



Mechatronik

Architektur und Komponentenwahl in Halbleiterinspektionssystemen

„Wie baue ich eine Maschine mit pm-Stabilität?“

Vortragender: Elger Matthes

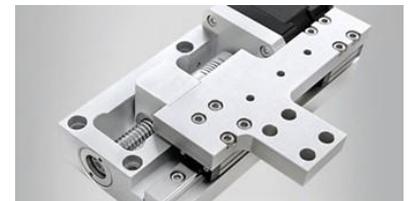
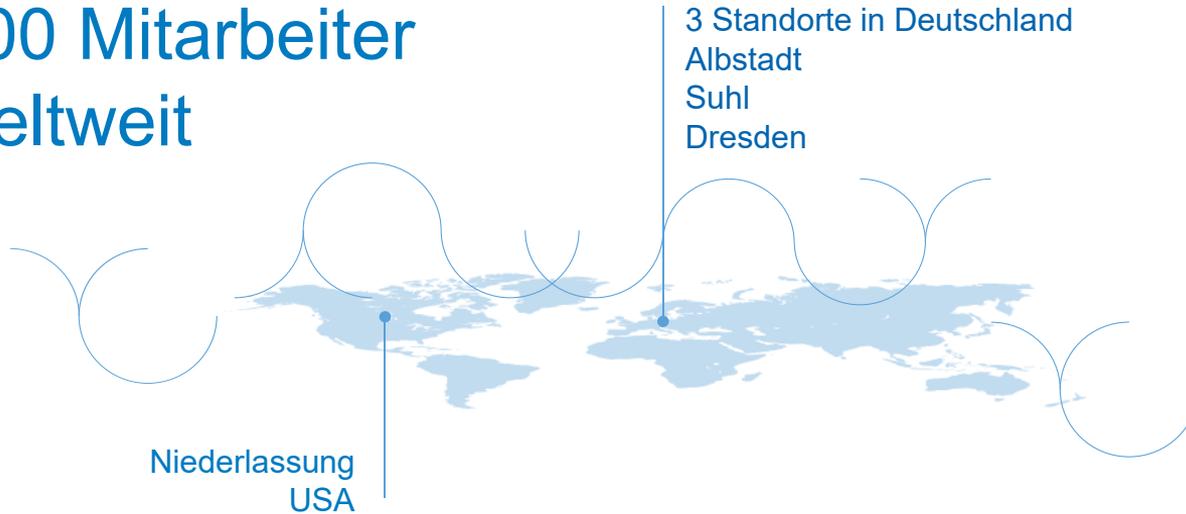
Lösungsidee und Konstruktion: Tobias Materne

September 2025



Steinmeyer Group

600 Mitarbeiter weltweit

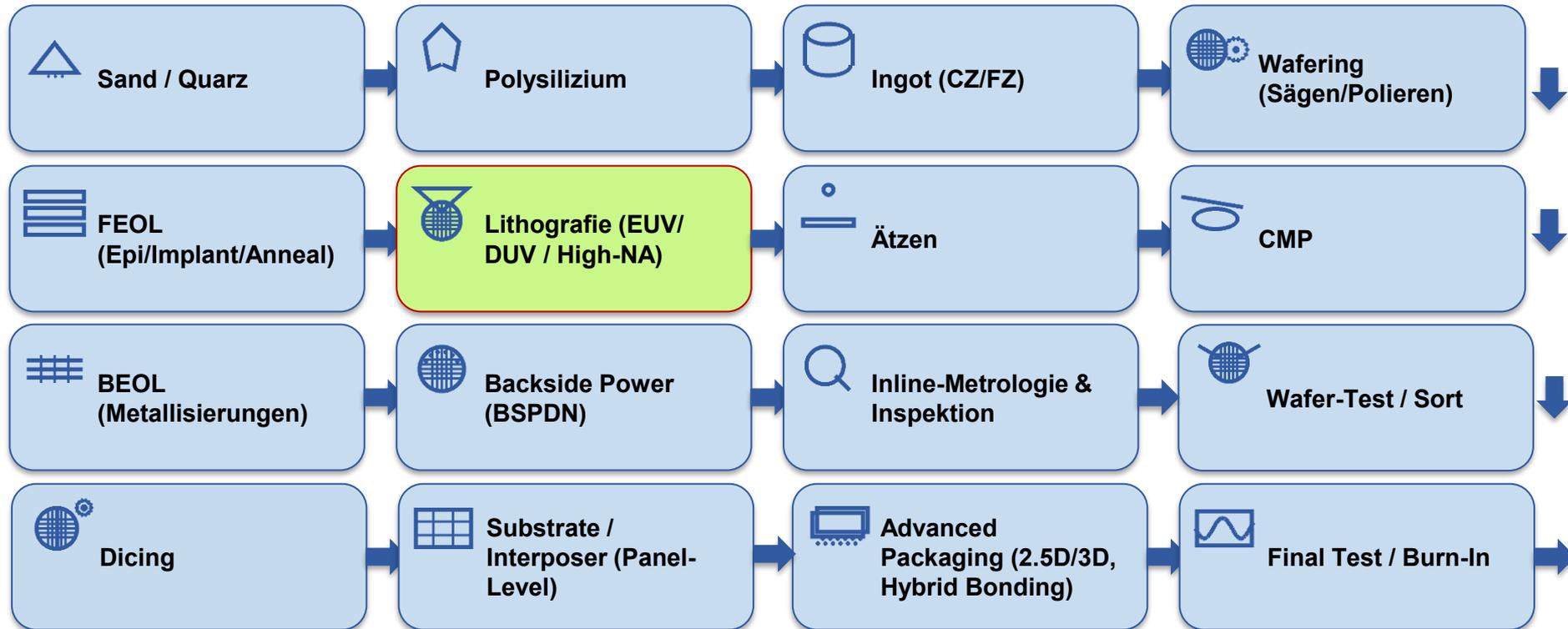


Steinmeyer Mechatronik

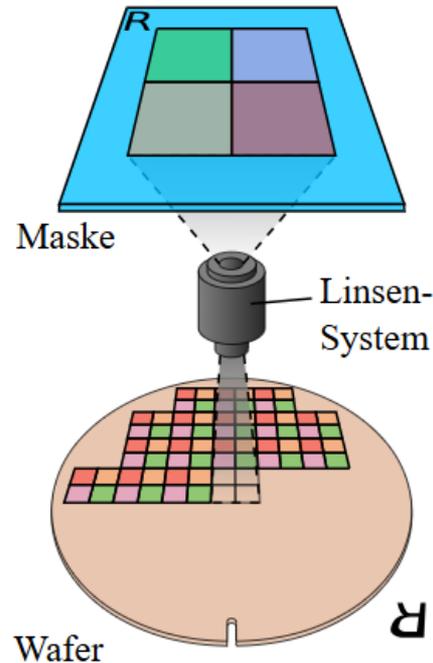
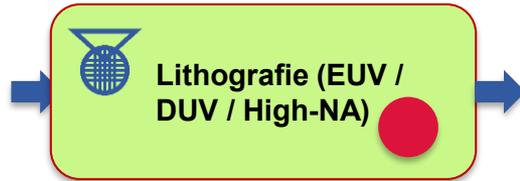
- Kompetenzzentrum für Positionierlösungen (μm für Alle!)
- 100 Mitarbeiter am Standort Dresden
- 150 Jahre Erfahrung in Entwicklung und Fertigung
- $1\mu\text{m}$, 1kN, 1m, n(xyz-RxRyRz), mBar, mT
- Vielzählige Applikationen für unterschiedlichste Branchen
- Von der Idee zur Serie: Alles unter einem Dach: Entwicklung, Fertigung, Montage, Test



Anwendungen von Positioniersystemen in Halbleiterprozessen



Anwendungen von Positioniersystemen in Halbleiterprozessen



Messprinzipien / Sensoren für optische Komponenten

Wir wollen eine Universalmaschine dafür entwickeln.

