

## Willkommen

bei

Eitzenberger GmbH

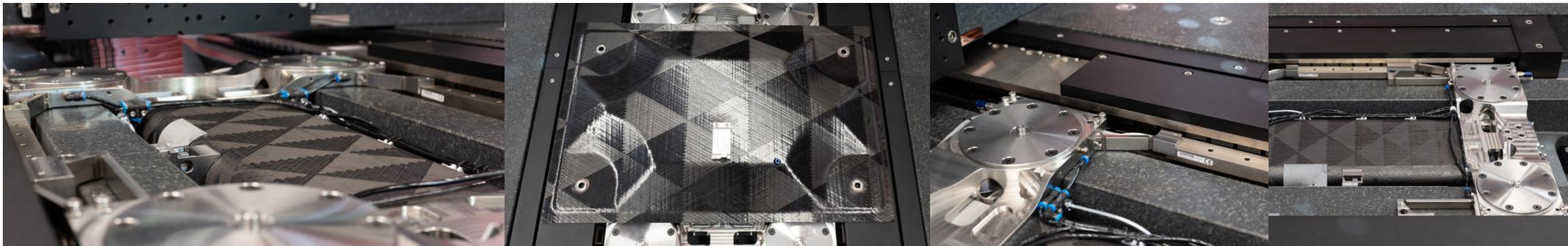
E

KINEMATIK MIT LUFT

Topic: **Kinematik mit Luftlagern – Grundlagen  
und Anwendungsbeispiele**

Autor: Hans Eitzenberger

Date: 27. September 2024



## Kinematik mit Luftlagern – Grundlagen und Anwendungsbeispiele

Luftlager: Warnungen und Empfehlungen

Anwendungsbereiche und Produktübersicht

Funktion und Integration von Luftlagern

Anforderungen an Hochpräzisions-Kinematiken

Anwendungen von Hochpräzisions-Kinematiken



## Kinematik mit Luftlagern – Grundlagen und Anwendungsbeispiele

### Luftlager: Warnungen und Empfehlungen

Anwendungsbereiche und Produktübersicht

Funktion und Integration von Luftlagern

Anforderungen an Hochpräzisions-Kinematiken

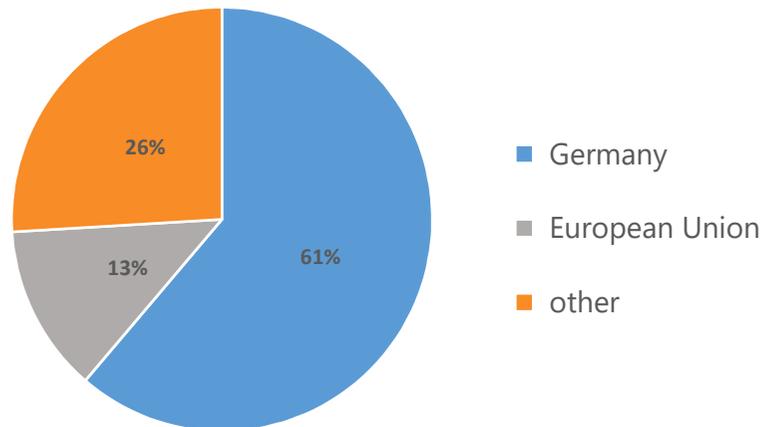
Anwendungen von Hochpräzisions-Kinematiken



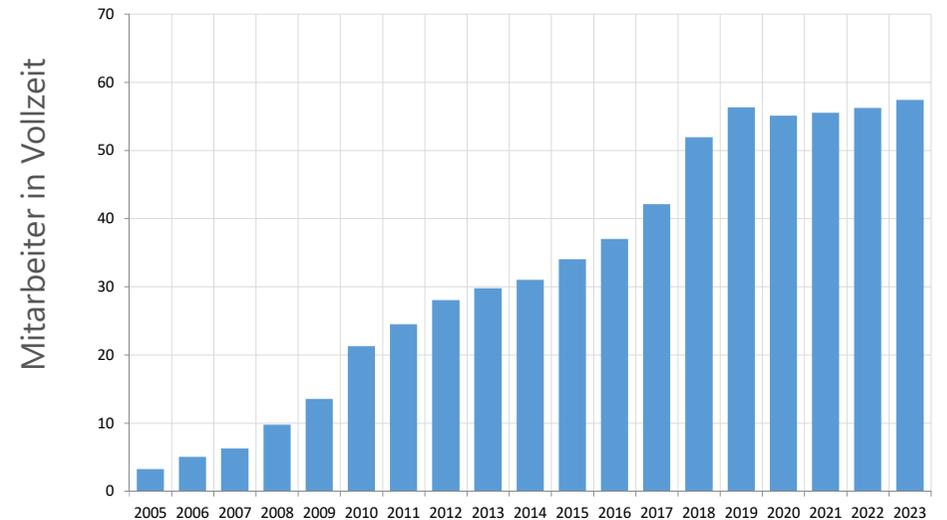
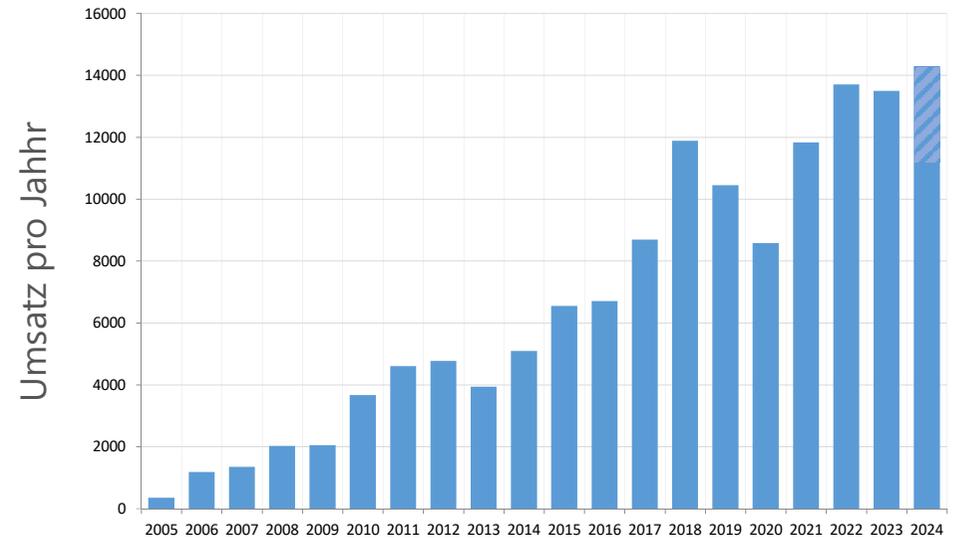
# EITZENBERGER Eckdaten

Gegründet: 2001  
 Mitarbeiter: 60 (Vollzeit)  
 Umsatz 2023: 13.5 Mio. €

Turnover by region



KINEMATIK MIT LUFT



# Eitzenberger Firmengebäude

Aktuell = 1.500 m<sup>2</sup>



Expansion = (Gesamtfläche) 4.000 m<sup>2</sup>



## Kinematik mit Luftlagern – Grundlagen und Anwendungsbeispiele

### Luftlager: Warnungen und Empfehlungen

Anwendungsbereiche und Produktübersicht

Funktion und Integration von Luftlagern

Anforderungen an Hochpräzisions-Kinematiken

Anwendungen von Hochpräzisions-Kinematiken



# Vorsicht !

- Luftlager haben eine Reihe (eine Menge!) Nachteile und nur wenige Vorteile.
- Verwenden Sie Luftlager nur, wenn Sie zumindest einen dieser positiven Eigenschaften benötigen.
- 99,X? % der Lager-Anwendungen nutzen besser sonstige Lagertypen!



# Wann sollten Sie Luftlager verwenden?

## Anforderungen, für die Sie Luftlager in Betracht ziehen sollten:

- Sehr hohe Ablaufgenauigkeiten
  - Nichtkompensierte absolut-Genauigkeiten ( $\mu\text{m}$  und darunter)
  - Wiederholgenauigkeiten oder kompensierte Genauigkeiten ( $0.X\mu\text{m}$  or  $0.0X \mu\text{m}$  or  $[0.00X \mu\text{m}]$ )
- Sehr hohe (Schrittantwort) Genauigkeiten
- Reinraumanwendungen (Partikel und Öl-Frei bis zu ISO 14644-1 Klasse 1)
- Verschleißfreiheit (10 Millionen Zyklen und mehr)
- Reibungsfreiheit / Stick Slip-Freiheit (z. B. genaue Dosierung der Kraft)
- Sehr hohe Geschwindigkeiten (oder Drehzahlen) oder sehr konstante Geschwindigkeit
- Sehr hohe Beschleunigung (z.B. Fast Tools)
- (Luftlager können nicht in einer Hochvakuumumgebung verwendet werden.)



