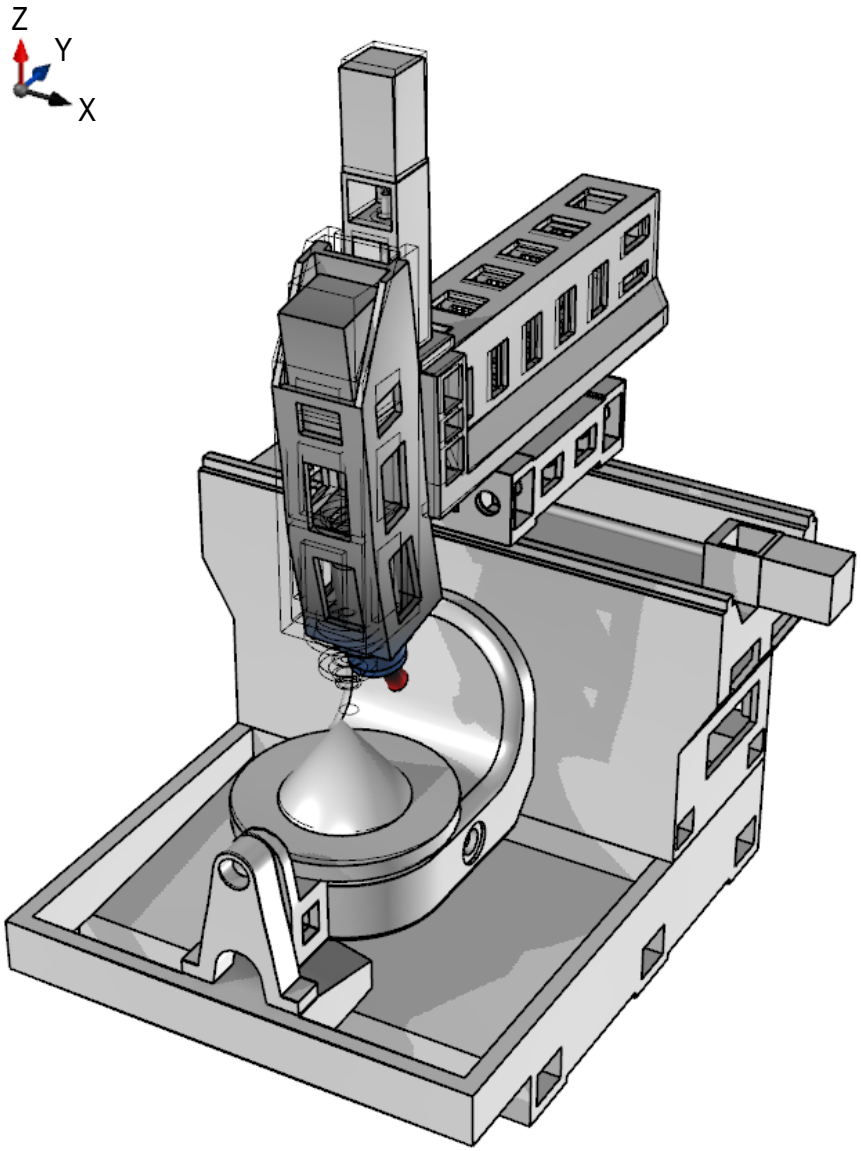
$k_{XX,WZG}$ = 6,2 N/µm
$k_{XX,WST}$ = 118,7 N/µm

Anteile der einzelnen Komponenten
an der Gesamtverformung



© planlauf GmbH

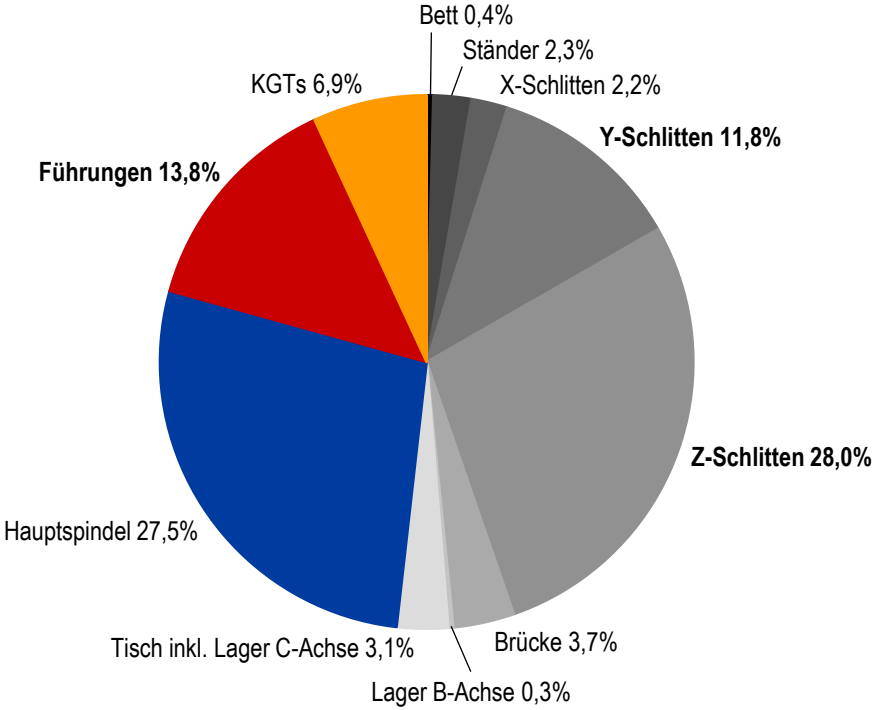
Statische Steifigkeit in Y-Richtung



Statische Steifigkeit in Y-Richtung
$k_{YY,REL}$ = 10,7 N/µm

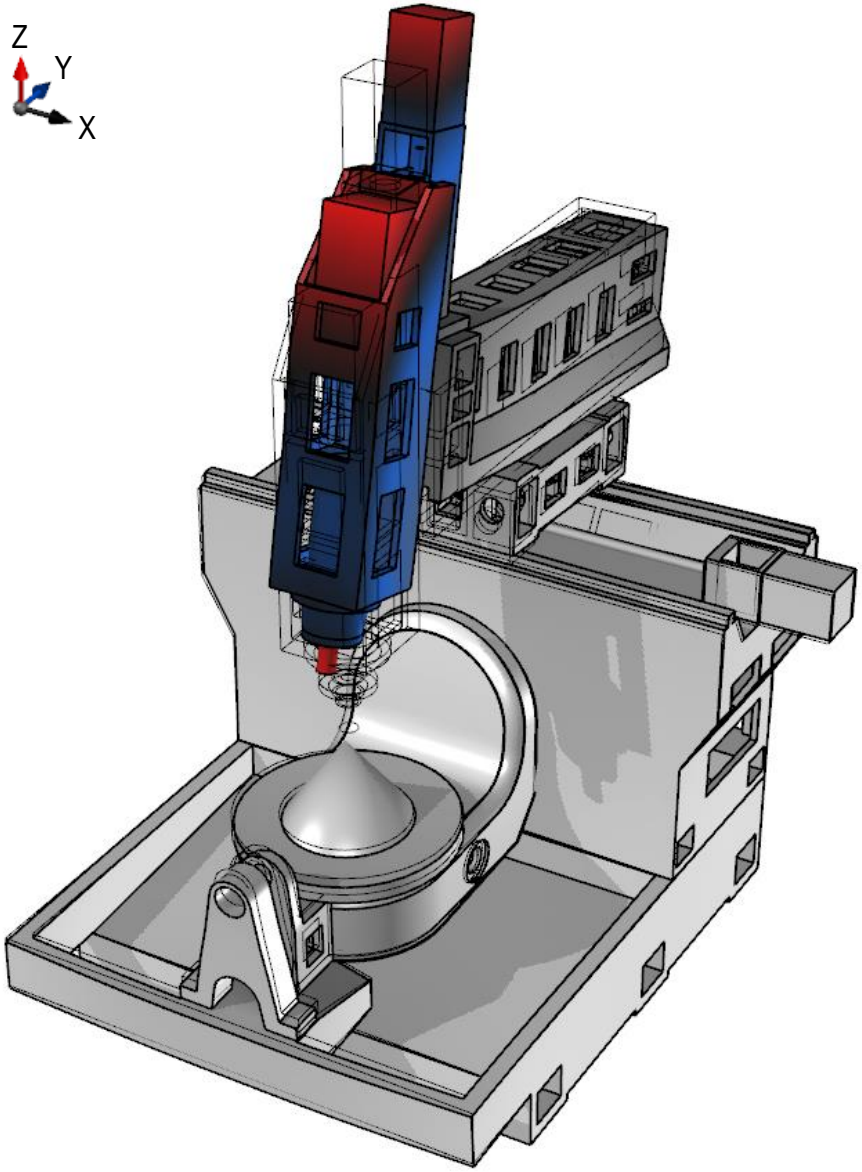
$k_{YY,WZG}$ = 11,4 N/µm
$k_{YY,WST}$ = 160,8 N/µm

Anteile der einzelnen Komponenten an der Gesamtverformung



© planlauf GmbH

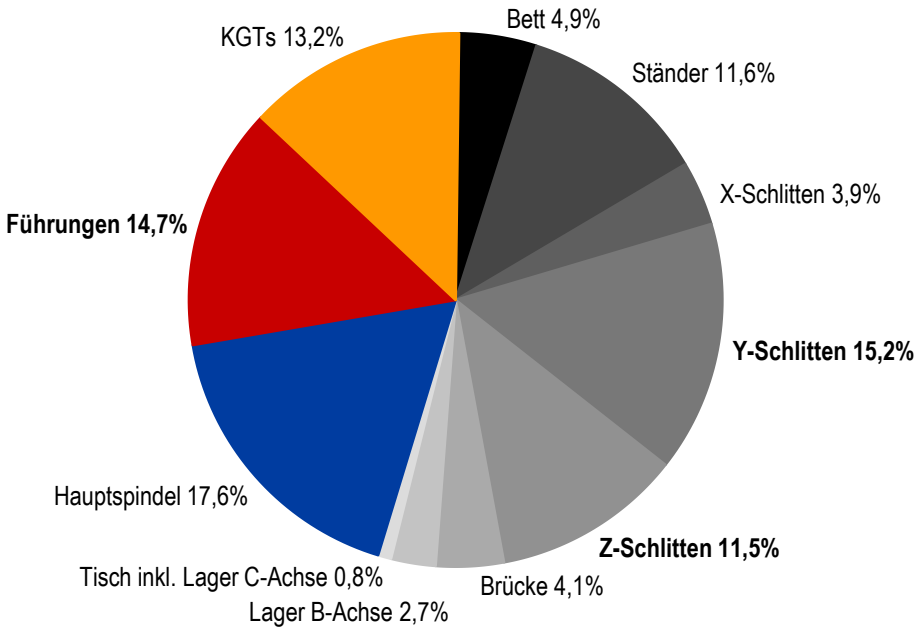
Statische Steifigkeit in Z-Richtung



Statische Steifigkeit in Z-Richtung
$k_{ZZ,REL}$ = 26,0 N/µm

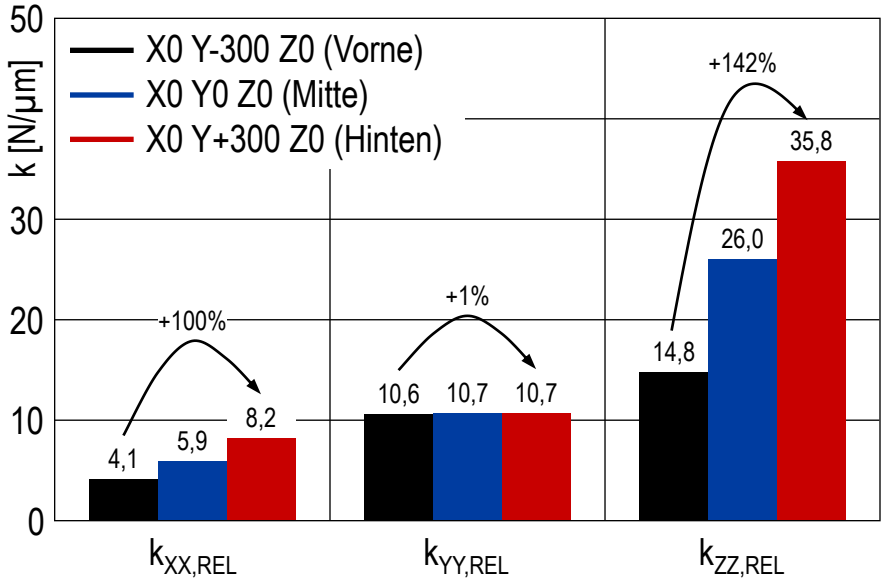
$k_{ZZ,WZG}$ = 28,6 N/µm
$k_{ZZ,WST}$ = 287,8 N/µm

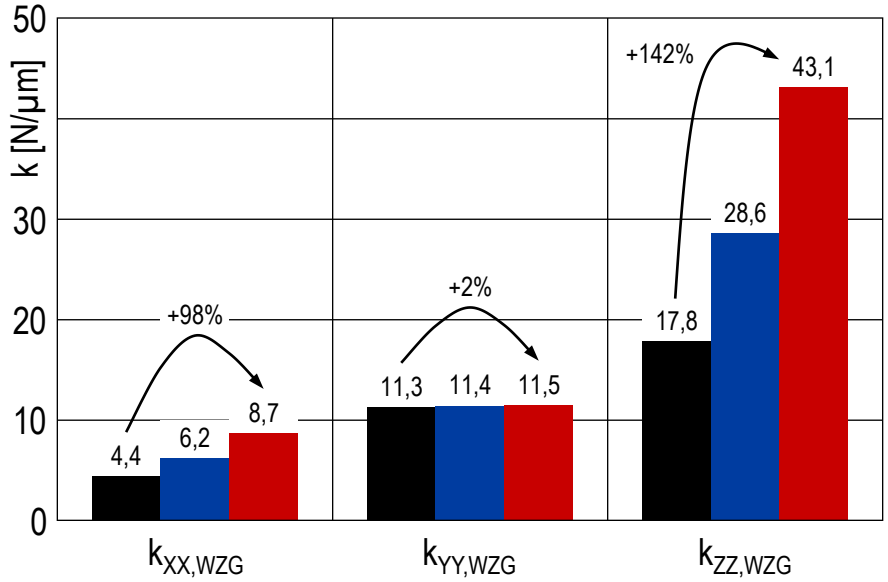
Anteile der einzelnen Komponenten
an der Gesamtverformung



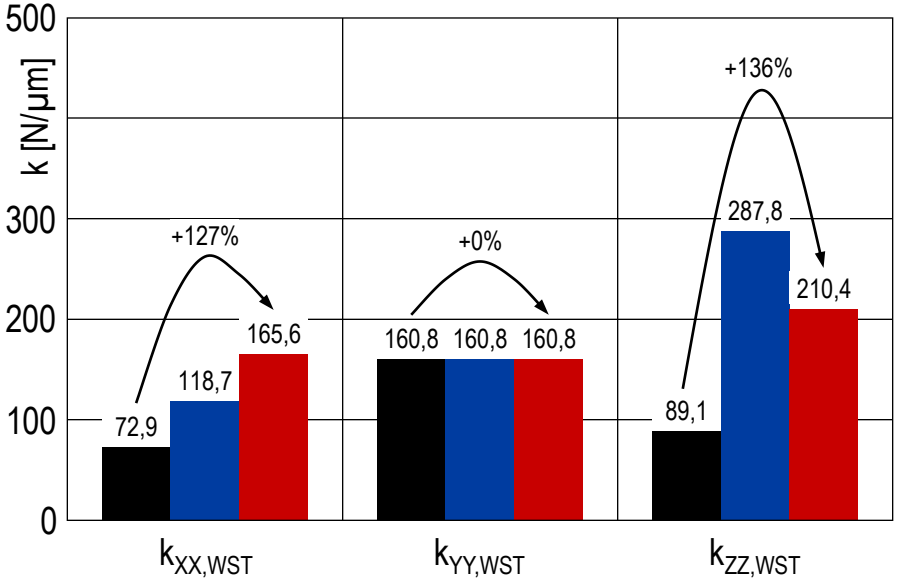
© planlauf GmbH

Gegenüberstellung der statischen Steifigkeiten in Abhängigkeit der Y-Position



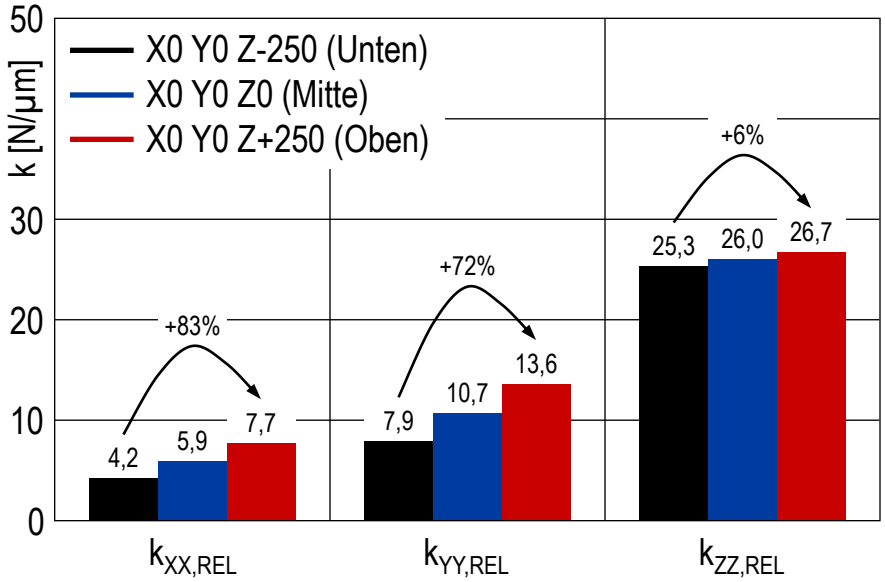


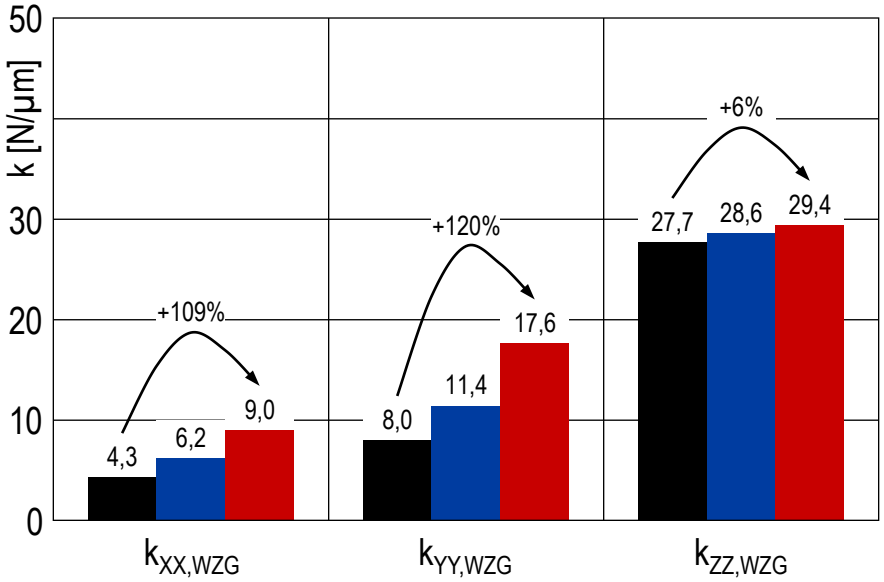
- Die werkzeugseitigen Steifigkeiten steigen mit abnehmender Auskragung des Y-Schlittens in X-Richtung auf ca. das Doppelte an.
- Die werkstückseitigen Steifigkeiten liegen im Vergleich zur Werkzeugseite auf einem sehr guten Niveau. In der hinteren Y-Position liegt die Steifigkeit in X-Richtung deutlich höher, da der Abstand zur Klemmung und damit der Torsionsanteil der Brücke geringer ist.
- **Die relative Zielsteifigkeit von 10 N/µm in Arbeitsraummitte wird in der X-Richtung deutlich verfehlt.**



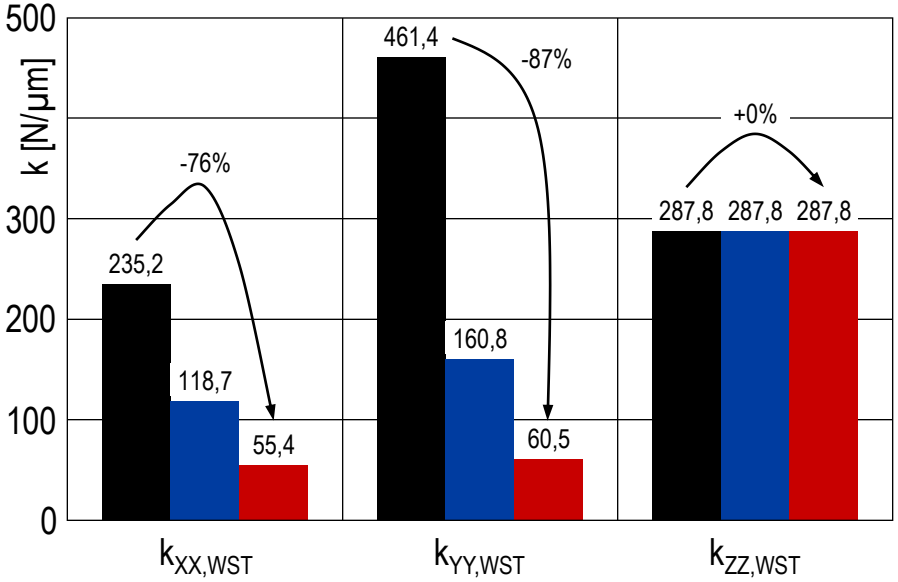
© planlauf GmbH

Gegenüberstellung der statischen Steifigkeiten in Abhängigkeit der Z-Position





- Die werkzeugseitigen Steifigkeiten steigen mit abnehmender Auskragung des Z-Schlittens in X- und Y-Richtung auf ca. das Doppelte an.
- Die werkstückseitigen Steifigkeiten liegen im Vergleich zur Werkzeugseite auf einem sehr guten Niveau. In der oberen Position ist der Hebelarm zur Brücke und zum Lager der C-Achse maximal, so dass hier auch die geringsten Steifigkeitswerte erreicht werden.
- **Die relative Zielsteifigkeit von 10 N/µm in Arbeitsraummitte wird in der X-Richtung deutlich verfehlt.**



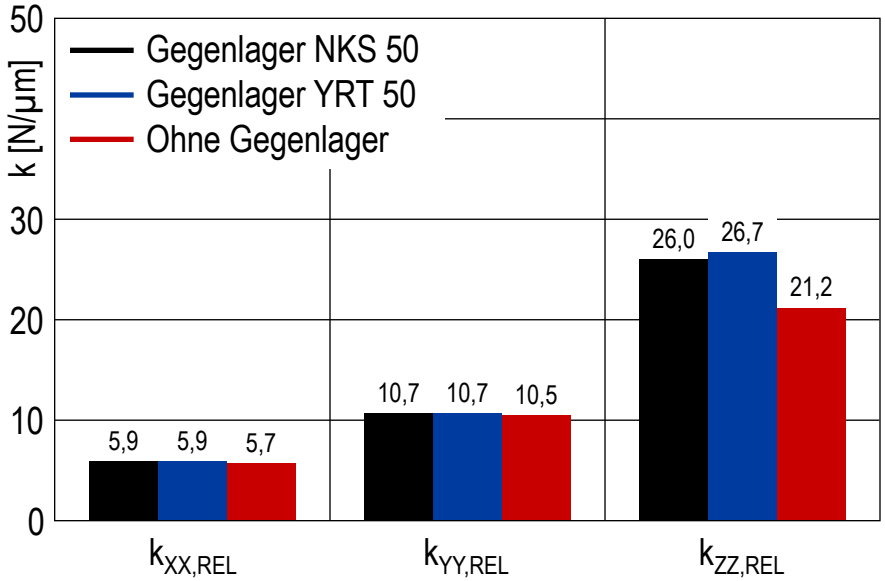
© planlauf GmbH

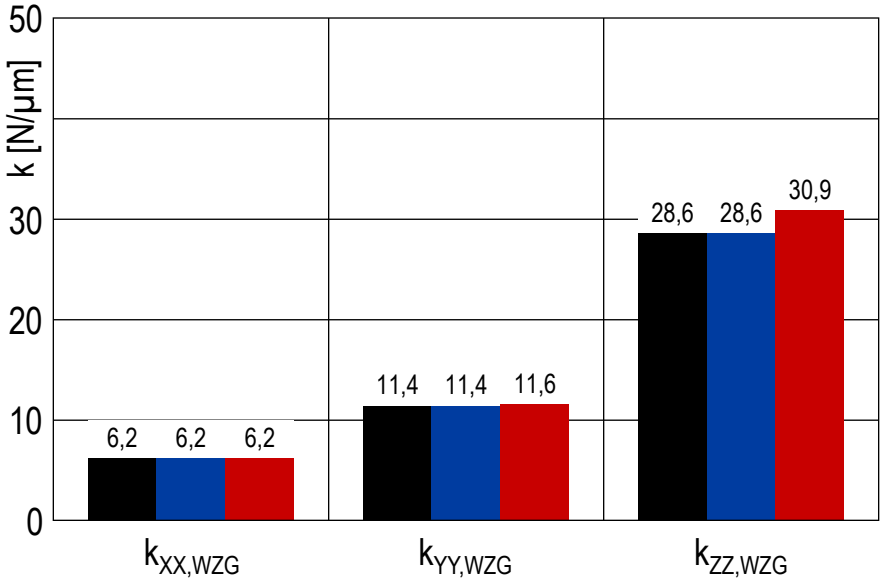
Gliederung

- Einleitung und Aufgabenstellung
- Statisches Verhalten – *Einfluss der Gegenlagerung der Brücke*
- Dynamisches Verhalten
- Zusammenfassung und Empfehlungen

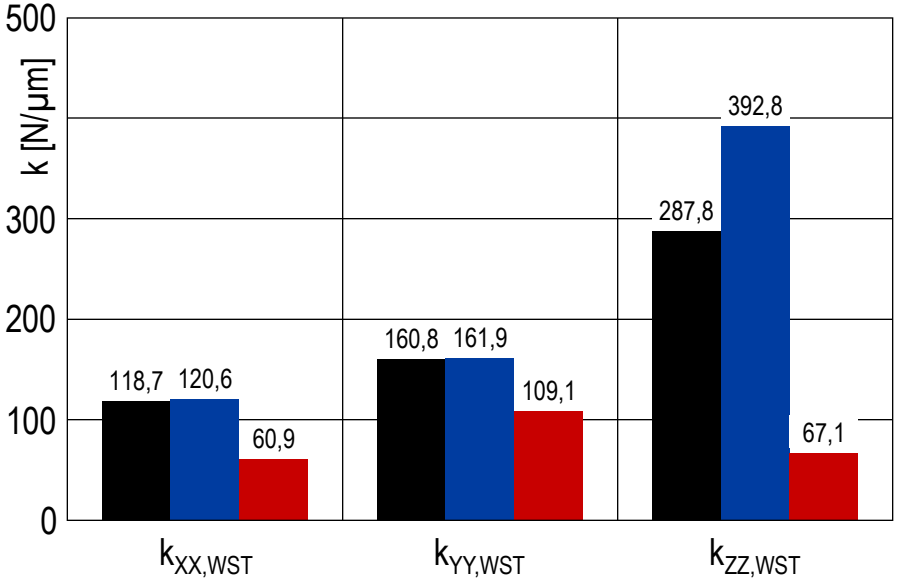
© planlauf GmbH

Gegenüberstellung der statischen Steifigkeiten (Mitte) in Abhängigkeit der Gegenlagerung der Brücke





- Die werkstückseitigen Steifigkeiten werden durch den Verzicht auf das Gegenlager deutlich reduziert. Ein steiferes Gegenlager (YRT 50) bringt hingegen in X- und Y-Richtung keine wesentliche Verbesserung.
- Insgesamt liegen die werkzeugseitigen Steifigkeiten allerdings auch ohne Gegenlager um den Faktor 10 unterhalb der Werte der Werkstückseite.
- **Für die statischen Steifigkeiten ist ein Gegenlager der Brücke nicht zwangsläufig erforderlich, da das Verhalten aktuell von der Werkzeugseite dominiert wird.**



© planlauf GmbH

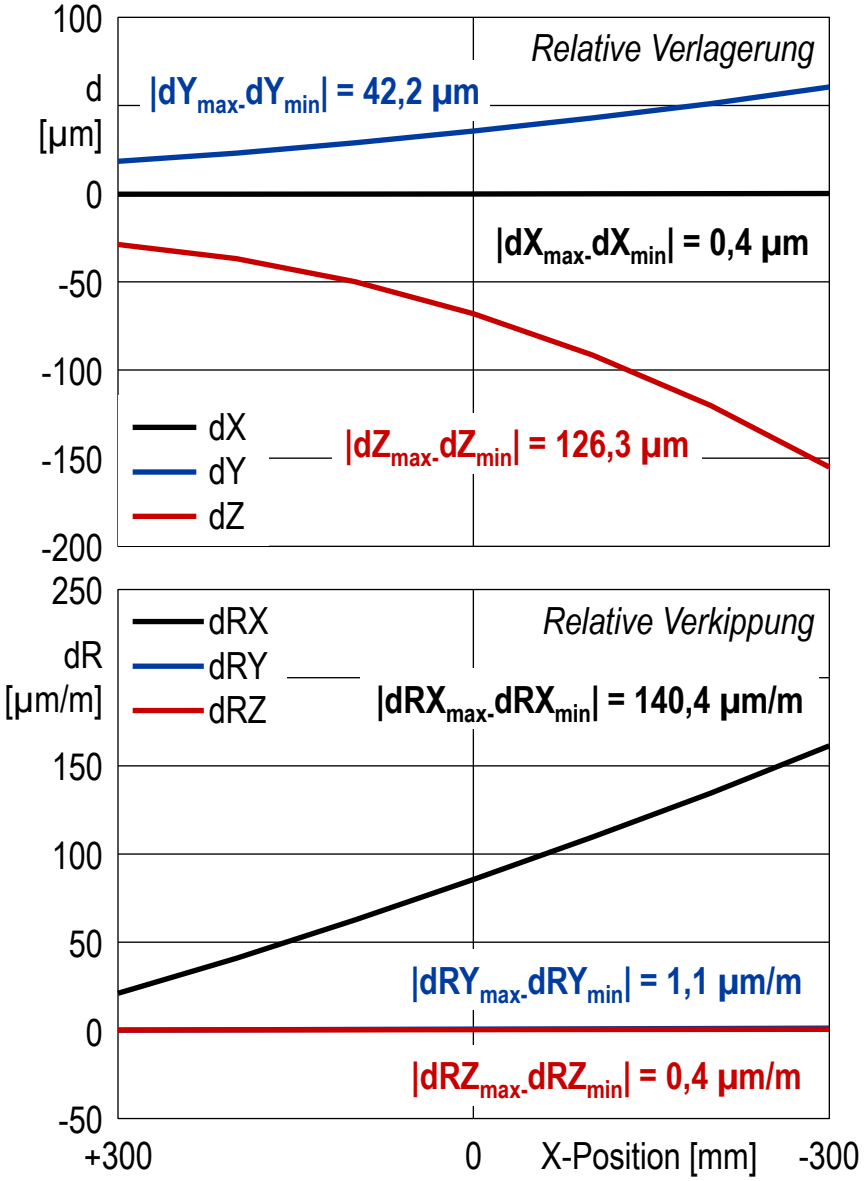
Gliederung

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

© planlauf GmbH

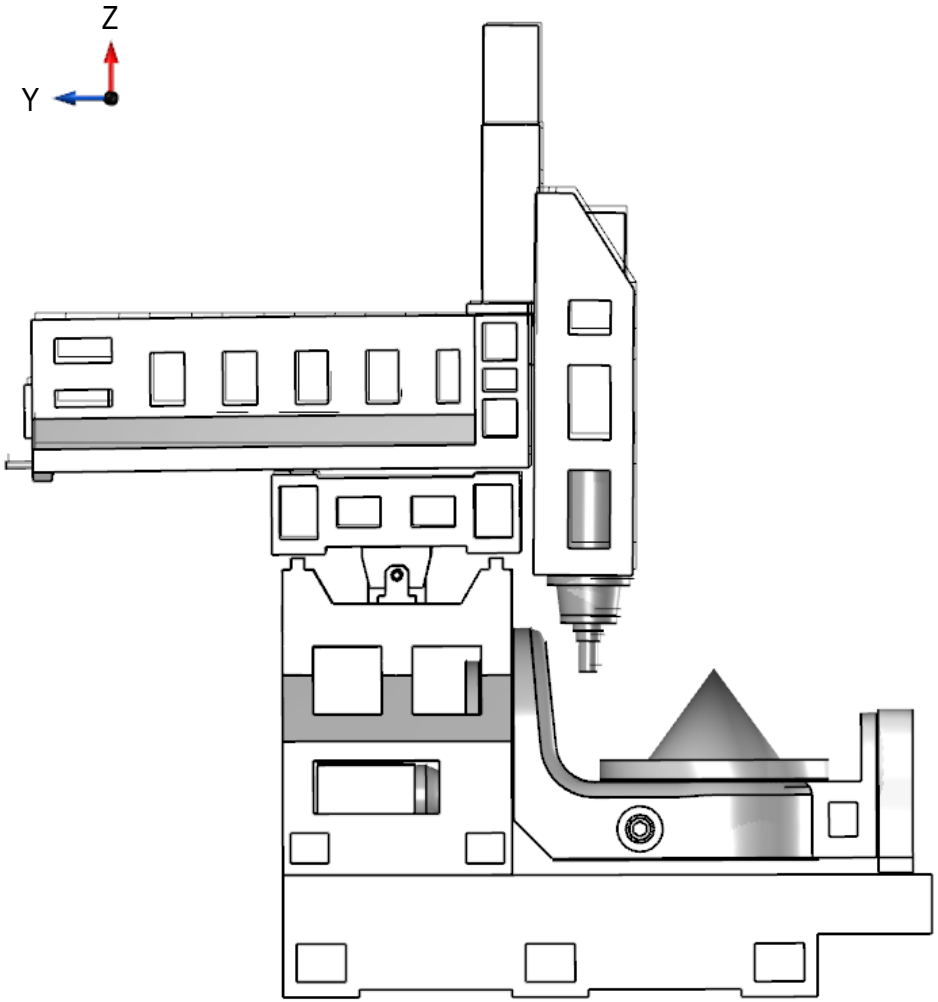
Verformung unter dem Eigengewicht der Y-Achse Zusammenfassung