Genauigkeitsbereich	Verfahren / Sensortyp	Physikalisches Messprinzip	Typische Anwendung
pm – <1 nm	Fizeau-Interferometer (Phase-Shifting) – z. B. Corning Tropel UltraFlat, Zygo Verifire	Kohärente flächige Beleuchtung; Interferenz zwischen Referenzfläche und Prüfling liefert komplette Höhenkarte	Planheit/Form EUV-/DUV-Spiegel, Masken, große Linsen
pm – nm	Multi-Beam Laser- / Fabry-Pérot-Interferometrie	Resonanz- bzw. Phasenverschiebung einer ganzen Wellenfront	Ultrapräzise Form- und Abstandsmessung großformatiger Linsen
<0.1 nm vertikal / nm lateral	Atomic Force Microscopy (AFM)	Rastertaster tastet Oberfläche ab; Kraft-/Weg-Signal → atomar aufgelöste Höhenkarte	Sub-nm-Rauheitsanalyse von Spiegel- und Maskenoberflächen
nm	Weißlicht-Interferometrie / Coherence Scanning (CSI)	Interferenz breitbandigen Lichts, Phasen- oder Kohärenzauswertung	Masken- und Wafer-Topografie, Linsenrohlinge, Beschichtungsdicke
nm	Digital Holographische Interferometrie	Numerische Rekonstruktion der kompletten Wellenfront aus einem Hologramm	Echtzeit-Deformations- und Aberrationsmessung
nm	Wellenfront-Sensoren (Shack-Hartmann, Pyramid)	Analyse lokaler Strahlneigungen über Linsenarray → Wellenfrontkarte	In-situ Prüfung der Abbildungsqualität kompletter Objektive
nm – 0.1 µm	Fokus-Variation (Focus Variation Microscopy) – z. B. Alicona, Bruker	Mikroskop mit variierender Z-Position: maximale Bildschärfe je Pixel → Höhenfeld	3D-Topografie von Linsenrändern, Kanten, strukturierten Masken
nm – 0.1 µm	Konfokale Mikroskopie / Weißlicht-Konfokal (Scanning oder Array)	Z-Fokusslage jedes Pixels über chromatische Dispersion oder konfokale Lochblende	3D-Topografie kleiner Linsenfelder, Masken, Resiststrukturen
0.1 – 1 µm	Structured Light / Fringe Projection (Moiré, Phase-Shift)	Projektion sinusförmiger Gitter, Phasenanalyse über Kamerabild	Grobformmessung größerer Optiken oder Halterungen
0.1 – 5 µm	3D-Laser-Scanning Mikroskopie (z. B. Keyence VK-Serie)	Konfokale Laserabtastung + Autofokus/Reflexanalyse	Schnelle Topografie auf mittleren Flächenbereichen


Nanosurf - Atomic Force Microscopes - Home

confocalDT_IFD2410/2415_1Micro-Epsilon

FocusX: The fastest & most versatile measuring device - Alicona

High-precision Point Sensors | PRECITEC

Präzise Messung selbst kleinster Merkmale bis in den Nanometerbereich Laserscanning-Mikroskop mit Triple Principle Integrated 130 Laserscanning-Mikroskop Modellreihe VK-X3000 | KEYENCE Deutschland

System für Atomic Force Messung an großen optischen Komponenten

Anforderungen - Wege

- Last bis 120kg von oben auflegbar
 - 360° Drehung Rz
 - 300mm in X (horizontal)
 - 600 .. 1000mm in Y (horizontal)
- Sensor darüber 2 kg
 - schwenken +60° Ry
 - Sensorabstand einstellen Z' 100mm

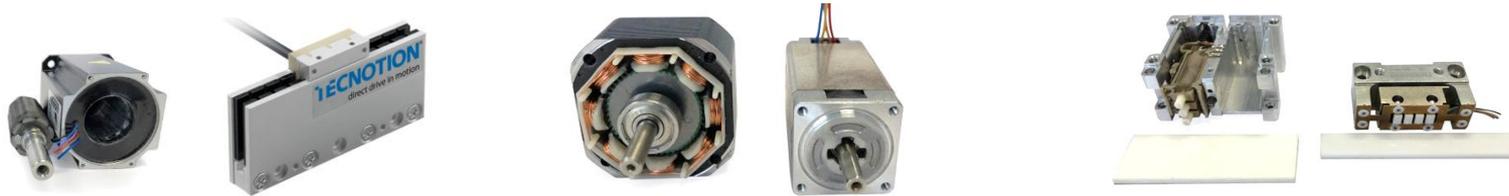
Anforderungen - Präzision

- Erste Eigenfrequenz > 200Hz
 - 0,05° Drehung Rz
 - 5µm in X (horizontal)
 - 5µm in Y (horizontal)
- Sensor darüber
 - 0,05° Ry
 - 2µm Z'

Stillstand: pm über Minuten

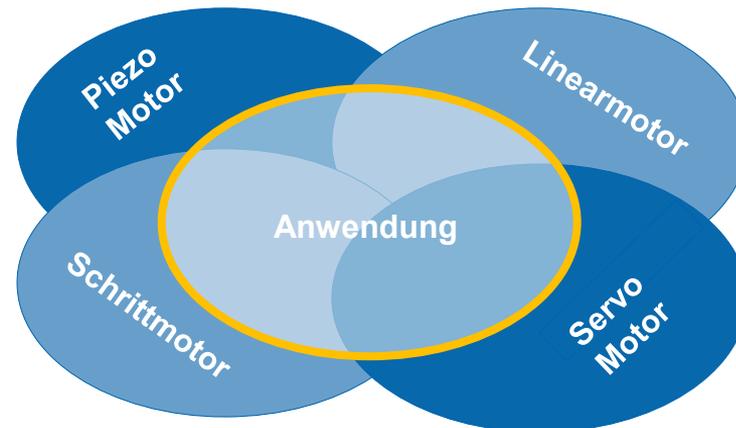


Wahl der Komponenten: Antrieb



Bei gegebener Last interessiert uns:

- Kleinstes Stellinkrement / „Genauigkeit“
- Dynamik: Beschleunigung, Geschwindigkeit
- Linearität: Resonanzen, Regelbarkeit
- Umwelt: Temperatur, Vakuum, Magnetismus, ...
- Integration: Einbautoleranzen, Wartung
- Industriereife: Zuverlässigkeit, Lebensdauer, Support

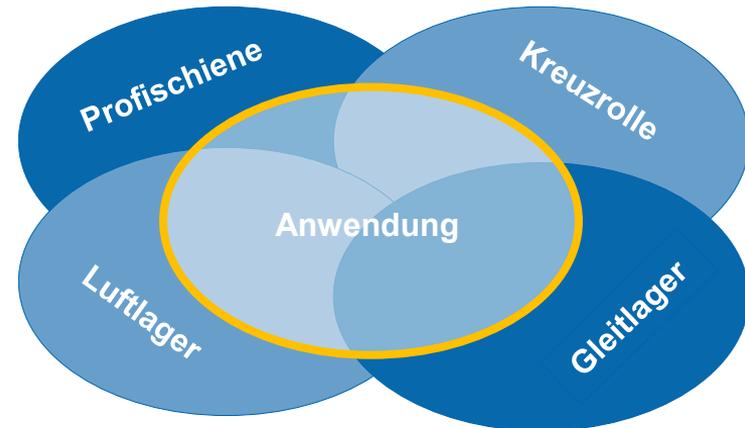


Wahl der Komponenten: Führung

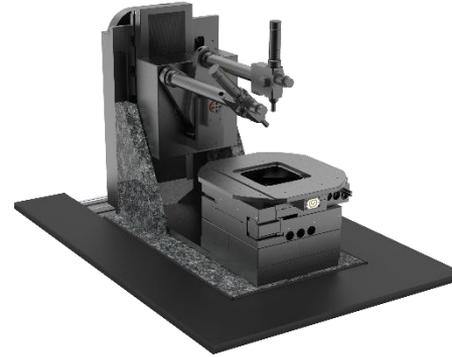


Bei gegebener Last interessiert uns:

- Kleinstes Stellinkrement / „Genauigkeit“
- Dynamik: Beschleunigung, Geschwindigkeit
- Linearität: Resonanzen, Regelbarkeit
- Umwelt: Temperatur, Vakuum, Magnetismus, ...
- Integration: Einbautoleranzen, Wartung
- Industriereife: Zuverlässigkeit, Lebensdauer, Support



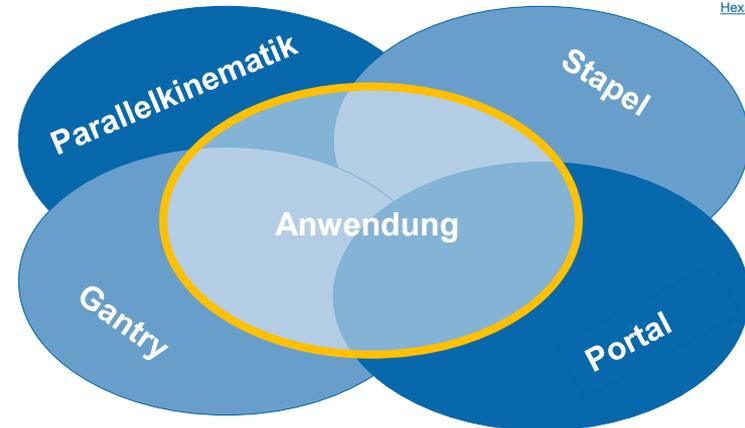
„Wahl“ der Architektur



[6 DOF Reality Motion Simulator Racing Platform cropped - Hexapod - Wikipedia](#)

Bei gegebener Last interessiert uns:

- Kleinstes Stellinkrement / „Genauigkeit“
- Dynamik: Beschleunigung, Geschwindigkeit
- Linearität: Resonanzen, Regelbarkeit
- Umwelt: Temperatur, Vakuum, Magnetismus, ...
- Integration: Einbautoleranzen, Wartung
- Industriereife: Zuverlässigkeit, Lebensdauer, Support



Steifigkeit → Eigenfrequenz

$$\omega_{res}^2 = \frac{c_{ges}}{m} \quad \omega_{res} = f_{res} * 2\pi$$

$$f_{res} = \sqrt{\frac{c_{ges}}{m}} / 2\pi$$

- m = Last + bewegte Teile des Systems
- c aus Führung und Struktur

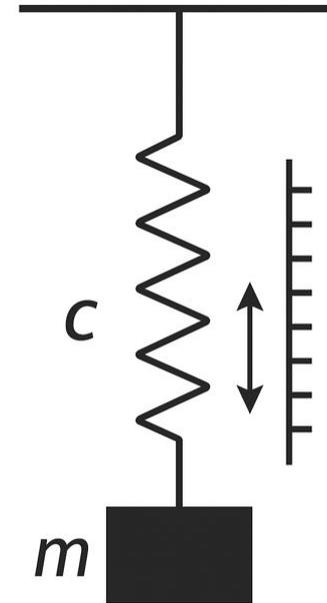
→ Steifigkeit so hoch wie möglich!

→ Massen so gering wie möglich (Last steht fest)

Problem: Steife Teile meist auch größer und schwerer

Steifigkeit hoch → Masse auch hoch

So ist erste Eigenfrequenz kaum erreichbar.

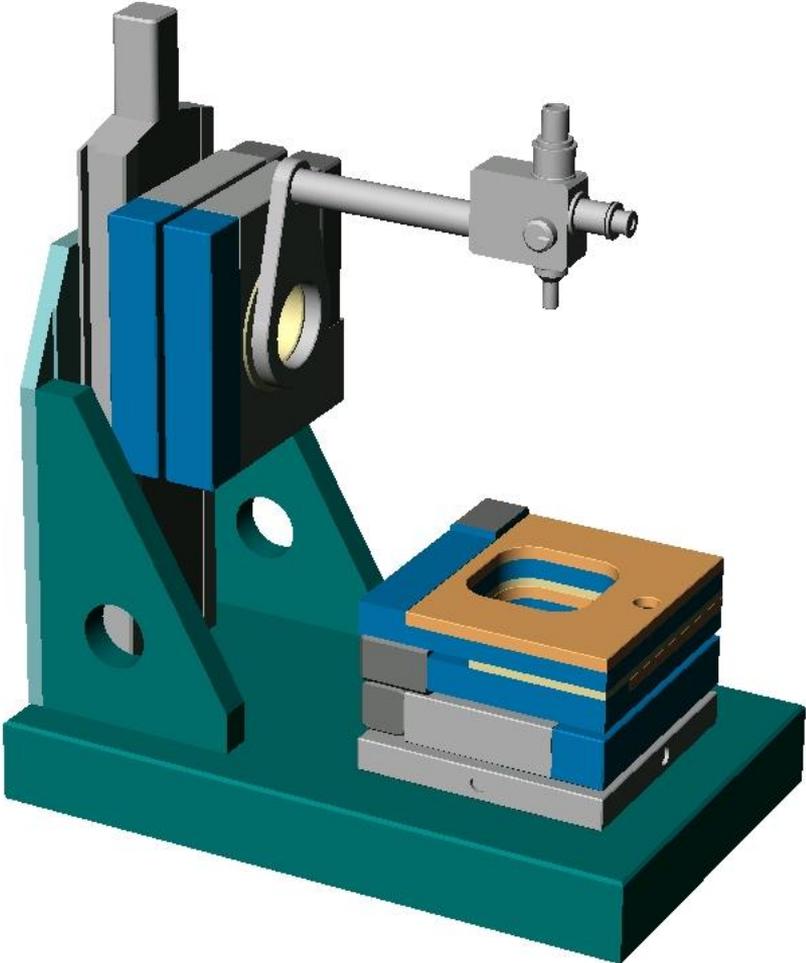
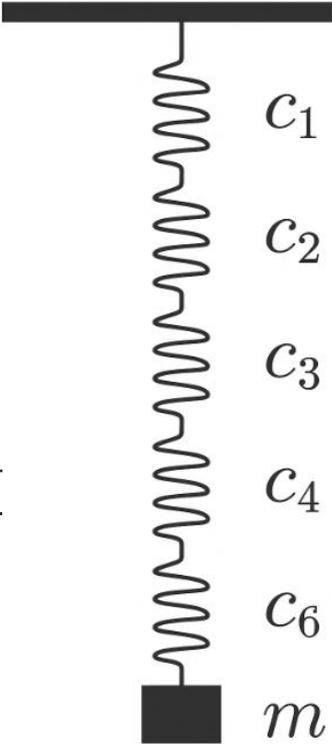


Steifigkeit → Eigenfrequenz



Reine Reihenschaltung von Steifigkeiten

$$c_{ges} = \frac{1}{\frac{1}{c_{Z'}} + \frac{1}{c_{Ry}} + \frac{1}{c_G} + \frac{1}{c_X} + \frac{1}{c_Y} + \frac{1}{c_{Rz}}}$$