## Kinematik mit Luftlagern – Grundlagen und Anwendungsbeispiele

Luftlager: Warnungen und Empfehlungen

### Anwendungsbereiche und Produktübersicht

Funktion und Integration von Luftlagern

Anforderungen an Hochpräzisions-Kinematiken

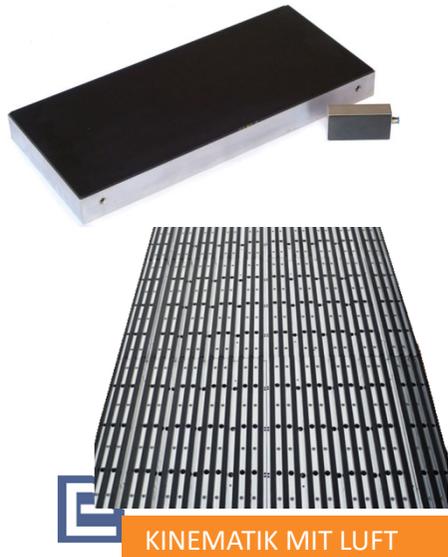
Anwendungen von Hochpräzisions-Kinematiken



# Typische Anwendungen



# Typische Anwendungen



# Typische Anwendungen



Automotiv simulation & wind tunnel



Flat Screen Manufacturing



Manufacturing of semiconductors & sensors



Pick and Place systems for chip handling

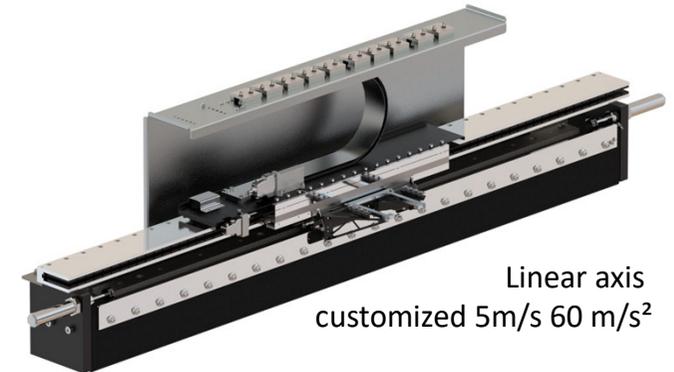
# EZ Produktüberblick



Air Bearing Pads



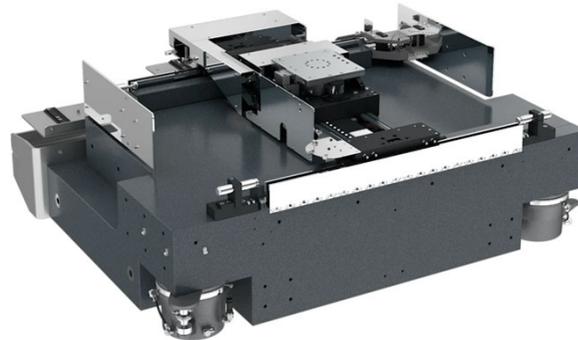
Linear axis EZ-2352-66



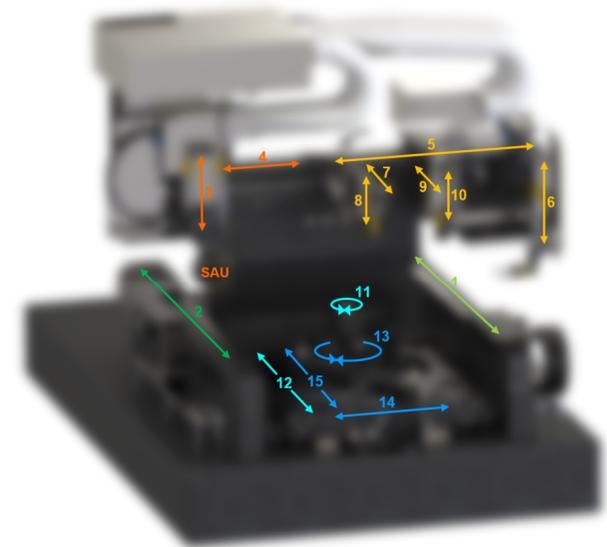
Linear axis  
customized 5m/s 60 m/s<sup>2</sup>



Z- Theta Setup



X-Y-Z Gantry EZ-0715



16 axis assembly system  
clean room application

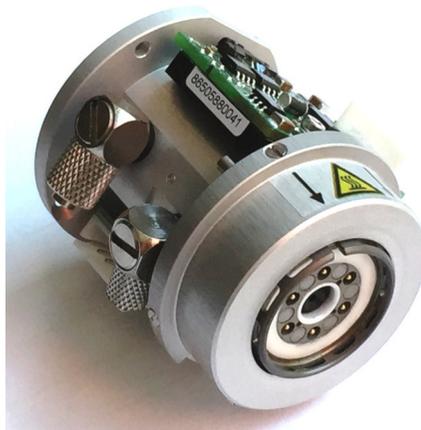
# EZ Produktüberblick



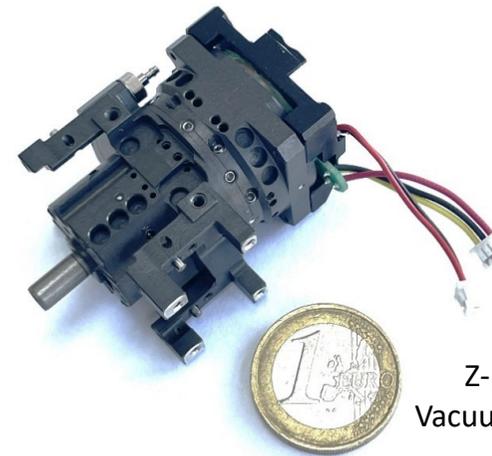
EZ-RP-201 Turn Table



EZ-9570 (Grinding) Spindel



Custom Pick Tools



Pick tool  
Z and theta movement  
Cylinder air bearing  
Z end air bearing  
Theta motor  
Z-piston for assembly force  
Vacuum passage for chip fixing

## Kinematik mit Luftlagern – Grundlagen und Anwendungsbeispiele

Luftlager: Warnungen und Empfehlungen

Anwendungsbereiche und Produktübersicht

### **Funktion und Integration von Luftlagern**

Anforderungen an Hochpräzisions-Kinematiken

Anwendungen von Hochpräzisions-Kinematiken



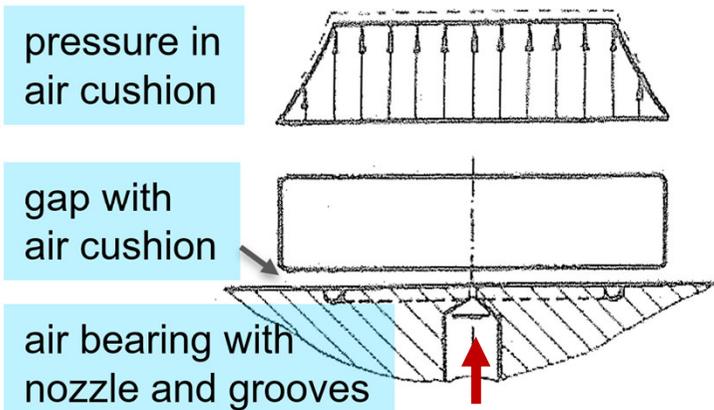
# Funktionsprinzipien von EZ-Luftlagern

## Theoretische Tragfähigkeit eines ebenen Luftlagers.

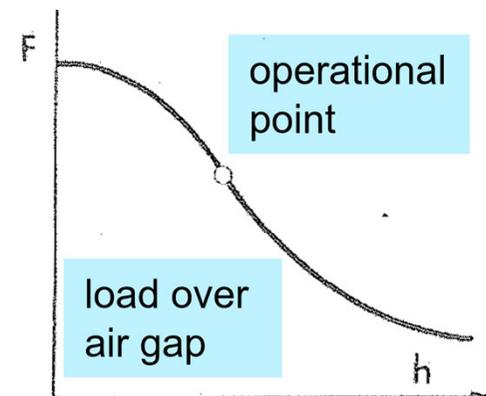
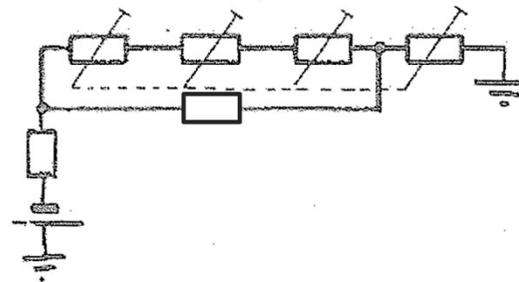
Der Versorgungsdruck (z.B. 0,5 MPa) multipliziert mit der Fläche ergibt die (theoretische) maximale Tragfähigkeit des Luftlagers.

Das Lager verbraucht kontinuierlich Druckluft.

Das Regelverhalten des Luftlagers ergibt sich aus dem veränderlichen Druck im Lagerpalt. Dieser wird geregelt durch den Druckabfall des Luftstroms an der Einströmdüse und dem Druckabfall am variablen Strömungswiderstand im Lagerpalt ( $\sim 1/h^3$ ). Dies führt zu einer Kraftkennlinie (F über h), typische Lagerpalte: **2 bis 15  $\mu\text{m}$** .



