



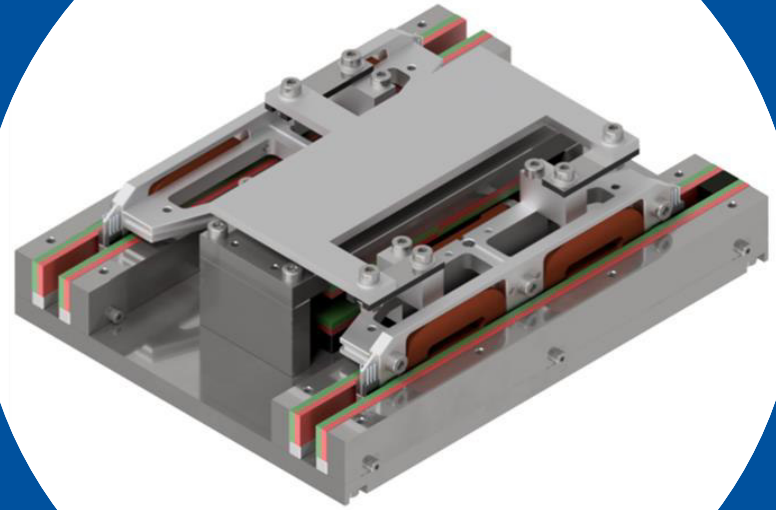
Universität Stuttgart

Institut für Konstruktion und Fertigung in der
Feinwerktechnik

Entwicklung von magnetisch geführten Linearantrieben für feinwerktechnische Anwendungen

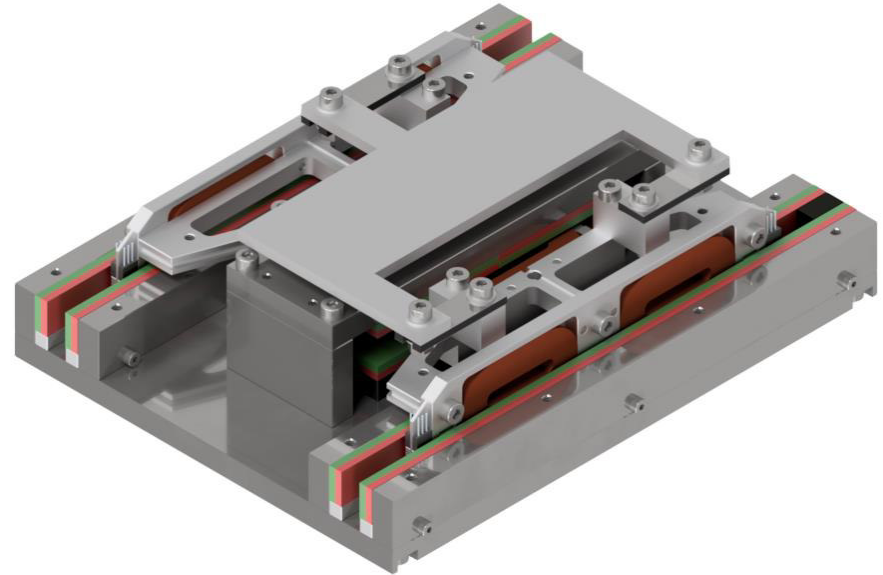
M. Raab M. Eng.