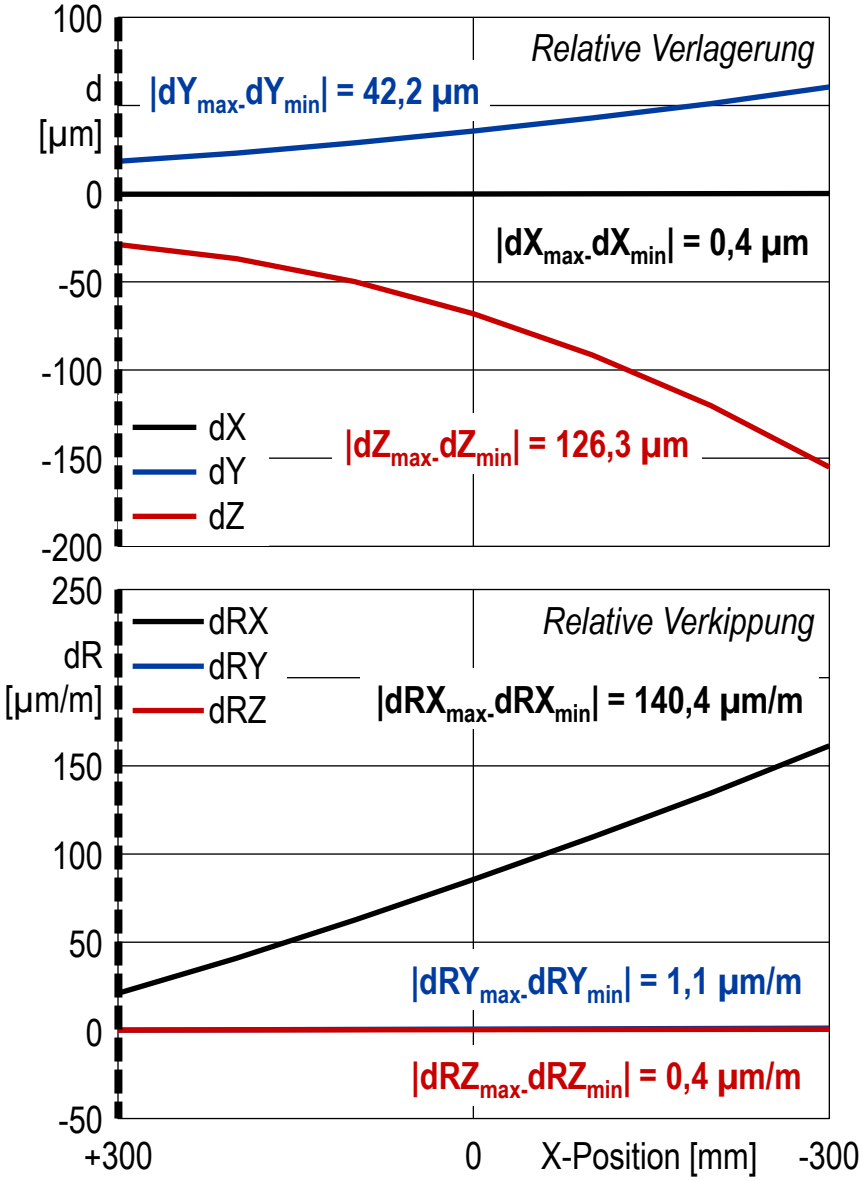
- Die maximalen relativen Verlagerungen zwischen Werkzeug und Werkstück treten mit ca. 125 µm in Z-Richtung auf.
- Die Ursache für diese vergleichsweise große Verlagerung liegt in der weit vorne konzentrierten Masse von Z-Einheit und Hauptspindel sowie der geringen Steifigkeit des Y-Schlittens.
- **Die auftretetenden Verlagerungen und Winkelfehler sind für eine Maschine dieser Baugröße vergleichsweise hoch, so dass die Versteifung des Y-Schlittens sowie ein größerer Abstand der Führungsschienen der X-Achse empfohlen wird.**
- **Zusätzlich sollte montageseitig versucht werden, die Verlagerung in Z-Richtung durch ein Anstellen der vorderen Y-Führungswagen zu verringern. Eine steuerungstechnische Kompensation zur Reduzierung der geometrischen Abweichung erscheint ebenfalls empfehlenswert.**



© planlauf GmbH

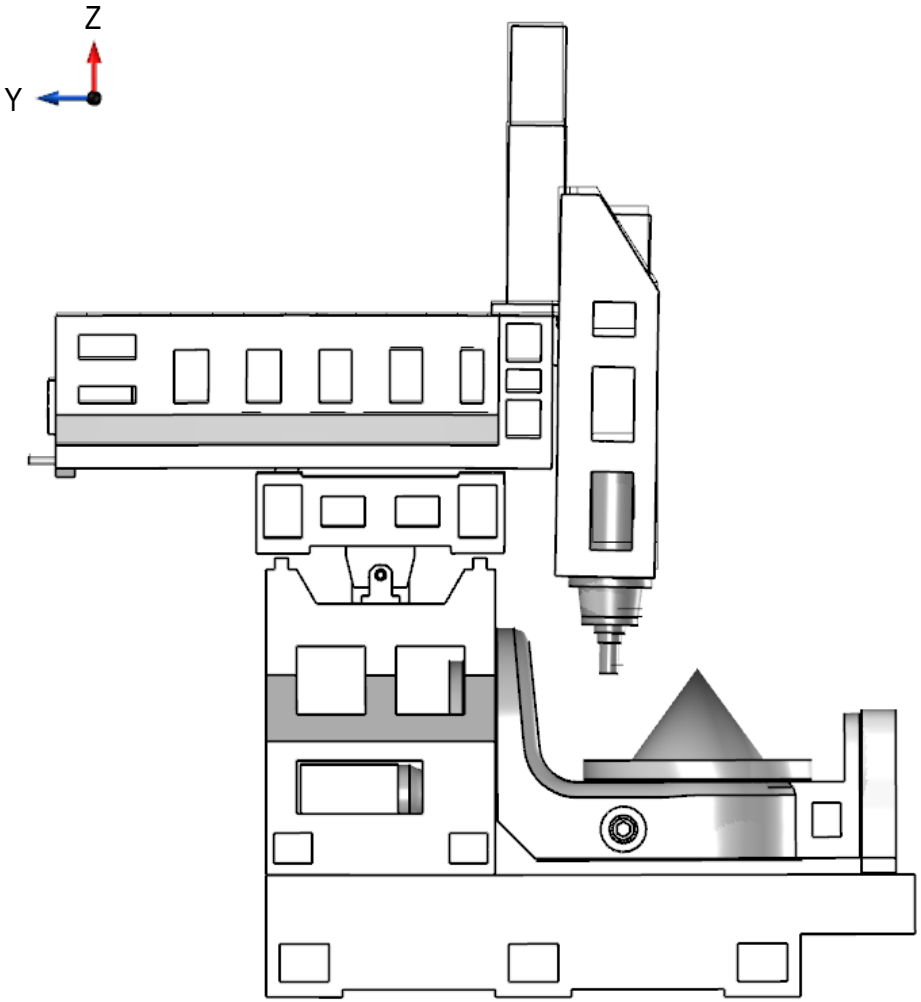
Verformung unter dem Eigengewicht der Y-Achse
Y-Position +300 mm

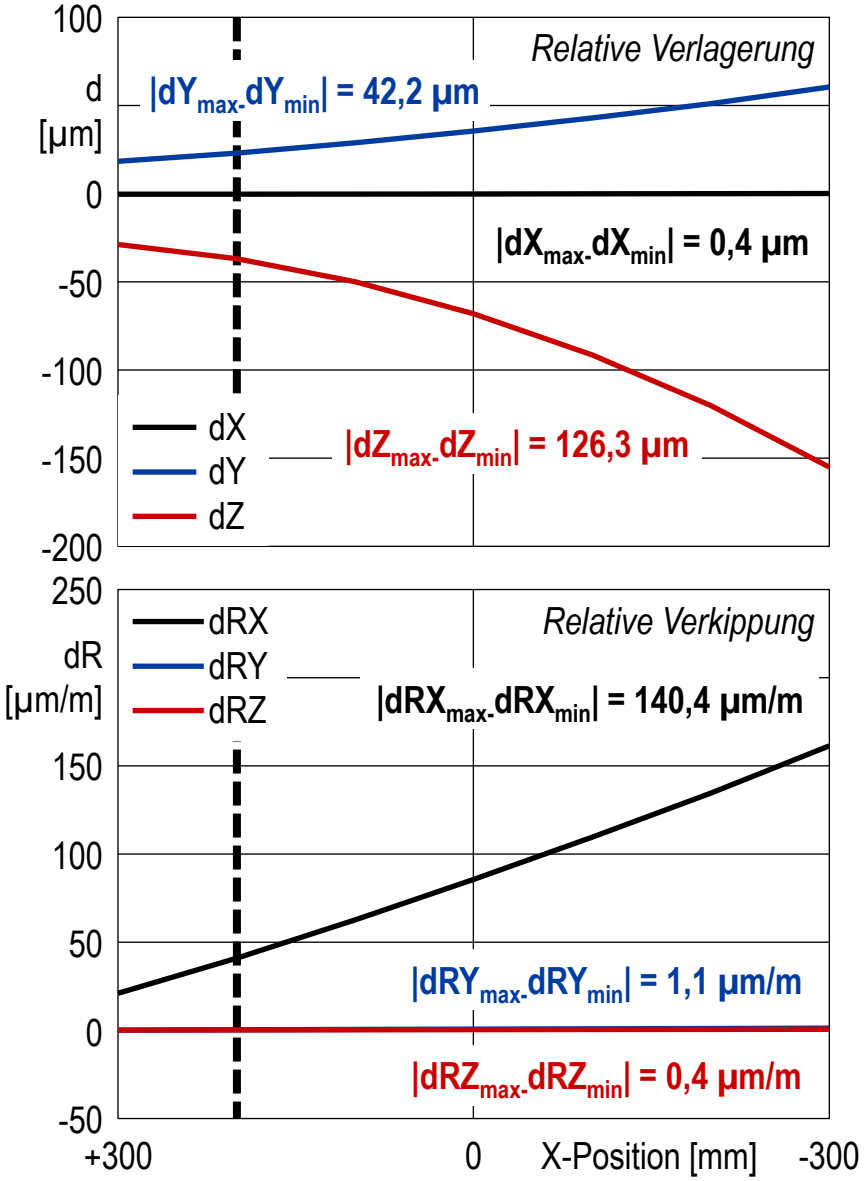




© planlauf GmbH

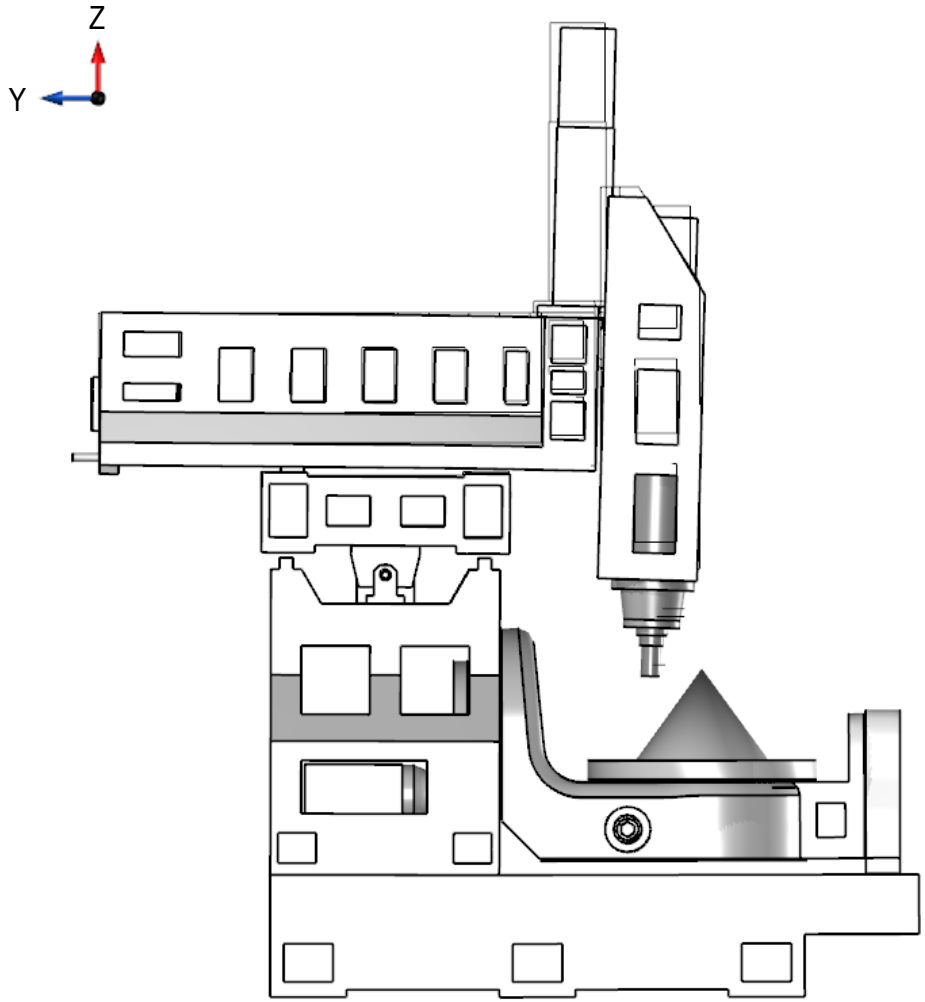
Verformung unter dem Eigengewicht der Y-Achse
Y-Position +200 mm

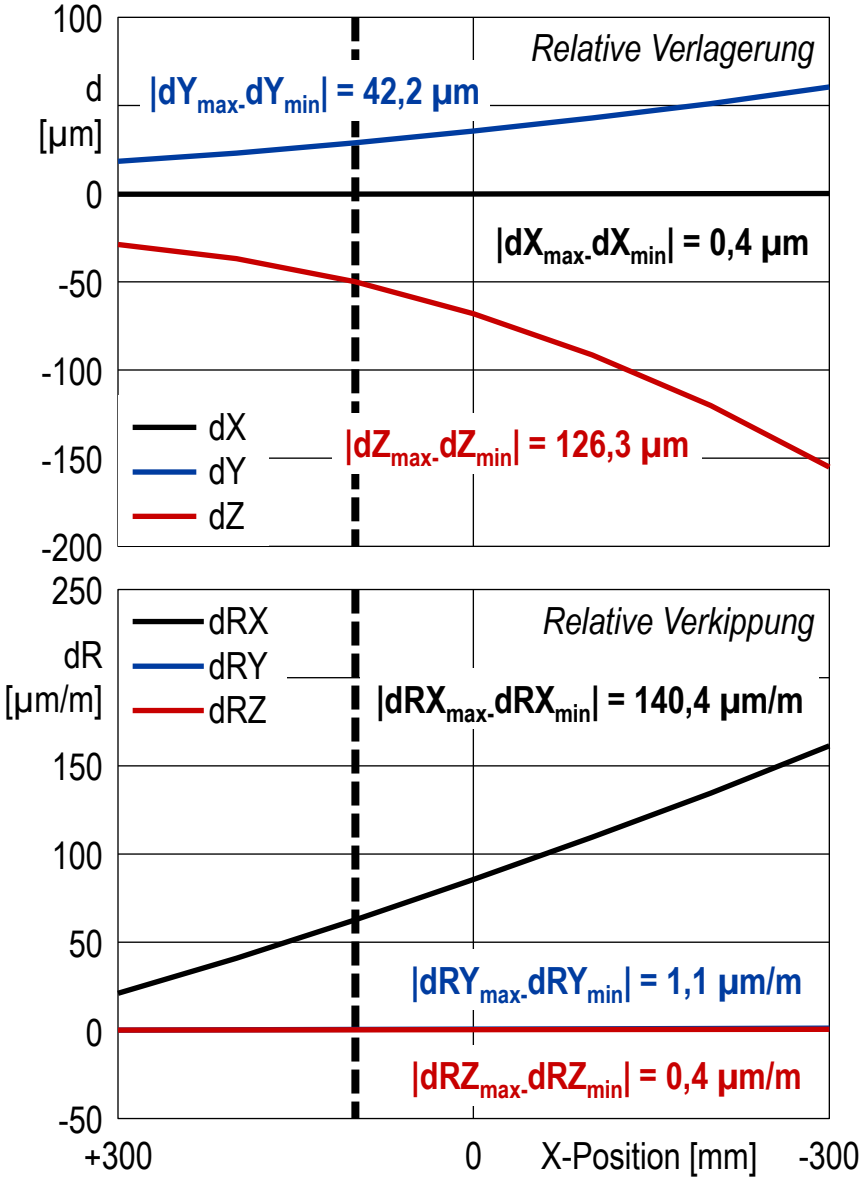




© planlauf GmbH

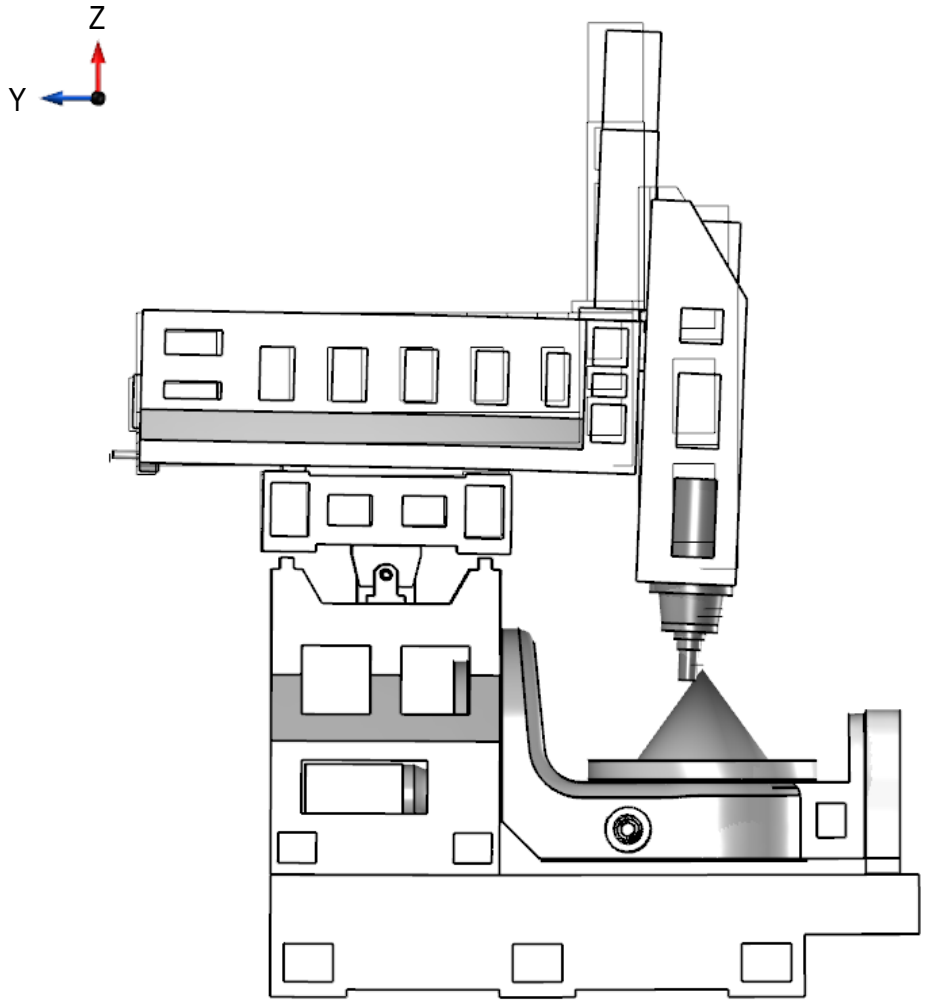
Verformung unter dem Eigengewicht der Y-Achse
Y-Position +100 mm

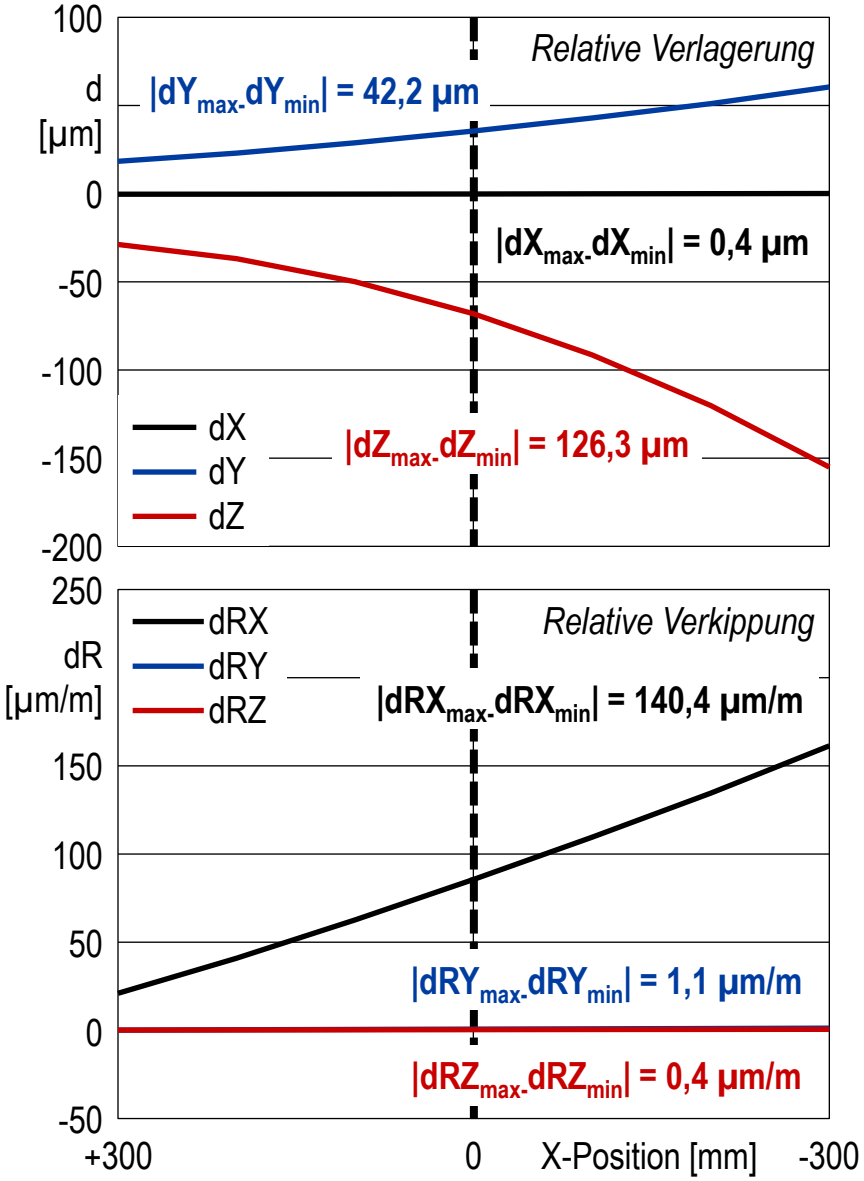




© planlauf GmbH

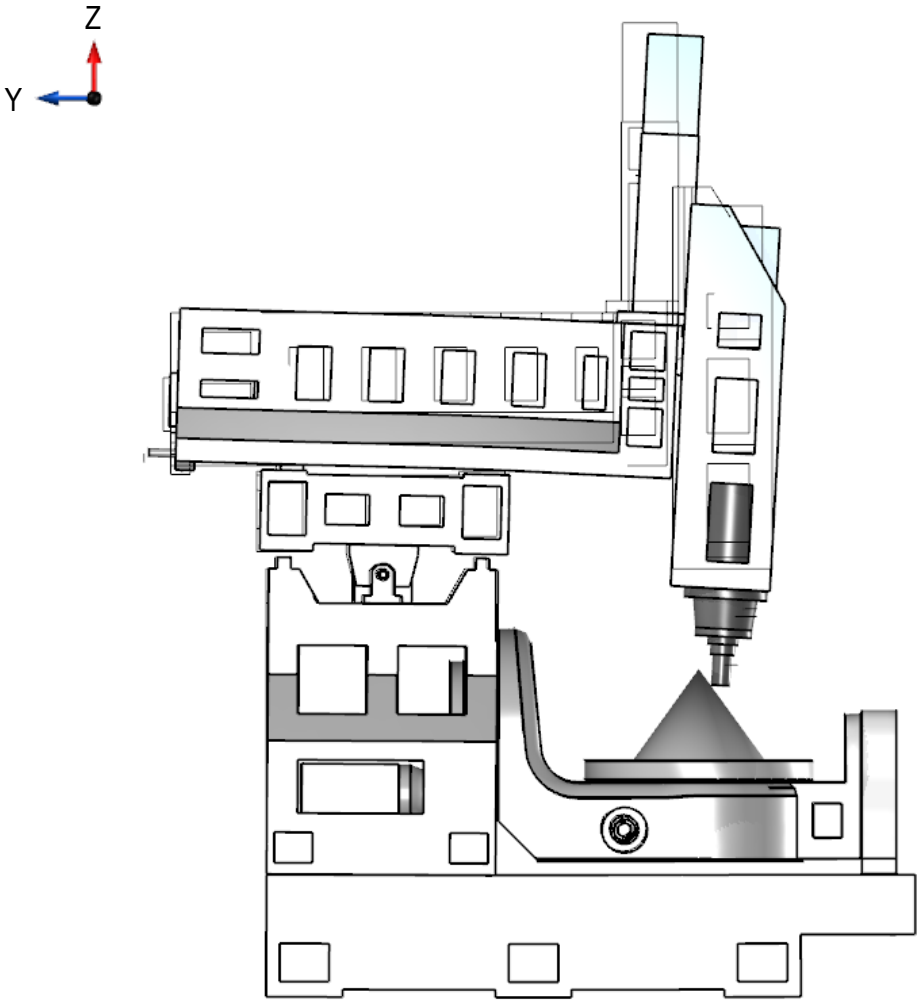
Verformung unter dem Eigengewicht der Y-Achse
Y-Position 0 mm

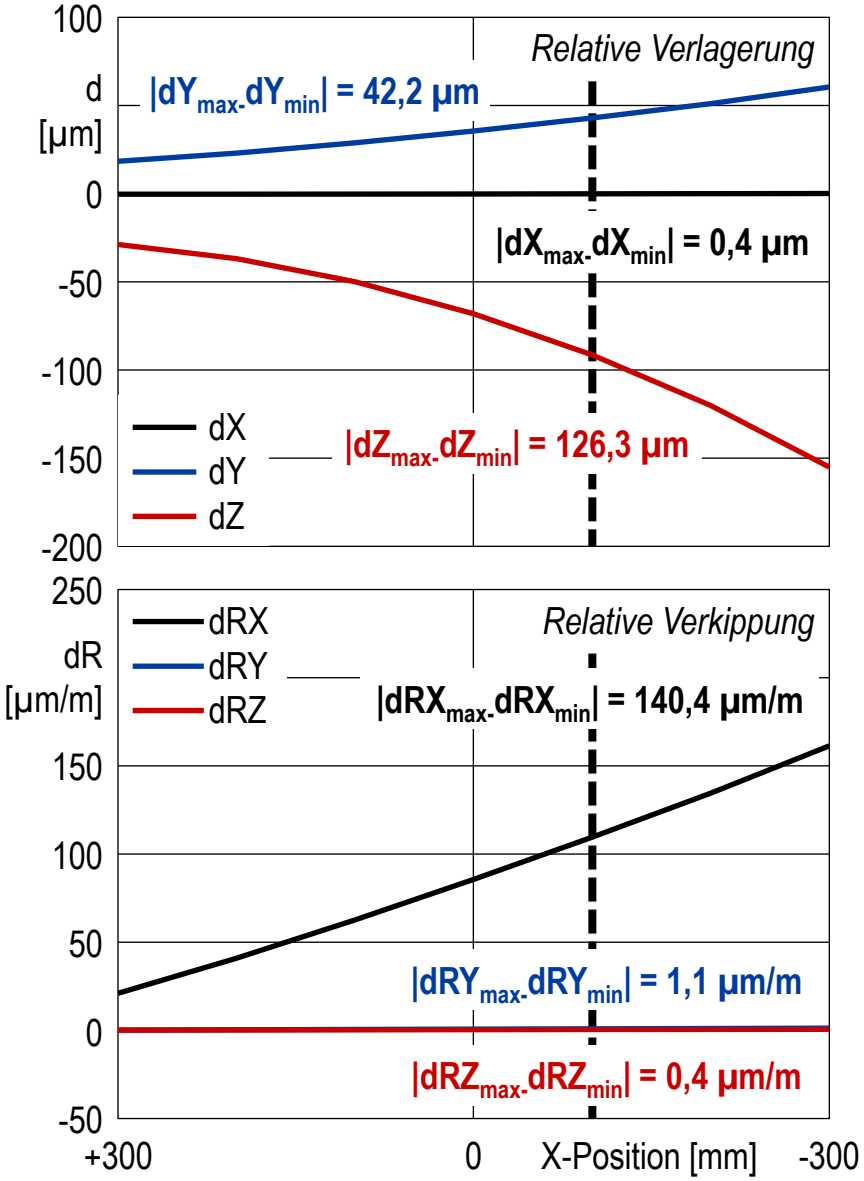




© planlauf GmbH

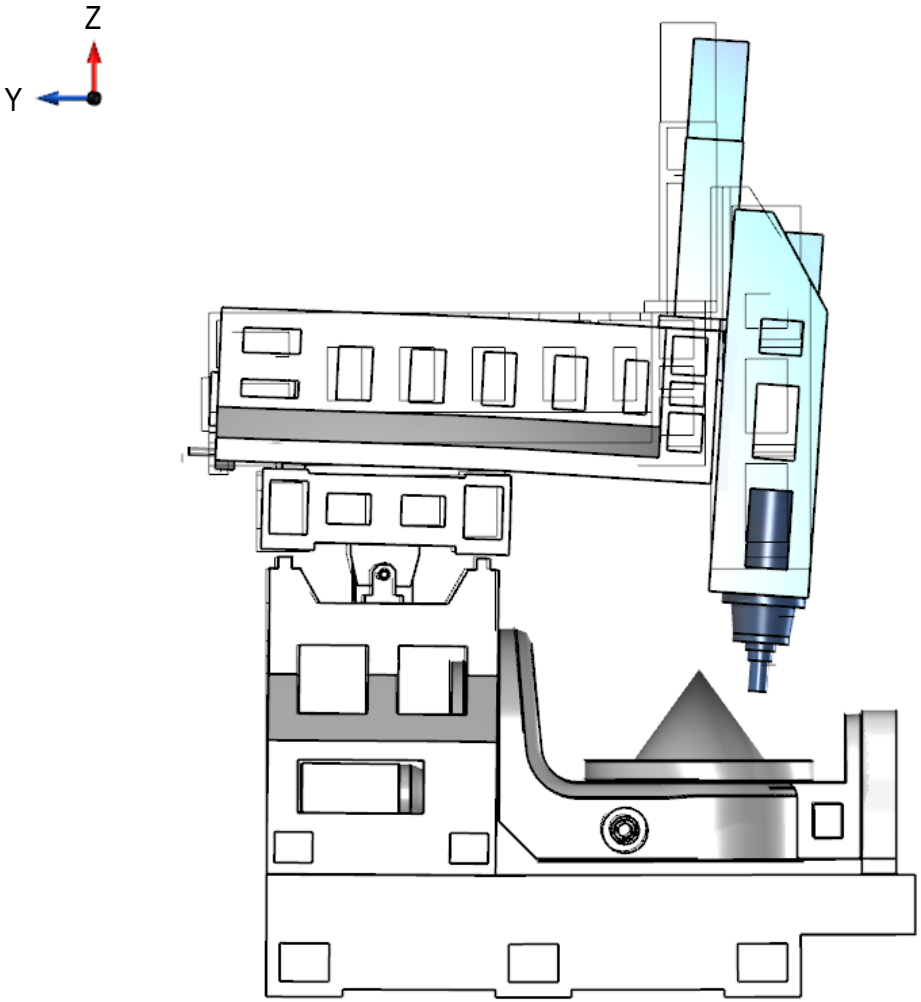
Verformung unter dem Eigengewicht der Y-Achse
Y-Position -100 mm