electrical resistance analogues



Quelle: J. Heinzl

# Design eines EZ Luftlagers (Pad)

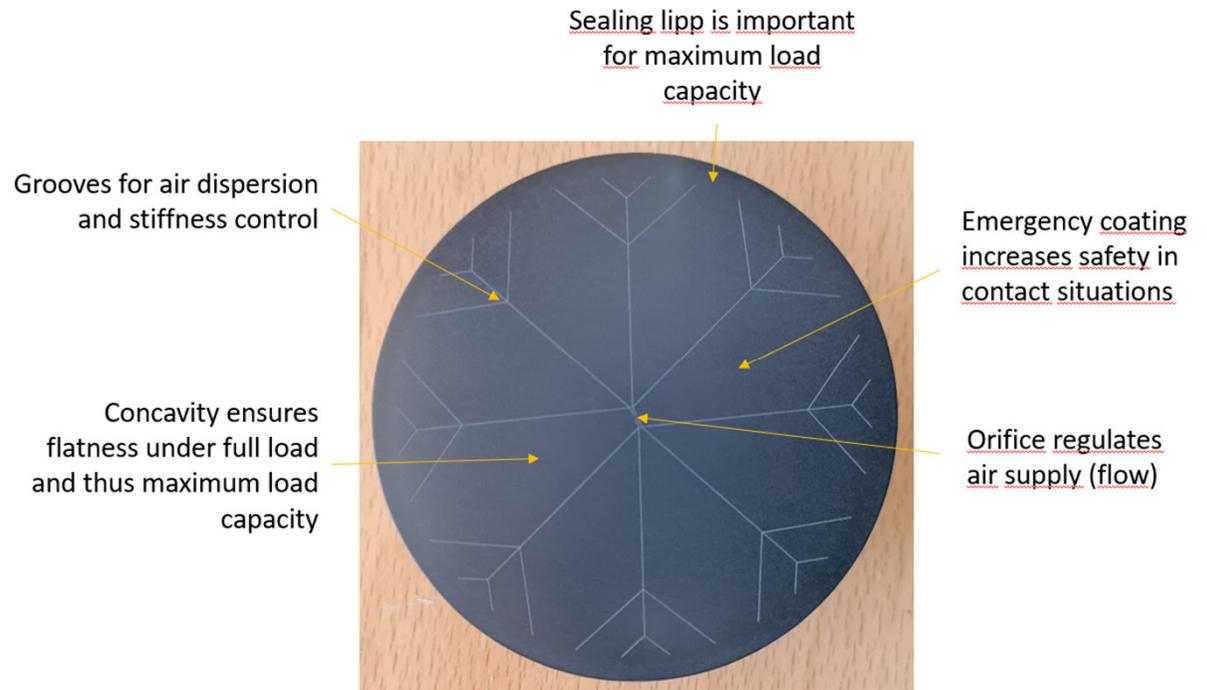
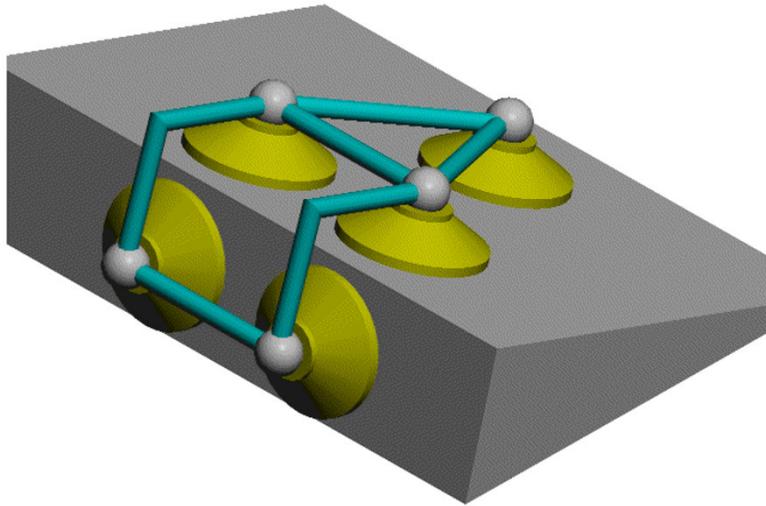
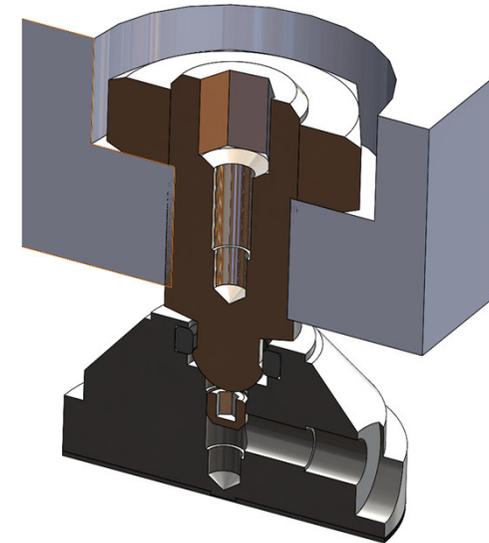


Abb. 1 Luftlagerpad mit „Schneeflocken“-Struktur

## Statisch bestimmte Linear-Achse



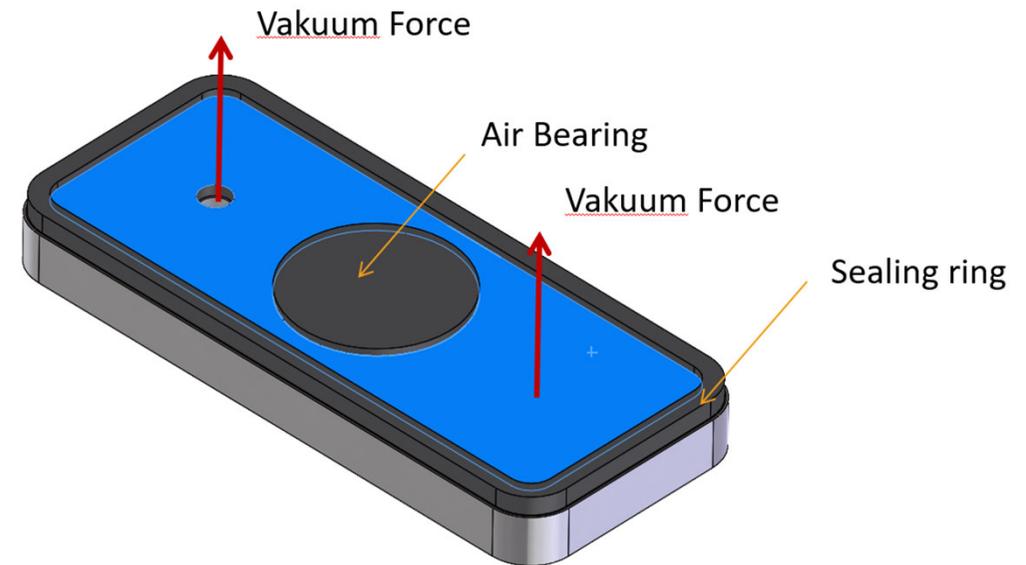
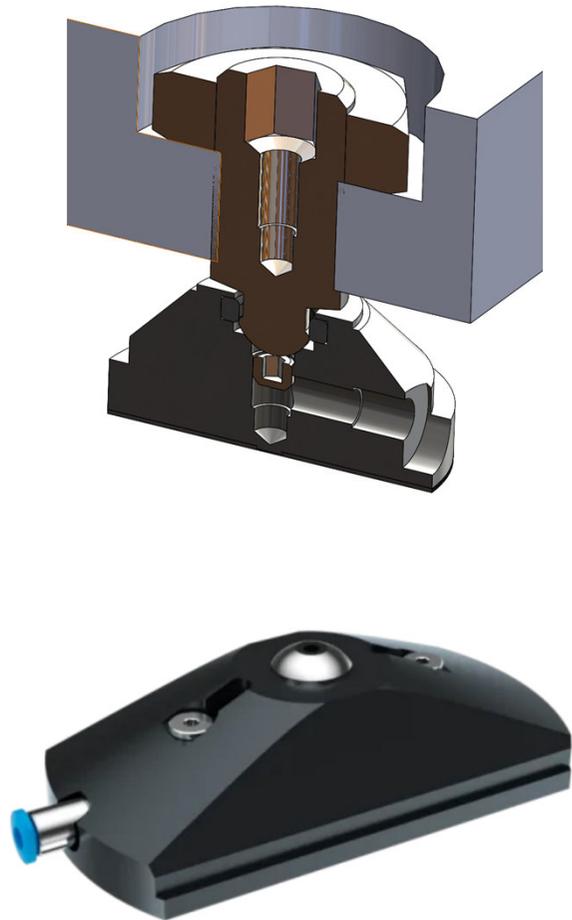
Fünf Luftlager mit sphärischer Anbindung



Sphärische Verbindung

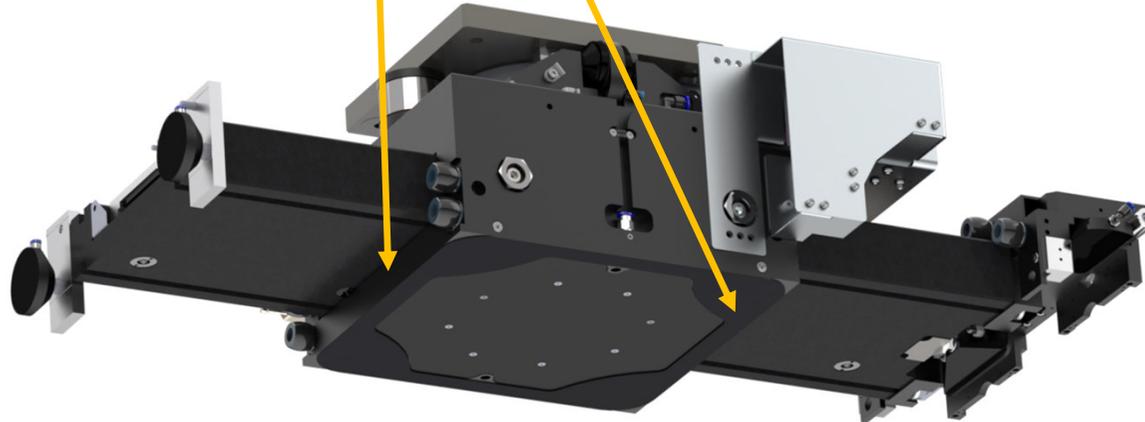
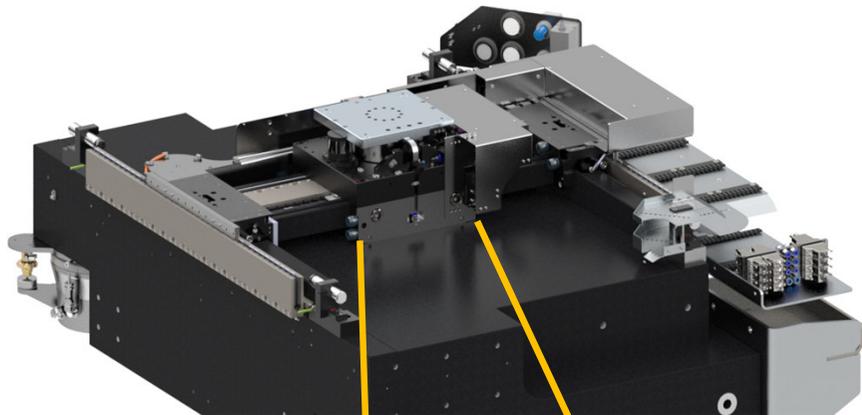
# Designs of EZ air bearing (Pads)