Prof. Dr.-Ing. W. Schinköthe



Gliederung

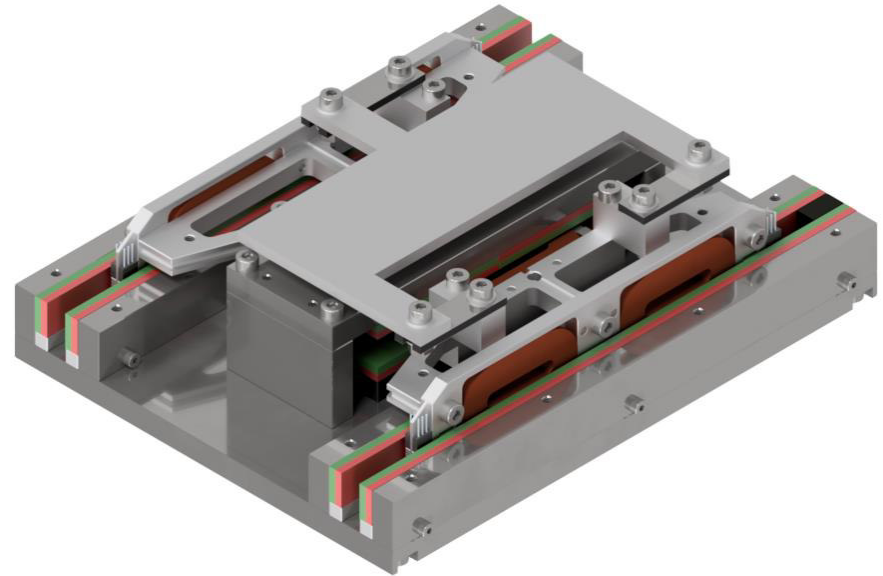
- Motivation
- Entwicklung feinwerktechnischer Magnetschwebeantriebe
- Leistungsloses Schweben
- Zusammenfassung



Motivation - Lineare Magnetschwebeantriebe

Gründe für lineare Magnetschwebetechnik

- Keine Reibung → kein Stick-Slip-Effekt
- Kein Verschleiß → hohe Lebensdauer
- Keine Schmierung notwendig → Einsatz in Reinraumanwendungen
- Positionierung in 6 Freiheitsgraden → Ausgleichsbewegungen in mehreren Achsen



Motivation - Lineare Magnetschwebeantriebe

Gründe für lineare Magnetschwebetechnik

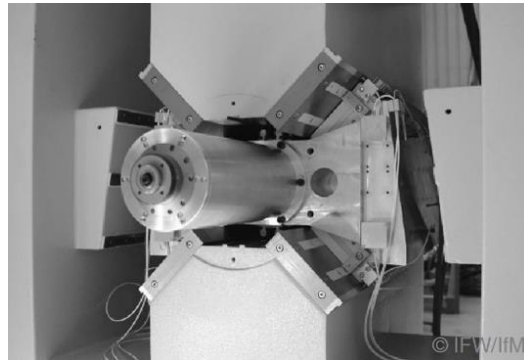
- Keine Reibung → kein Stick-Slip-Effekt
- Kein Verschleiß → hohe Lebensdauer
- Keine Schmierung notwendig → Einsatz in Reinraumanwendungen
- Positionierung in 6 Freiheitsgraden → Ausgleichsbewegungen in mehreren Achsen

Anwendungsgebiete

- Nanopositionierung / Lithographie
- Werkzeugmaschinen
- Reinraumtechnik
- Medizintechnik
- Automatisierungstechnik