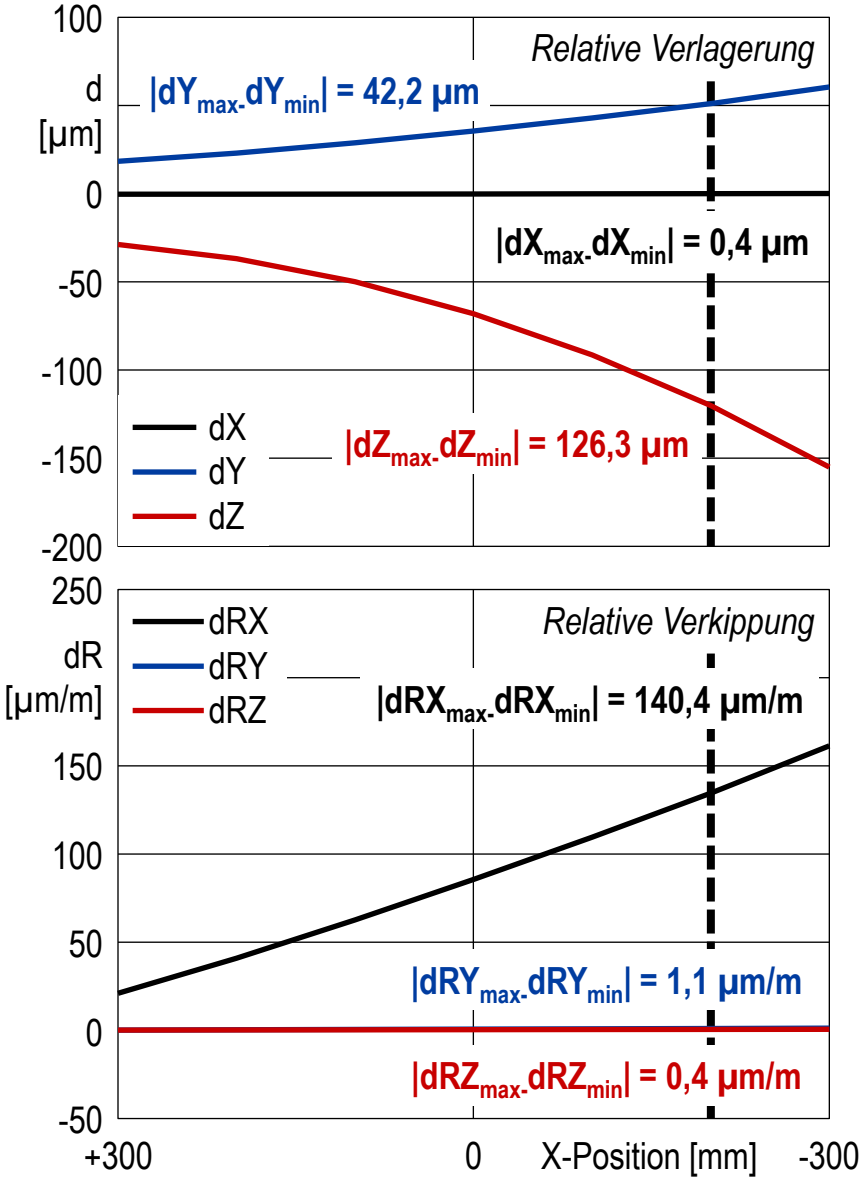




© planlauf GmbH

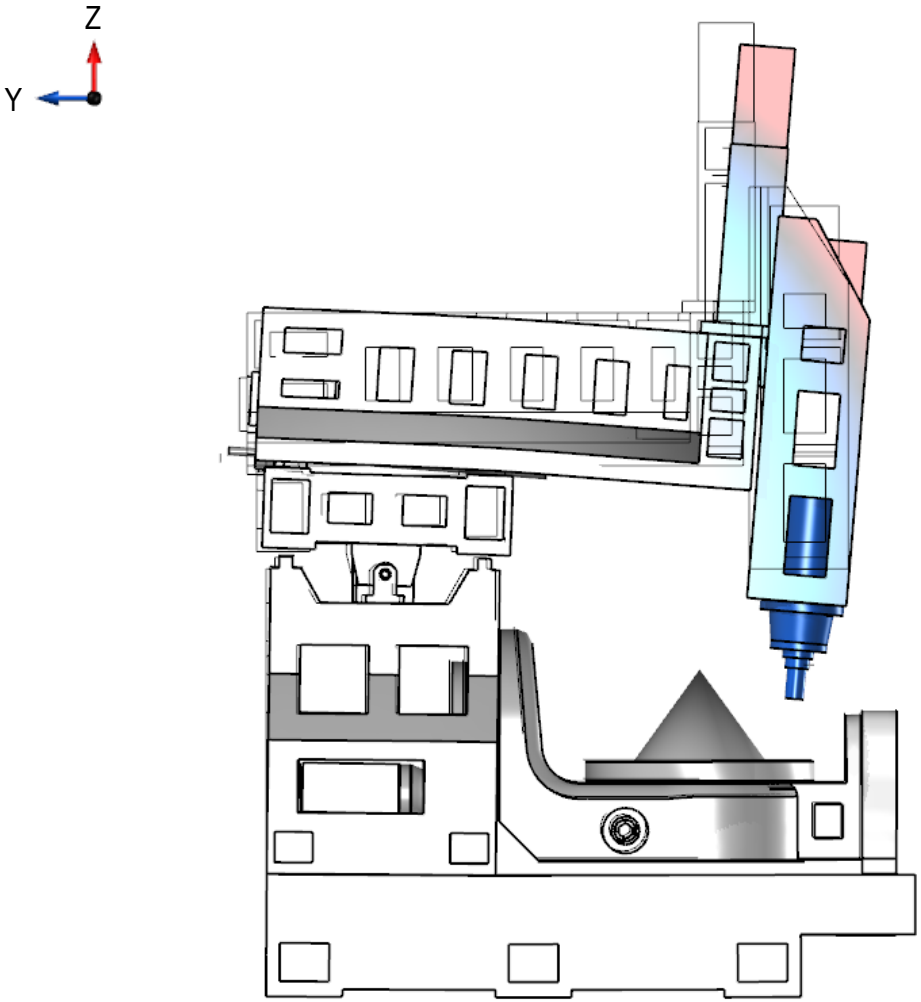
Verformung unter dem Eigengewicht der Y-Achse
Y-Position -200 mm

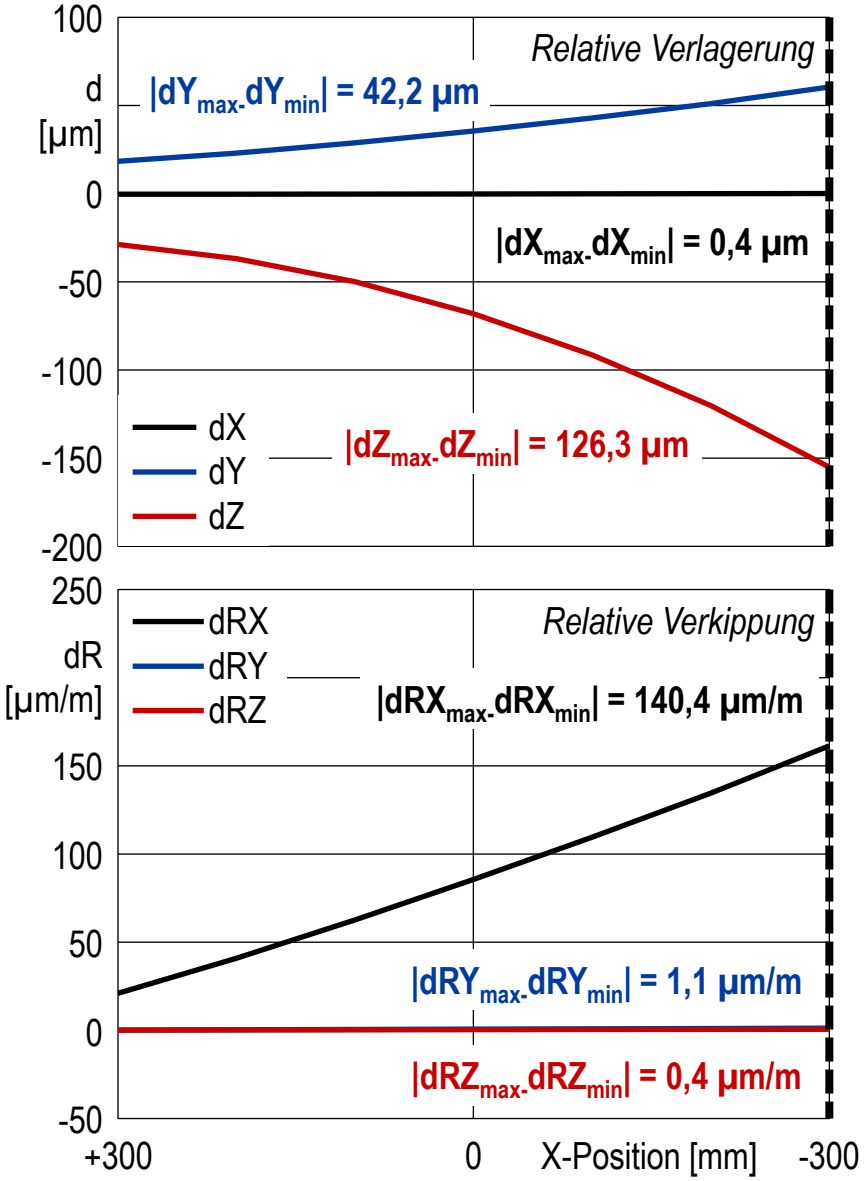




© planlauf GmbH

Verformung unter dem Eigengewicht der Y-Achse
Y-Position -300 mm





© planlauf GmbH

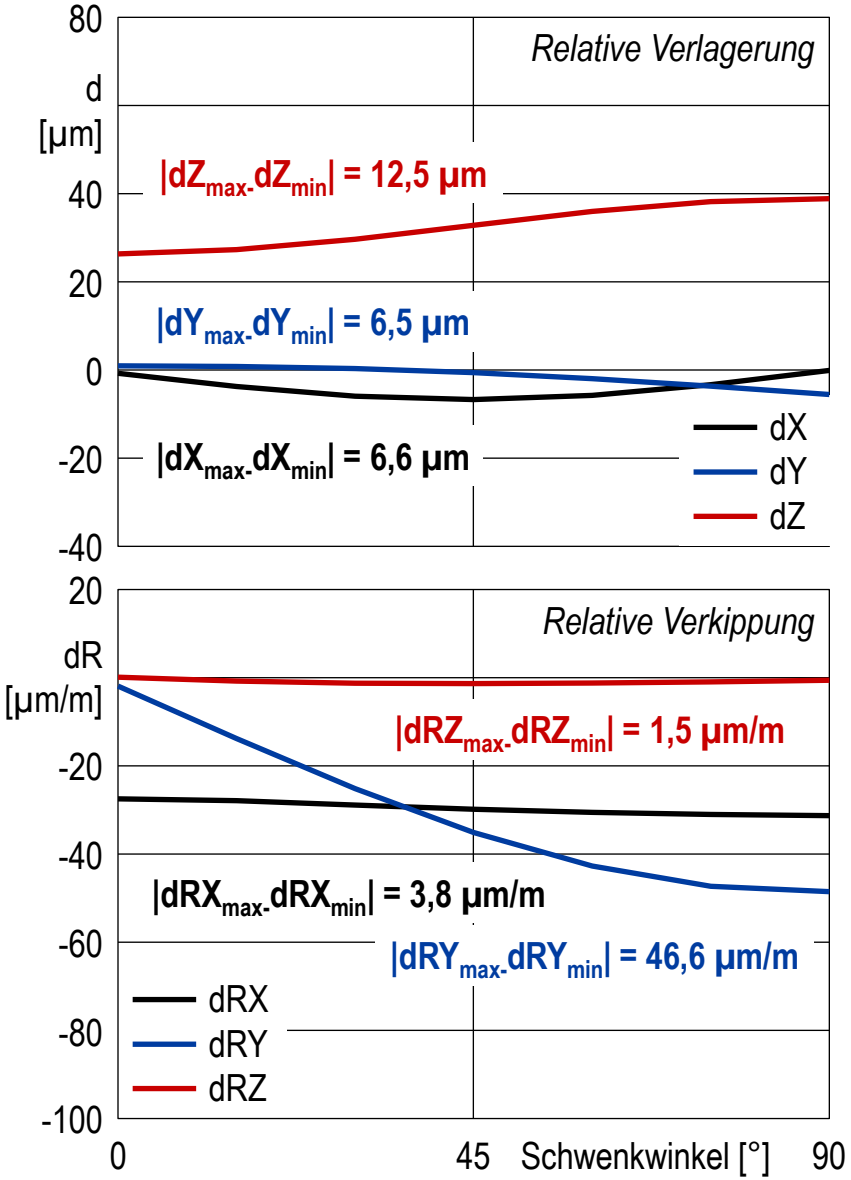
Gliederung

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

© planlauf GmbH

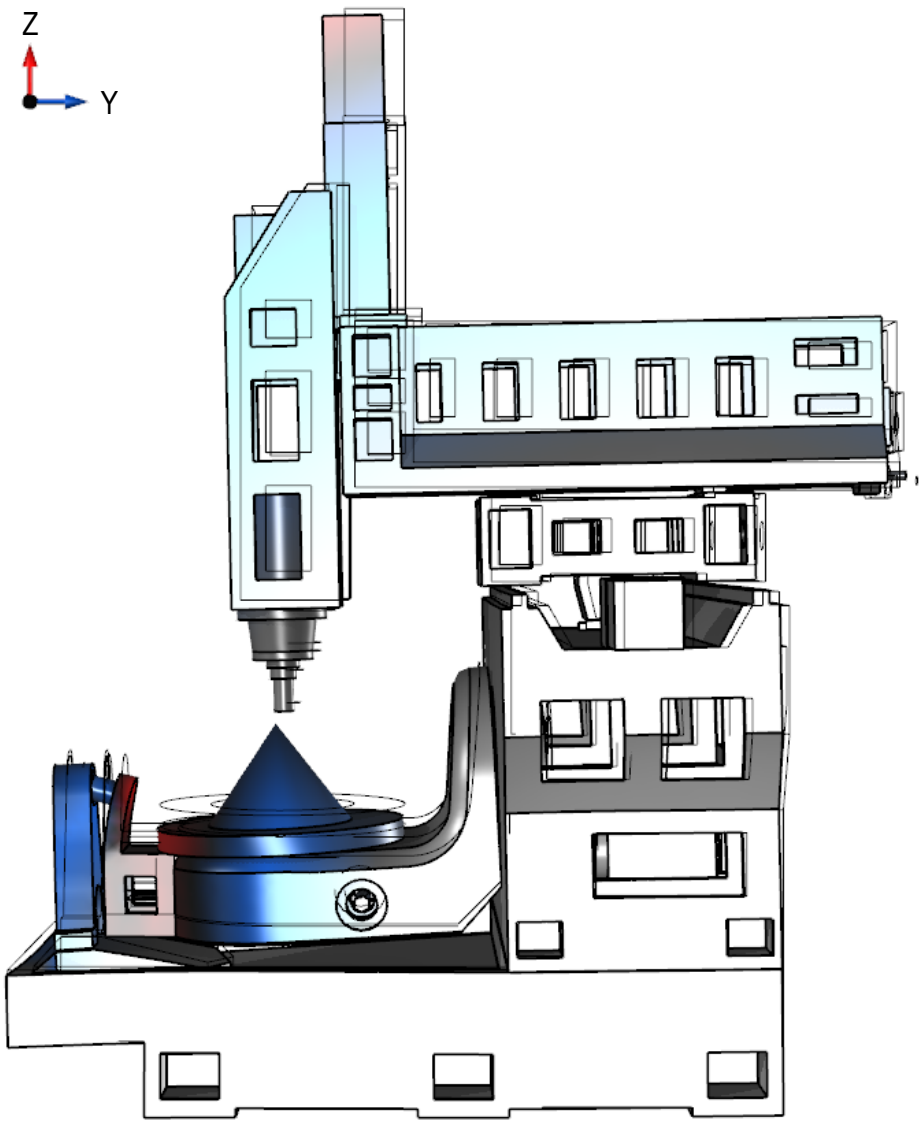
Verformung unter dem Eigengewicht der B-Achse
Zusammenfassung

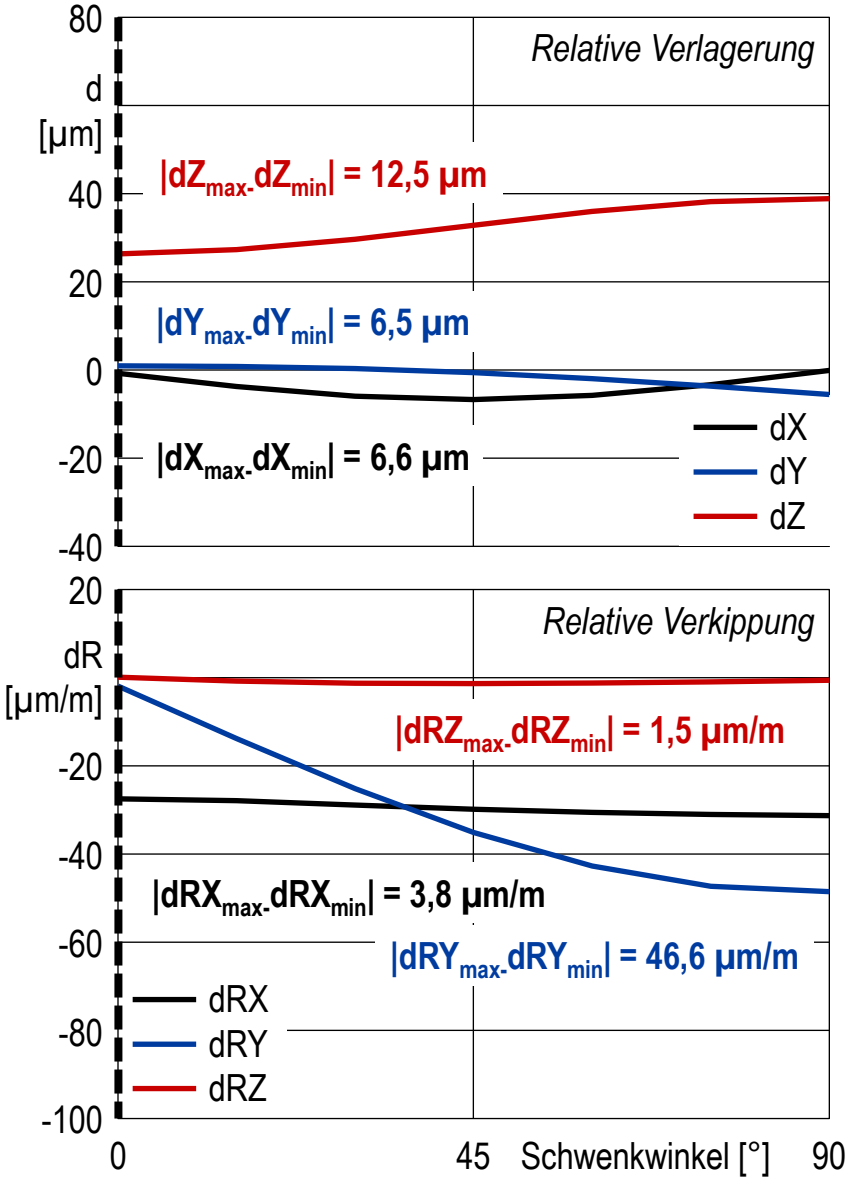
- Die maximalen relativen Verlagerungen zwischen Werkzeug und Werkstück treten mit ca. 13 µm in Z-Richtung auf.
- Die maximale Schiefstellung beträgt 47 µm/m bei einem Schwenkwinkel von 90°.
- Die Ursache für diese Verformungen liegt in der begrenzten Kippsteifigkeit des B-Achs-Lagers, in der Verformung der Anbindung der Gegenlagerung sowie in der Torsionssteifigkeit der Brücke.
- **Die Versteifung der Anbindung der Gegenlagerung an der Brücke und am Bett sollte zu einer Verbesserung des Verhaltens führen.**
- **Die Erhöhung der Torsionssteifigkeit der Brücke könnte z.B. über eine Vergrößerung des Querschnitts erreicht werden.**



© planlauf GmbH

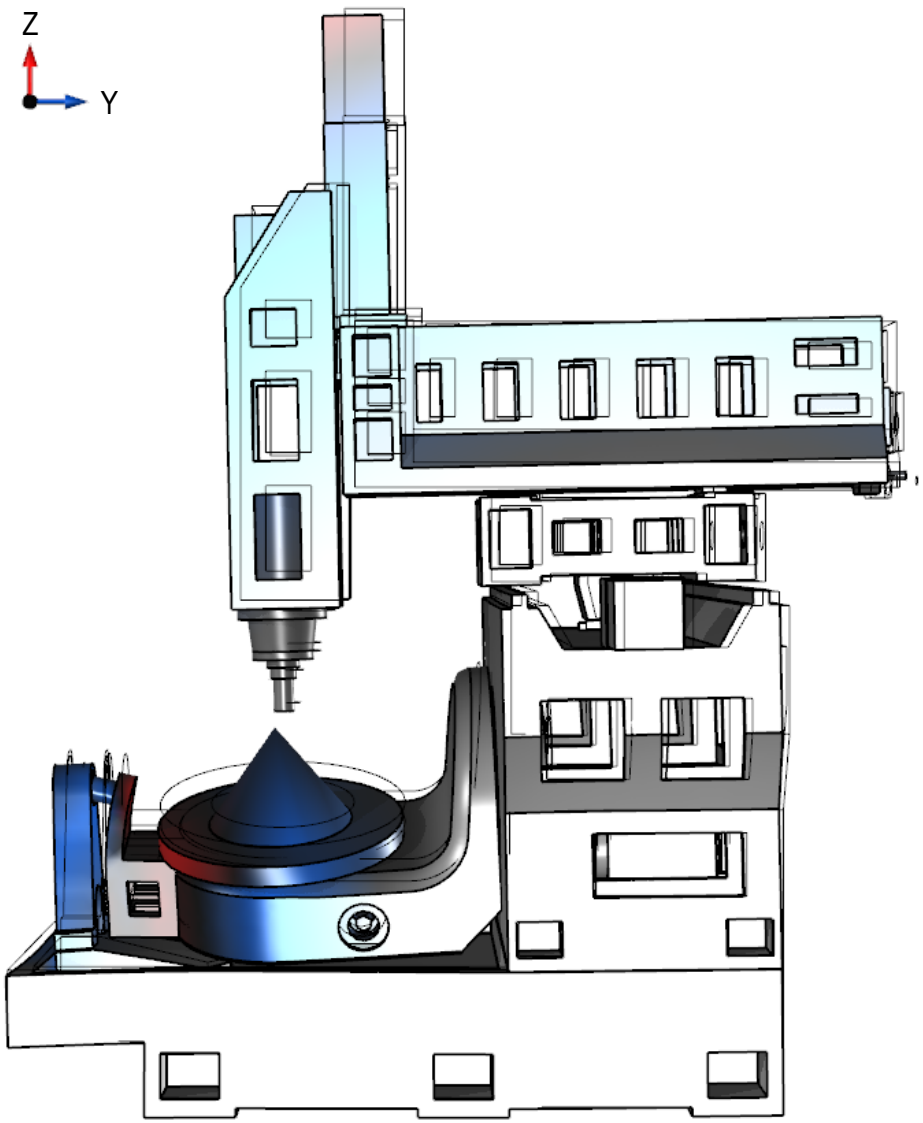
Verformung unter dem Eigengewicht der B-Achse
Schwenkwinkel 0°

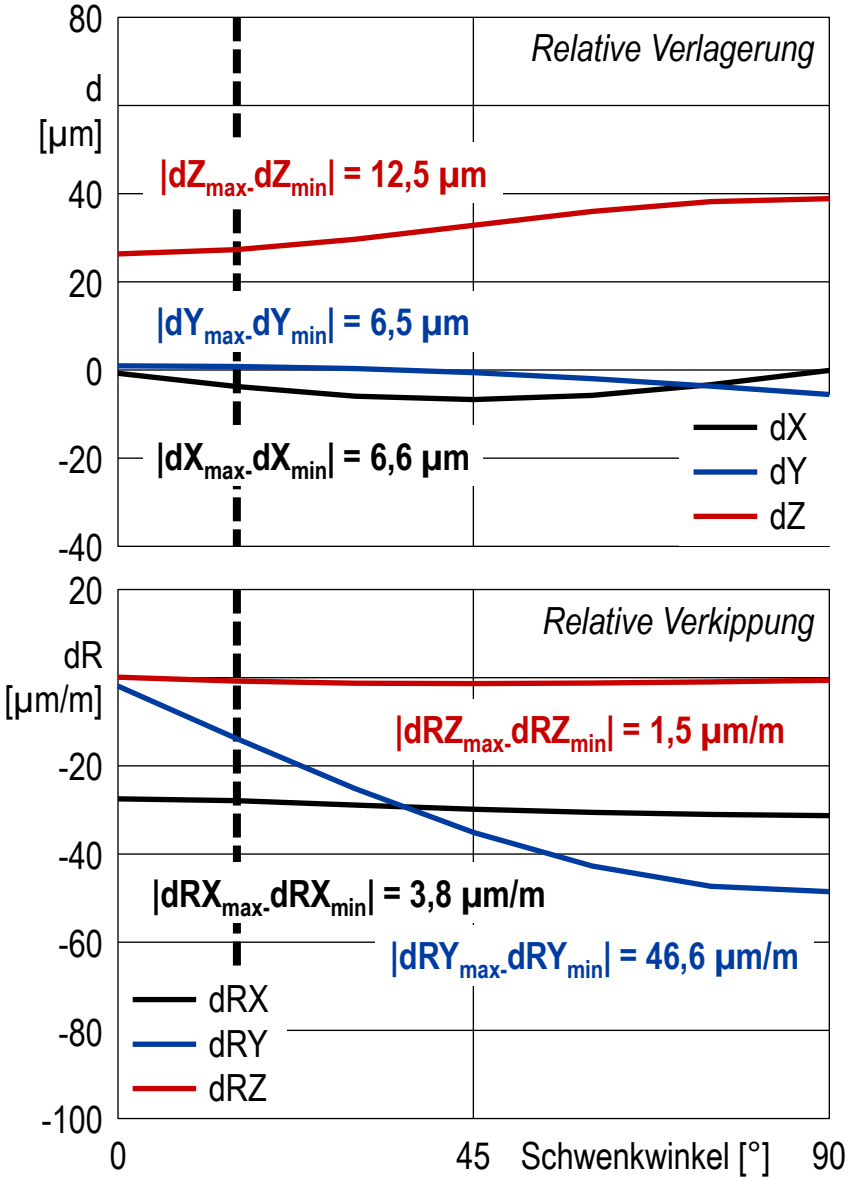




© planlauf GmbH

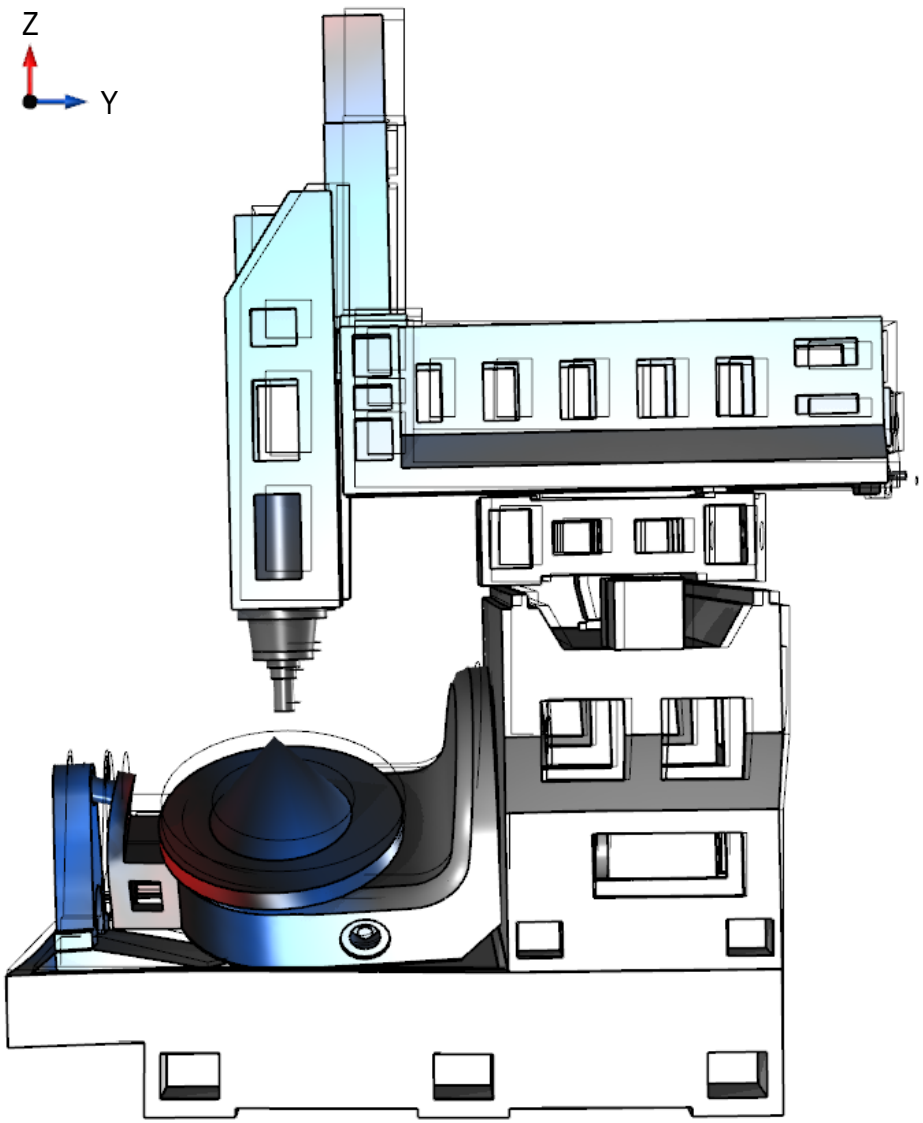
Verformung unter dem Eigengewicht der B-Achse
Schwenkwinkel 15°