Porous Graphite Air Bearing wit vacuum chamber

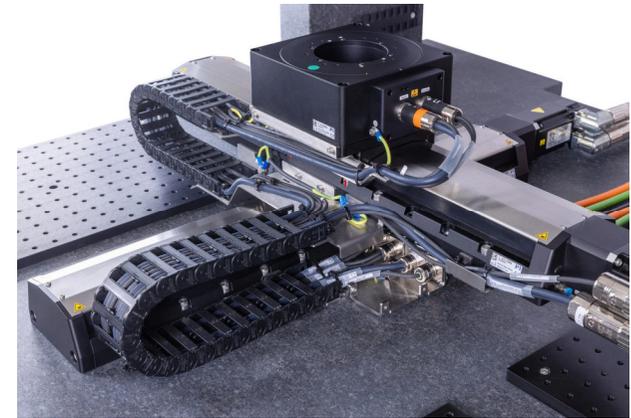


# Luftlager Integration

## Koplanare Lagerung



Luftlager mit Vakuum-Vorspannung  
läuft direkt auf der Basisplatte



Quelle: PI

Sehr Steife und thermisch stabile Führung des  
Schlittens auf der Basisplatte in Z und um RX und RY

# Funktionsprinzipien von EZ-Luftlagern

Statisches Regelverhalten des Luftlagers

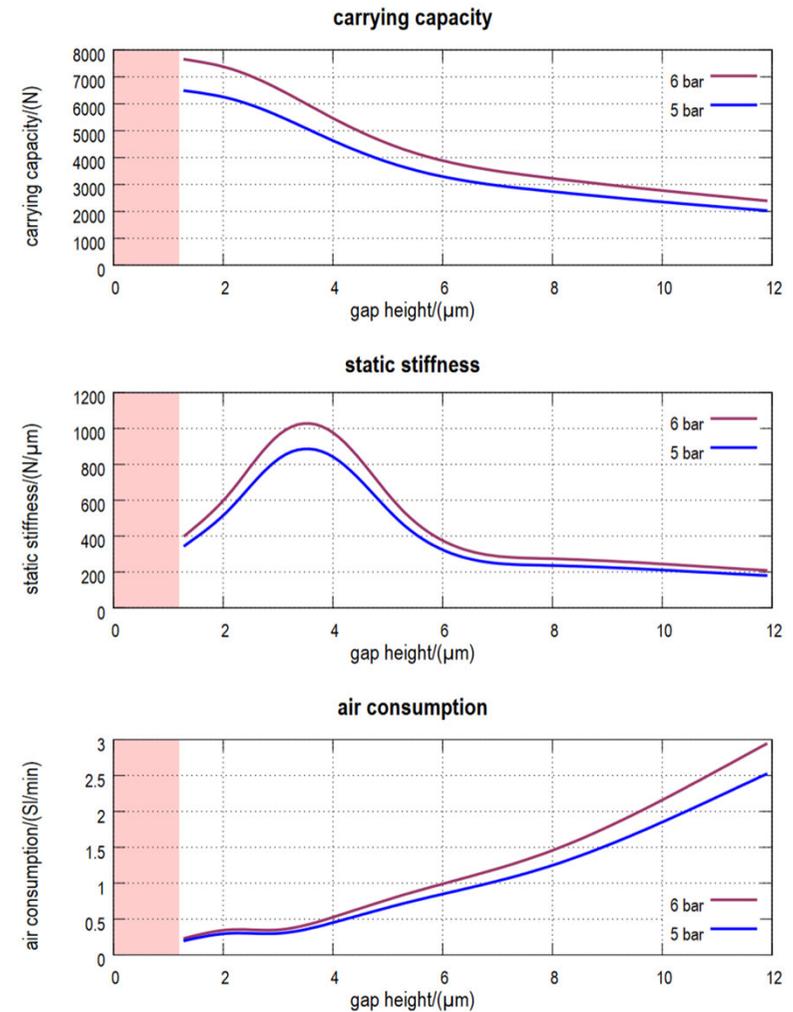
**Oben:** die Tragfähigkeit (N) in Abhängigkeit von der Luftspalthöhe ( $\mu\text{m}$ ).

**Mitte:** die resultierende Steifigkeit ( $\text{N}/\mu\text{m}$ ) (Ableitung der Tragkraftkurve)

**Unten:** der Luftverbrauch des Lagers ( $\text{Sl}/\text{min}$ ).

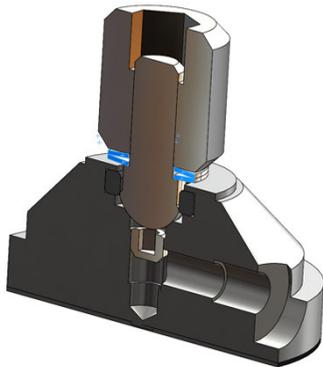


Luftlager in einem Prüfstand: Die Tragkraft (N) wird aufgebracht, die resultierende Spalthöhe ( $\mu\text{m}$ ) und der Luftverbrauch gemessen.

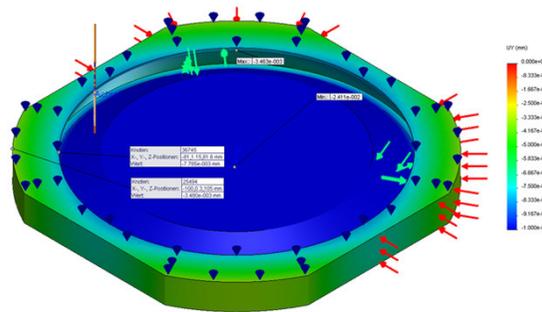


# Vorspannung von Luftlagern

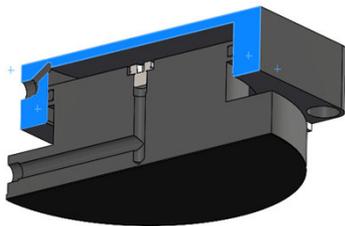
Vorspannung mit Kräften



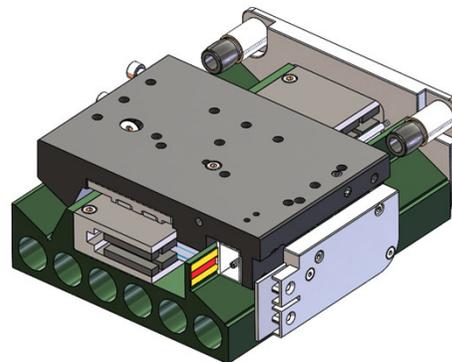
Gegenlager mit Federn



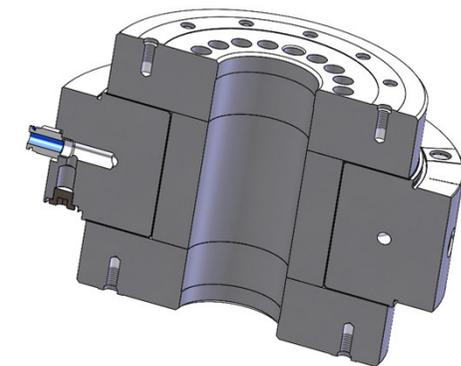
Vakuum in der Lagerebene



Gegenlager mit Druckkolben



Magnetische Vorspannung

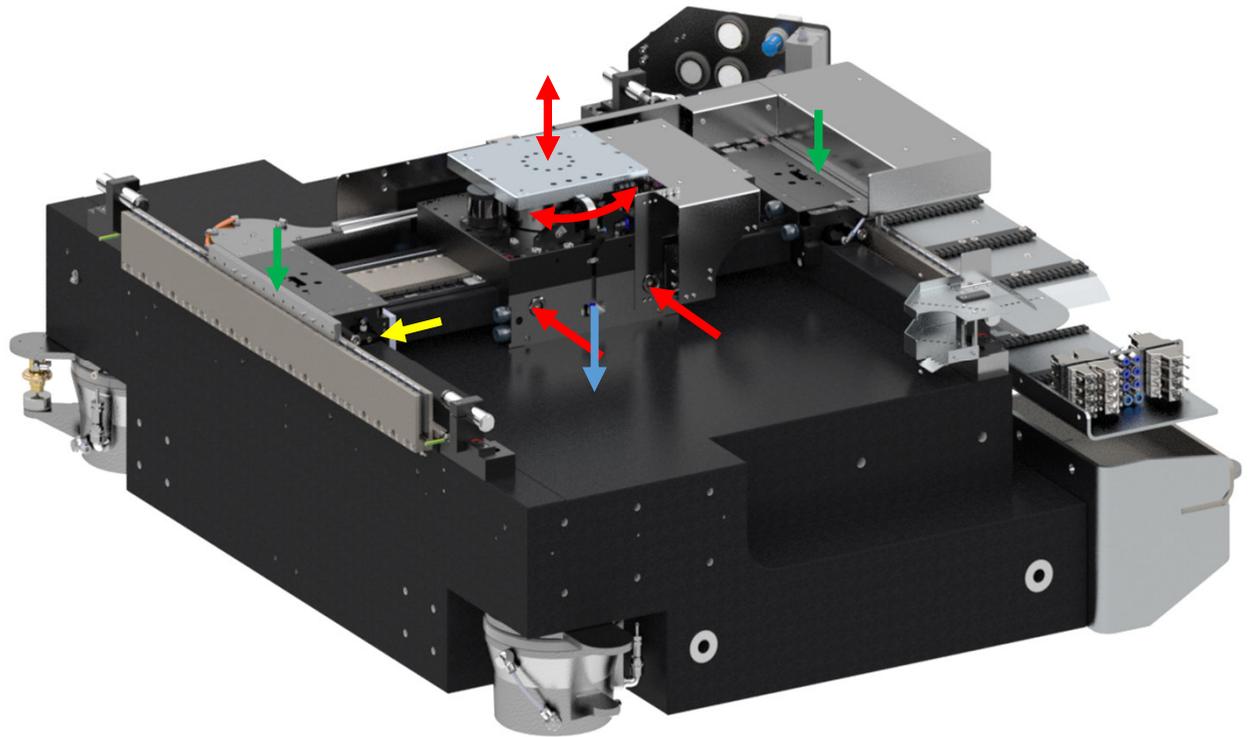


Steife geometrische  
Vorspannung mit angestellter  
Gegenlagerung

# Vorspannung von Luftlagern

## Verschiedene Arten der Vorspannung in einem EZ-0715 X-Y-Z-Portalsystem

- Arten der Vorspannung
  - Geometrisch
  - Magnetisch
  - Elastisch nachgiebig
  - Vakuum
  