Quelle: PI GmbH und IMMS



Quelle: IFW, Uni Hannover



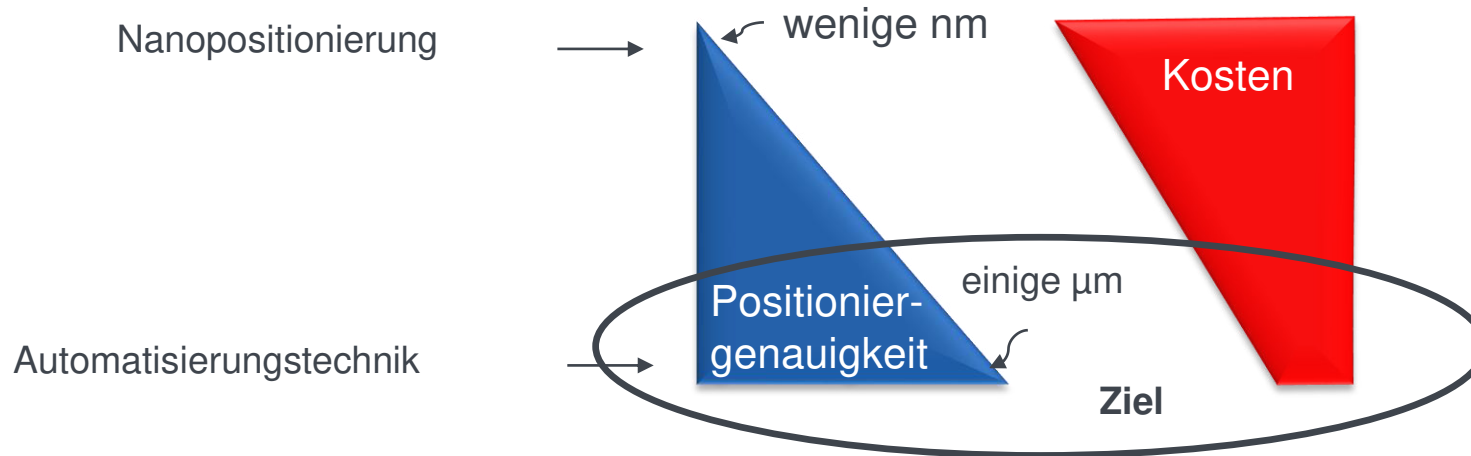
Quelle: Festo

Motivation - Lineare Magnetschwebeantriebe

Gründe für lineare Magnetschwebetechnik

- Keine Reibung → kein Stick-Slip-Effekt
- Kein Verschleiß → hohe Lebensdauer
- Keine Schmierung notwendig → Einsatz in Reinraumanwendungen
- Positionierung in 6 Freiheitsgraden → Ausgleichsbewegungen in mehreren Achsen