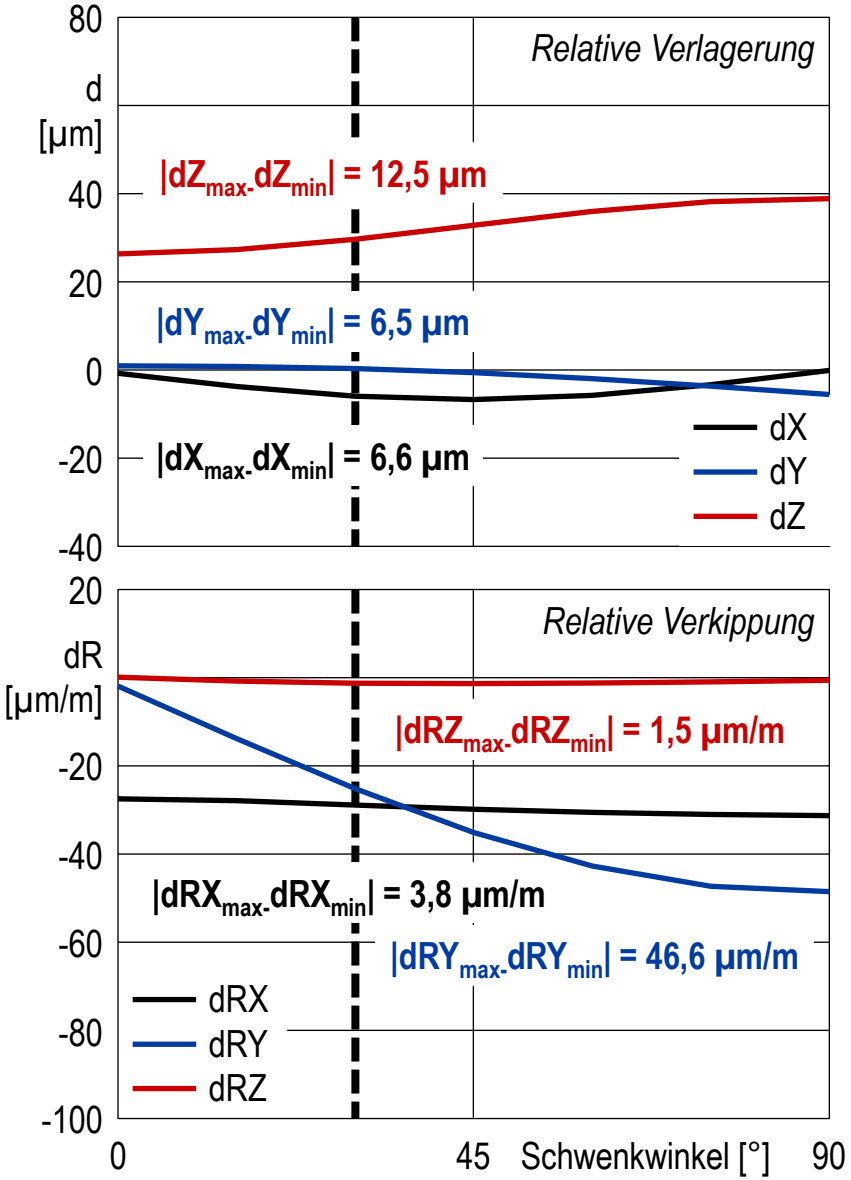




© planlauf GmbH

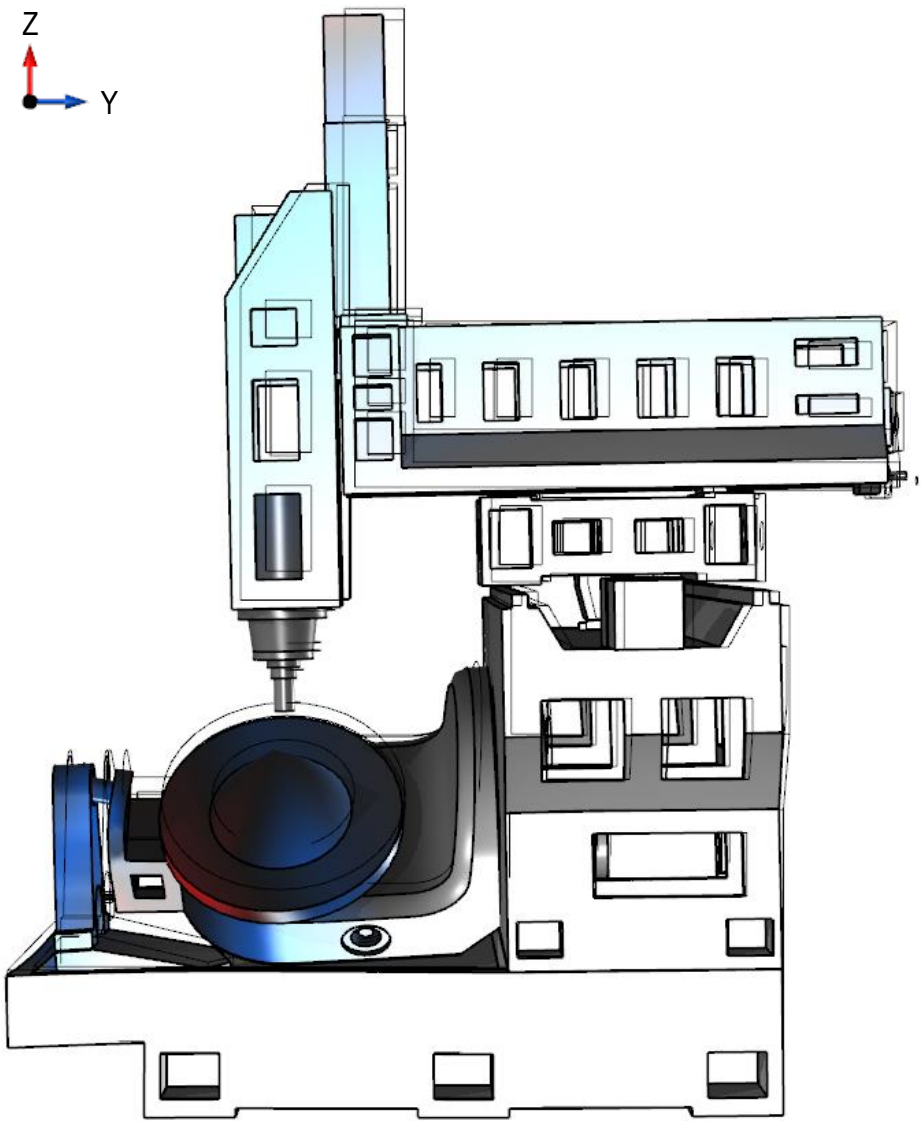
Verformung unter dem Eigengewicht der B-Achse
Schwenkwinkel 30°

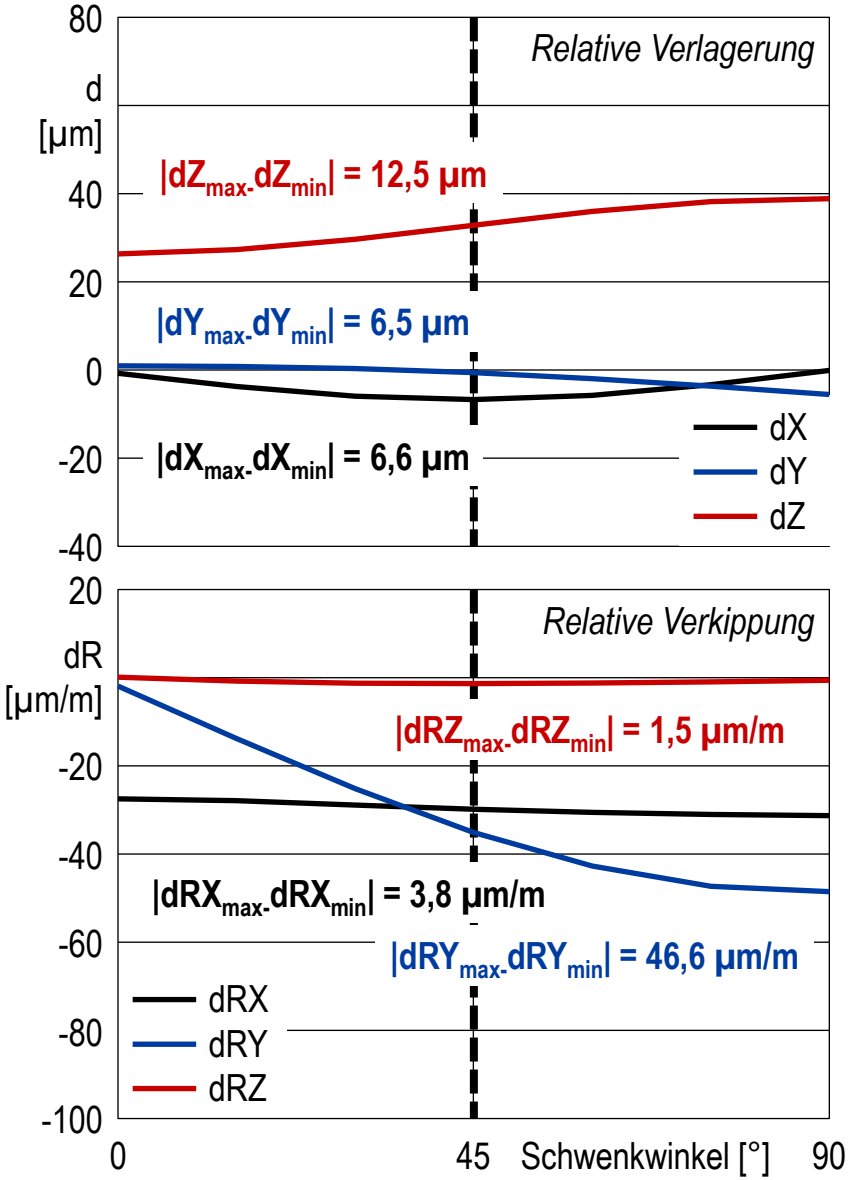




© planlauf GmbH

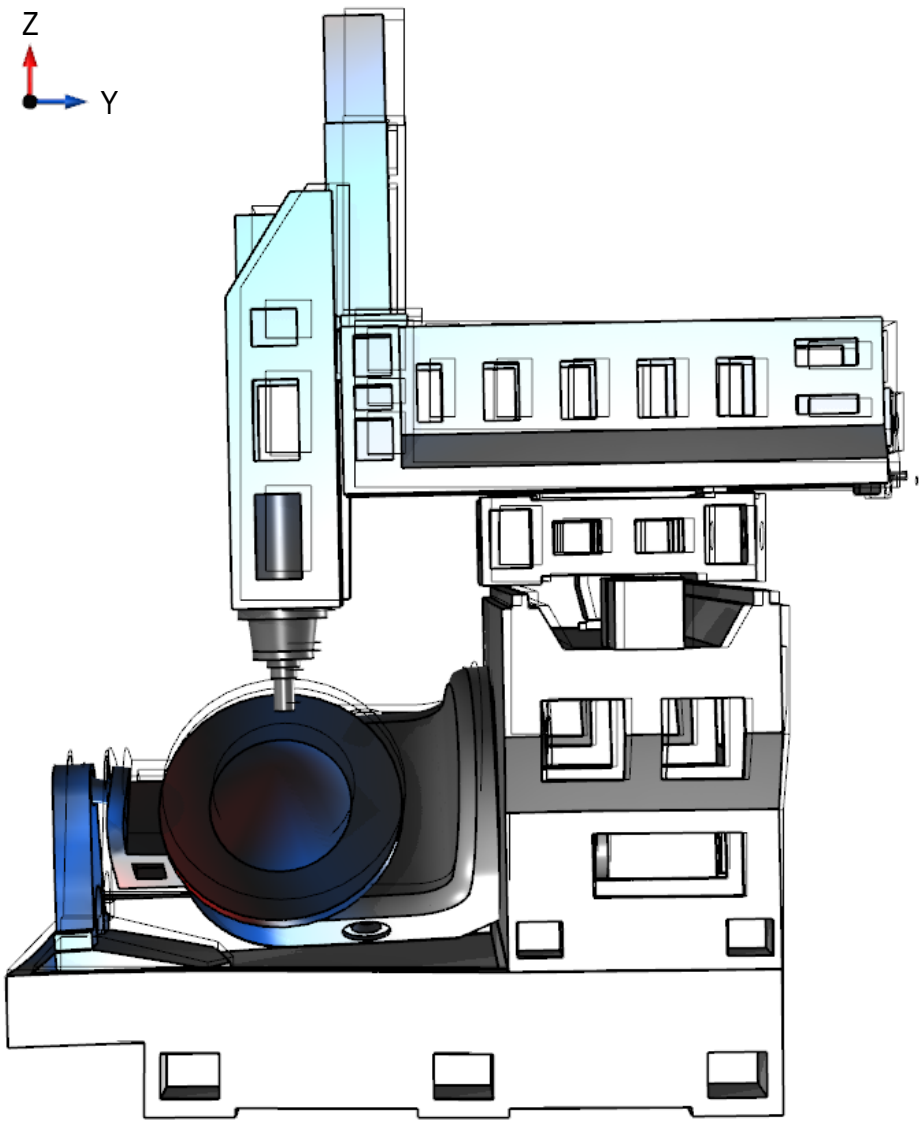
Verformung unter dem Eigengewicht der B-Achse
Schwenkwinkel 45°

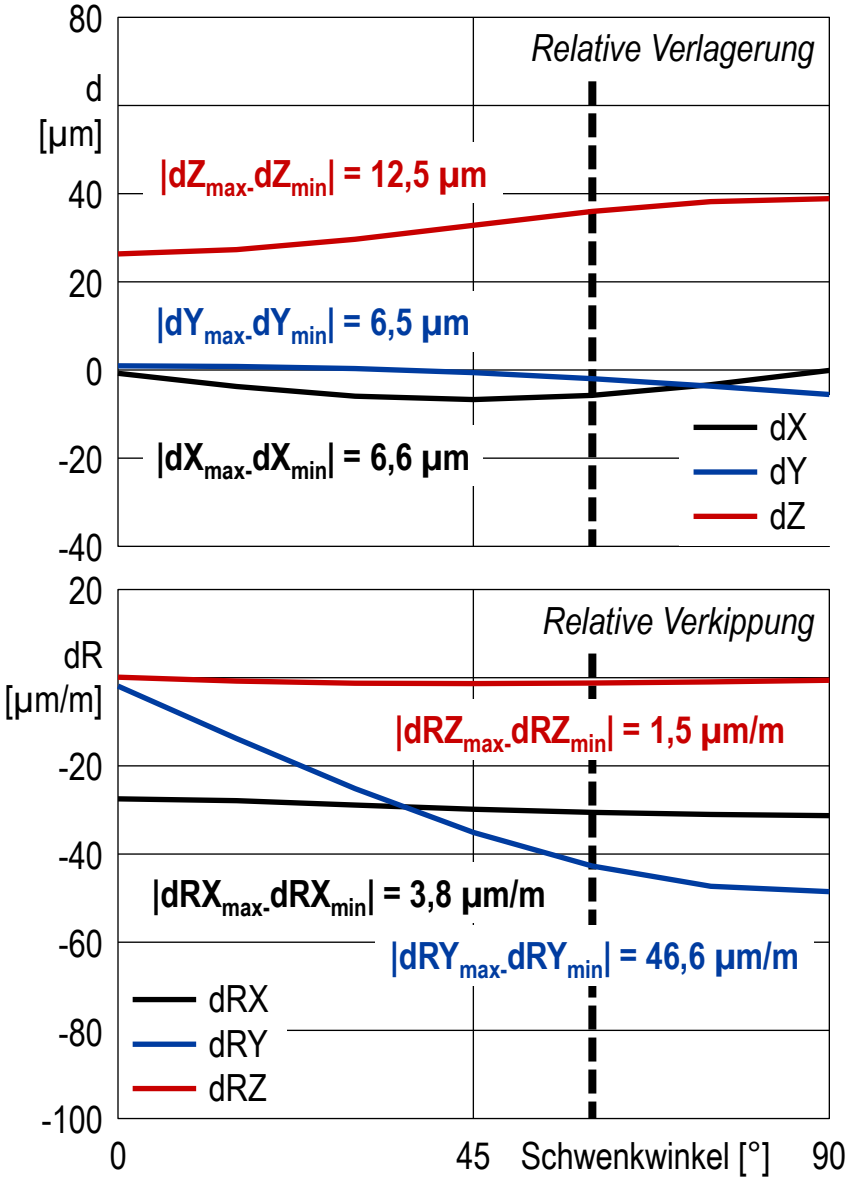




© planlauf GmbH

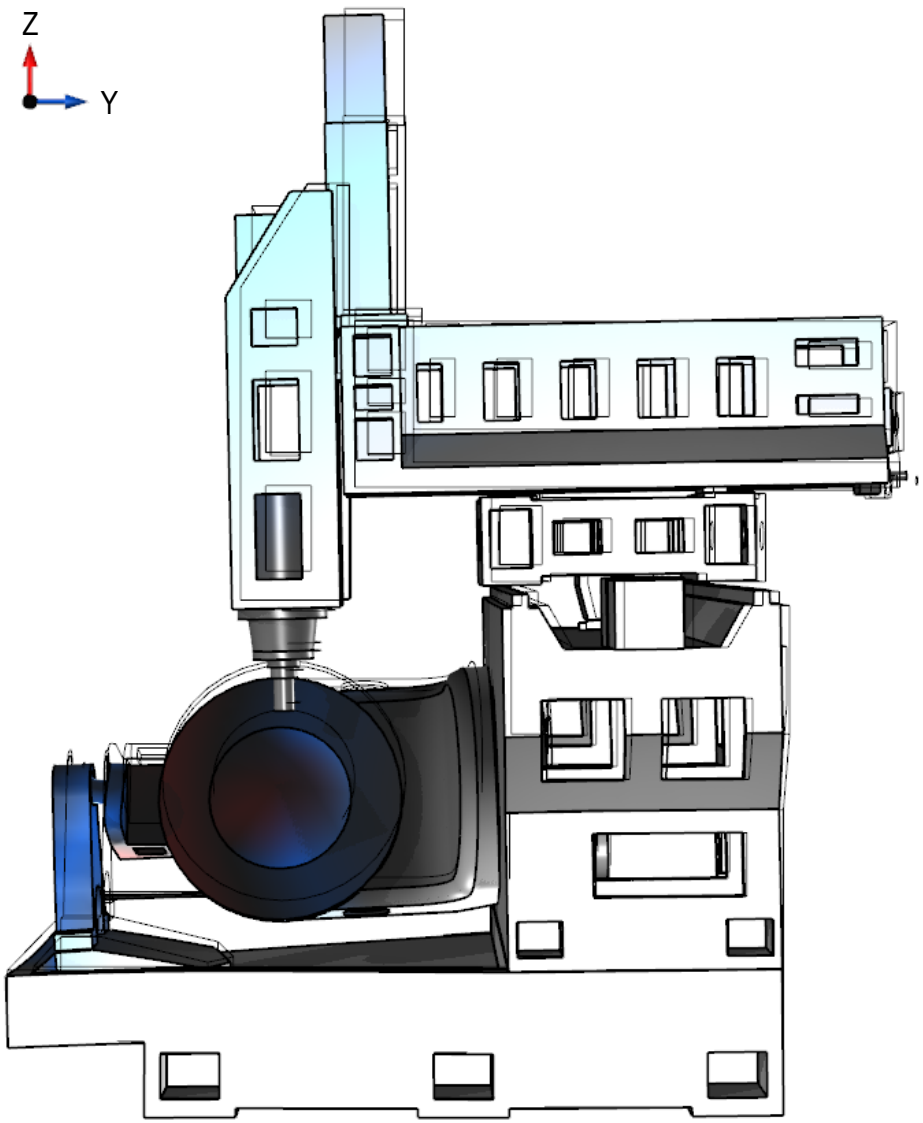
Verformung unter dem Eigengewicht der B-Achse
Schwenkwinkel 60°

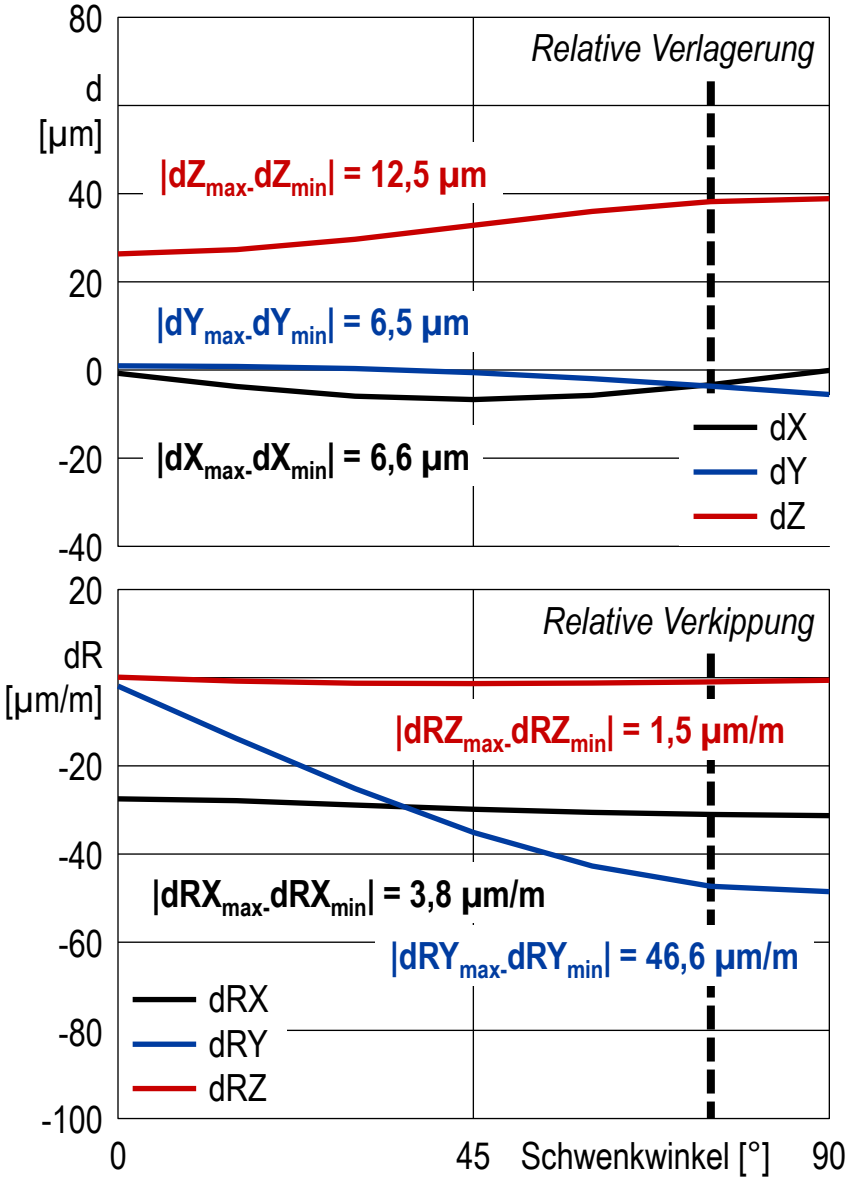




© planlauf GmbH

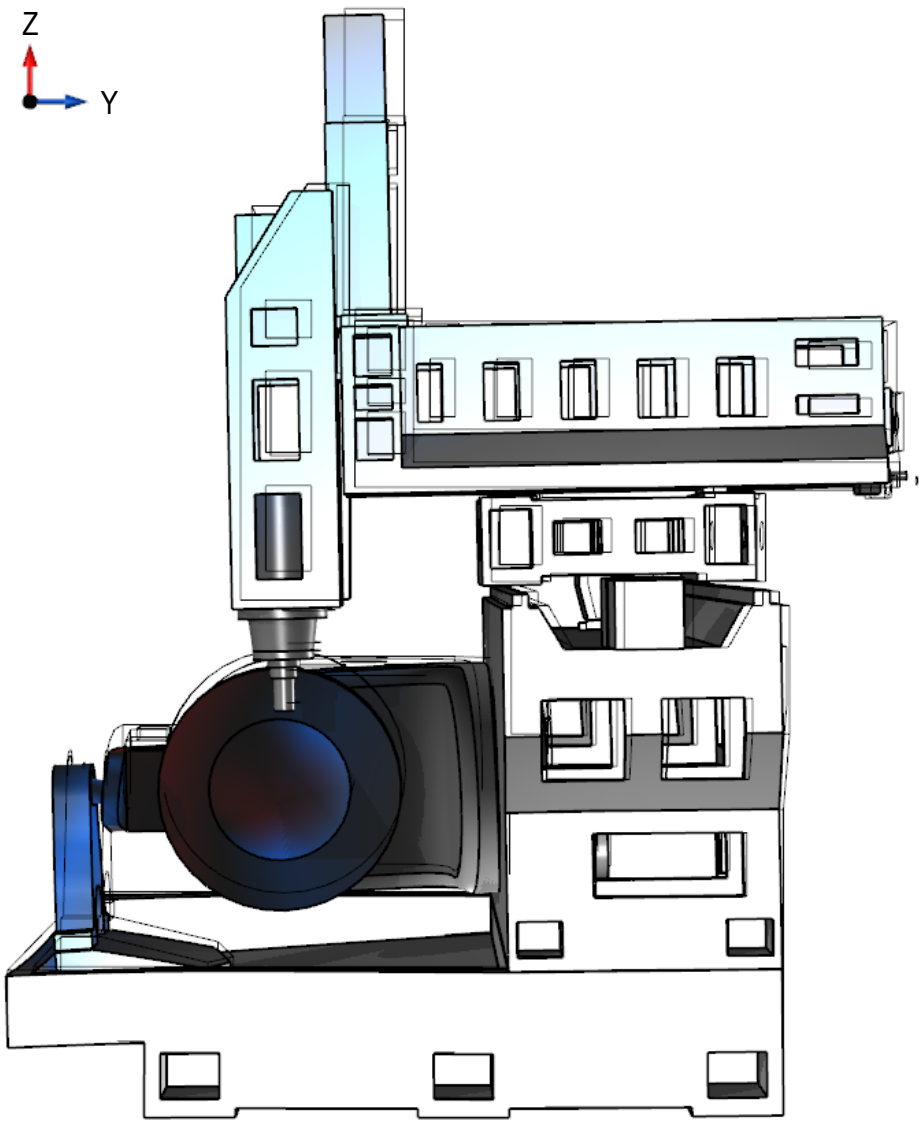
Verformung unter dem Eigengewicht der B-Achse
Schwenkwinkel 75°

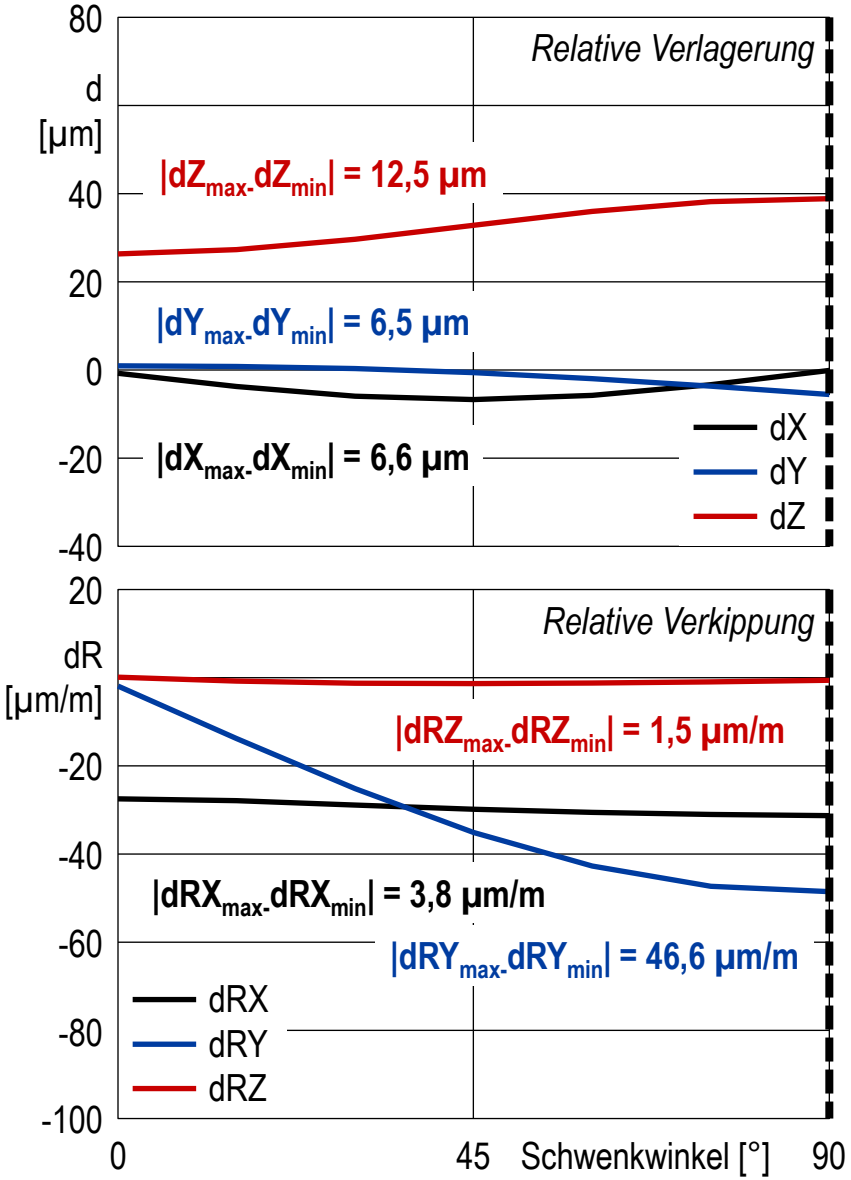




© planlauf GmbH

Verformung unter dem Eigengewicht der B-Achse
Schwenkwinkel 90°





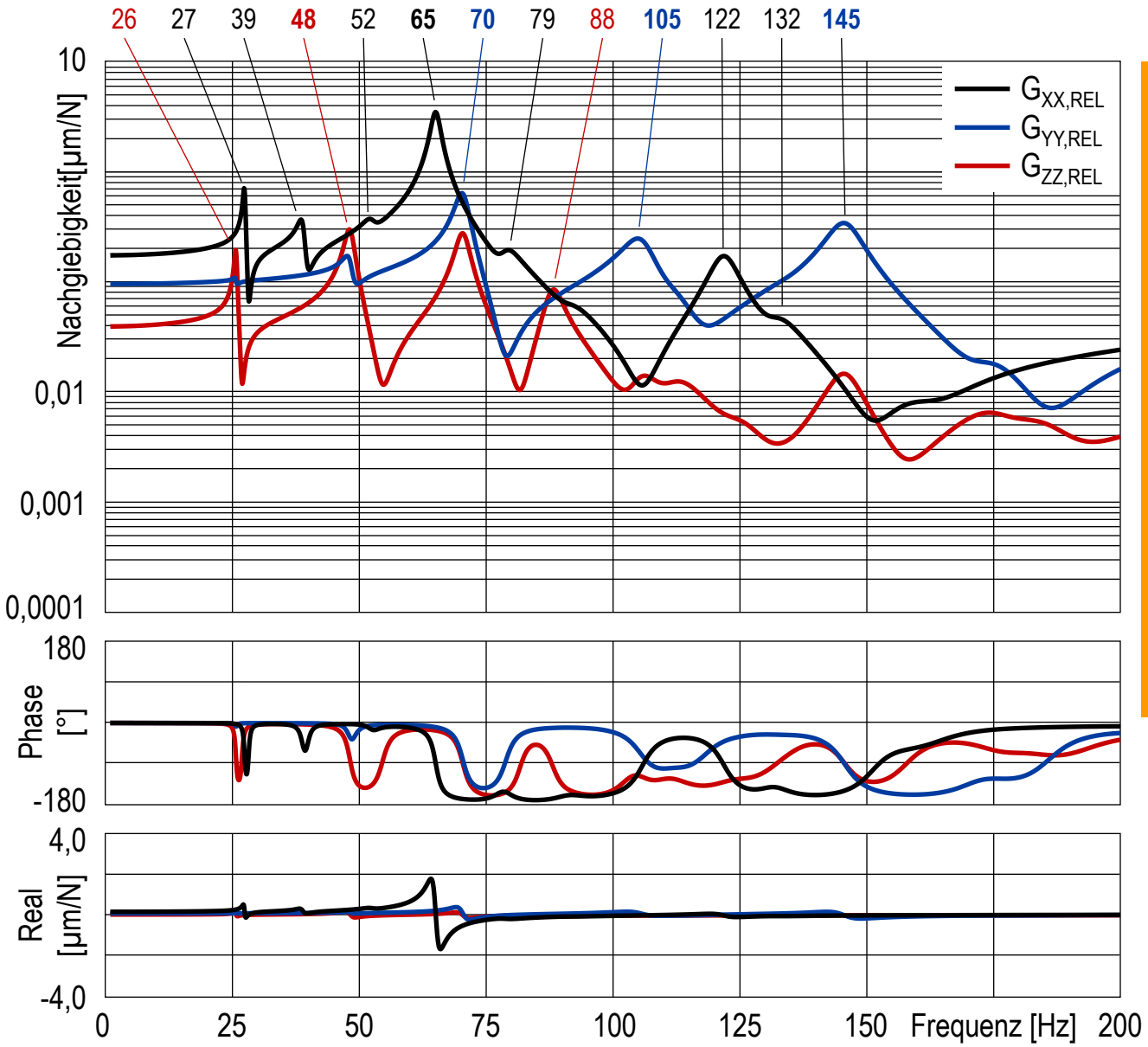
© planlauf GmbH

Gliederung

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

© planlauf GmbH

Relative Nachgiebigkeitsfrequenzgänge



Dominante Resonanzfrequenzen

48 Hz
- Nicken und Biegung des Y-Schlittens
- Schieben des Z-Schlittens

65 Hz
- Torsion des Y-Schlittens
- Pendeln des Z-Schlittens in X-Richtung

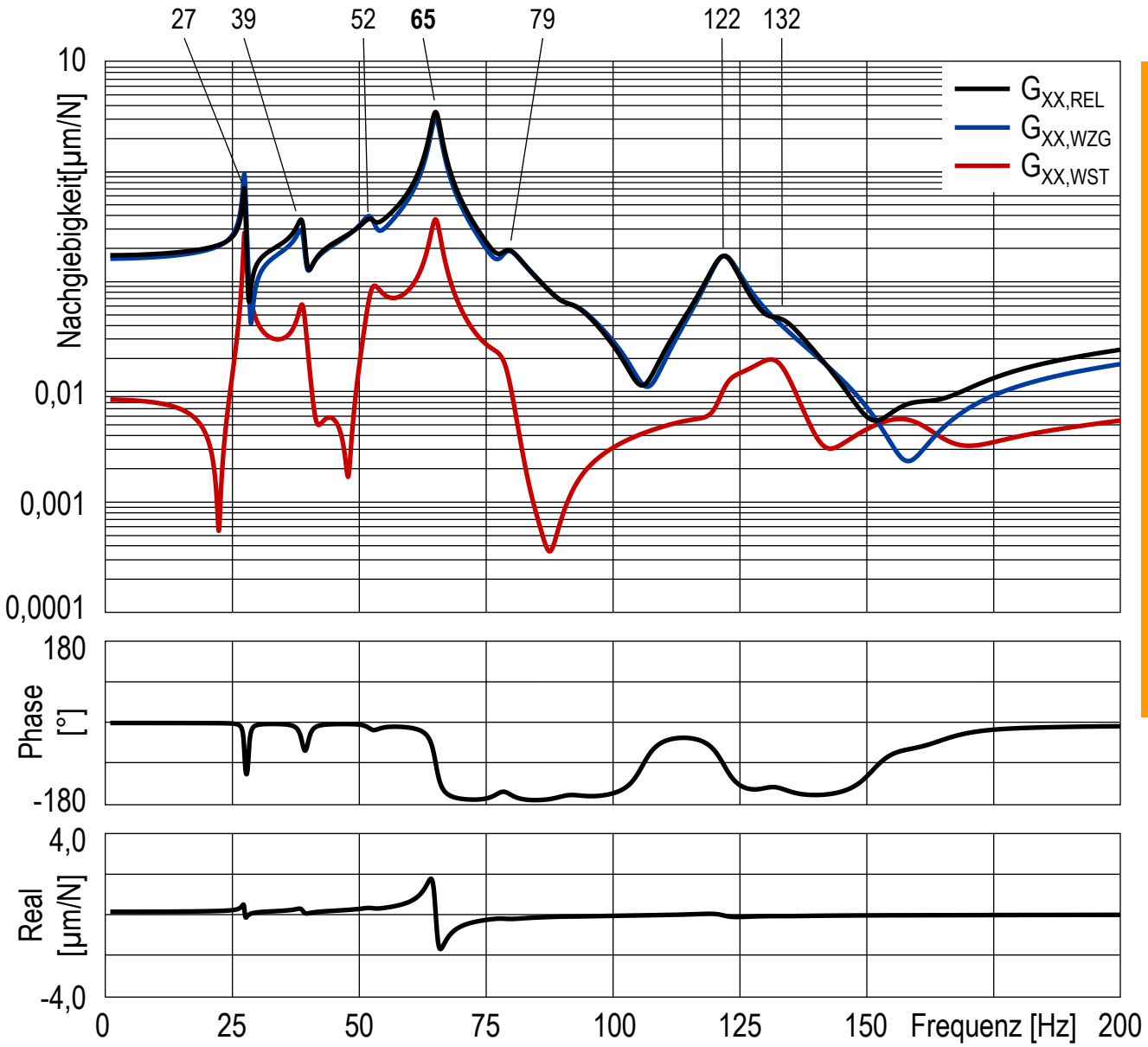
70 Hz
- Schieben, Nicken und Biegung des Y-Schlittens
- Schieben und Biegung des Z-Schlittens