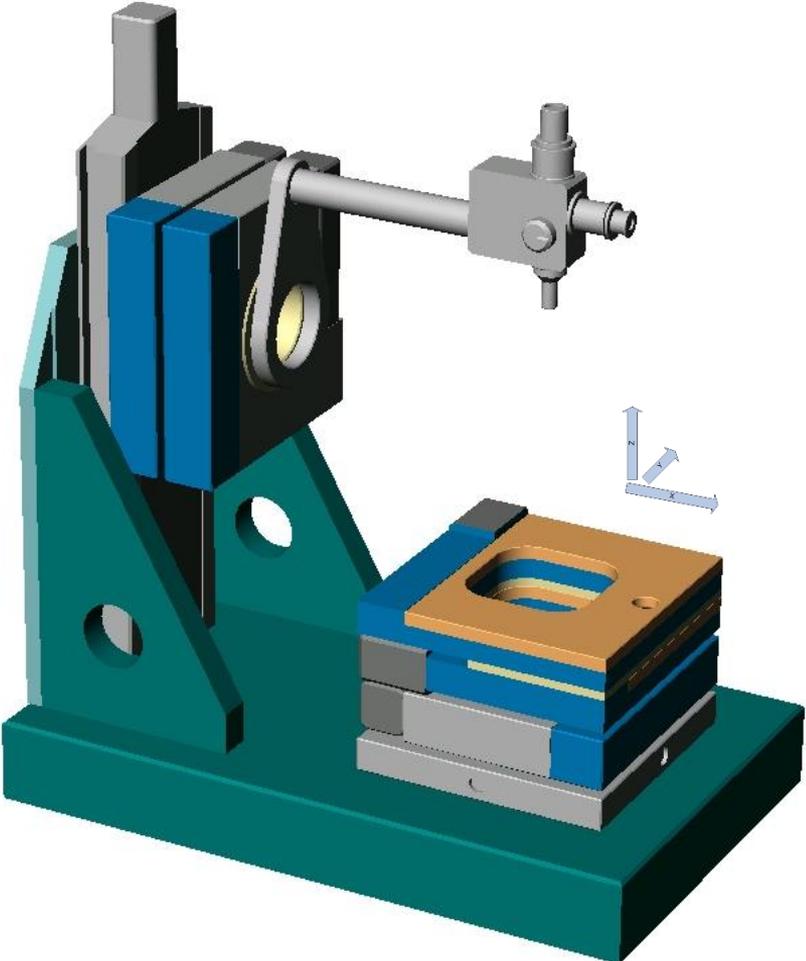
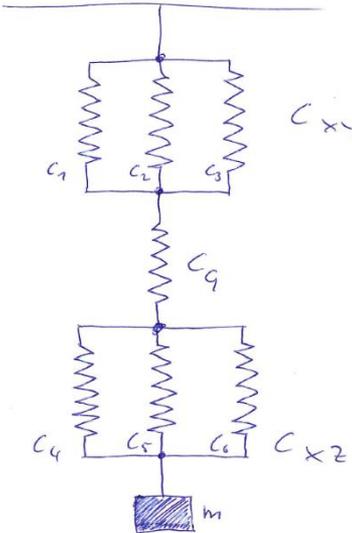


Steifigkeit → Eigenfrequenz

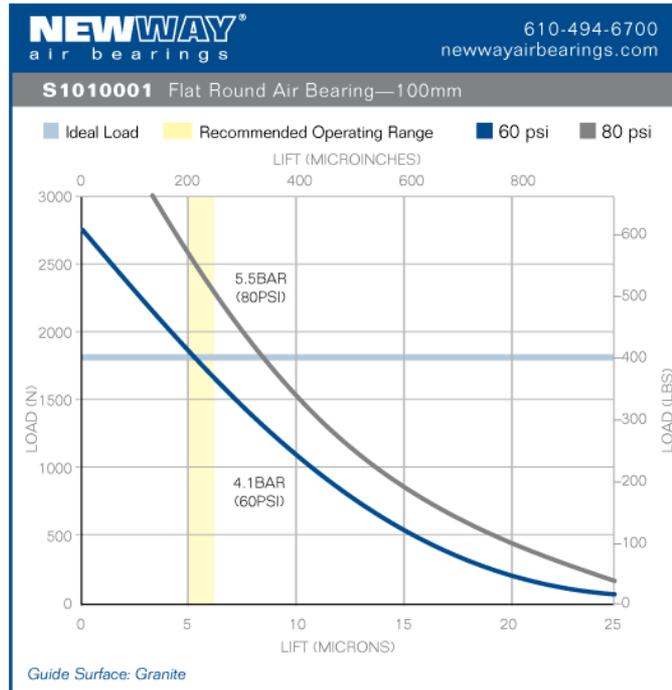
Teilweises Parallelschalten der Bewegungen in den Ebenen XZ und XY?

$$c_{ges} = \frac{1}{\frac{1}{c_{Z'} + c_{Ry}} + \frac{1}{c_G} + \frac{1}{c_X + c_Y + c_R}}$$

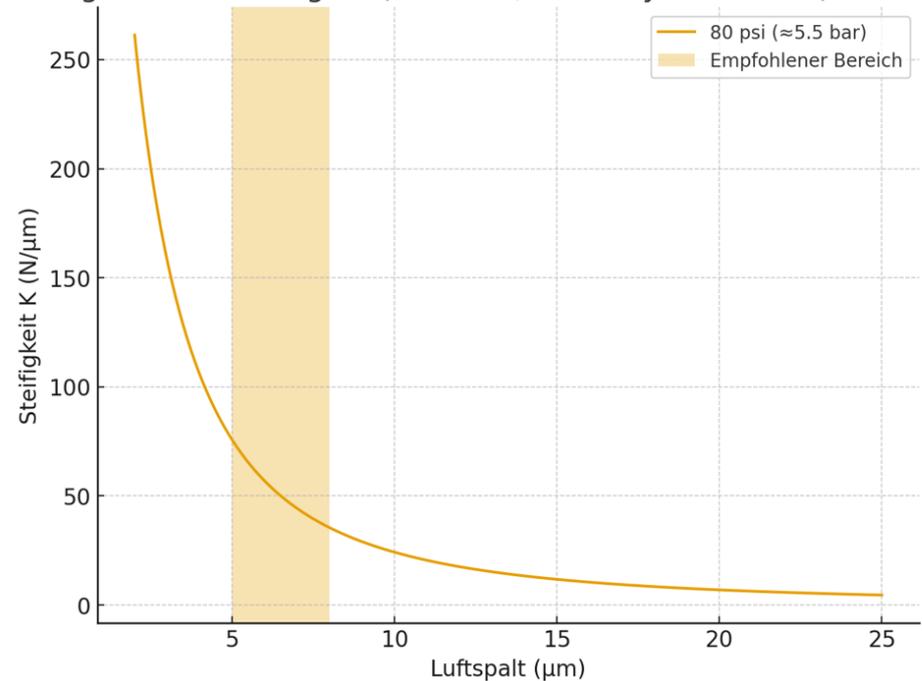
$$c_{ges} = \frac{1}{\frac{1}{c_{YZ}} + \frac{1}{c_G} + \frac{1}{c_{XY}}}$$



Steifigkeit der Lagerung: Luft oder Stahl – Was ist steifer?



Steifigkeit des Luftlagers (100 mm, NewWay S1010001)

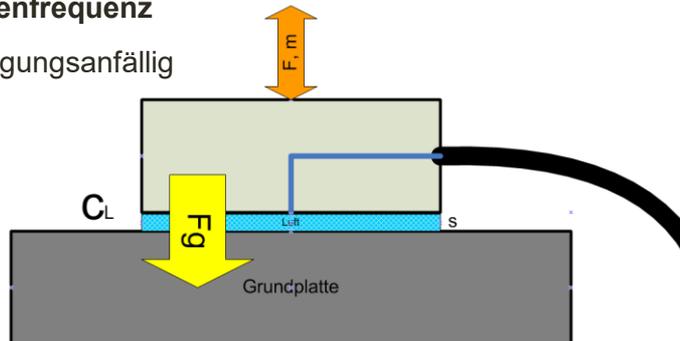


Steifigkeit der Lagerung: Steife Luft?