Kosten / Nutzen

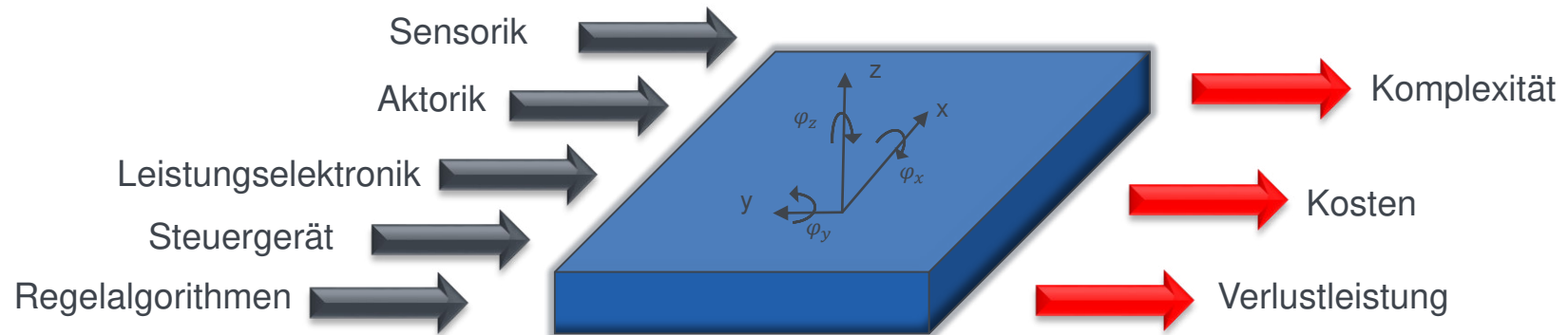


Motivation - Lineare Magnetschwebeantriebe

Gründe für lineare Magnetschwebetechnik

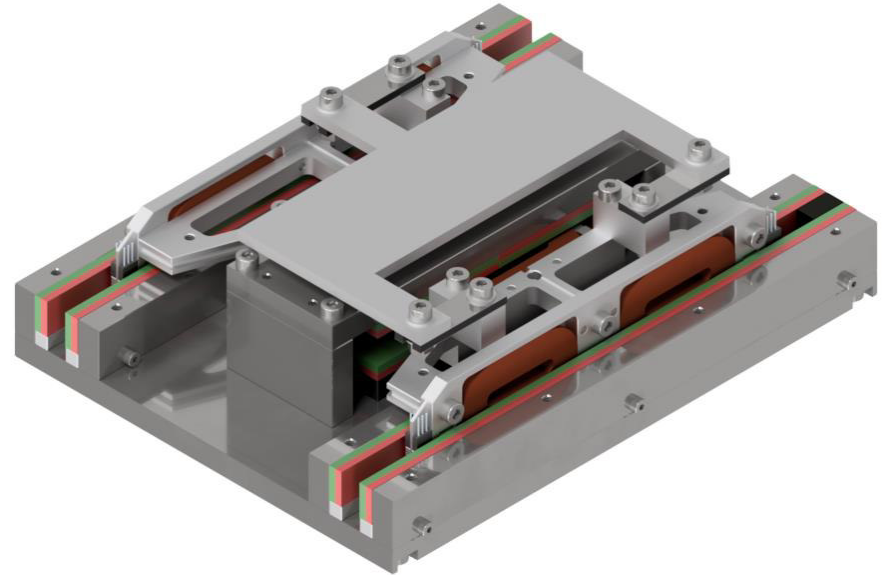
- Keine Reibung → kein Stick-Slip-Effekt
- Kein Verschleiß → hohe Lebensdauer
- Keine Schmierung notwendig → Einsatz in Reinraumanwendungen
- Positionierung in 6 Freiheitsgraden → Ausgleichsbewegungen in mehreren Achsen

Herausforderungen: Sechs Freiheitsgrade müssen stabilisiert werden (aktiv oder passiv)



Gliederung

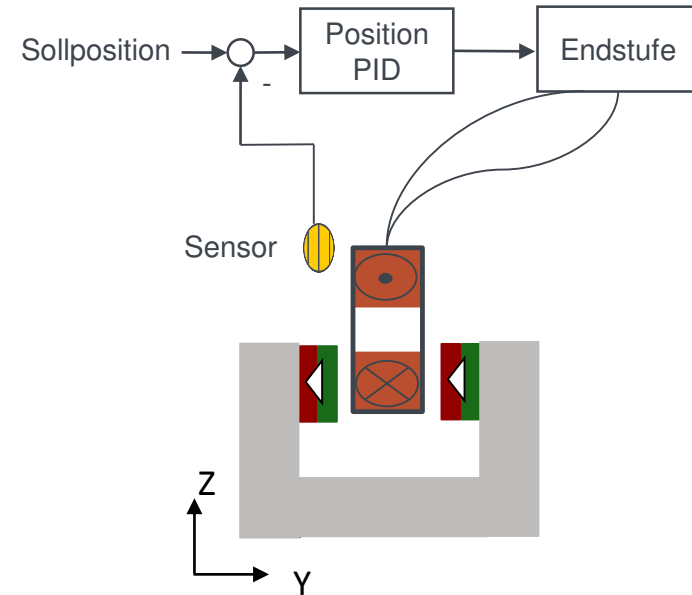
- Motivation
- Entwicklung feinwerktechnischer Magnetschwebeantriebe
- Leistungsloses Schweben
- Zusammenfassung



Führungskonzept – Magnetkräfte in Schwebeantrieben

Aktive Stabilisierung von Freiheitsgraden

- Nutzung von Lorentzkraft oder Reluktanzkraft
 - Aktive Regelung der Sollposition
-
- + Sollposition wird exakt gehalten
 - + Störungen können aktiv ausgeglichen werden
 - + Position aktiv einstellbar
-
- Hoher Aufwand an Peripherie (Sensor, Aktor, Endstufe, Steuergerät)
 - Verlustleistung bei konstant benötigter Kraft des Aktors