105 Hz
- Biegung des Z-Schlittens
- Schwingung des Schwenktischs in Z-Richtung
- Biegung des Betts im Bereich des Gegenlagers

145 Hz
- Schieben, Nicken und Biegung des Z-Schlittens

© planlauf GmbH

Nachgiebigkeitsfrequenzgänge in X-Richtung



Dominante Resonanzfrequenzen

48 Hz
- Nicken und Biegung des Y-Schlittens
- Schieben des Z-Schlittens

65 Hz
- Torsion des Y-Schlittens
- Pendeln des Z-Schlittens in X-Richtung

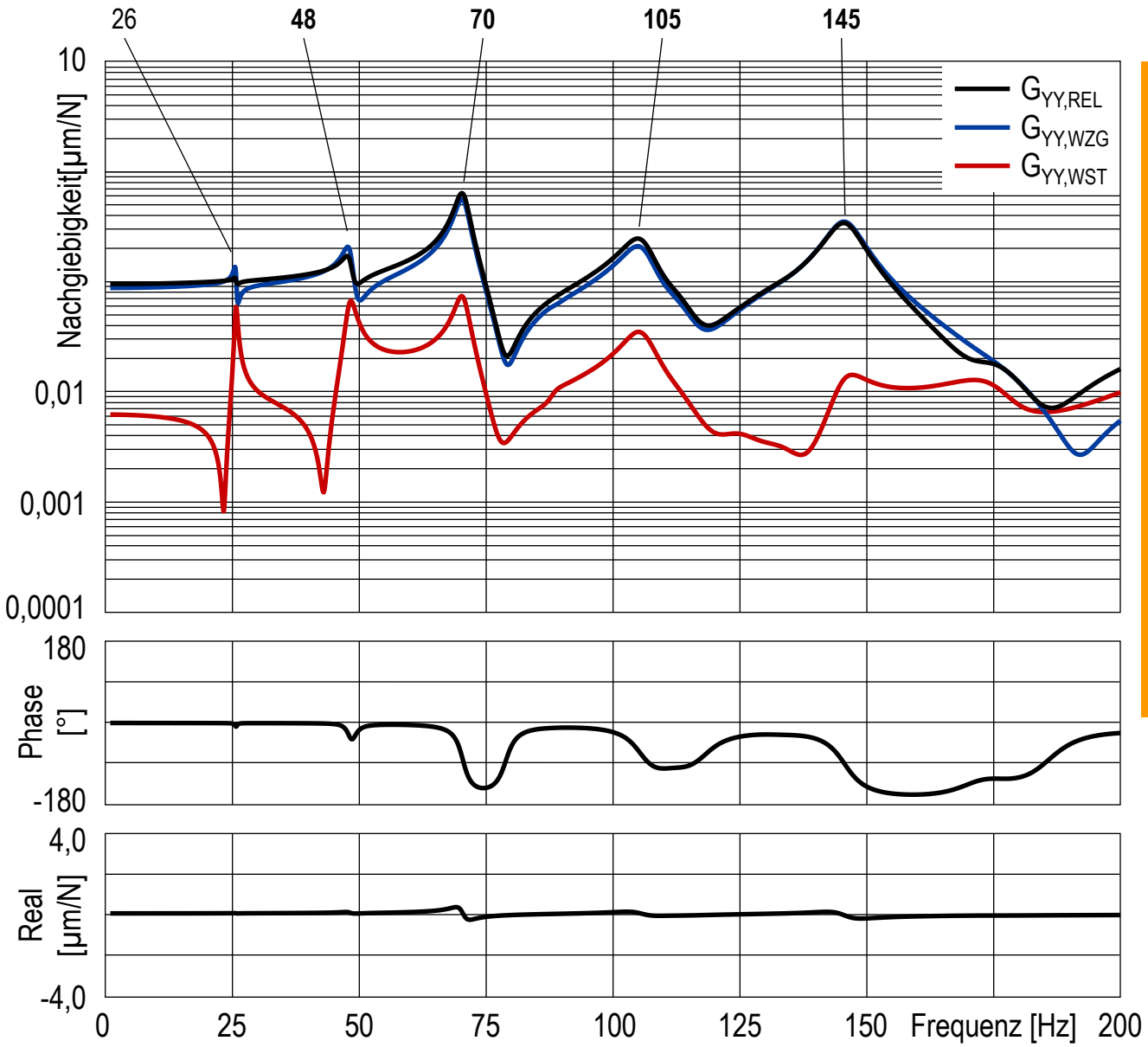
70 Hz
- Schieben, Nicken und Biegung des Y-Schlittens
- Schieben und Biegung des Z-Schlittens

105 Hz
- Biegung des Z-Schlittens
- Schwingung des Schwenktischs in Z-Richtung
- Biegung des Betts im Bereich des Gegenlagers

145 Hz
- Schieben, Nicken und Biegung des Z-Schlittens

© planlauf GmbH

Nachgiebigkeitsfrequenzgänge in Y-Richtung



Dominante Resonanzfrequenzen

48 Hz
- Nicken und Biegung des Y-Schlittens
- Schieben des Z-Schlittens

65 Hz
- Torsion des Y-Schlittens
- Pendeln des Z-Schlittens in X-Richtung

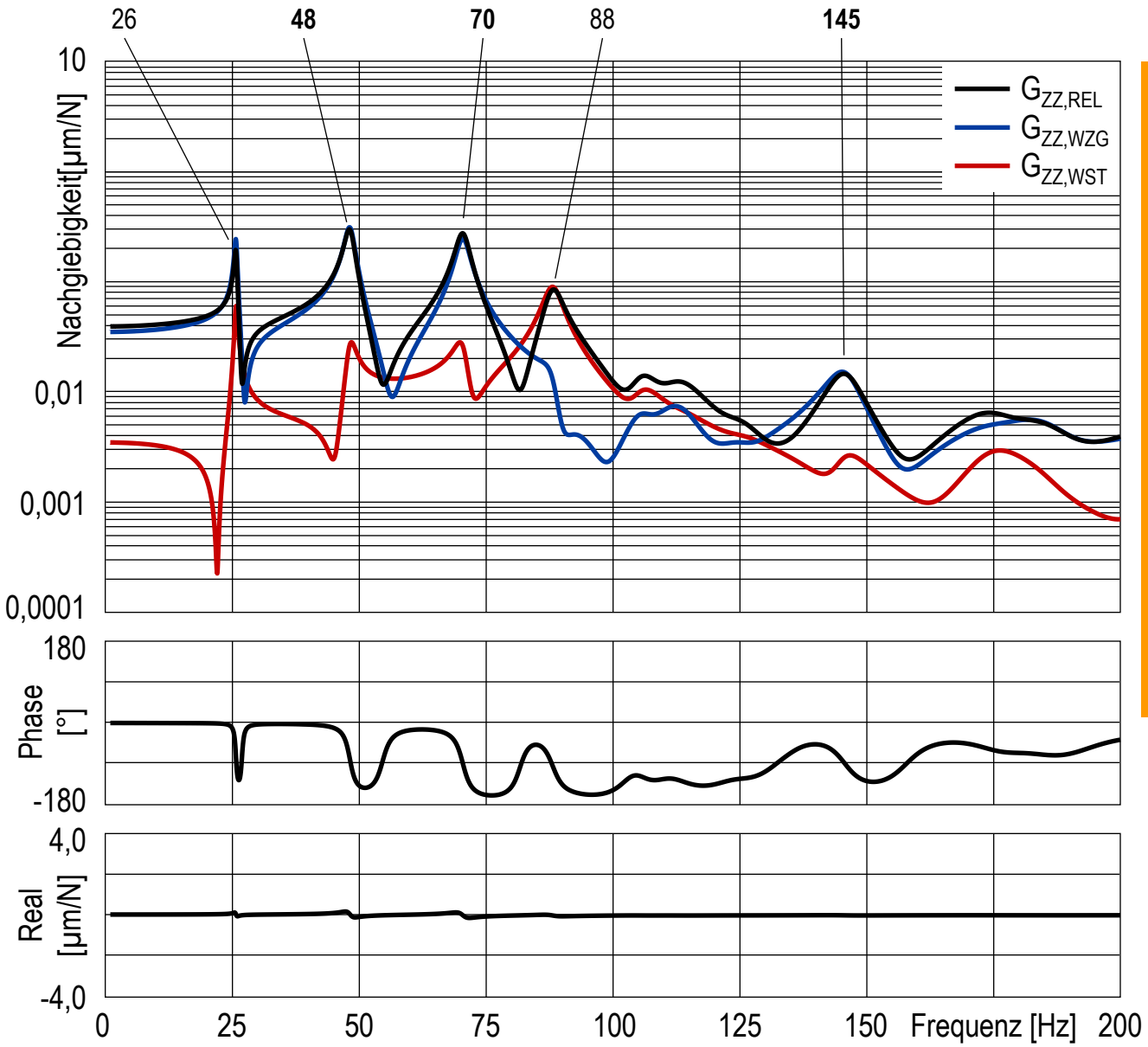
70 Hz
- Schieben, Nicken und Biegung des Y-Schlittens
- Schieben und Biegung des Z-Schlittens

105 Hz
- Biegung des Z-Schlittens
- Schwingung des Schwenktischs in Z-Richtung
- Biegung des Betts im Bereich des Gegenlagers

145 Hz
- Schieben, Nicken und Biegung des Z-Schlittens

© planlauf GmbH

Nachgiebigkeitsfrequenzgänge in Z-Richtung



Dominante Resonanzfrequenzen

48 Hz
- Nicken und Biegung des Y-Schlittens
- Schieben des Z-Schlittens

65 Hz
- Torsion des Y-Schlittens
- Pendeln des Z-Schlittens in X-Richtung

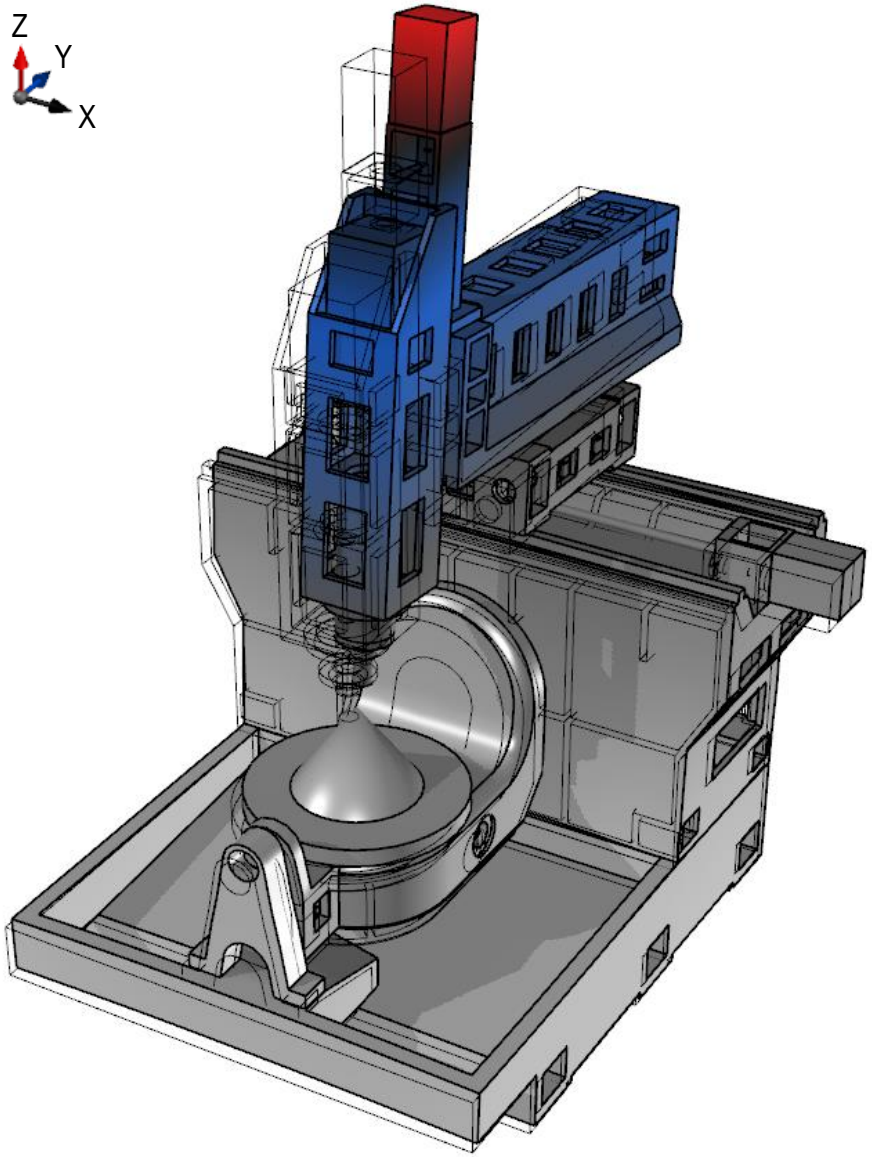
70 Hz
- Schieben, Nicken und Biegung des Y-Schlittens
- Schieben und Biegung des Z-Schlittens

105 Hz
- Biegung des Z-Schlittens
- Schwingung des Schwenktischs in Z-Richtung
- Biegung des Betts im Bereich des Gegenlagers

145 Hz
- Schieben, Nicken und Biegung des Z-Schlittens

© planlauf GmbH

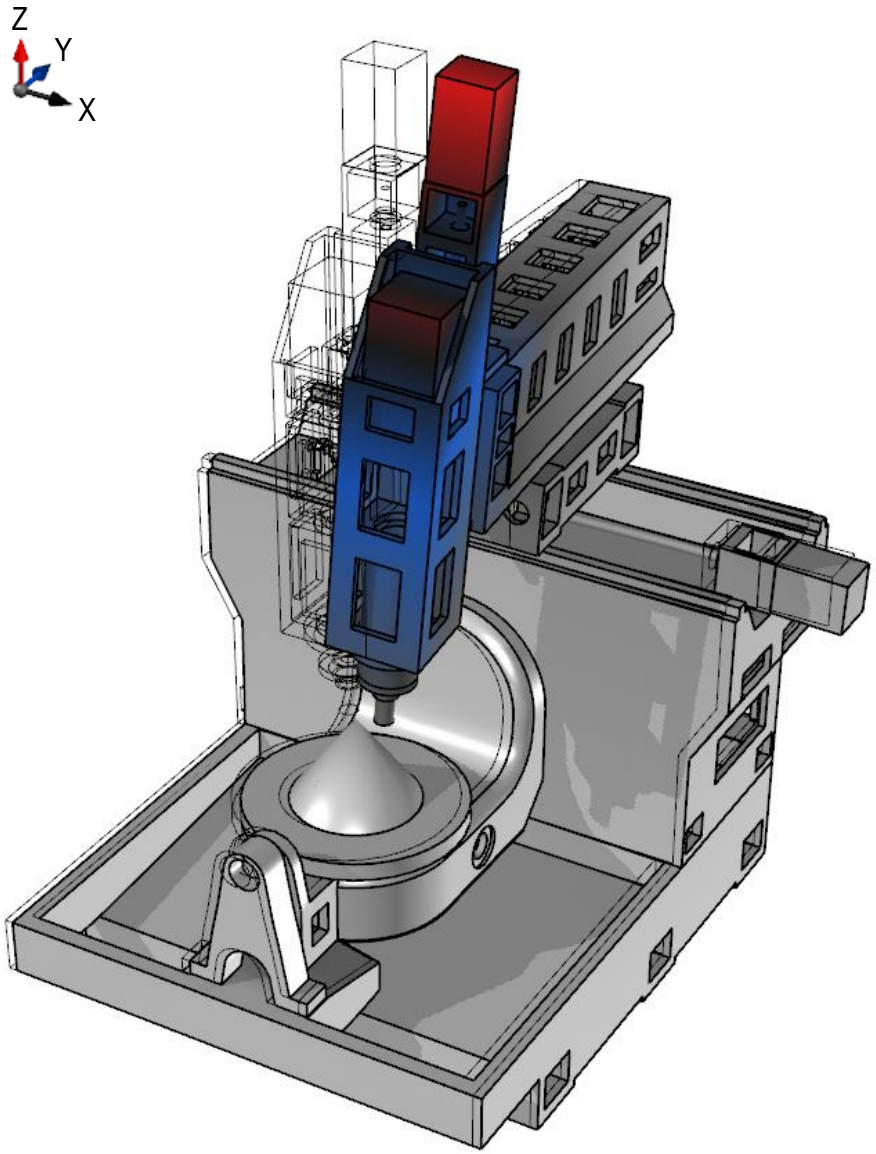
Schwingungsform bei 26 Hz



- Aufstellschwingung in Y-Richtung
- Nicken des Y-Schlittens

© planlauf GmbH

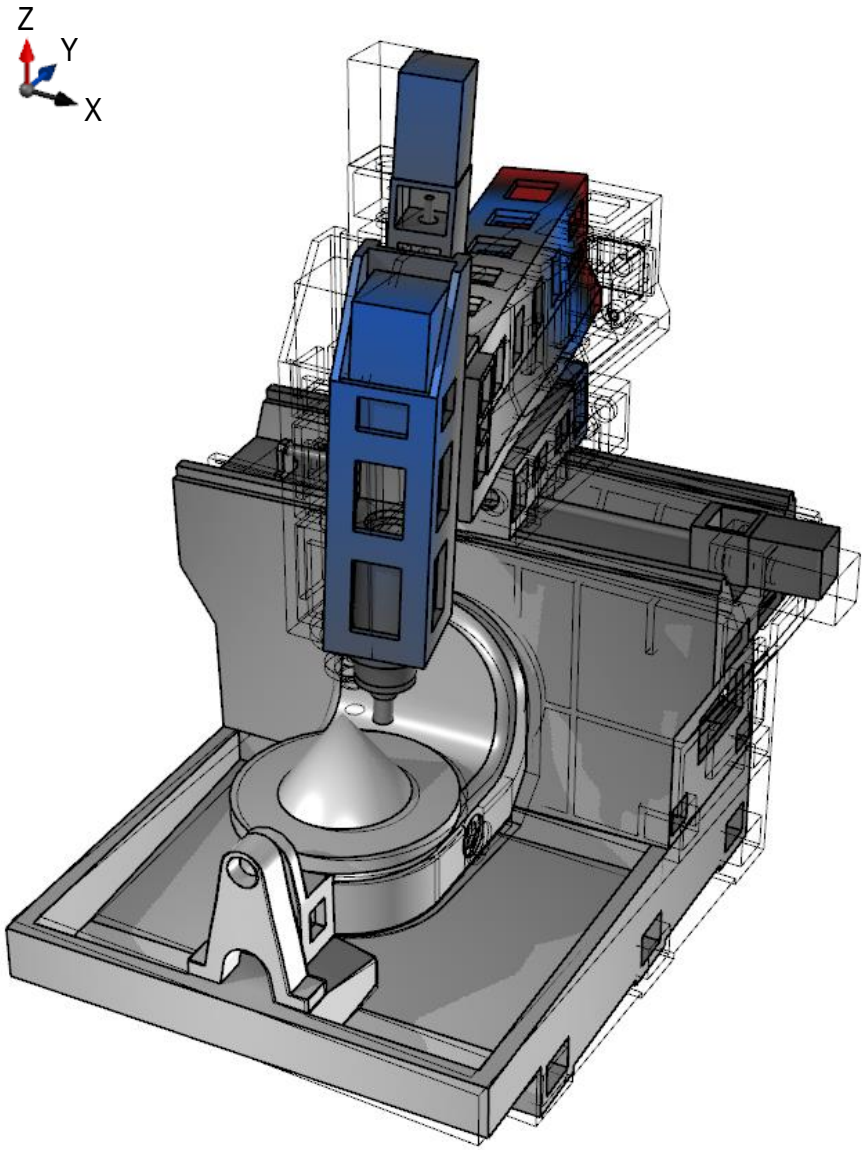
Schwingungsform bei 27 Hz



- Aufstellschwingung in X-Richtung
- Schieben des X-Schlittens
- Rollen des Y-Schlittens

© planlauf GmbH

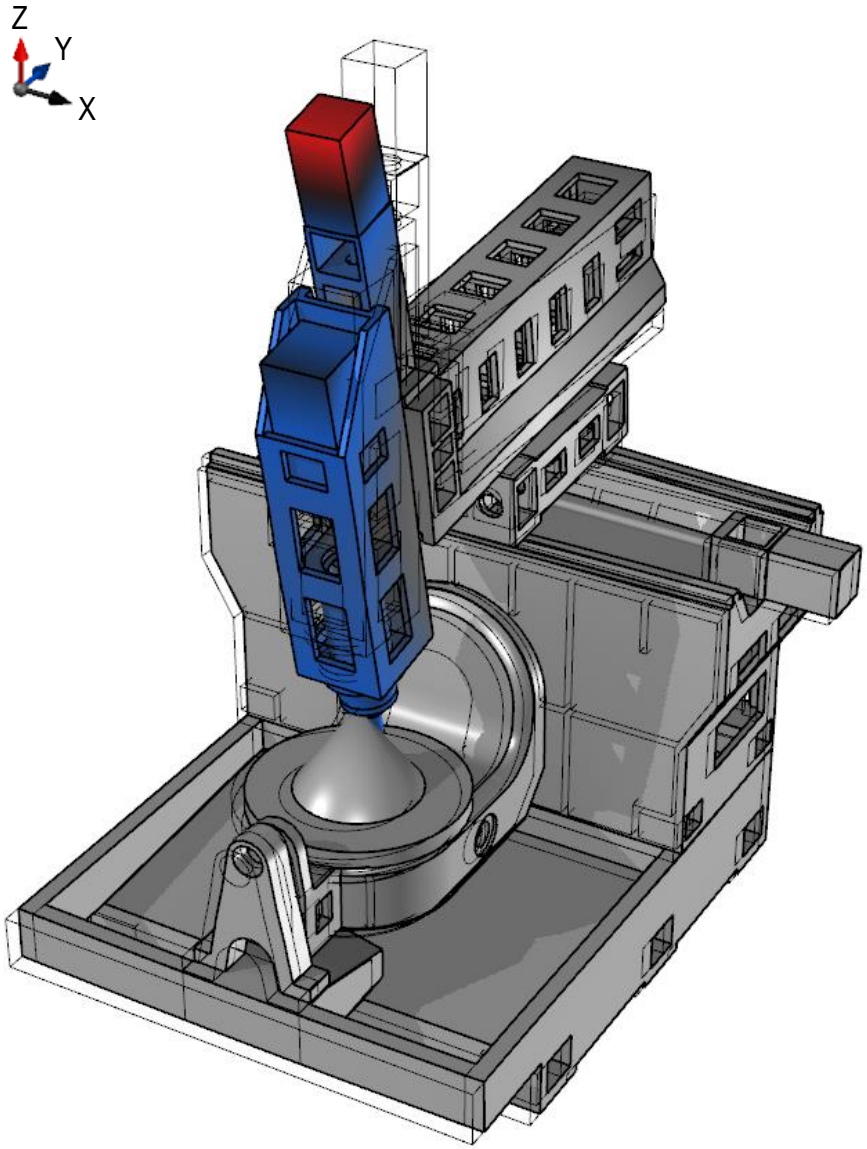
Schwingungsform bei 39 Hz



- Aufstellschwingung um die Z-Achse
- Gieren des Y-Schlittens

© planlauf GmbH

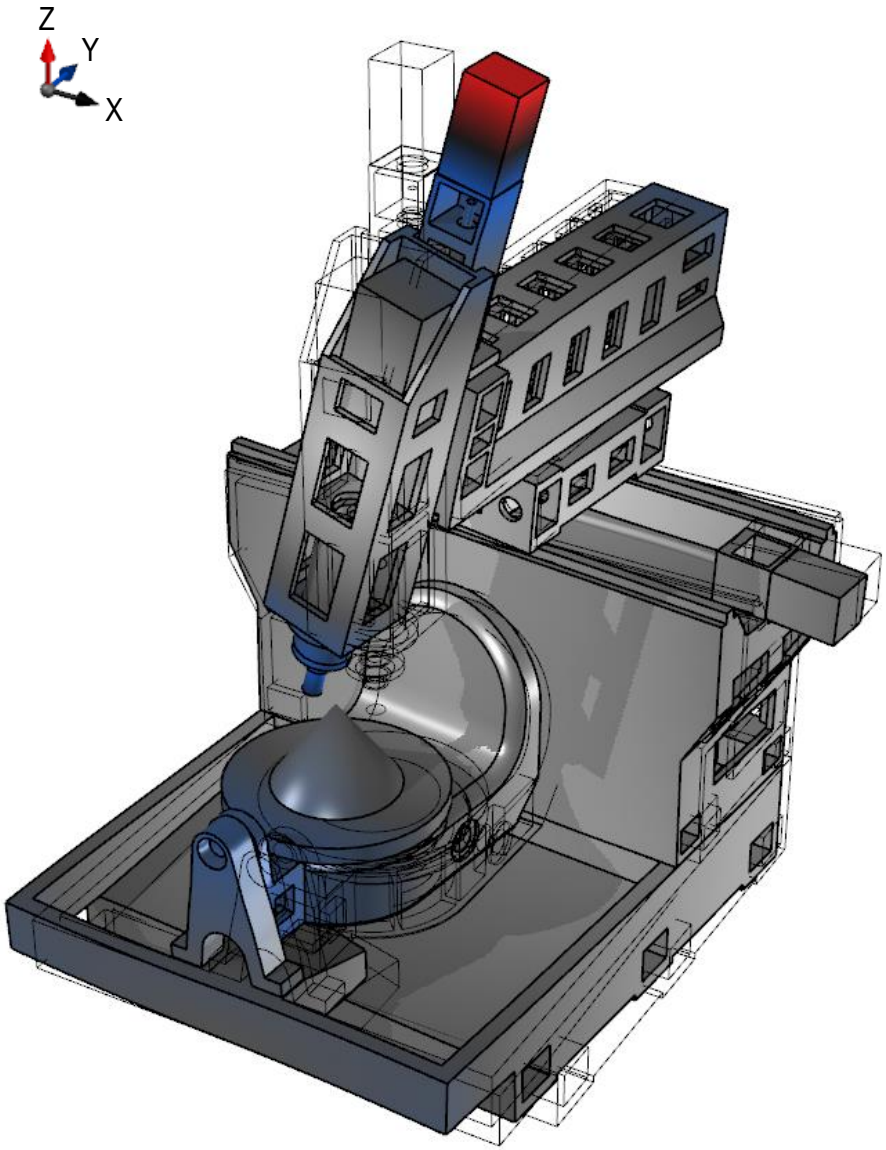
Schwingungsform bei 48 Hz



- Nicken und Biegung des Y-Schlittens
- Schieben des Z-Schlittens

© planlauf GmbH

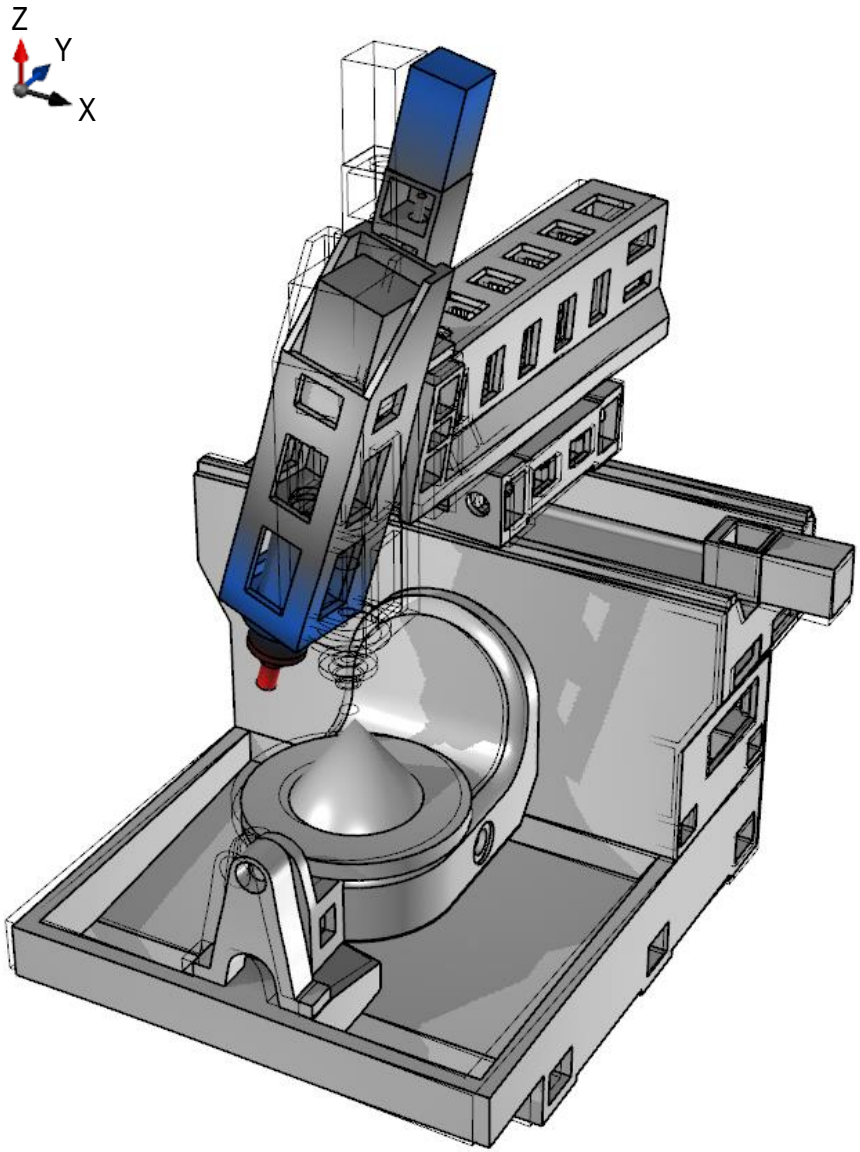
Schwingungsform bei 52 Hz



- Aufstellschwingung in X-Richtung
- Torsion des Y-Schlittens
- Pendeln des Z-Schlittens in X-Richtung