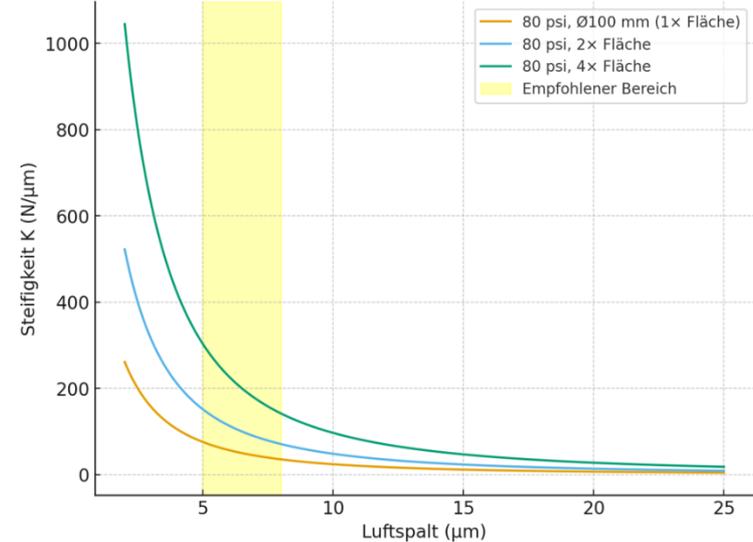
Masse-Vorspannung (ohne / mit Ballast)

- Gesamtmasse bestimmt Arbeitspunkt des Luftlagers, damit Steifigkeit
- Keine Vorspannung durch die Struktur

- Geringe lastabhängige Steifigkeit
- Schlechtes Verhältnis aus Steifigkeit und Masse
- **Viel zu geringe Eigenfrequenz**
- Ungedämpft, schwingungsanfällig



Steifigkeit Luftlager (80 psi) - Skalierung mit der Fläche



Steifigkeit der Lagerung: Steife Luft?

Vorspannung mit Magnetismus

- Last bestimmt Arbeitspunkt des Luftlagers, damit Steifigkeit
- Massefreie Kraftquelle! (Vorspannkraft viel größer als Lastkraft!)

→ Lastunabhängige Steifigkeit

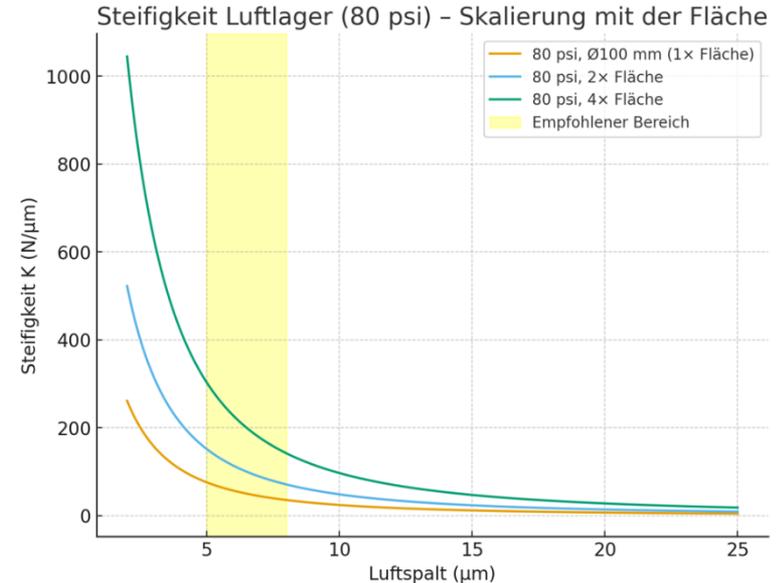
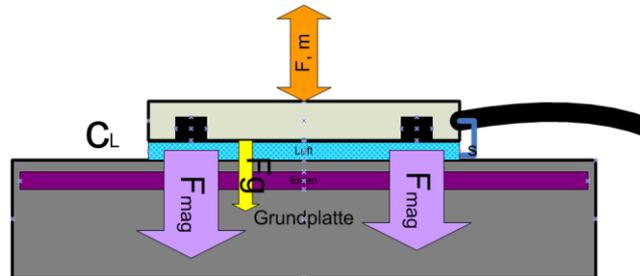
→ Gutes Verhältnis aus Steifigkeit und Masse

→ **hohe Eigenfrequenz**

→ Immer noch schwingungsanfällig

→ Problem:

Wie flächige,
sehr homogene
Magnete / Eisen??



Steifigkeit der Lagerung: Steife Luft?

Vorspannung mit 2. Luftlager (opponierende Anordnung)

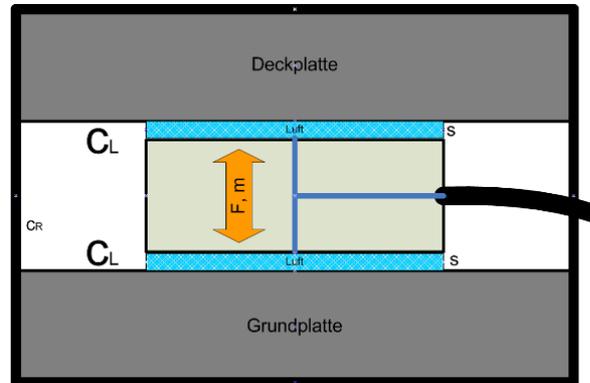
- Symmetrische Anordnung, LL in beide Richtungen
- Verspannen sich gegenseitig
- Lastunabhängige Steifigkeit
- Gutes Verhältnis aus Steifigkeit und Masse
- Geringe, schwingungsanfällige „Regelung“
- Hohe Eigenfrequenz

Problem:

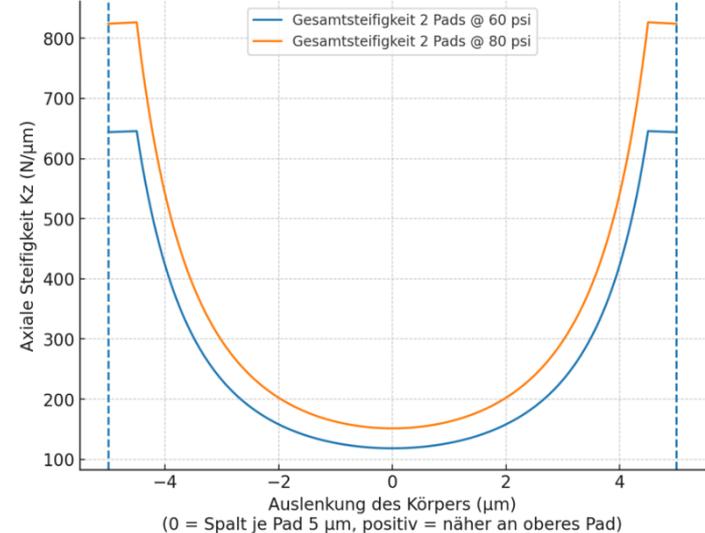
Nicht genug Platz!

Wie XYRz?

Massen gering halten!