- Z-Zylinder Geometrische Vorspannung
- Z-Verdrehicherung
  
- Z-Führungslager für Schlitten
- Seitliches Lager für Schlitten
  
- Schiene:
  - Z-Führungslager
  - Seitliche Lager



## Kinematik mit Luftlagern – Grundlagen und Anwendungsbeispiele

Luftlager: Warnungen und Empfehlungen

Anwendungsbereiche und Produktübersicht

Funktion und Integration von Luftlagern

### **Anforderungen an Hochpräzisions-Kinematiken**

Anwendungen von Hochpräzisions-Kinematiken

# Verformung im Nanometerbereich

Erlaubte Kräfte für:

Kräfte, die Millimeterabweichungen verursachen

**Kräfte verursachen:**

Millimeter-Abweichung / 1000 = Mikrometer-Abweichung

Mikrometer-Abweichung / 1000 = Nanometer-Abweichung

→ Vergrößere Steifigkeiten

→ Halte die (Stör-) Kräfte niedrig

Kräfte, die Mikrometerabweichungen verursachen

Kräfte, die Nanometer-Abweichungen verursachen



# Reduzieren unerwünschter Lageabweichung

Mechanische Aspekte,	Maßnahme	Anmerkung
<b>Steifigkeit erhöhen</b>	Koplanare LL	Bei X-Y oder Theta-Z Systemen
<b>Kräfte reduzieren</b>		
interne Kräfte	Reibung reduzieren → LL	statischer Aspekt
interne Anregung	bewegte Massen reduzieren	dynamischer Aspekt
interne Anregung	statische Massen erhöhen	dynamischer Aspekt
externe Anregung	isoliere Aufbau von Umgebung	
Sonstige Aspekte: Achs-Regler, Thermische Effekte, Kräftepaare, Abbe-Fehler etc. nicht berücksichtigt		

## Kinematik mit Luftlagern – Grundlagen und Anwendungsbeispiele

Luftlager: Warnungen und Empfehlungen

Anwendungsbereiche und Produktübersicht

Funktion und Integration von Luftlagern

Anforderungen an Hochpräzisions-Kinematiken

**Anwendungen von Hochpräzisions-Kinematiken**

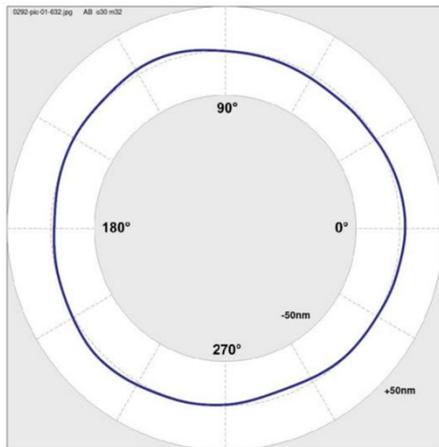


# EZ-RP 201-250 (vorläufig)

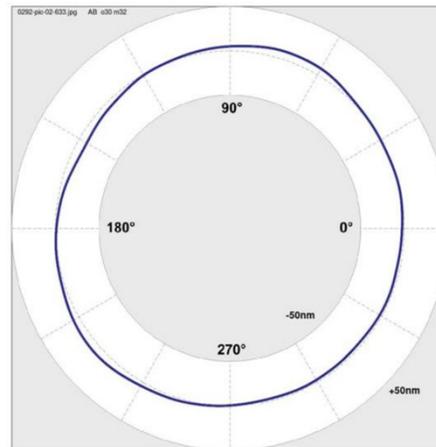


Tragkraft, Steifigkeit,  
Führungsgenauigkeit  
Läuferdurchmesser 250 mm

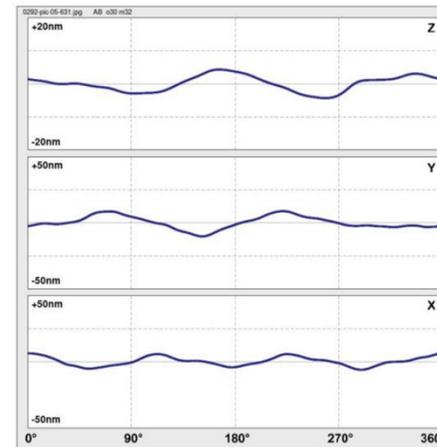
Characteristic	Unit	Target value	Measured value
Max. Carrying capacity, side A	N	5000	8200
Max. Carrying capacity, side B	N	5000	8800
Max. Carrying capacity, radial	N	2000	2194
Stiffness, axial @nom. carrying force	N/ $\mu$ m	2500	2692
Stiffness, radial @nom. carrying force	N/ $\mu$ m	500	810