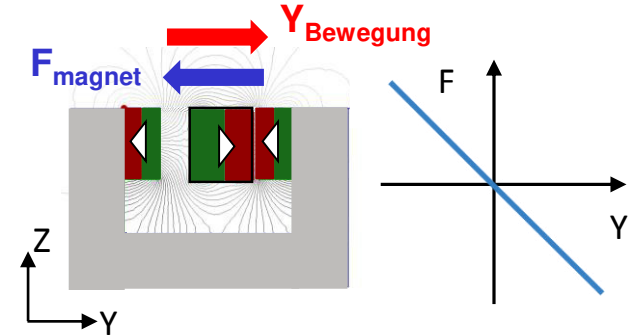


Führungskonzept – Magnetkräfte in Schwebeantrieben

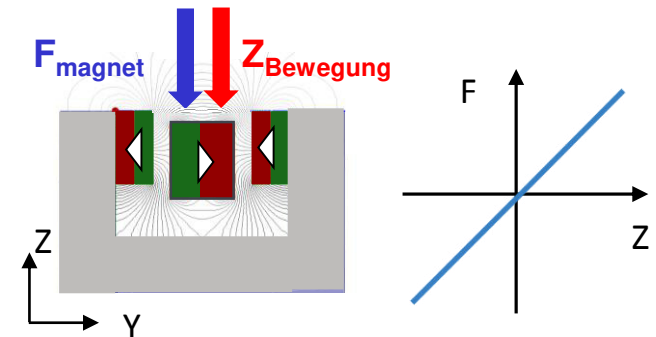
Passive Stabilisierung von Freiheitsgraden

- + Stabil in bis zu fünf Achsen
 - + Zu regelnde Freiheitsgrade können reduziert werden
 - + Einsparpotential bei Sensorik, Aktorik und Steuerungstechnik
-
- Instabil in mindestens einer Achse
 - Geringe Dämpfung in passiv stabilisierten Achsen
 - Position durch veränderliche Lasten veränderbar