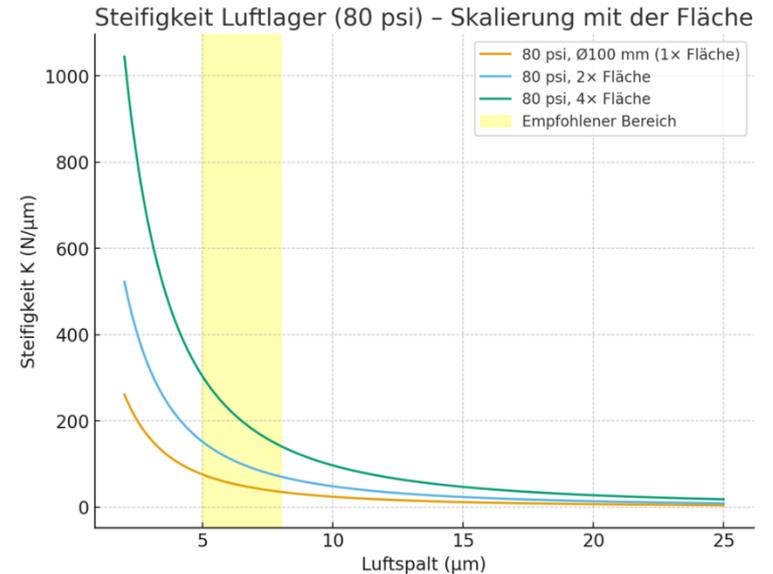
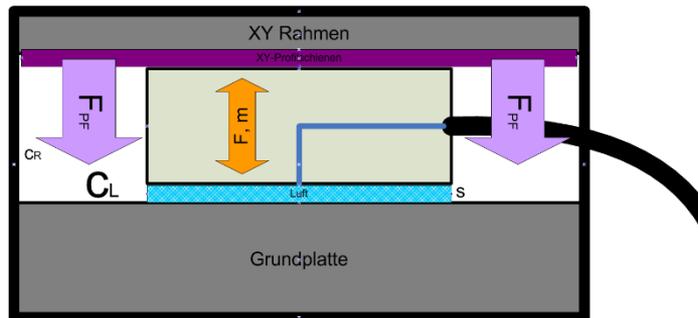
Steifigkeitsverlauf bei $\pm 5 \mu\text{m}$ Auslenkung
Oppositionslagerung mit zwei 100-mm Luftlagern (vereinfachtes Fit-Modell)



Steifigkeit der Lagerung: Steife Luft?

Vorspannung durch (krafterzeugende) mechanische Führung

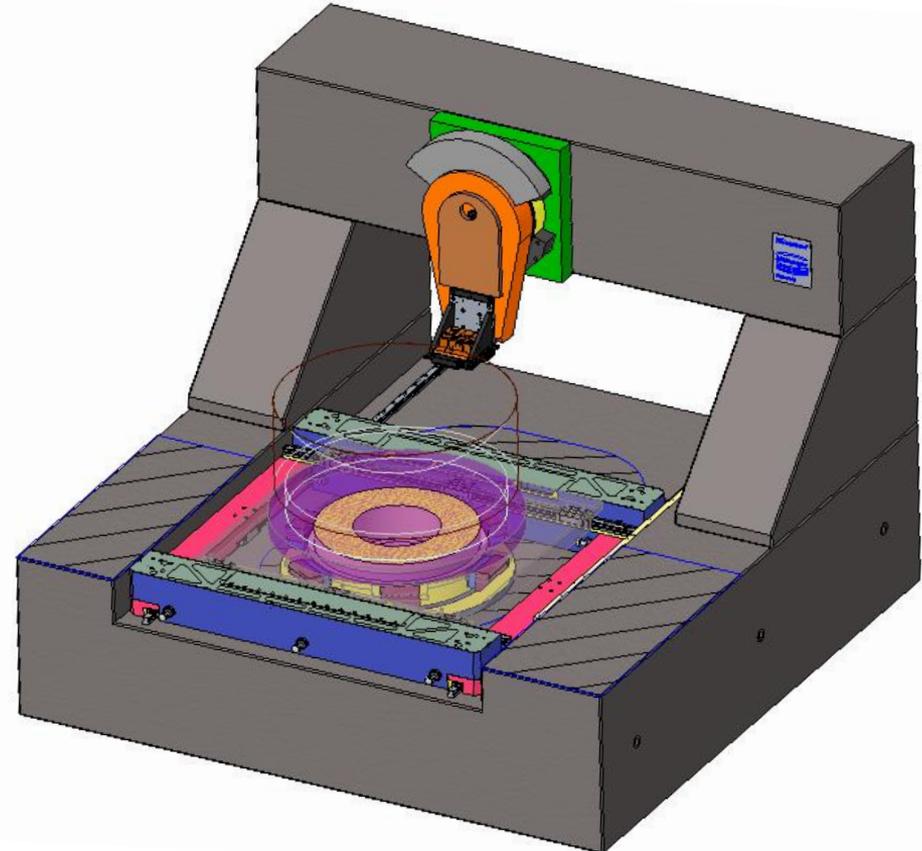
- LL auf Granitfläche
- Vorspannung durch XYZ-Kombination von Profilschienen
- Lastunabhängige Steifigkeit
- Gutes Verhältnis aus Steifigkeit und Masse
- **Kompakt durch mechanische Vorspannung**
- Genügend hohe Eigenfrequenz



Architektur - final

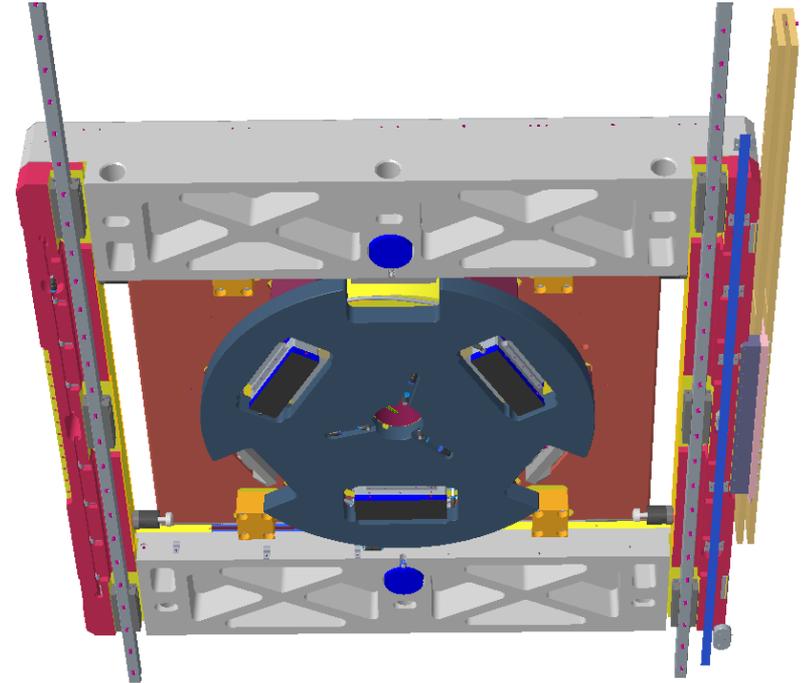
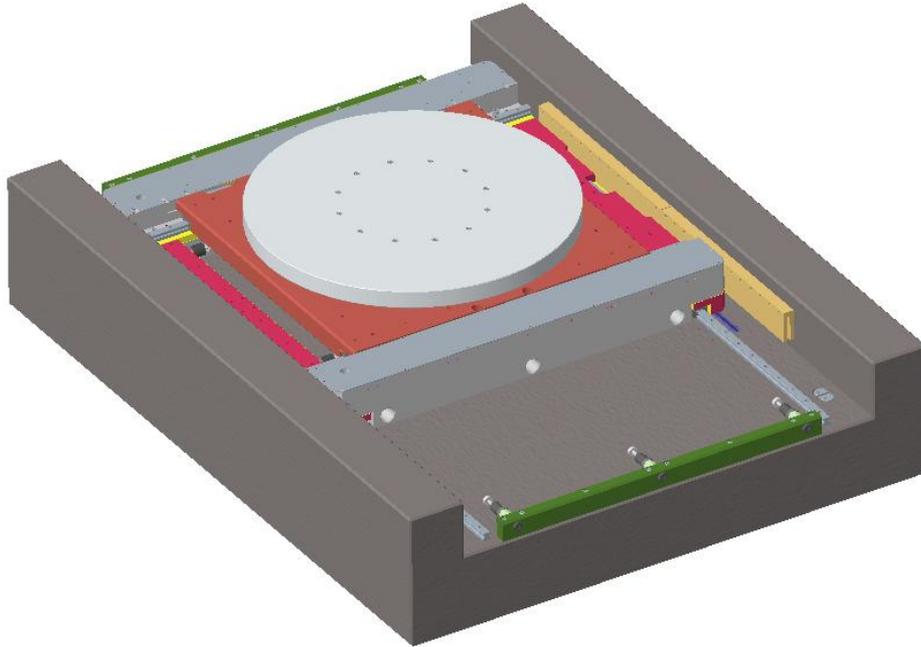
- Drehtisch und XY mit Luftlagern
 - direkt abgestützt auf Granitbasis
 - Drehtisch mit stehenden Luftlagern
 - > unendlich drehend!
 - YY mit fahrenden Luftlagern auf gleicher Granitbasis
 - Alles mit XY-Profileschienen und DT-Luftlagern vorgespannt
 - Antriebe eDLM