error motion radial X



error motion radial Y



error motion X,Y,Z

error motion XY sum [nm_ss]	21
error motion axial Z [nm_ss]	9



## EZ-0715 (XYZ-Portal System)

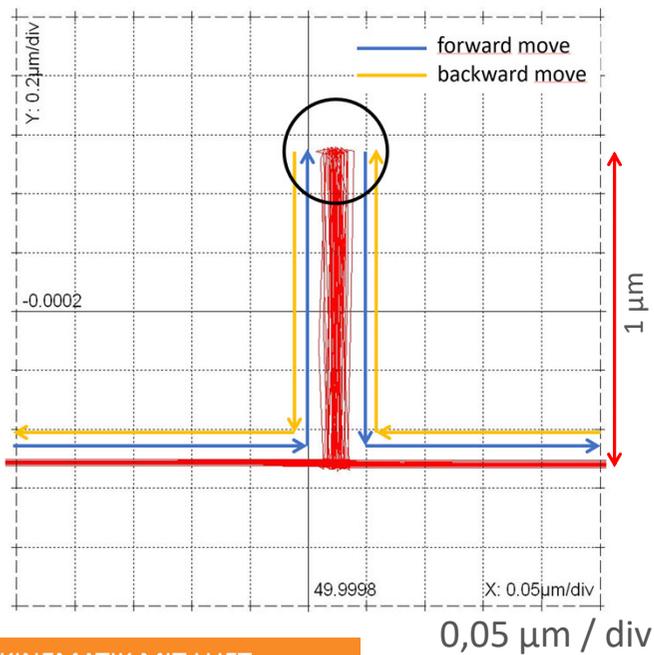
X-Y Hub: 450 mm x 350mm

### Bidirectional Repeatability X-Test (+/- 100mm)

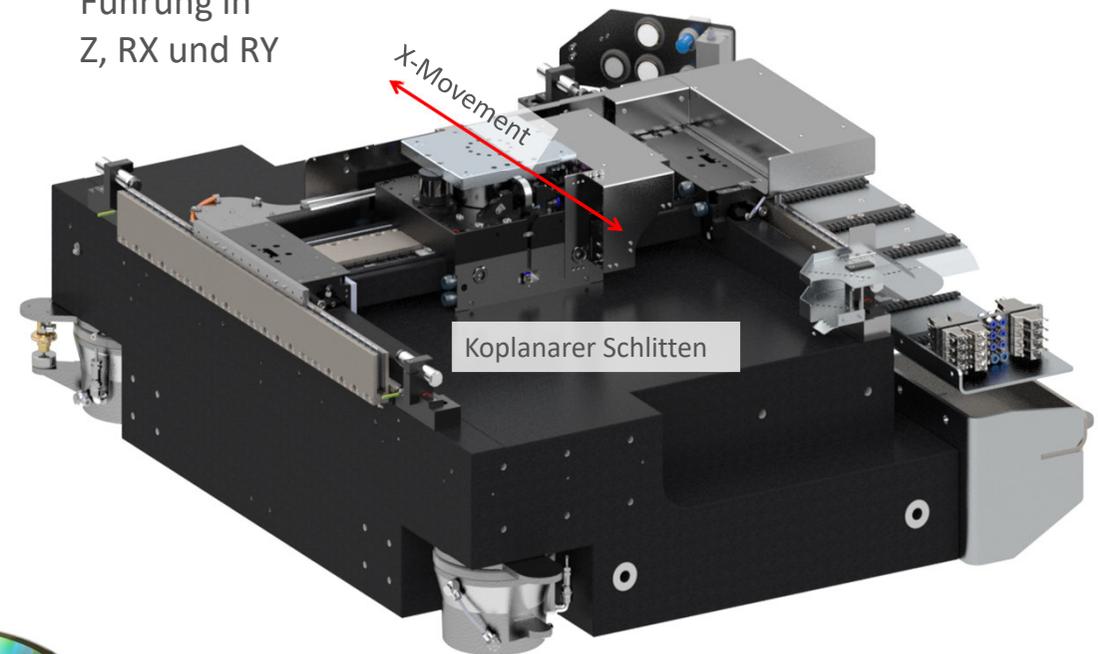
Geschwindigkeit: 0.5 m/s

Beschleunigung: 10 m/s<sup>2</sup>

Wiederholgenauigkeit: +/- 20 nm

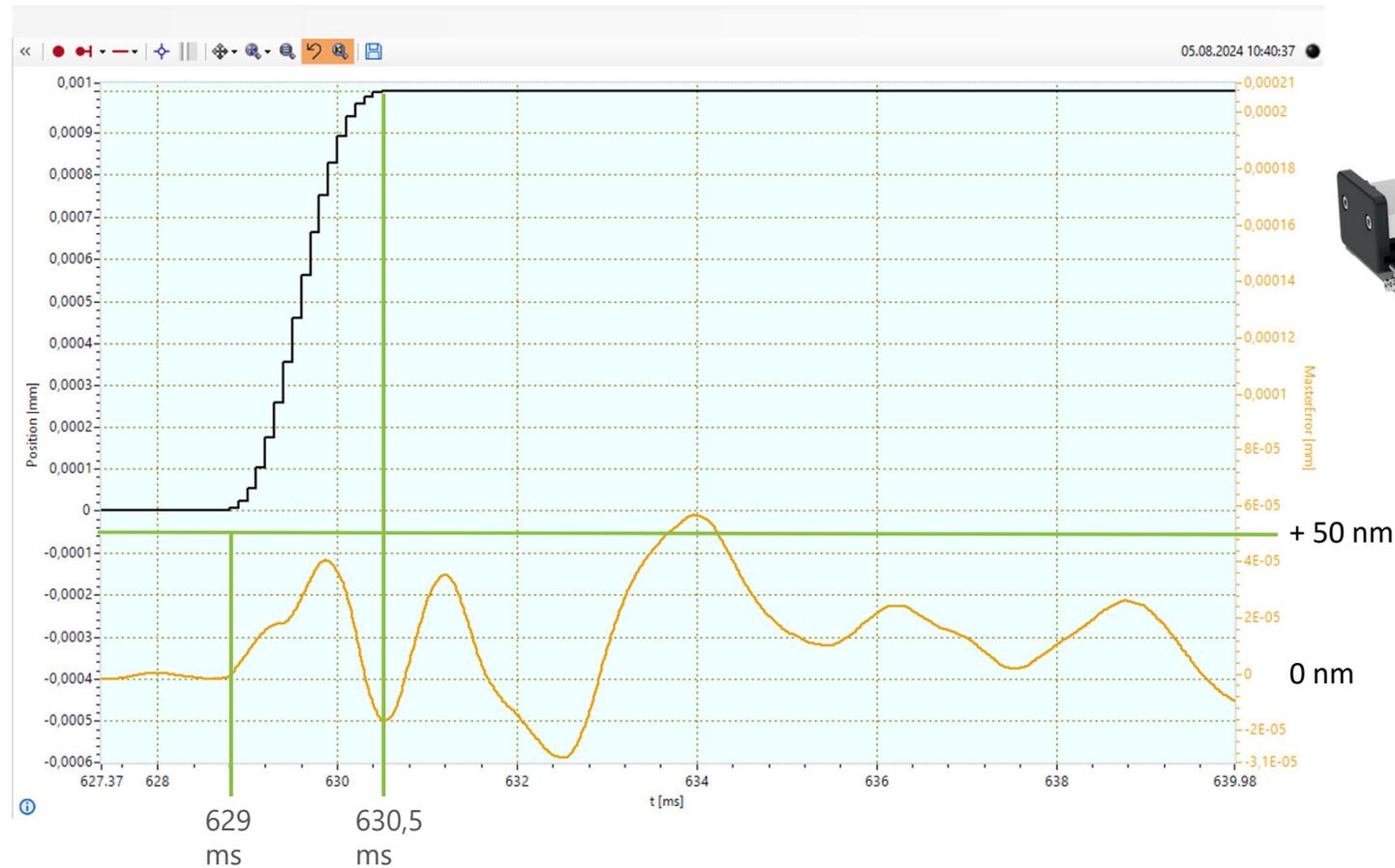


Koplanarer Schlitten:  
Hohe Steifigkeit der  
Führung in  
Z, RX und RY



# Move and Settle Time 1 $\mu\text{m}$ Step

Spontaner, Quicktest 1  $\mu\text{m}$  Settling an EZ-2352-094  
Hochwertiger Achsregler (ohne mechanische Optimierung))

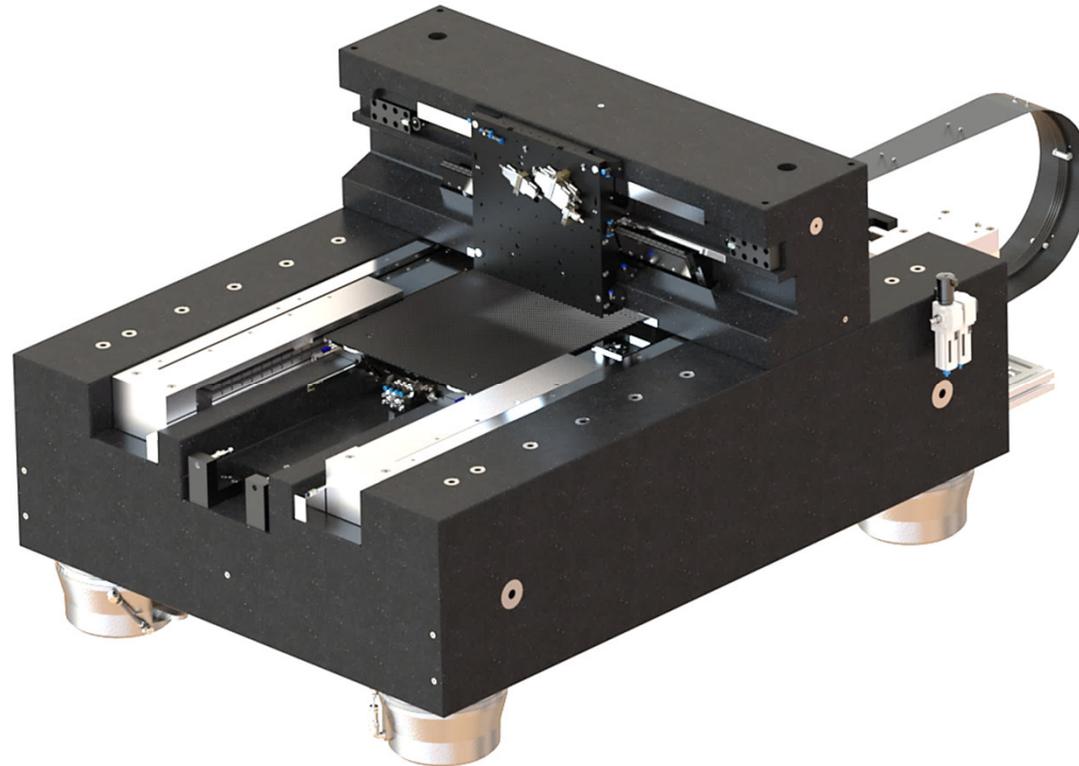


Angeregte Resonanz der Umgebung

# EITZENBERGER Kinematik System

EITZENBERGER  
KINEMATIK MIT LUFT

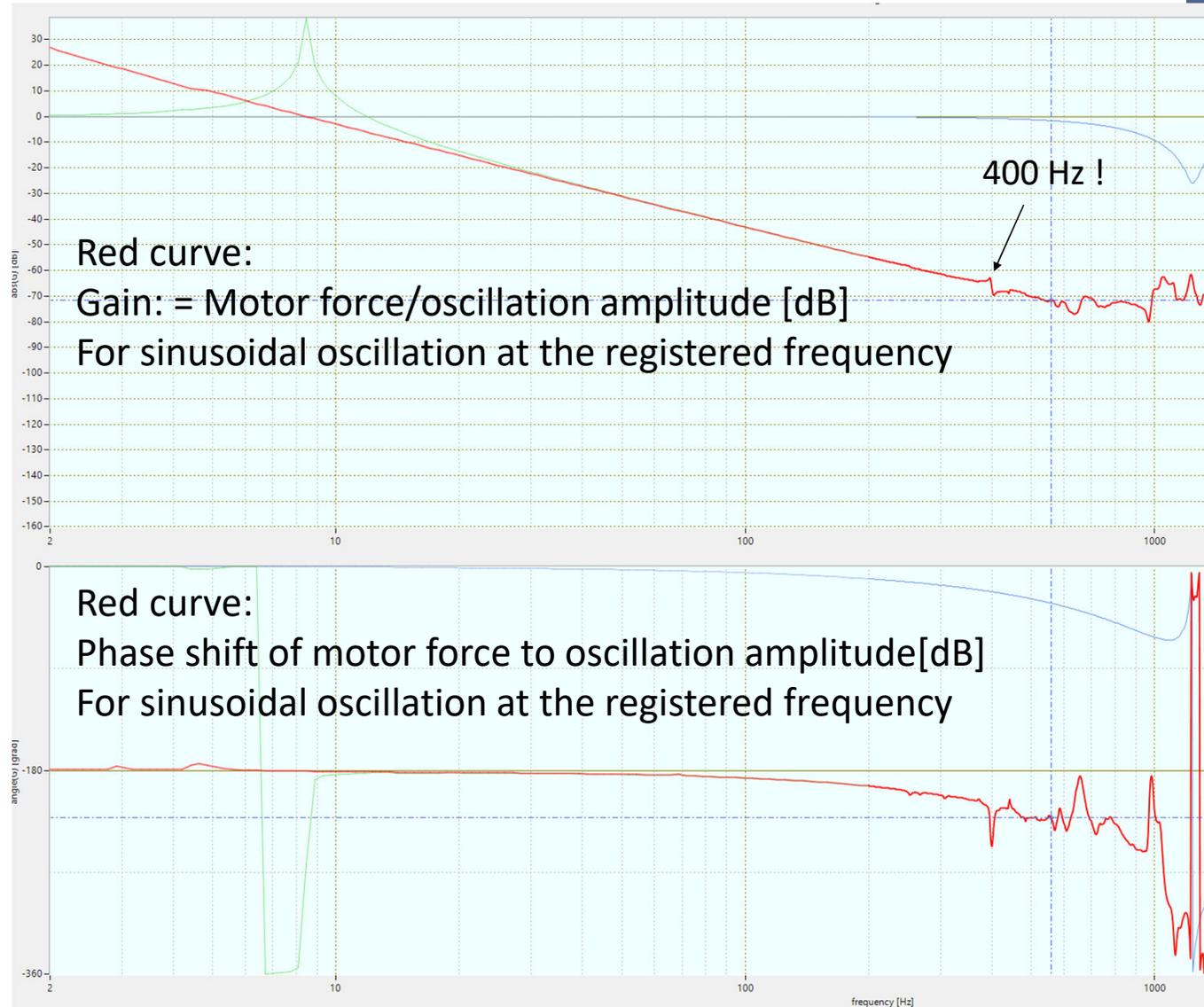
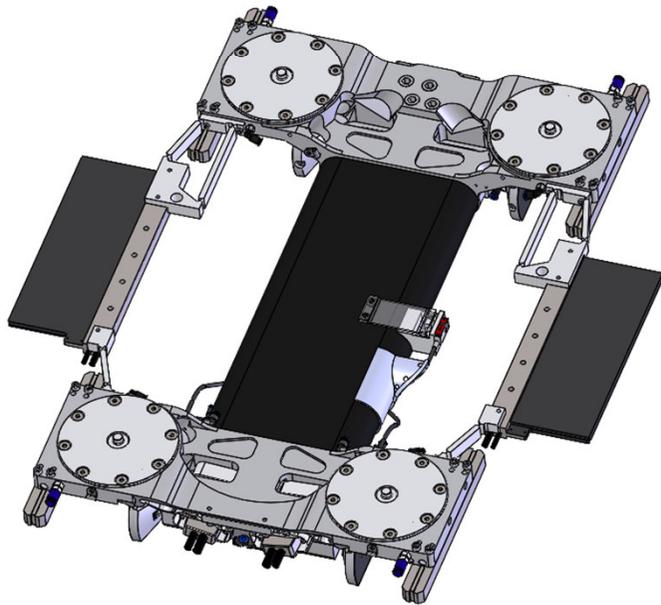
Hochdynamisches, hochgenaues XY-System mit Impulskopplung und Tilteinheit EZ-0730