© planlauf GmbH

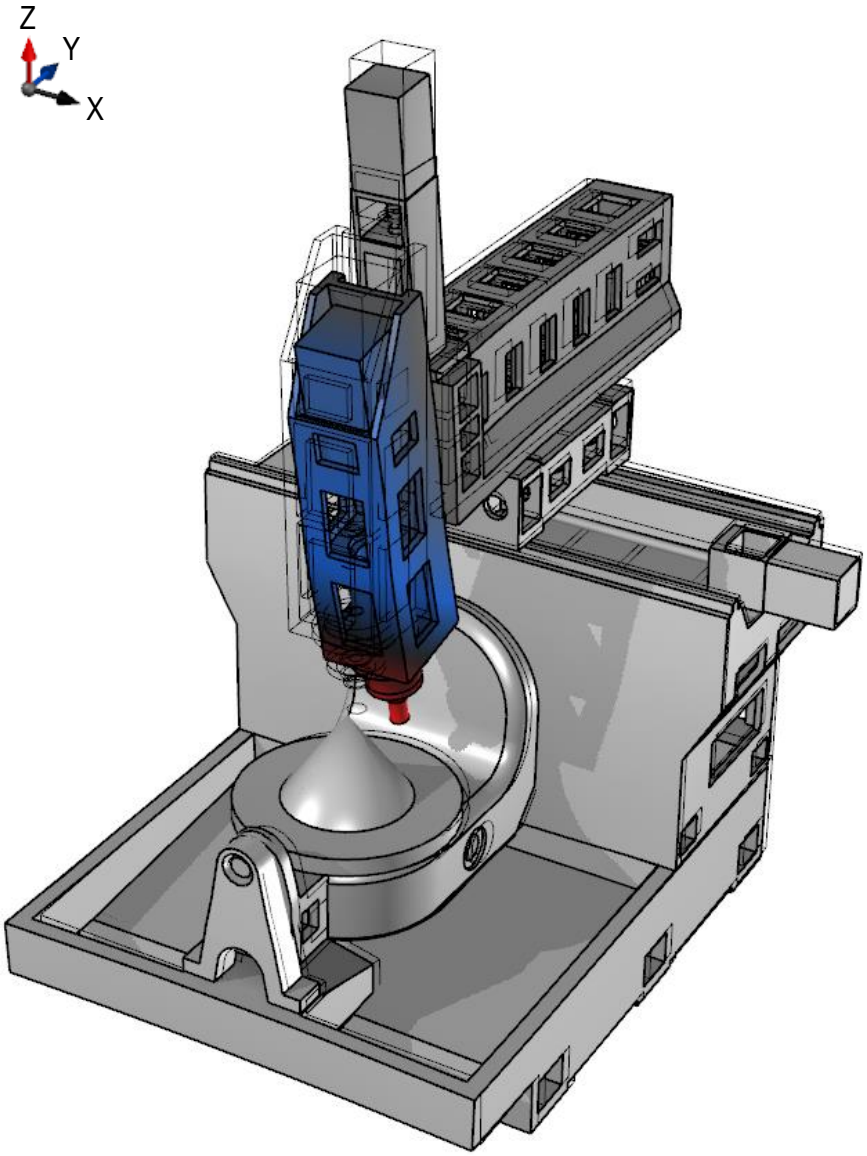
Schwingungsform bei 65 Hz



- Torsion des Y-Schlittens
- Pendeln des Z-Schlittens in X-Richtung

© planlauf GmbH

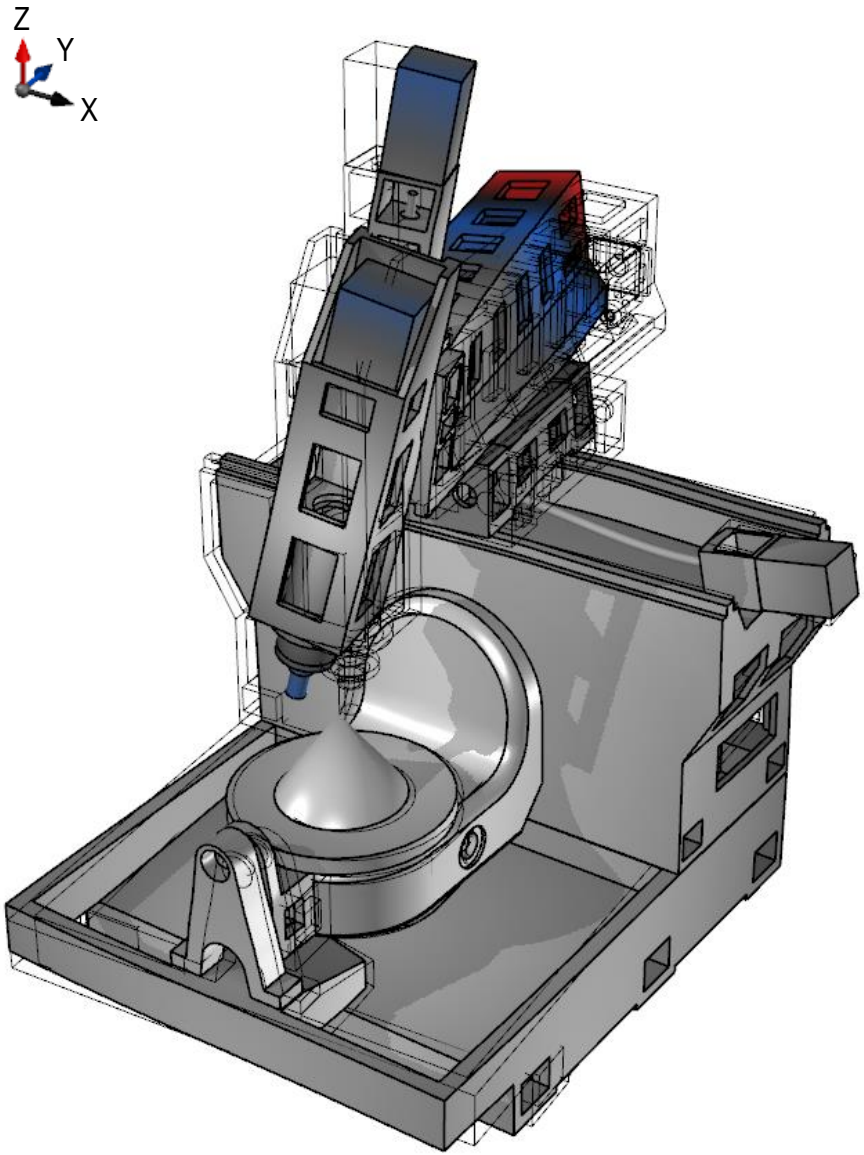
Schwingungsform bei 70 Hz



- Schieben, Nicken und Biegung des Y-Schlittens
- Schieben und Biegung des Z-Schlittens

© planlauf GmbH

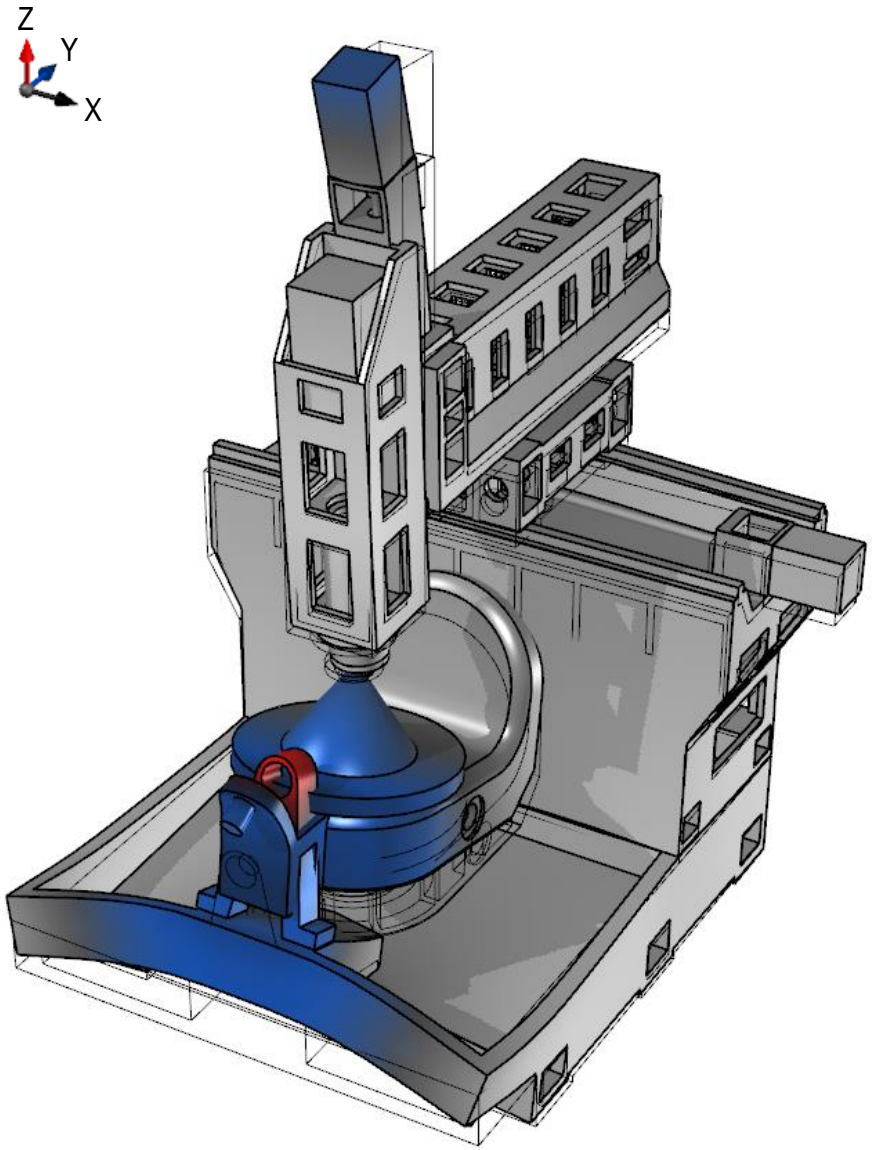
Schwingungsform bei 79 Hz

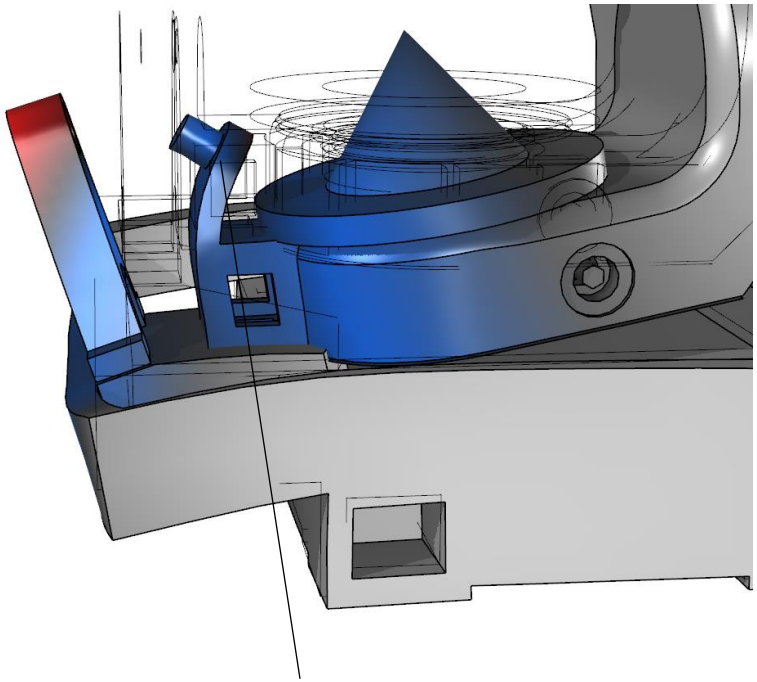


- Schieben des X-Schlittens
- Torsion des Y-Schlittens

© planlauf GmbH

Schwingungsform bei 88 Hz

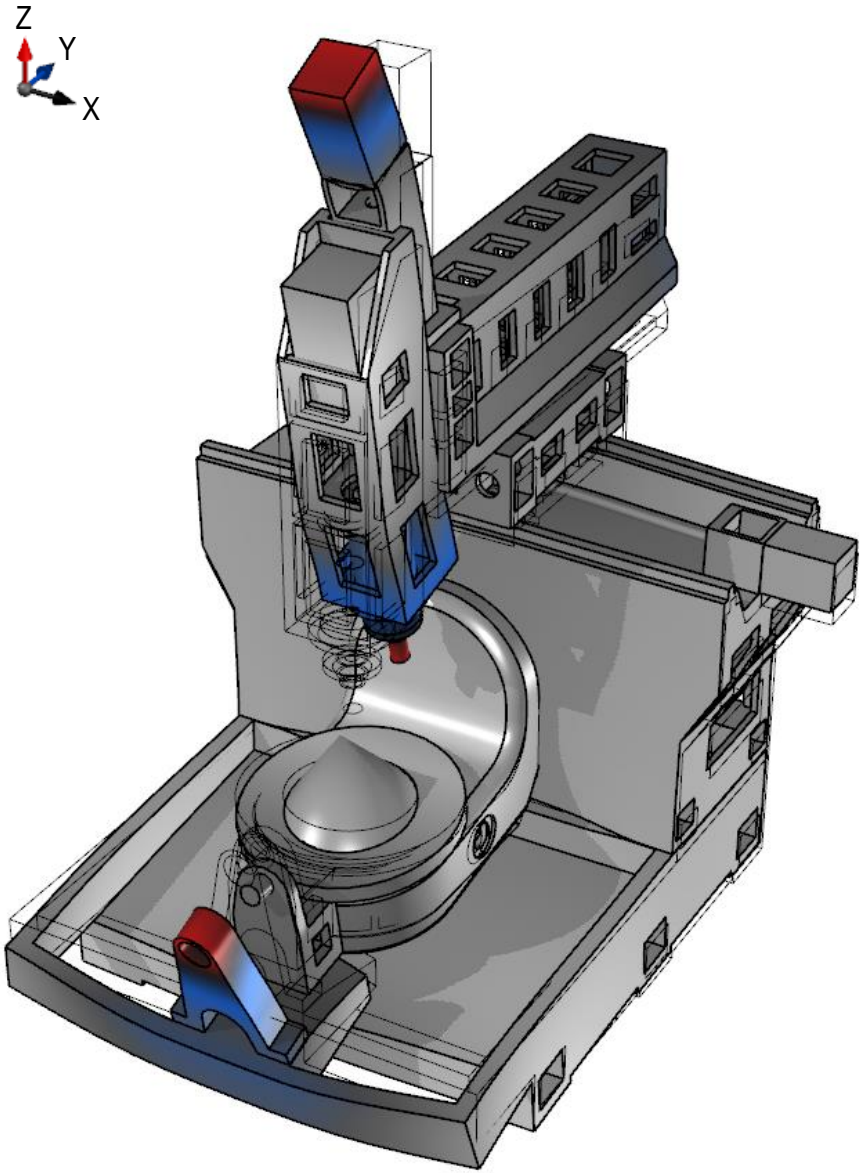


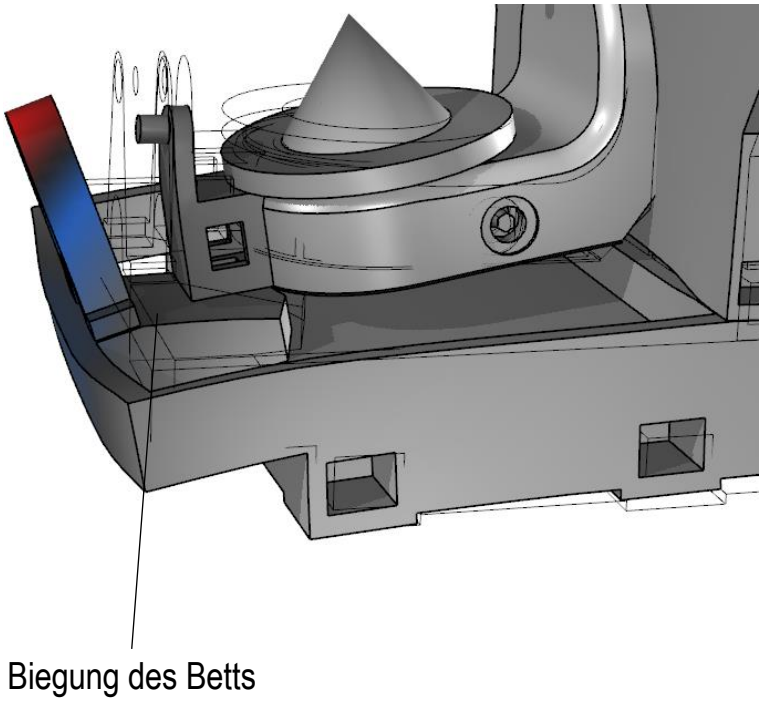


- Schwingung des Schwenktischs in Z-Richtung
- Biegung des Betts im Bereich des Gegenlagers
- Biegung des Gegenlagerzapfens

© planlauf GmbH

Schwingungsform bei 105 Hz

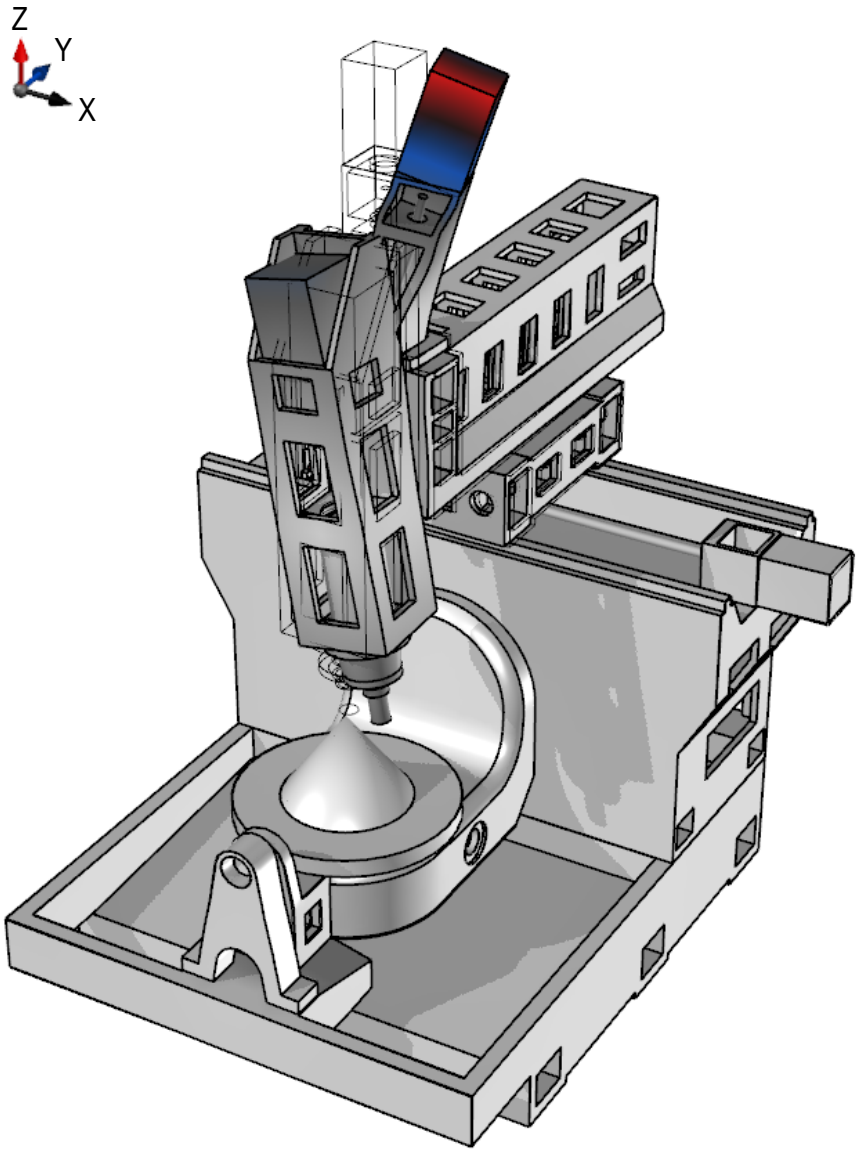


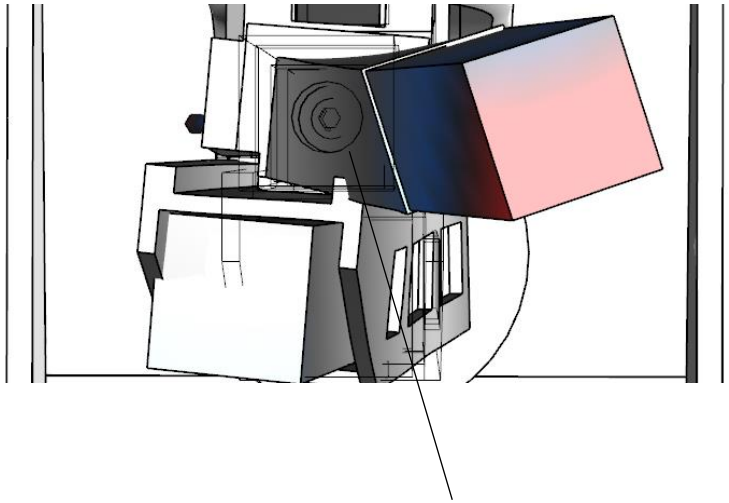


- Biegung des Z-Schlittens
- Schwingung des Schwenktischs in Z-Richtung
- Biegung des Betts im Bereich des Gegenlagers

© planlauf GmbH

Schwingungsform bei 122 Hz

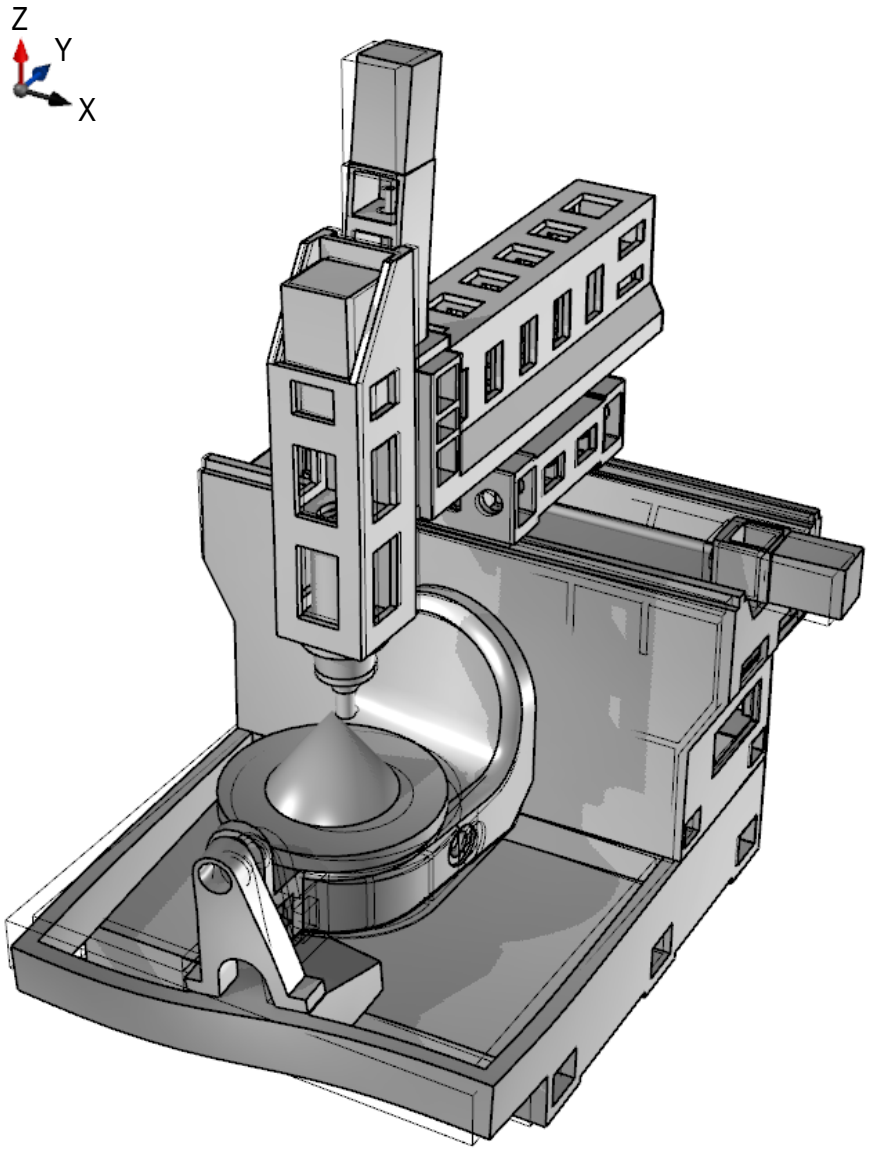


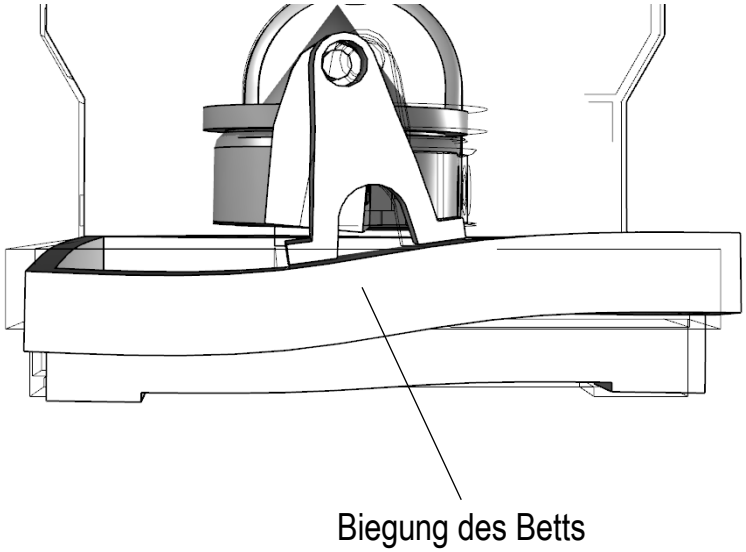


- Gieren des Z-Schlittens
- Torsion der Z-KGT-Festlagerkonsole

© planlauf GmbH

Schwingungsform bei 132 Hz

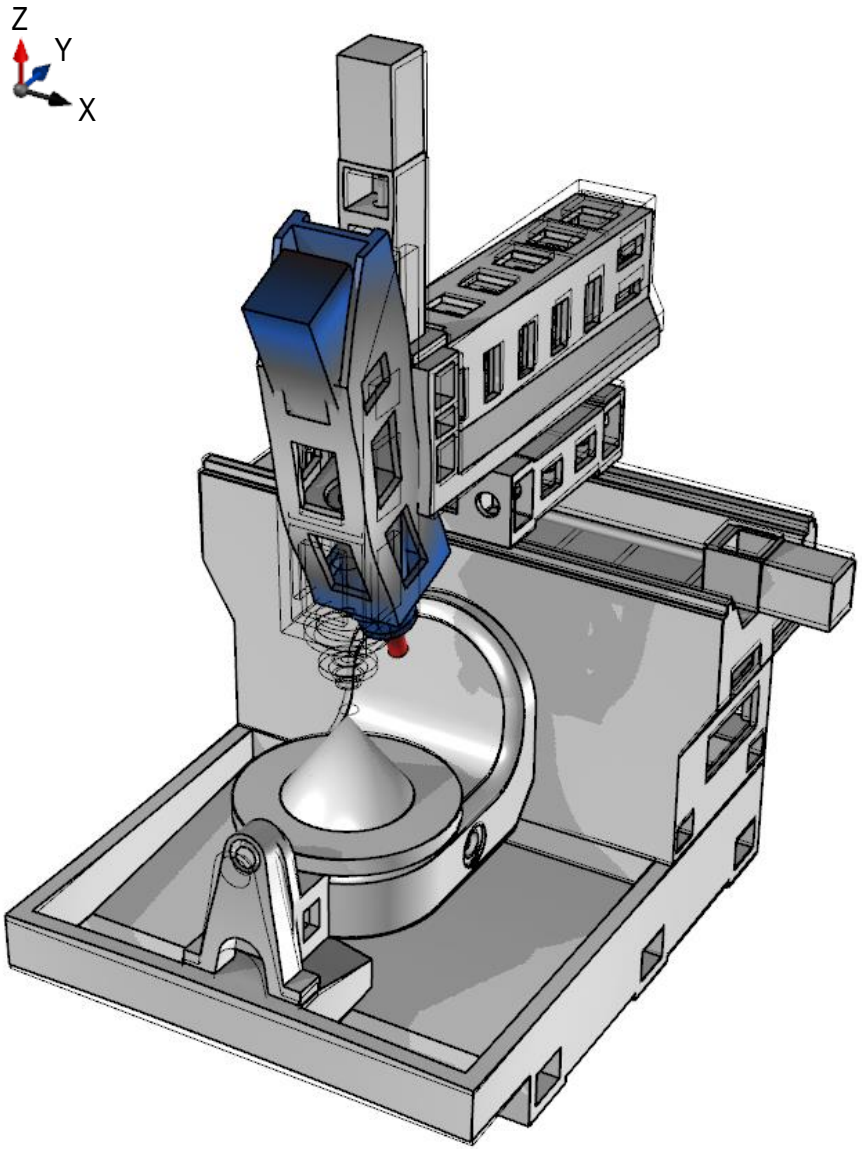




- Schwingung des Schwenktischs in X-Richtung
- Biegung des Betts im Bereich des Gegenlagers