- Z mit Profilschiene, KGT, Getriebe und Schrittmotor



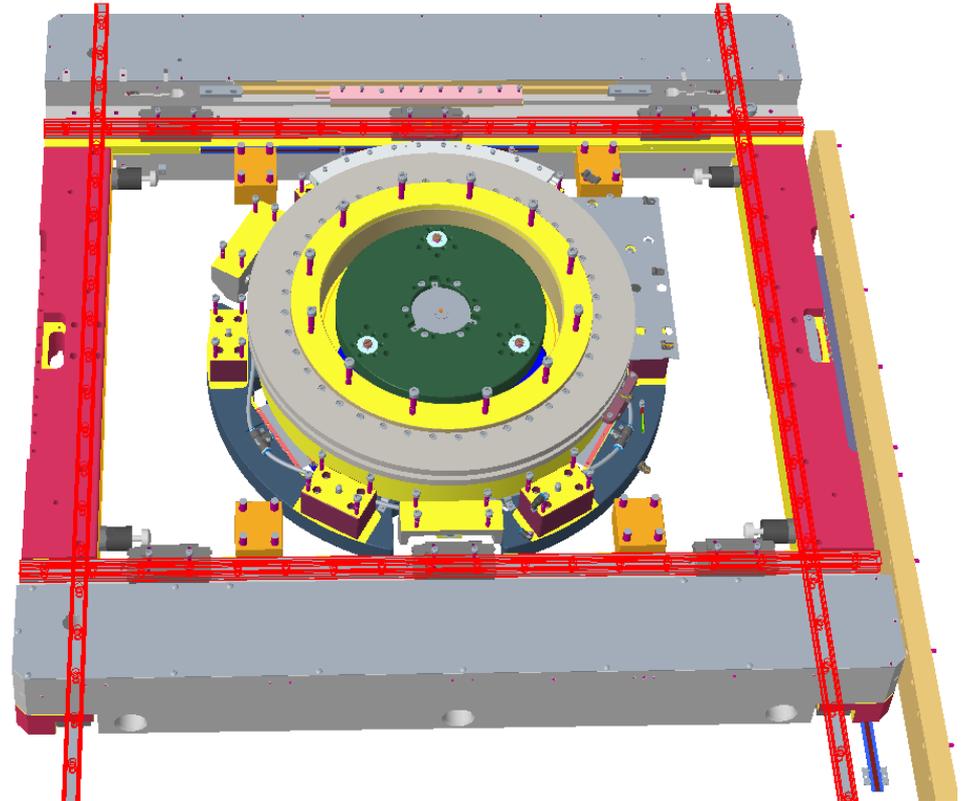
Die weiteren Betrachtungen konzentrieren sich aus Zeitgründen auf xyRz.

XY-Rz System: Luftlager mit Profilschienenvorspannung



XY-Rz System: Luftlager mit Profilschienenvorspannung

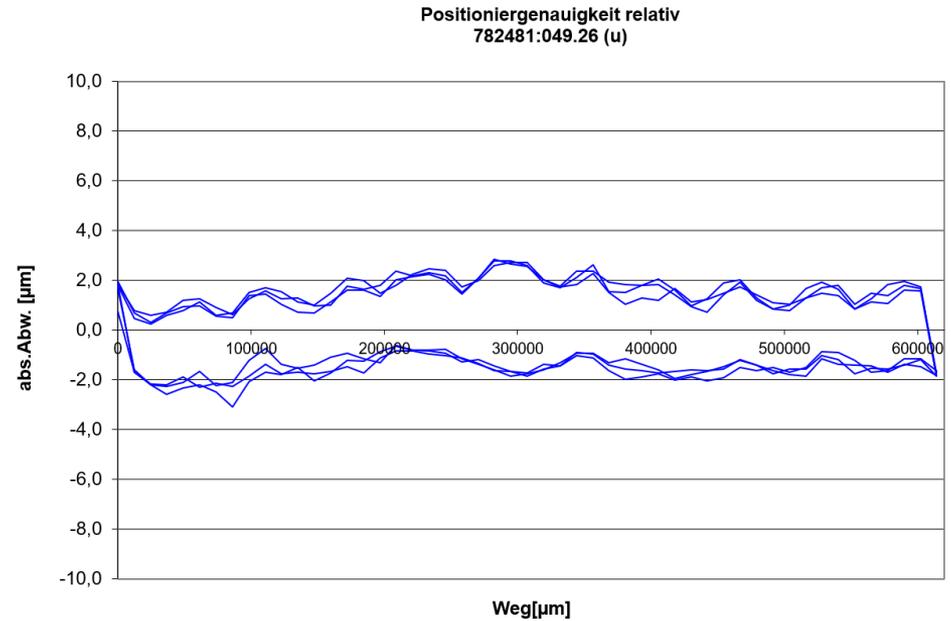
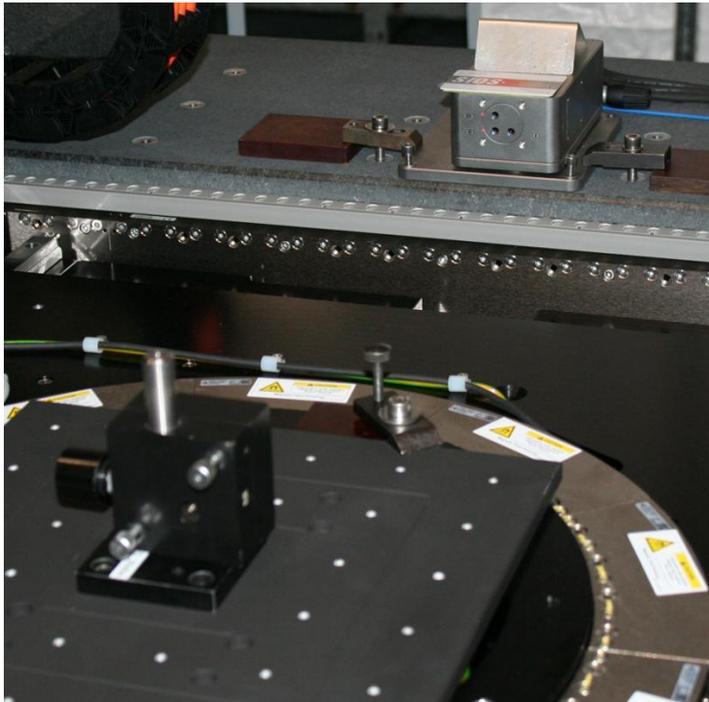
- XY – Rahmen als Vorspannung von oben (wie magnetische Vorspannung, nur Krafterzeuger)
- Funktionstrennung in der Führung xyzRxRy
 - Z, Rx, Ry in XY-Ebene: LL
 - XY: PF
 - Rz: Antrieb DT
- XY Linearmotoren seitlich