KINEMATIK MIT LUFT

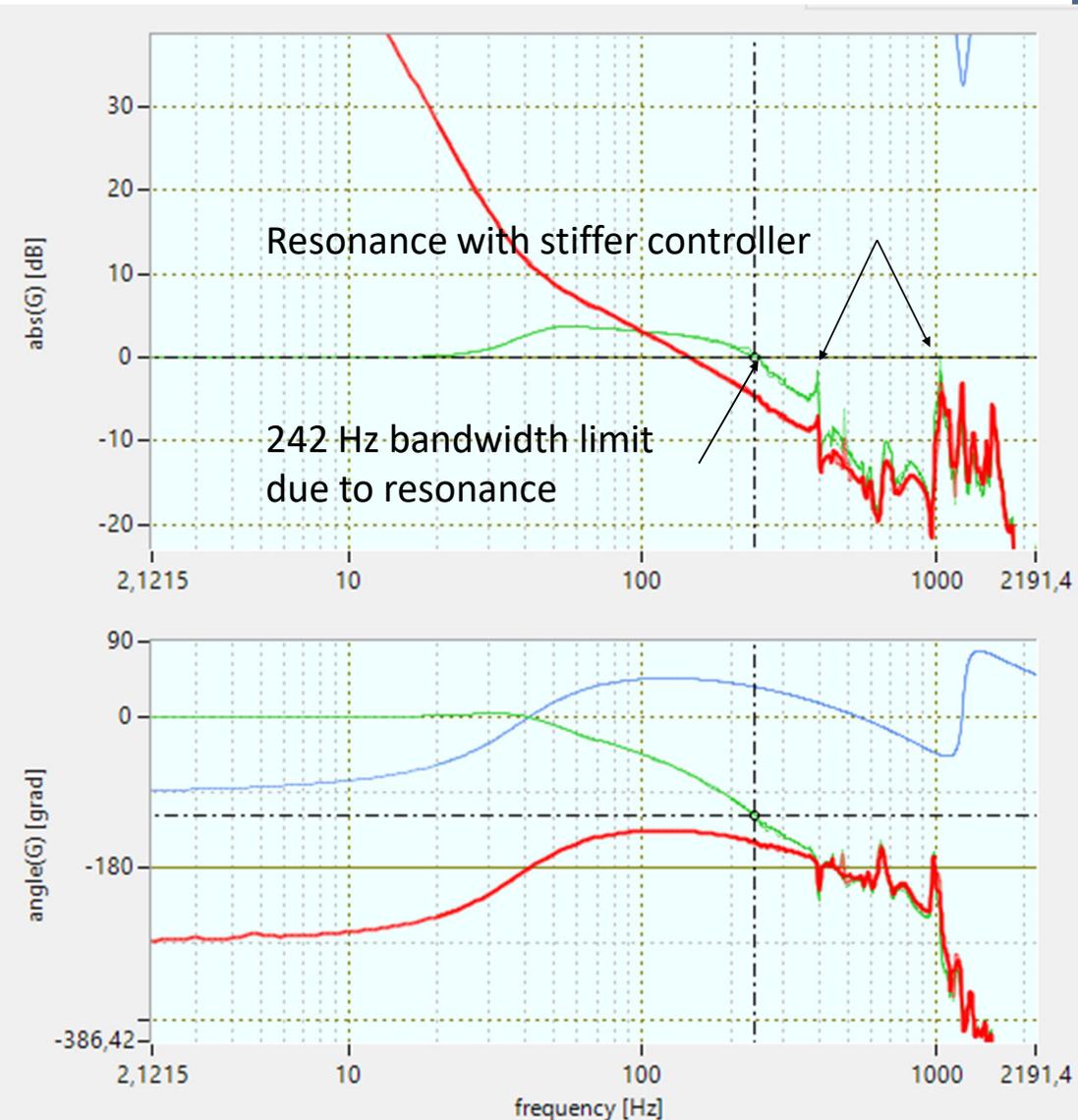
# X-Axis Open Loop Bode Diagram

Modellname: 0034861  
Studienname: Frequenz 1(-Standard-)  
Darstellungsart: Frequenz Amplitude2  
Schwingungsform: 2 Wert= 365,57 Hz  
Verformungsfaktor: 0,0235166



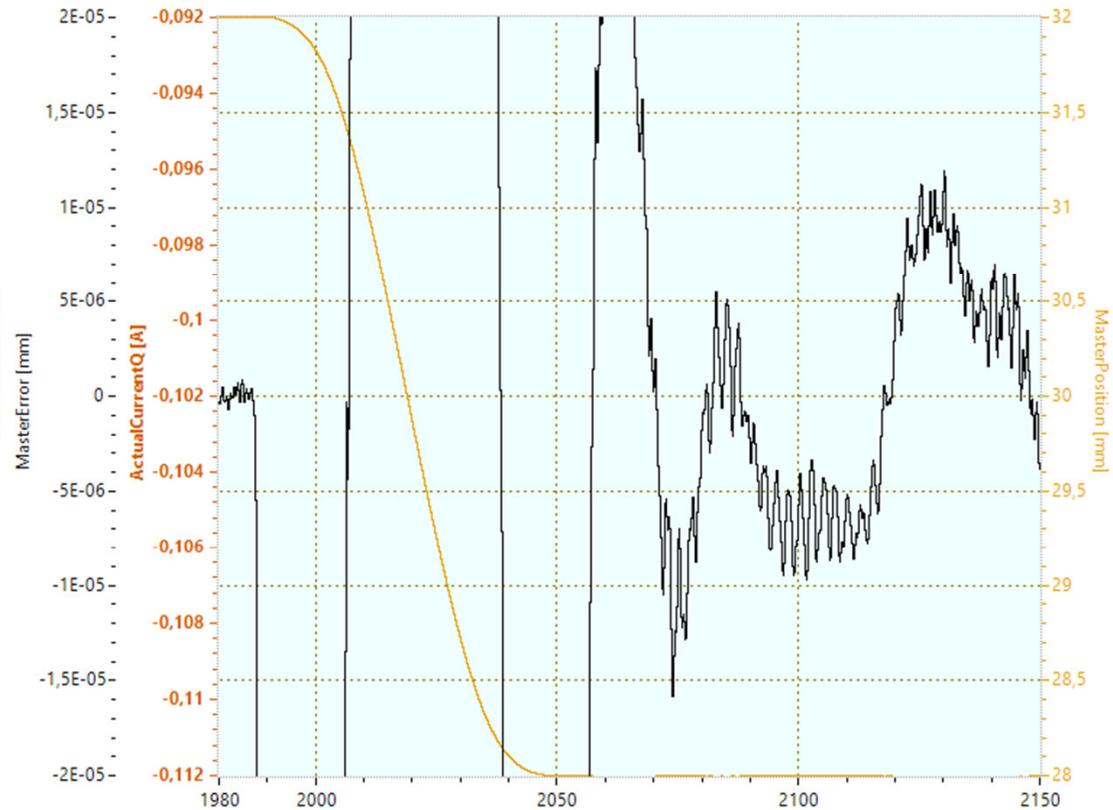
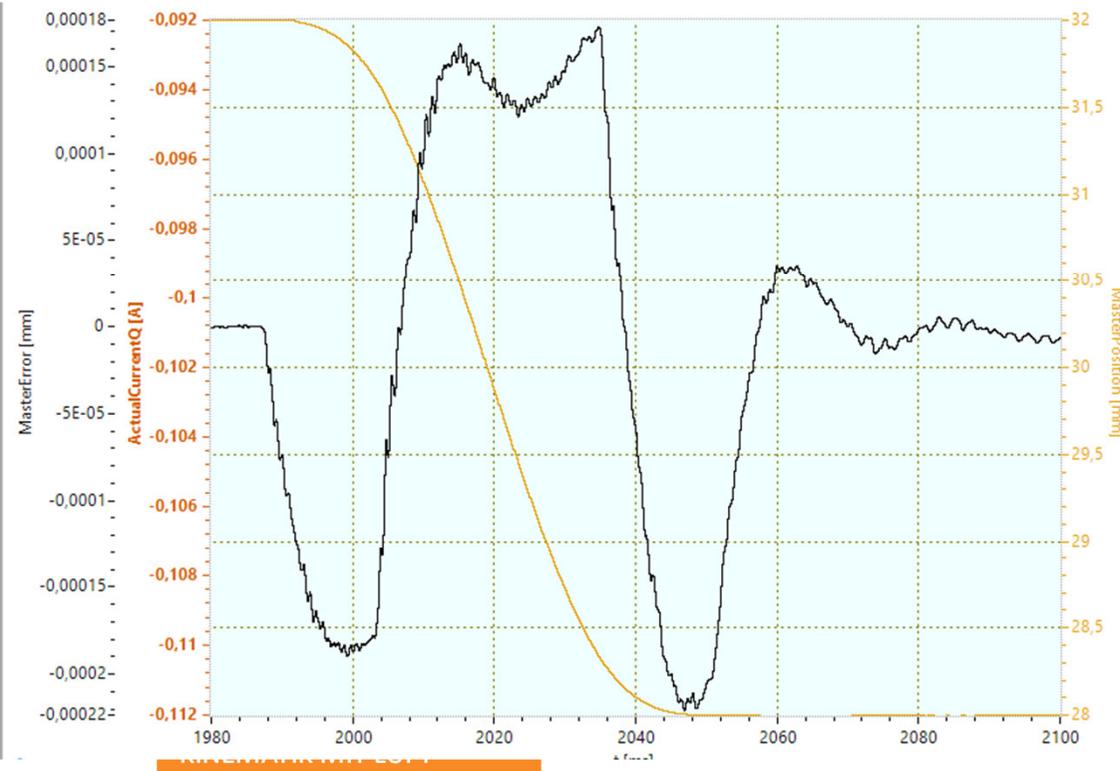
# X-Axis Bode Diagram