© planlauf GmbH

Schwingungsform bei 145 Hz



- Schieben, Nicken und Biegung des Z-Schlittens

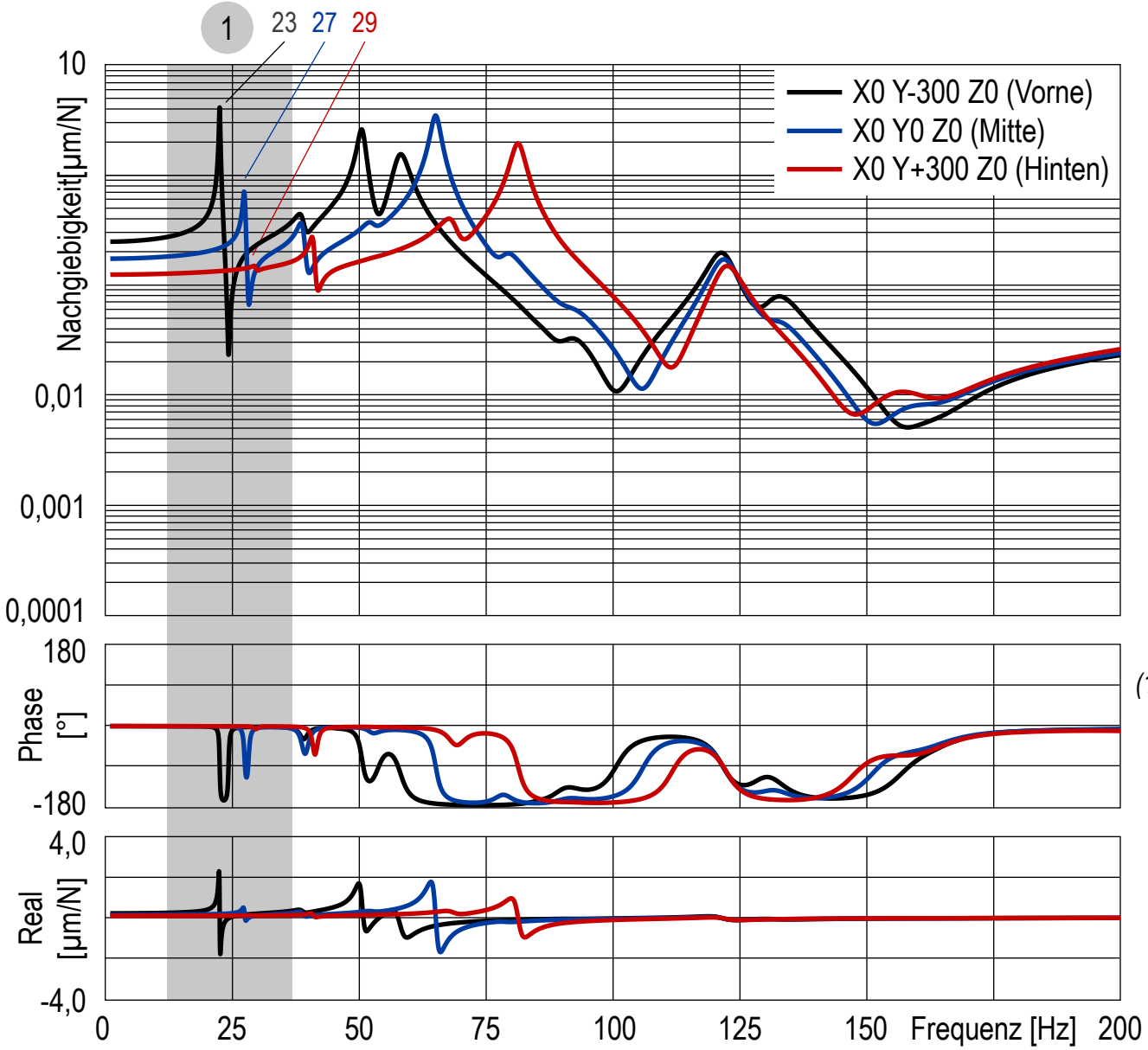
© planlauf GmbH

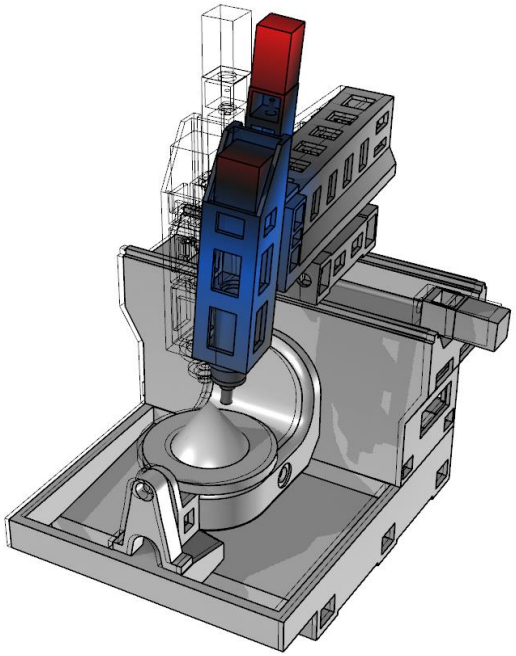
Gliederung

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

© planlauf GmbH

Relative Nachgiebigkeitsfrequenzgänge in X-Richtung

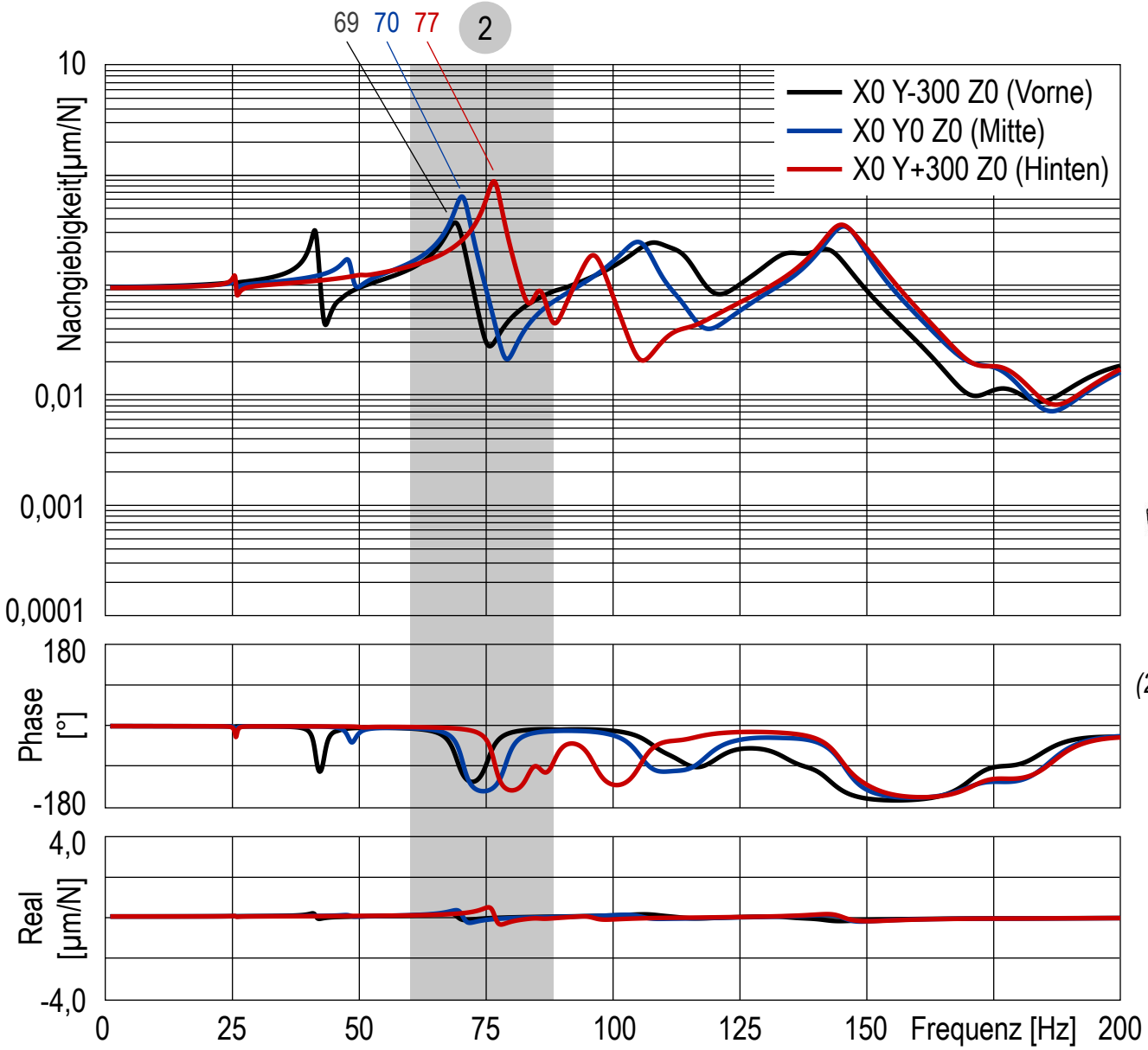


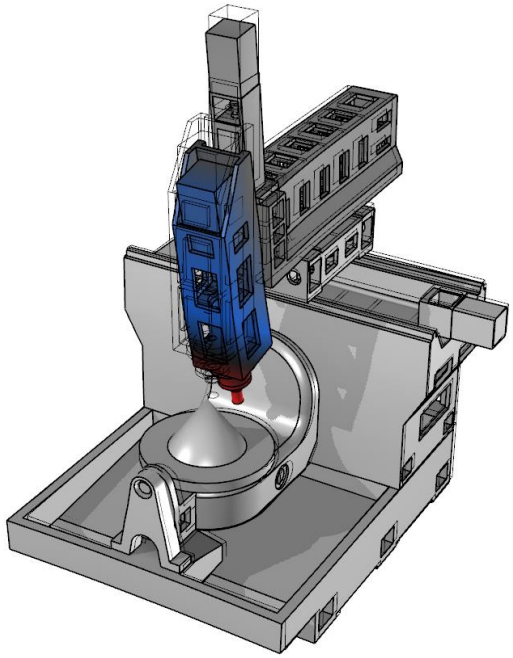


(1) Schwingungsform bei 27 Hz (Mitte)
- Aufstellschwingung in X-Richtung
- Schieben des X-Schlittens
- Rollen des Y-Schlittens

© planlauf GmbH

Relative Nachgiebigkeitsfrequenzgänge in Y-Richtung

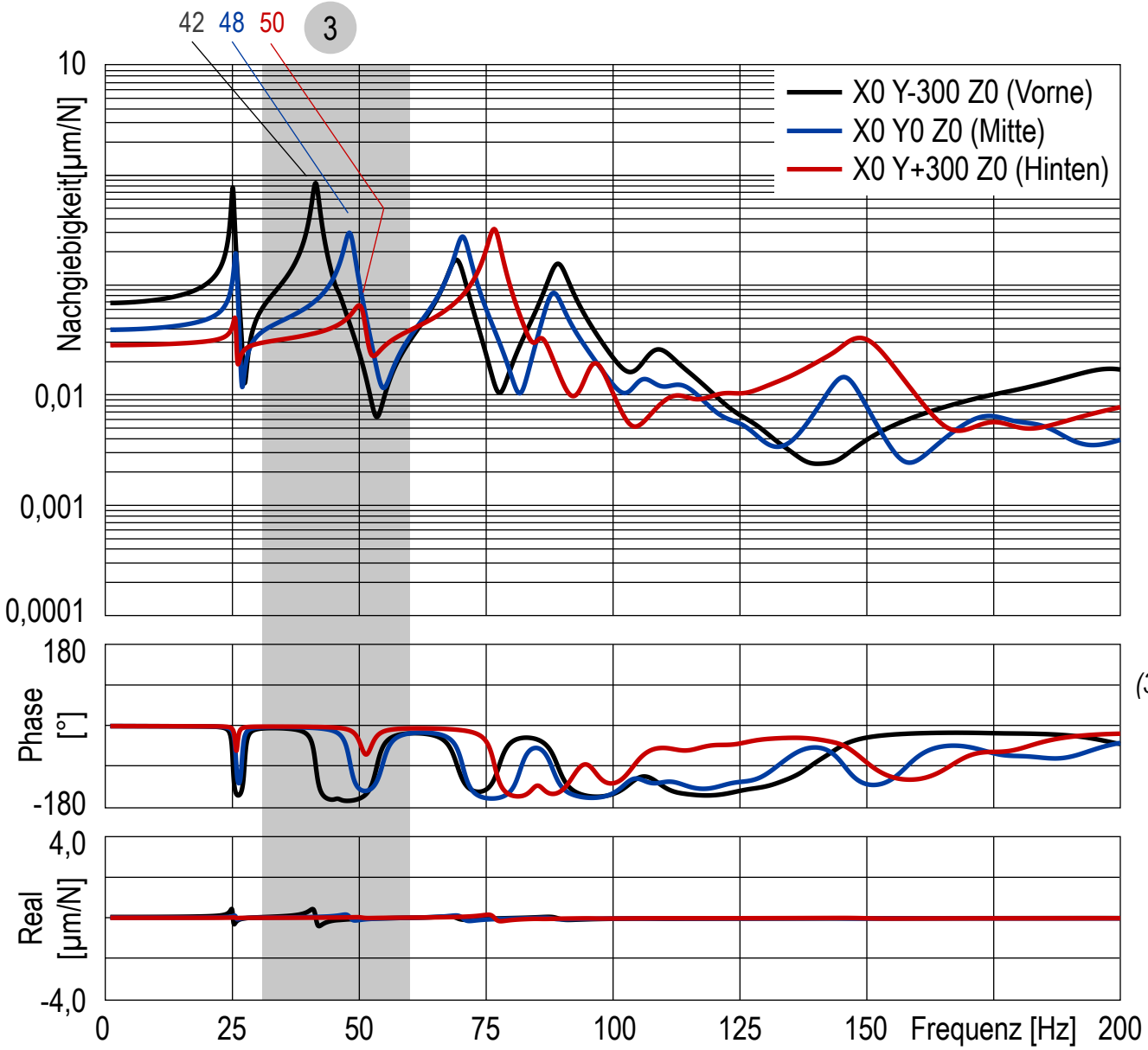


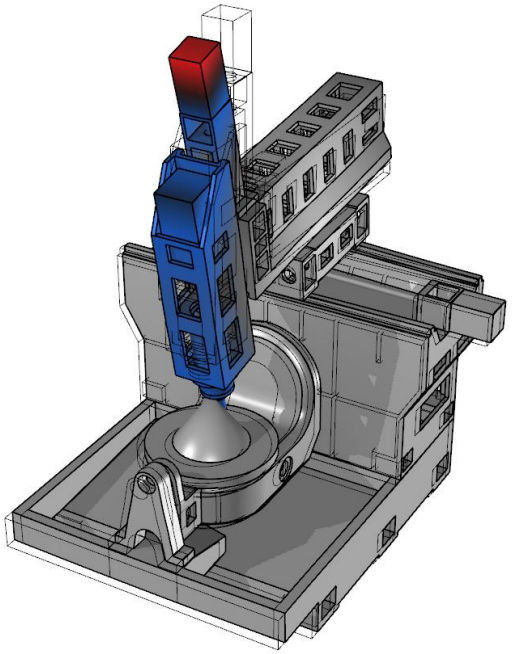


(2) Schwingungsform bei 70 Hz (Mitte)
- Schieben, Nicken und Biegung des Y-Schlittens
- Schieben und Biegung des Z-Schlittens

© planlauf GmbH

Relative Nachgiebigkeitsfrequenzgänge in Z-Richtung





(3) Schwingungsform bei 48 Hz (Mitte)
- Nicken und Biegung des Y-Schlittens
- Schieben des Z-Schlittens

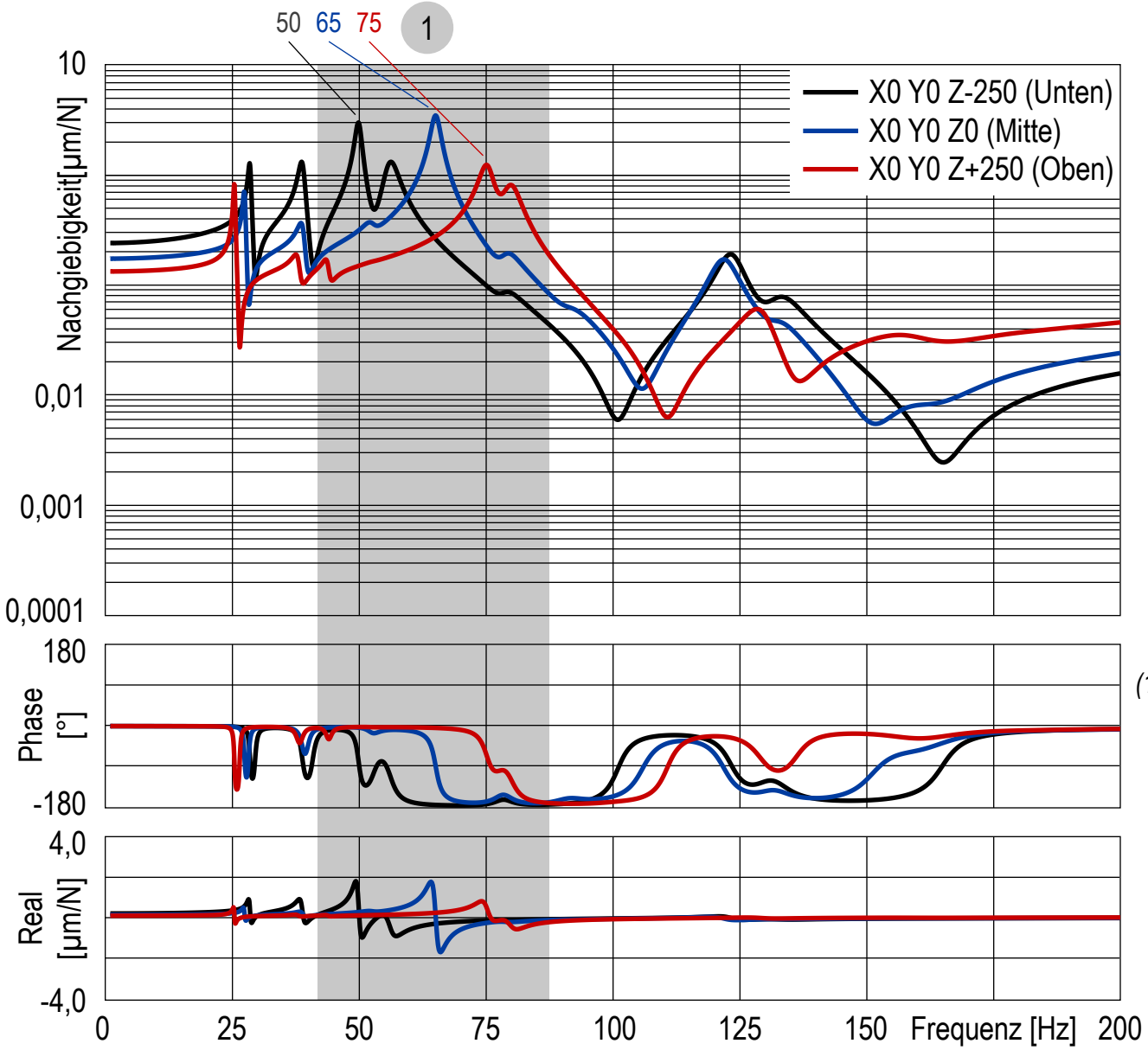
© planlauf GmbH

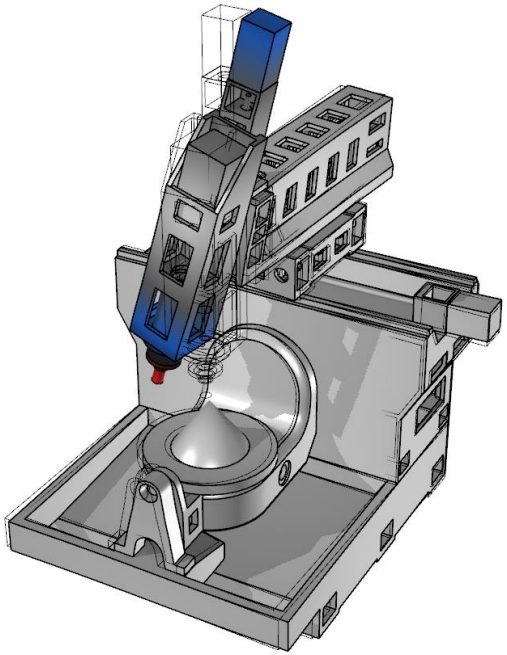
Gliederung

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

© planlauf GmbH

Relative Nachgiebigkeitsfrequenzgänge in X-Richtung

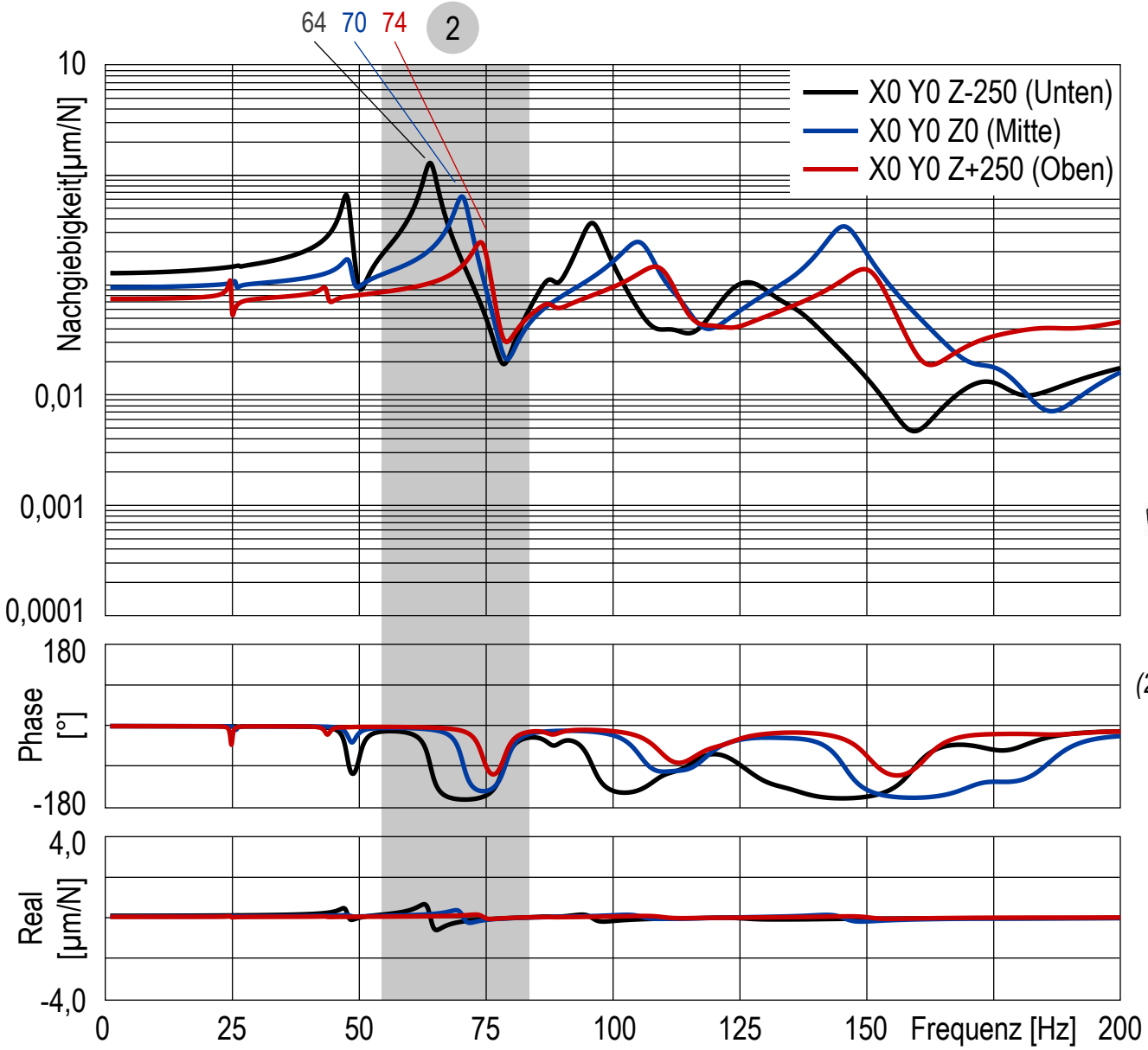


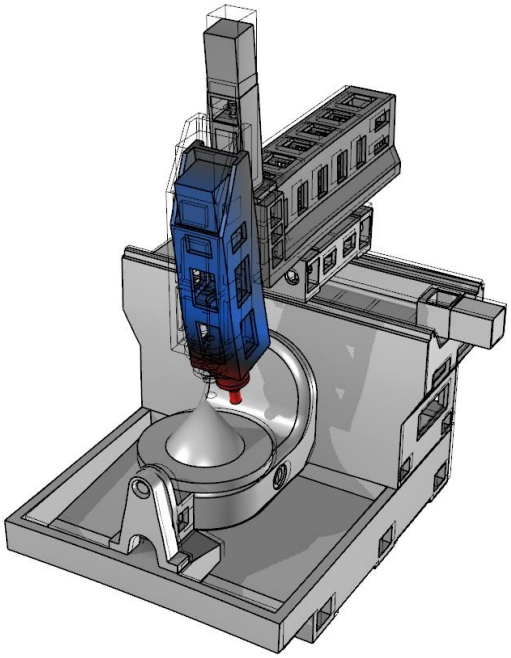


(1) Schwingungsform bei 65 Hz (Mitte)
- Torsion des Y-Schlittens
- Pendeln des Z-Schlittens in X-Richtung

© planlauf GmbH

Relative Nachgiebigkeitsfrequenzgänge in Y-Richtung

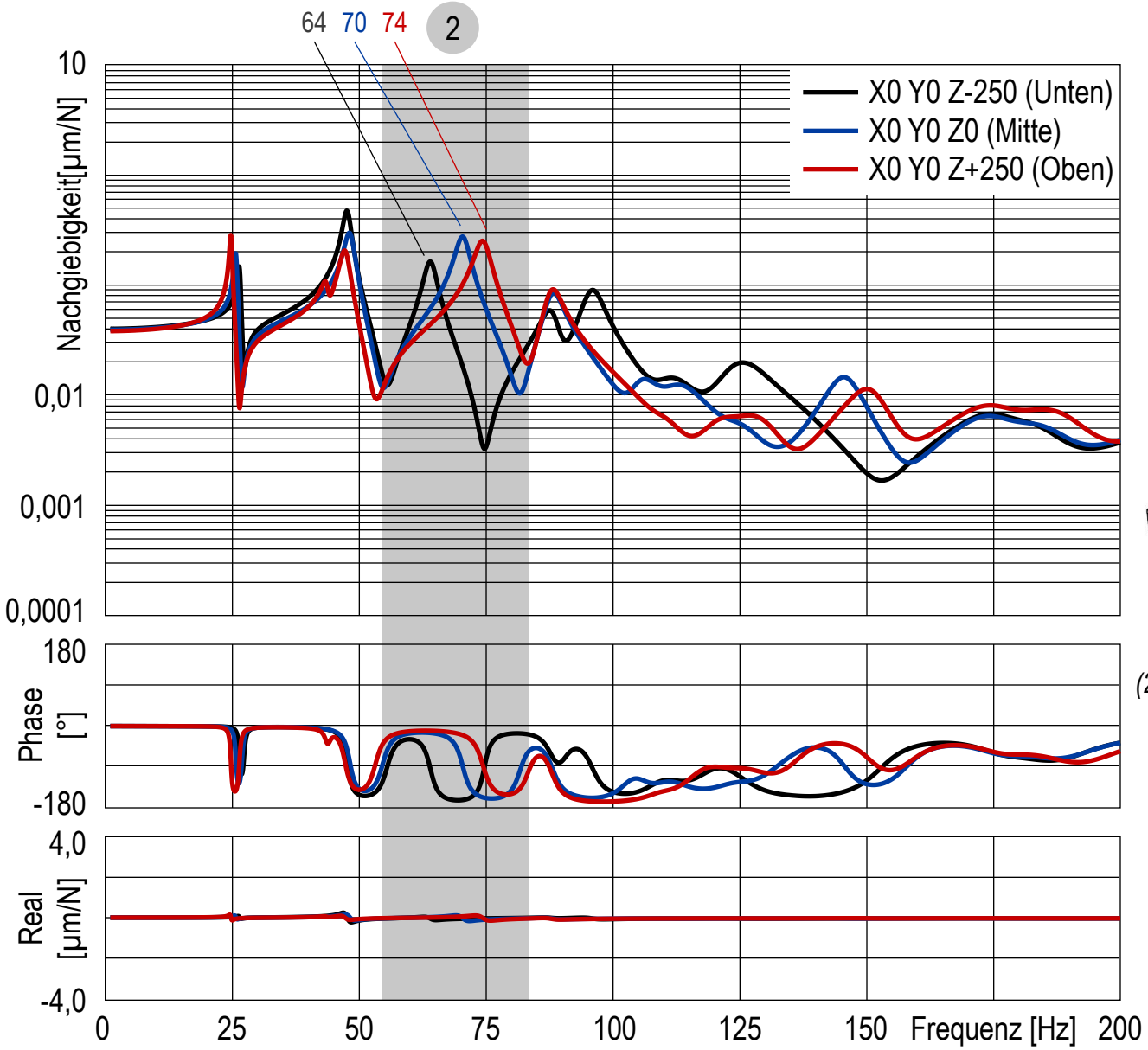


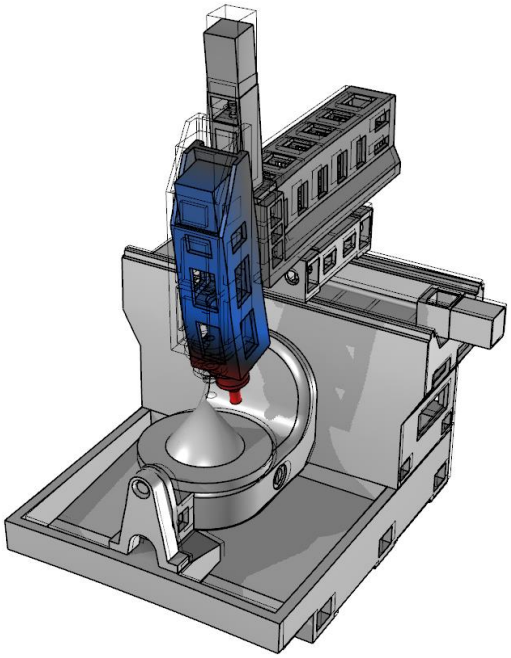


(2) Schwingungsform bei 70 Hz (Mitte)
- Schieben, Nicken und Biegung des Y-Schlittens
- Schieben und Biegung des Z-Schlittens

© planlauf GmbH

Relative Nachgiebigkeitsfrequenzgänge in Z-Richtung





(2) Schwingungsform bei 70 Hz (Mitte)
- Schieben, Nicken und Biegung des Y-Schlittens
- Schieben und Biegung des Z-Schlittens

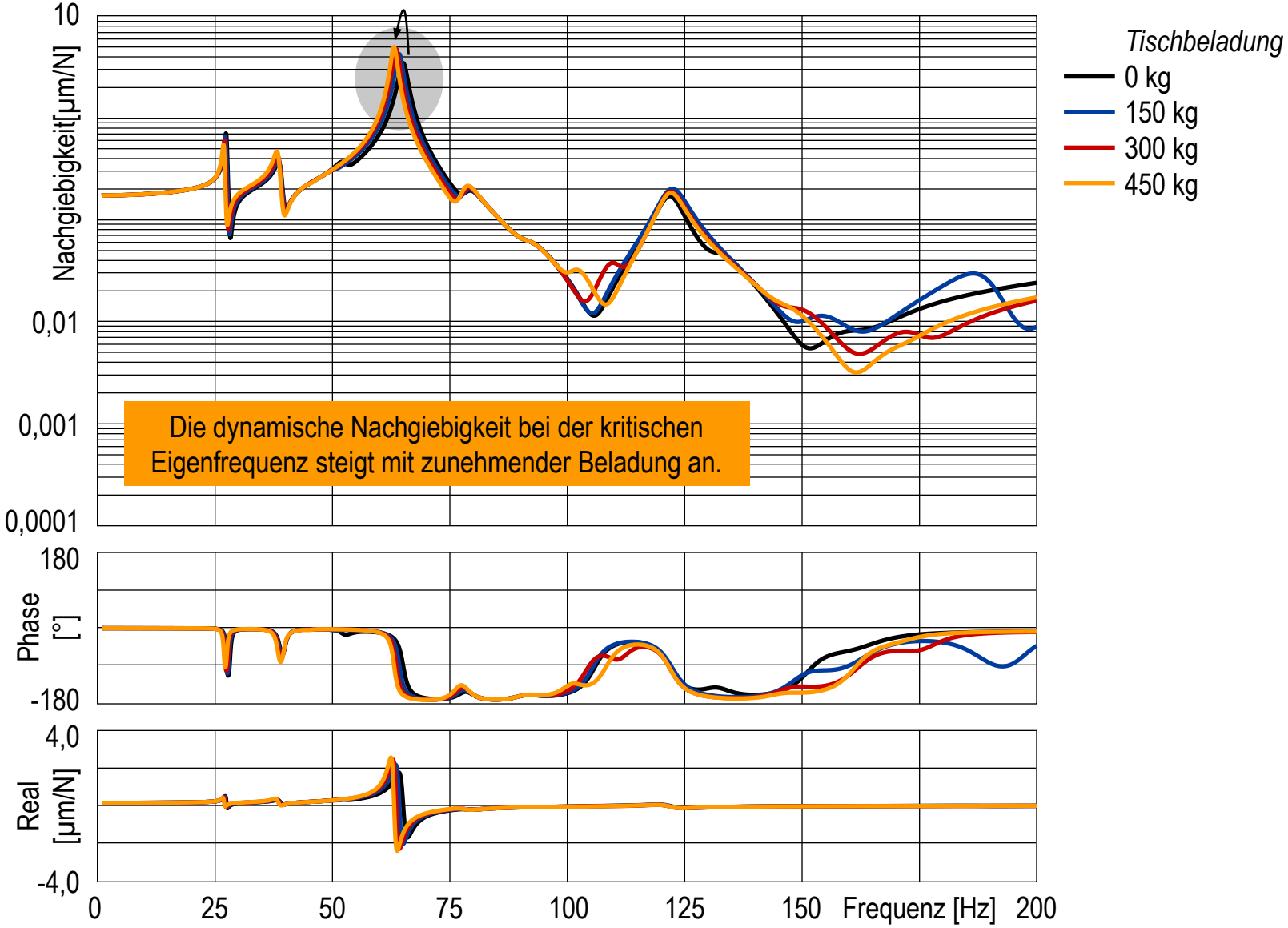
© planlauf GmbH

Gliederung

- Einleitung und Aufgabenstellung
- Statisches Verhalten
- Dynamisches Verhalten – *Variation der Tischbeladung mit Gegenlager*
- Zusammenfassung und Empfehlungen

© planlauf GmbH

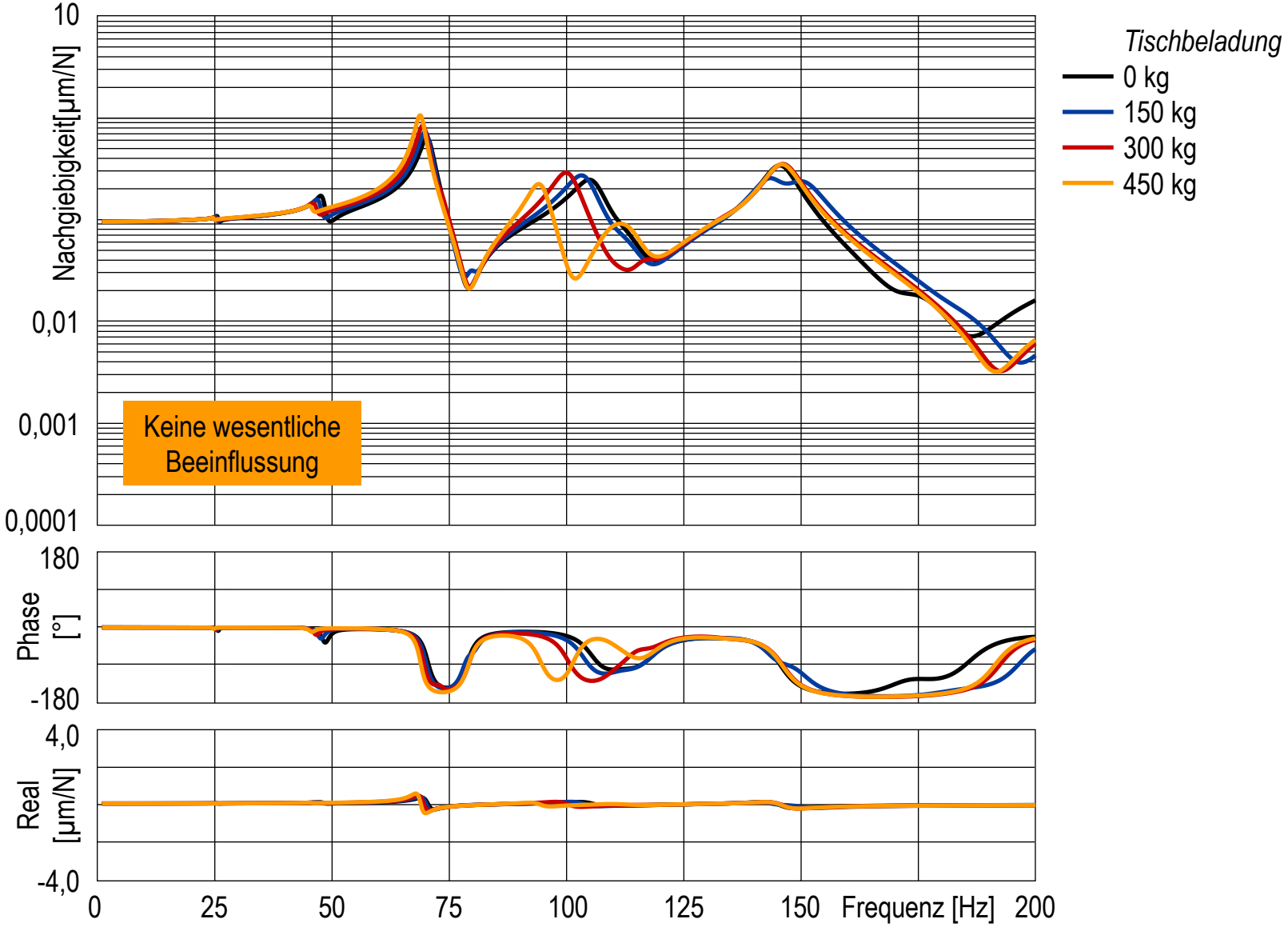
Relative Nachgiebigkeitsfrequenzgänge in X-Richtung in Abhängigkeit der Tischbeladung – mit Gegenlager



Die dynamische Nachgiebigkeit bei der kritischen Eigenfrequenz steigt mit zunehmender Beladung an.