Stabiles Verhalten



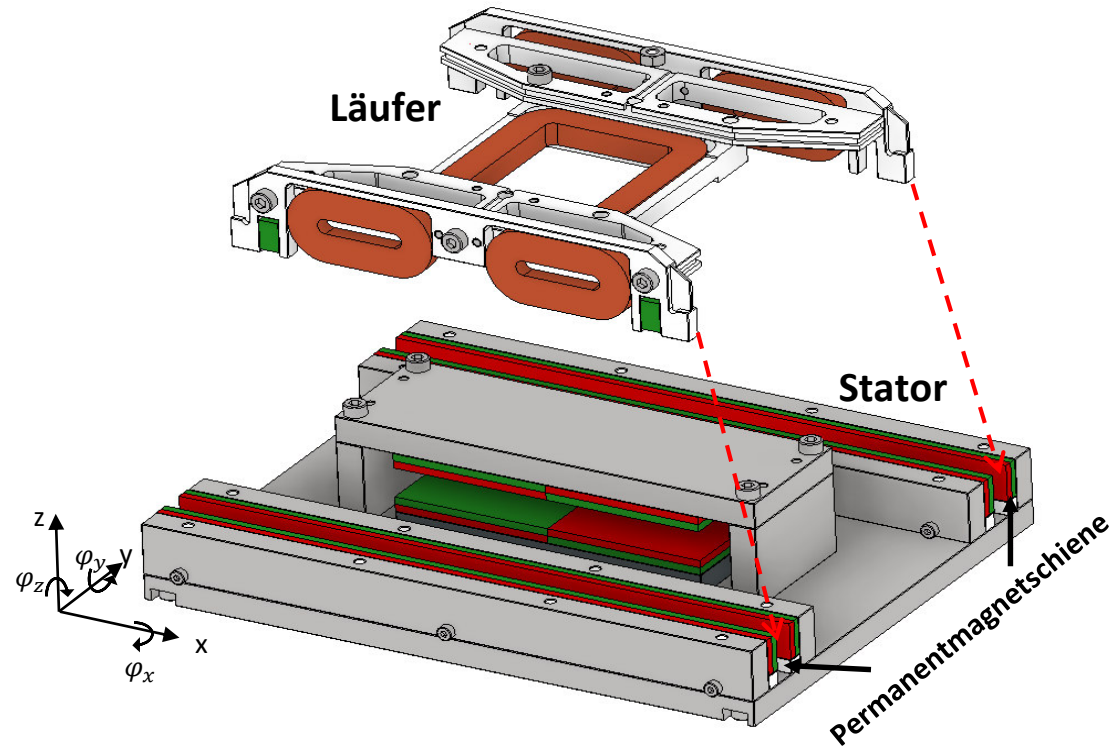
Instabiles Verhalten



Antriebskonzept 1 - Passive Stabilisierung von horizontalen Achsen

Vorschubachse

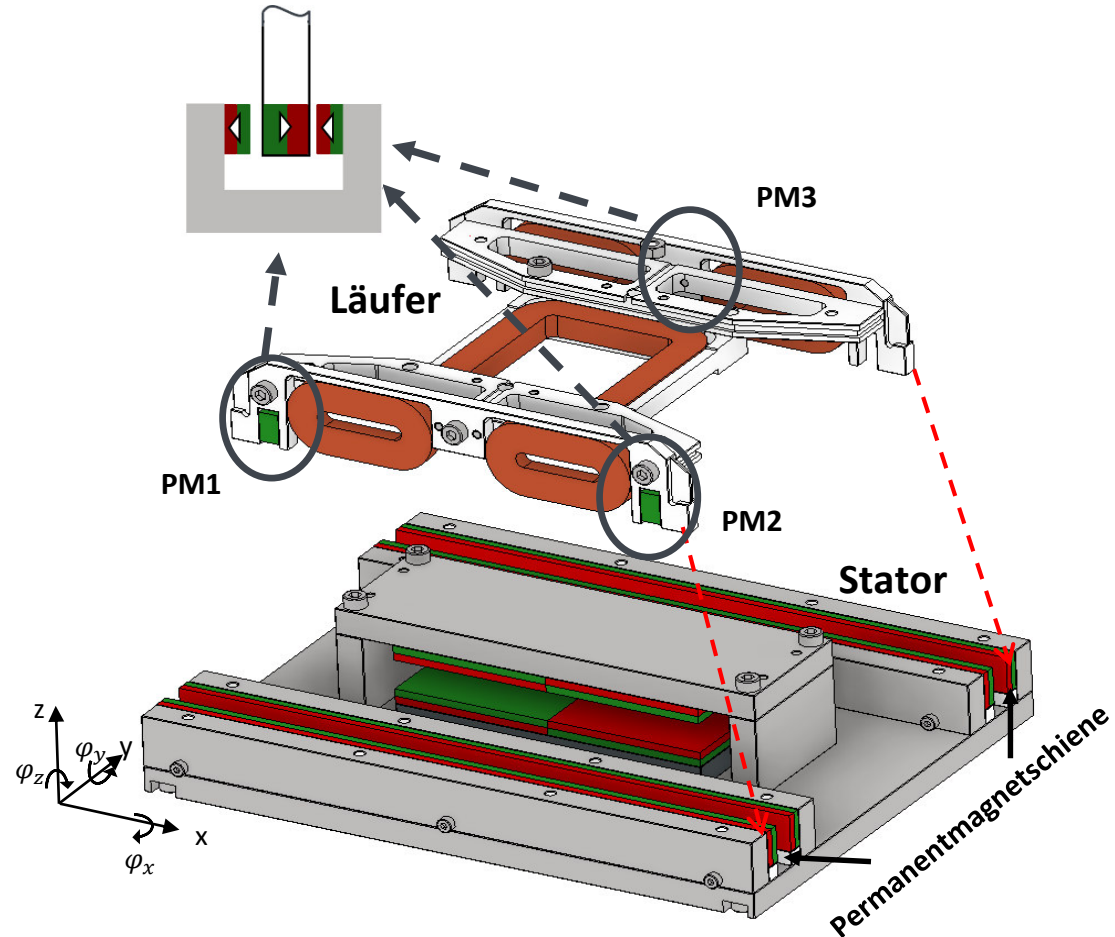
- Homopolarer
Flachspulantrieb in der
Vorschubachse