Messergebnisse

Genauigkeit / Wiederholgenauigkeit: X,Y

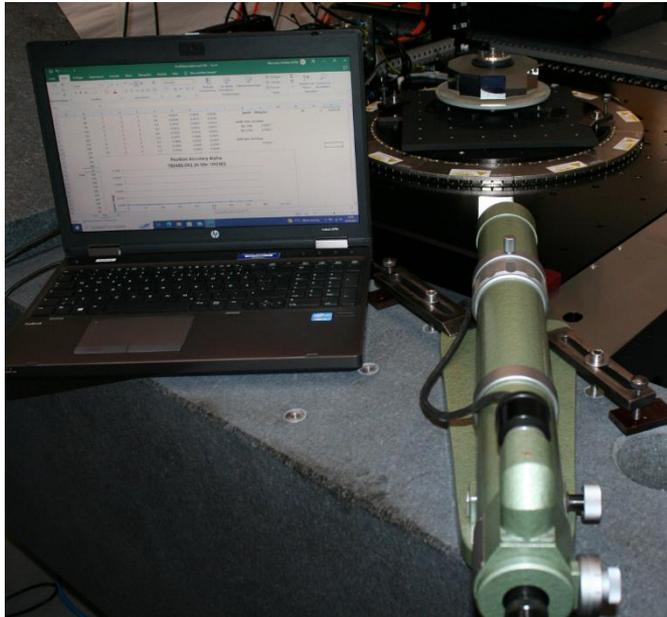
➤ Dreistrahl Laserinterferometer Sios



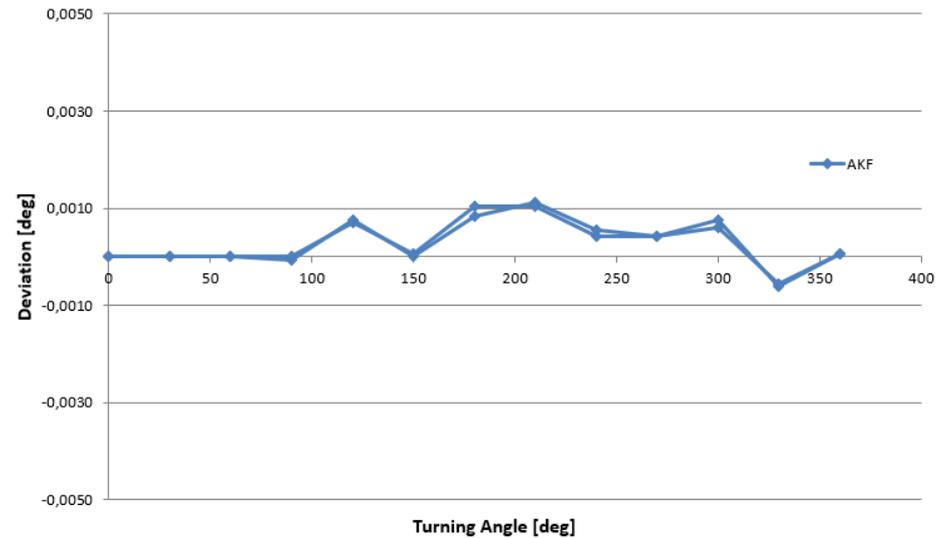
Messergebnisse

Genauigkeit / Wiederholgenauigkeit: Alpha (Rz), Omega (Ry)

➤ Autokollimationsfernrohr, Spiegelpolygon

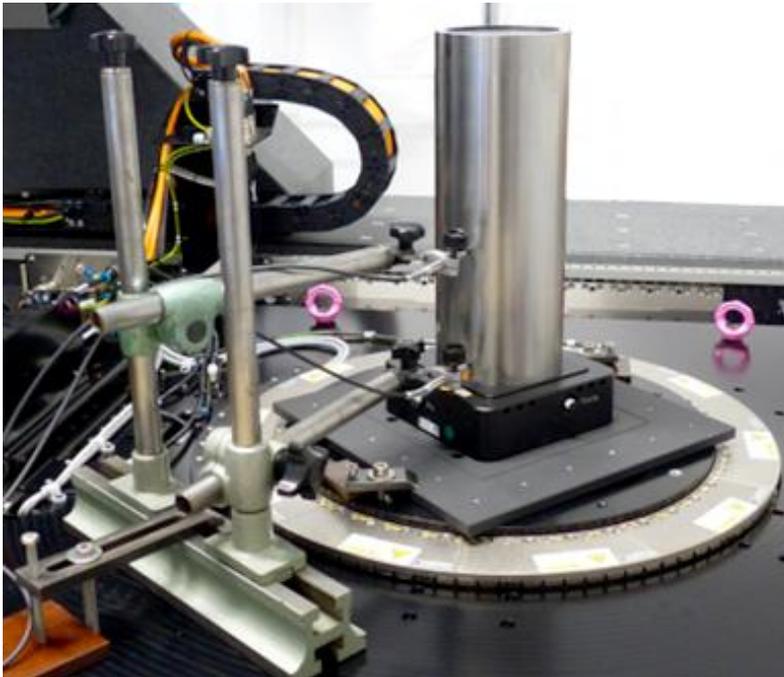


Position Accuracy Phi
782481:049.26 SNr: 032501

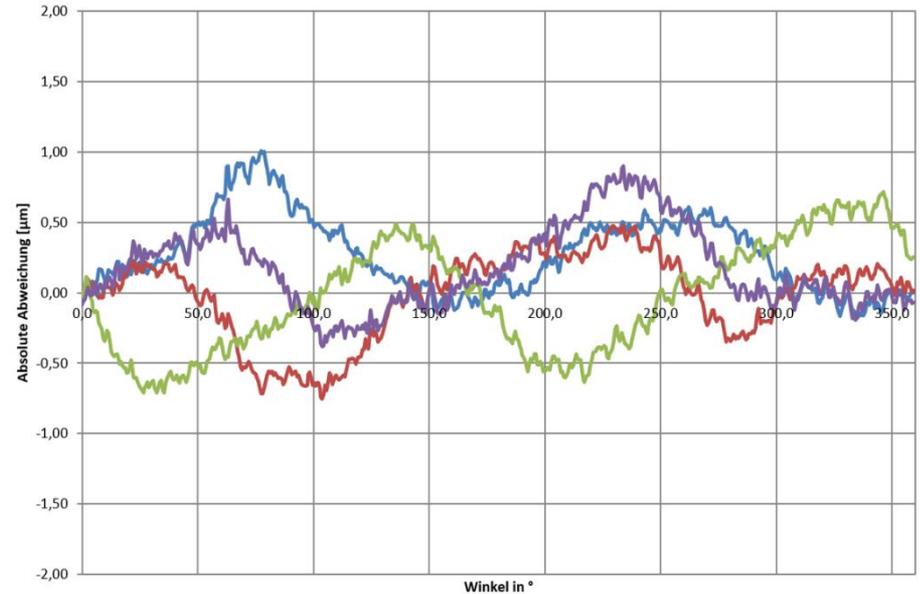


Messergebnisse Taumeln, Planlauf Alpha (Rz), Omega (Ry)

➤ 2 Taster und Zylindernormal



**Rundlauf Phi unten (Z=0mm), Taumel eingerichtet
782481:049.26 SNr.: 032501**



Messergebnisse (xyRz) und Fazit

- System mit 3-Achs oder 5-Achs Architektur
- Supersteife Profilschienen-vorgespannte XY-Rz-Luftlager
- Last bis 120kg
- Vermessung von Objekten D1000mm, ex300mm H100mm
- Erfolgreiche Überführung zur Produktreife

- ✓ Erste Eigenfrequenz **220Hz**
- ✓ Stillstand **70pm / 30s** bei STM (besser in Fab)
- ✓ Genauigkeit Drehung Rz **$\pm 0,001^\circ$**
- ✓ Genauigkeit XY (horizontal) **$\pm 3\mu\text{m} / 600\text{mm}$**

- Stabilität im subatomaren Bereich wurde erfolgreich realisiert Info: Atomradius Si = 111pm
- **5-Achs Basismaschine für AFM, Fizeau, Konfokal, Laserscanning, ...**





Mechatronik

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

Elger Matthes

Leiter Produktmanagement

elger.matthes@steinmeyer.com

Steinmeyer Mechatronik GmbH

Fritz-Schreiter-Str. 32 / 01259 Dresden

www.steinmeyer-mechatronik.de