- Controller is now applied to the open control loop
- Green curve: Gain of the closed control loop
- 0dB = 1 → based on  $F = ma$ , you get exactly the expected behavior

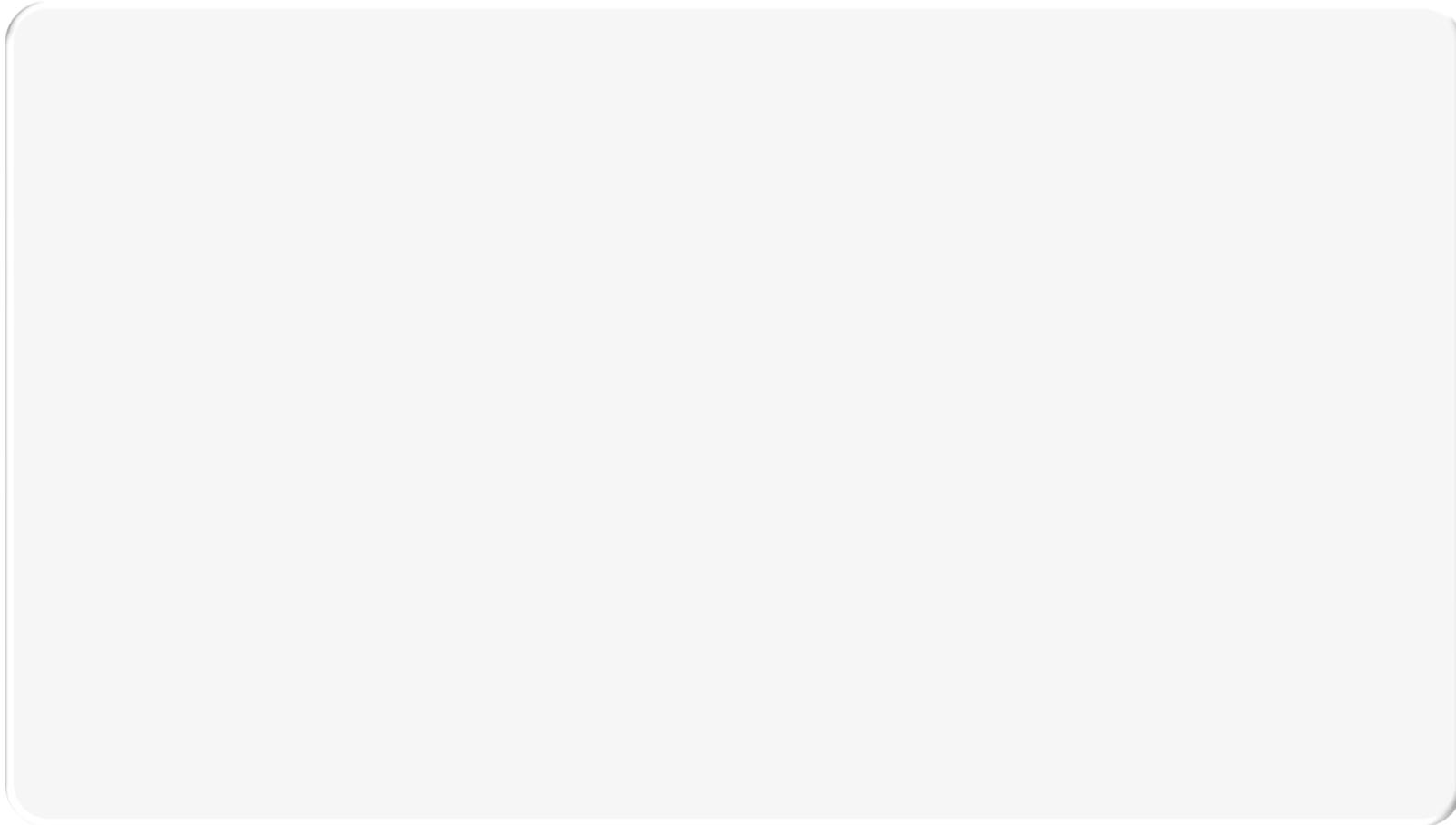


# Move and Settle Time 4 mm Step

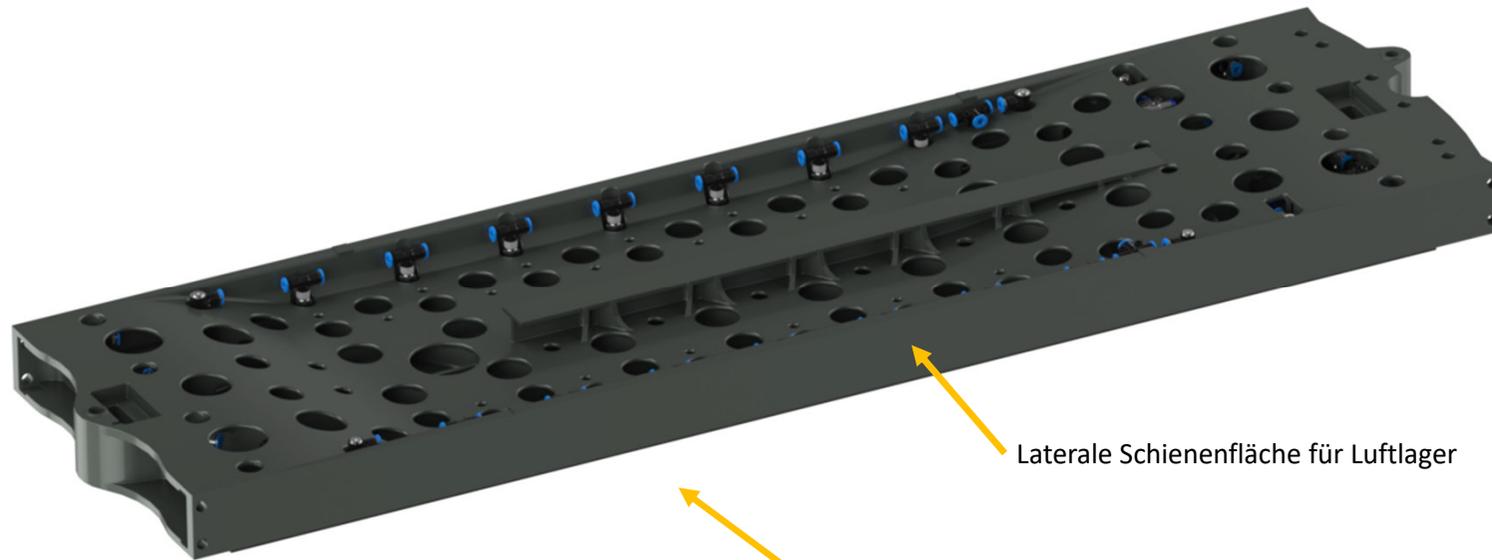
- X-axis, 1 g, 4 mm step, move-time not optimized (!!!)
- 2 error scales
- Full dynamics with 200 nm error
- Settle time < 50 nm position error in 10 ms
- Settle time < 10 nm position error in 30 ms
- More time elapses before a real standstill is reached because the cable drag swings. There is potential for optimization.



## Linearsystem XY Stage EZ-0730 mit Impulskoppelung



## Führungsschiene aus SIC



Laterale Schienenfläche für Luftlager

Luftlager Bodenplatte  
mit Vakuumvorpannung

**Vielen Dank für Ihre geschätzte Aufmerksamkeit**

EITZENBERGER  
KINEMATIK MIT LUFT