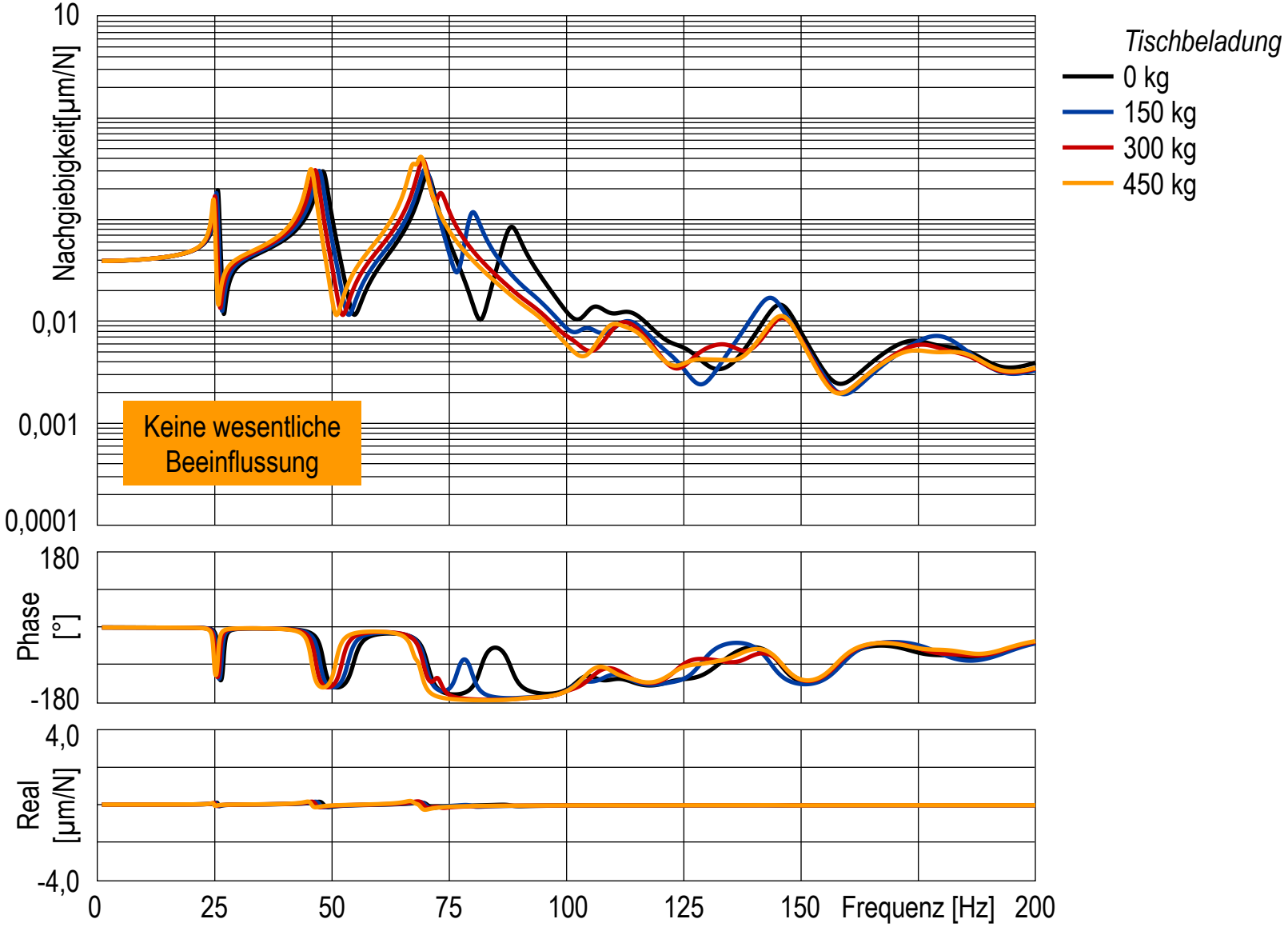
© planlauf GmbH

Relative Nachgiebigkeitsfrequenzgänge in Y-Richtung in Abhängigkeit der Tischbeladung – mit Gegenlager



© planlauf GmbH

Relative Nachgiebigkeitsfrequenzgänge in Z-Richtung in Abhängigkeit der Tischbeladung – mit Gegenlager



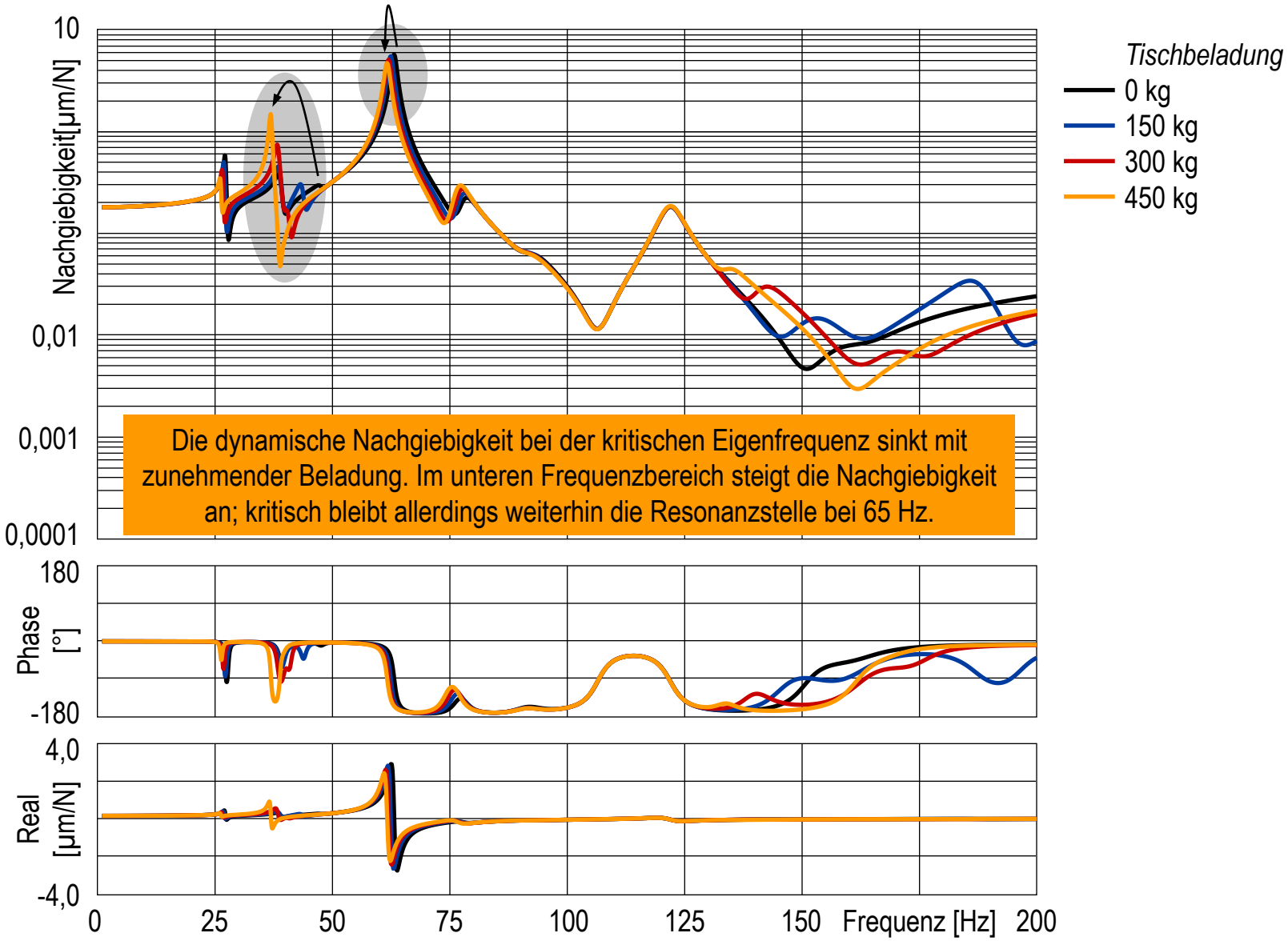
© planlauf GmbH

Gliederung

- Einleitung und Aufgabenstellung
- Statisches Verhalten
- Dynamisches Verhalten – *Variation der Tischbeladung ohne Gegenlager*
- Zusammenfassung und Empfehlungen

© planlauf GmbH

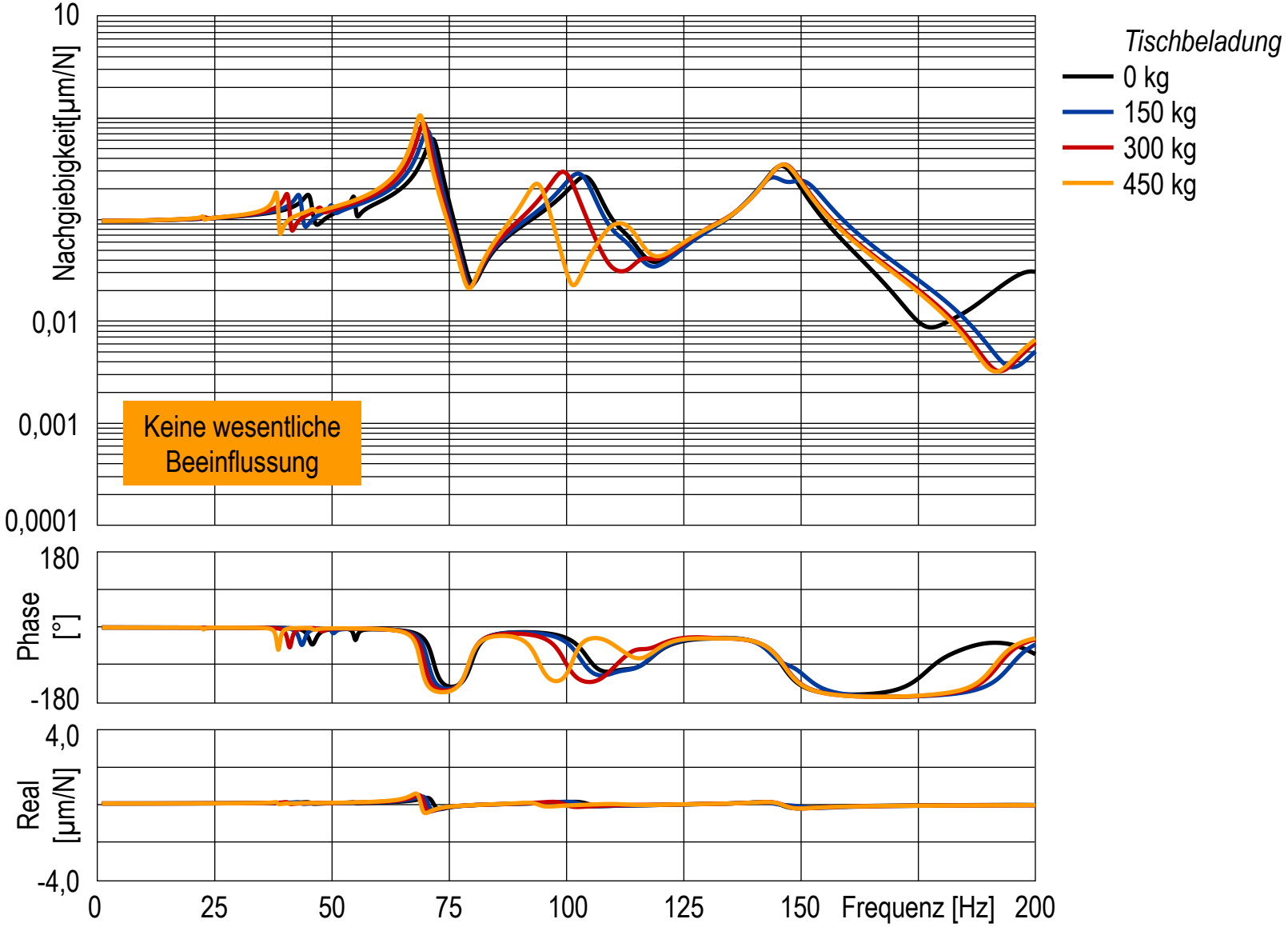
Relative Nachgiebigkeitsfrequenzgänge in X-Richtung in Abhängigkeit der Tischbeladung – ohne Gegenlager



Die dynamische Nachgiebigkeit bei der kritischen Eigenfrequenz sinkt mit zunehmender Beladung. Im unteren Frequenzbereich steigt die Nachgiebigkeit an; kritisch bleibt allerdings weiterhin die Resonanzstelle bei 65 Hz.

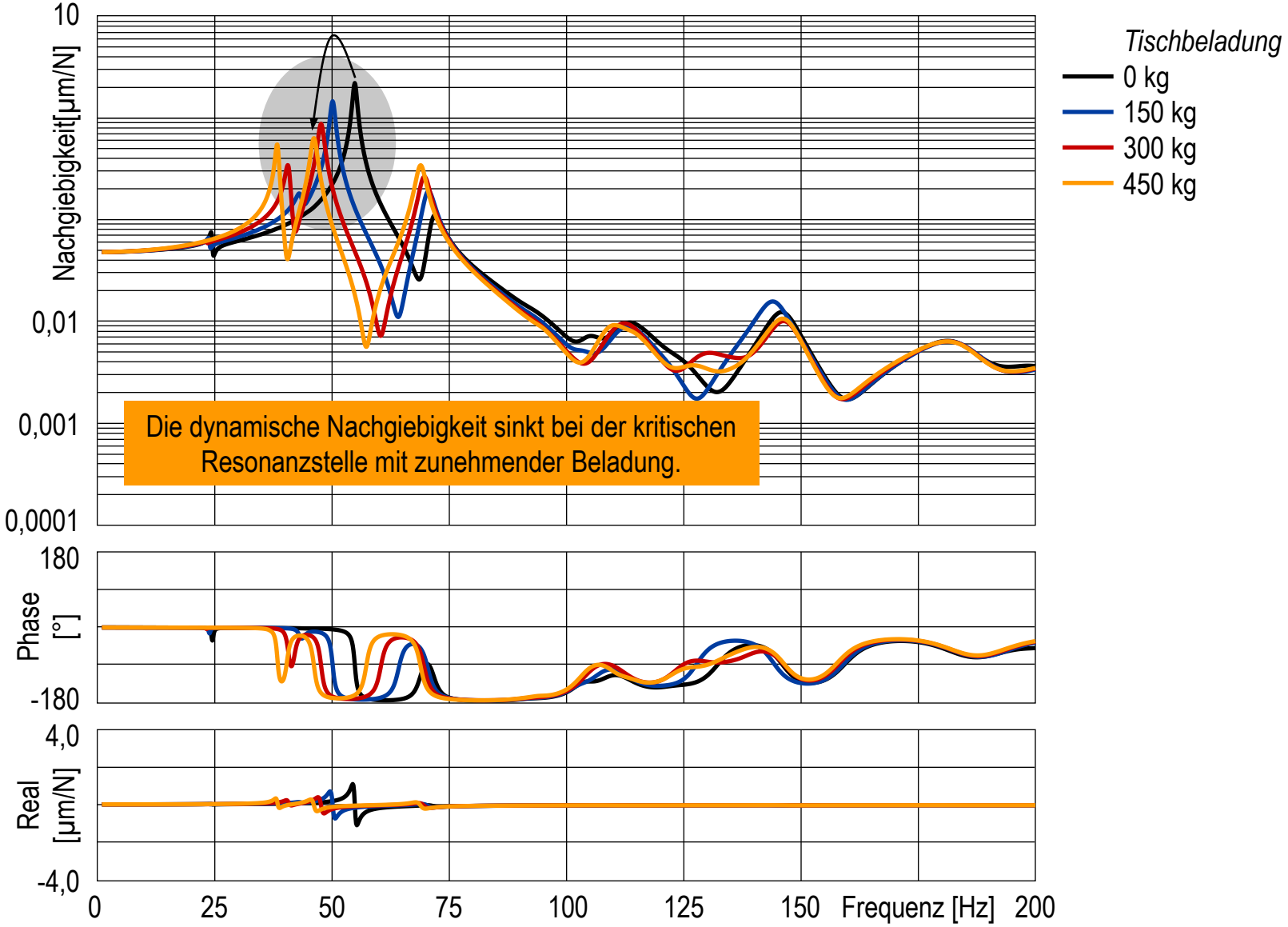
© planlauf GmbH

Relative Nachgiebigkeitsfrequenzgänge in Y-Richtung in Abhängigkeit der Tischbeladung – ohne Gegenlager



© planlauf GmbH

Relative Nachgiebigkeitsfrequenzgänge in Z-Richtung in Abhängigkeit der Tischbeladung – ohne Gegenlager



Die dynamische Nachgiebigkeit sinkt bei der kritischen Resonanzstelle mit zunehmender Beladung.

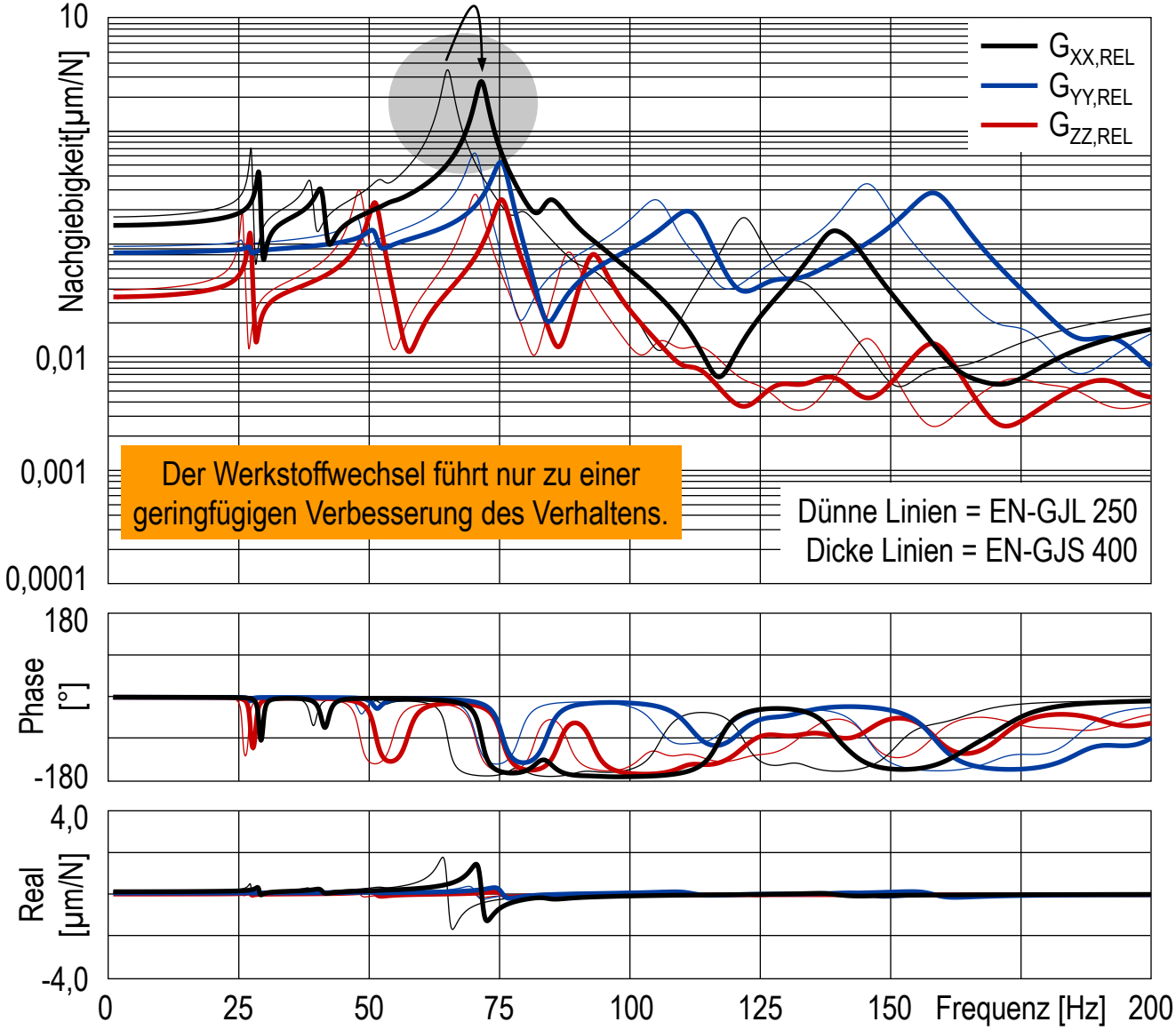
© planlauf GmbH

Gliederung

- Einleitung und Aufgabenstellung
- Statisches Verhalten
- Dynamisches Verhalten – *Werkstoffwechsel von EN-GJL 250 zu EN-GJS 400*
- Zusammenfassung und Empfehlungen

© planlauf GmbH

Werkstoffwechsel für alle Gussbauteile von EN-GJL 250 zu EN-GJS 400
Relative Nachgiebigkeitsfrequenzgänge (Mitte)



© planlauf GmbH

Gliederung

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

© planlauf GmbH

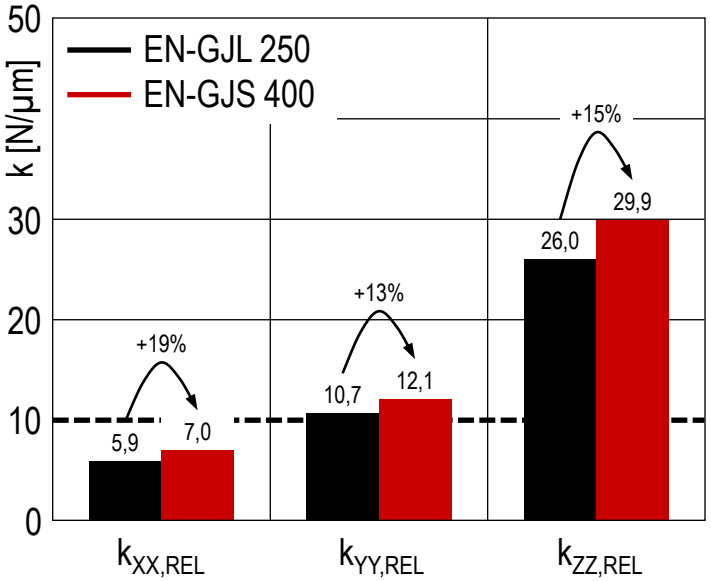
Zusammenfassung

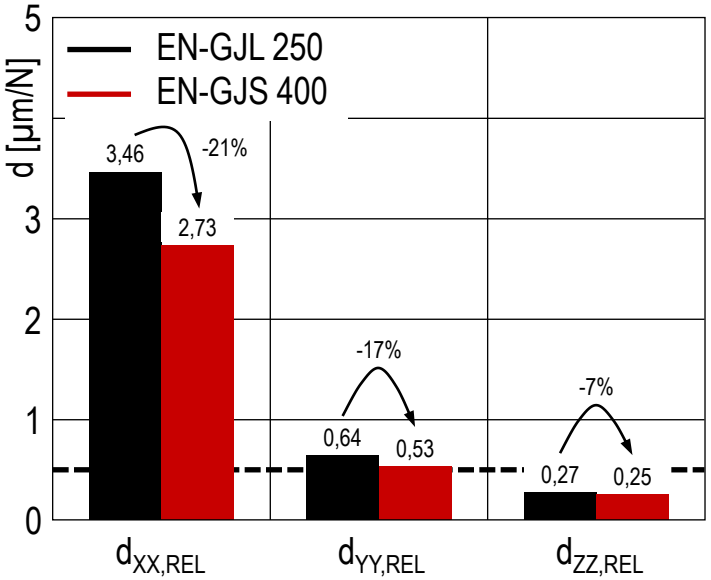
Statisches Verhalten

- Die **Zielsteifigkeit** von 10 N/µm relativ zwischen Werkzeug und Werkstück wird von dem aktuellen Entwurf **deutlich verfehlt**.
- Das statische Verhalten wird dabei von der Werkzeugseite dominiert.
- Eine **Gegenlagerung des Schwenktischs** ist aus statischen Gründen **nicht erforderlich**, da die werkstückseitige Steifigkeit auch ohne Gegenlager um den Faktor 10 über dem Wert der Werkzeugseite liegt.
- Die Verformungsanteile von **Y-Schlitten, Z-Schlitten und der Führungen** sind vergleichsweise hoch, so dass hier entsprechendes **Verbesserungspotenzial** vorhanden ist.
- Die **Verformungen unter Eigengewicht** der Y-Achse liegen ohne Kompensation im Bereich von 1/10 mm und sind damit vergleichsweise hoch. Die Verstärkung des Y-Schlittens ist empfehlenswert.
- Ein Werkstoffwechsel der Gussbauteile von EN-GJL 250 zu EN-GJS 400 führt nur zu einer Erhöhung der Steifigkeit in X-Richtung auf 7,0 N/µm, so dass eher konstruktive Maßnahmen erforderlich sind.

Dynamisches Verhalten

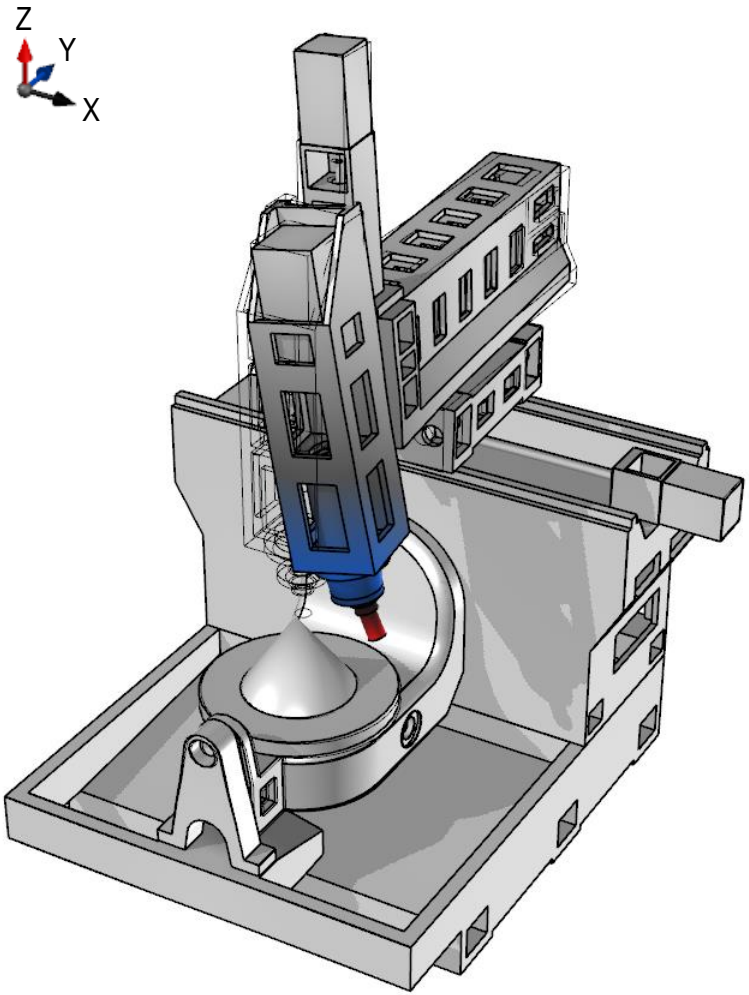
- Die geforderte maximale **dynamische Nachgiebigkeit** von 0,5 µm/N **wird bei weitem nicht erreicht**.
- Die dominanten Schwachstellen werden auf den folgenden Seiten zusammen mit den Empfehlungen näher erläutert.





© planlauf GmbH

Empfehlungen (1/2)
Statische Schwachstelle in X-Richtung



Verformungsanteile

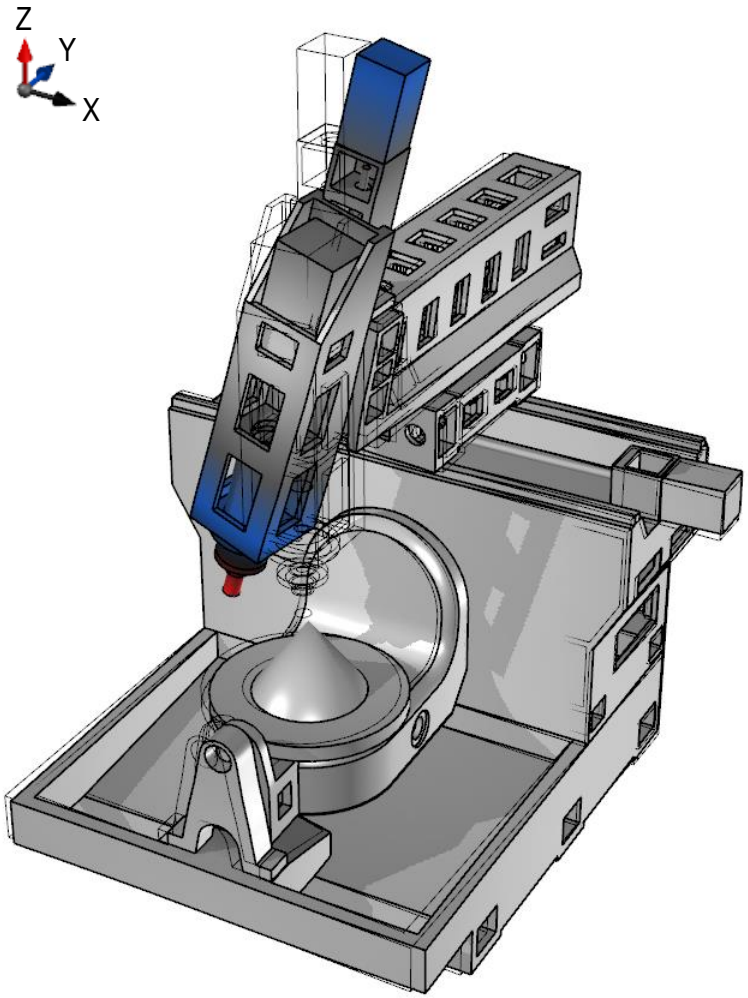
- Gieren des X-Schlittens durch den mittig platzierten X-KGT
- Torsion des Y-Schlittens im frei auskragenden Bereich
- Verformung des Z-Schlittens, begünstigt durch die großen Montageöffnungen

Empfehlung

- Versetzen des X-KGTs möglichst weit nach vorne
- Vergrößerung des Querschnitts des Y-Schlittens zur Erhöhung der Torsionssteifigkeit
- Weitgehendes Schließen der Montageöffnungen im Z-Schlitten

© planlauf GmbH

Empfehlungen (2/2)
Dynamische Schwachstelle bei 65 Hz



Schwingungsform

- Torsion des Y-Schlittens
- Pendeln des Z-Schlittens in X-Richtung

Ursache

- Geringe Torsionssteifigkeit des Y-Schlittens
- Geringe Abstände der Führungswagen der X-, Y- und Z-Achse

Empfehlung

- Vergrößerung des Querschnitts des Y-Schlittens zur Erhöhung der Torsionssteifigkeit
- Vergrößerung des Abstands der Y-Führungswagen in X-Richtung
- Vergrößerung des Abstands der Z-Führungswagen in X- und vor allem Z-Richtung

© planlauf GmbH