Antriebskonzept 1 - Passive Stabilisierung von horizontalen Achsen

Passive Stabilisierung

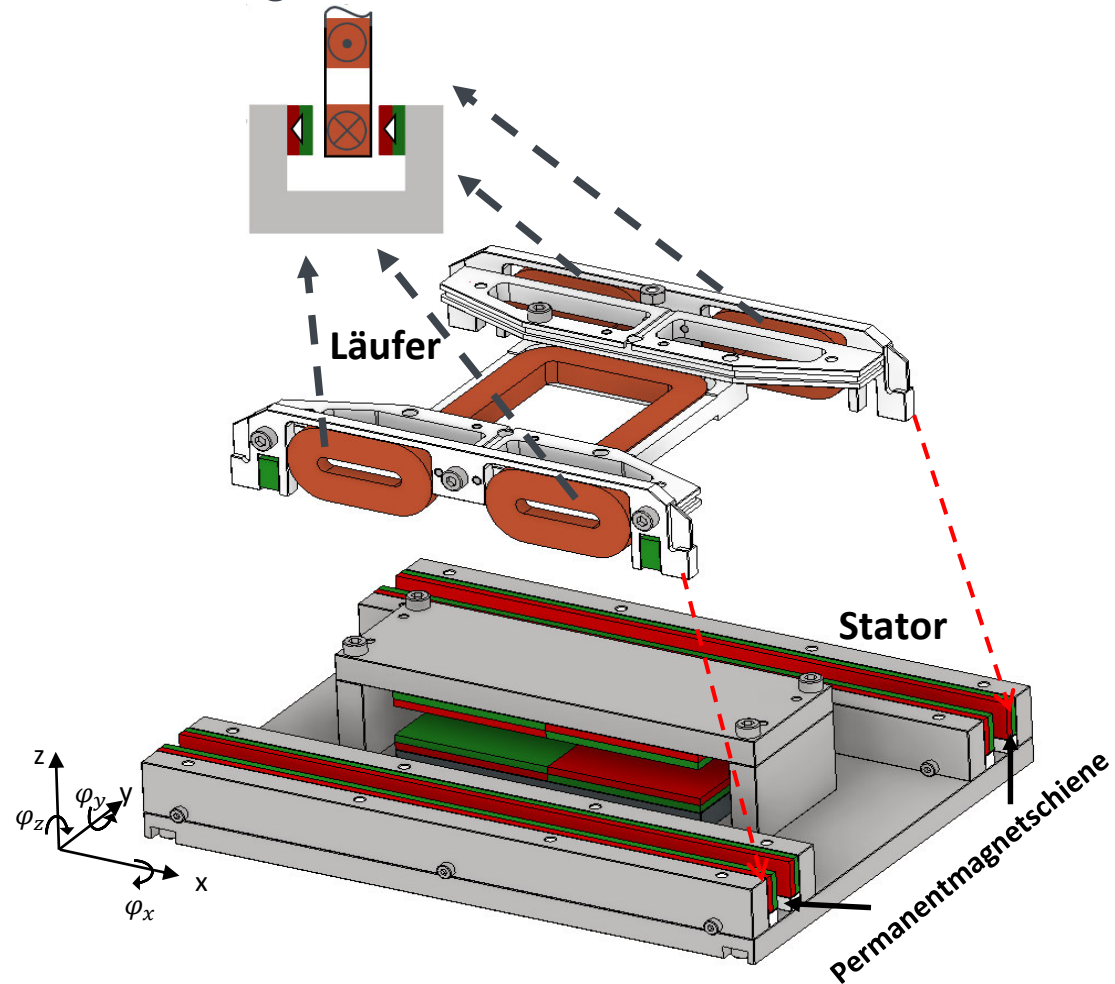
- Homopolarer Flachspulantrieb in der Vorschubachse
- Passive Stabilisierung von zwei Freiheitsgraden (Y und φ_z)



Antriebskonzept 1 - Passive Stabilisierung von horizontalen Achsen

Aktive Stabilisierung

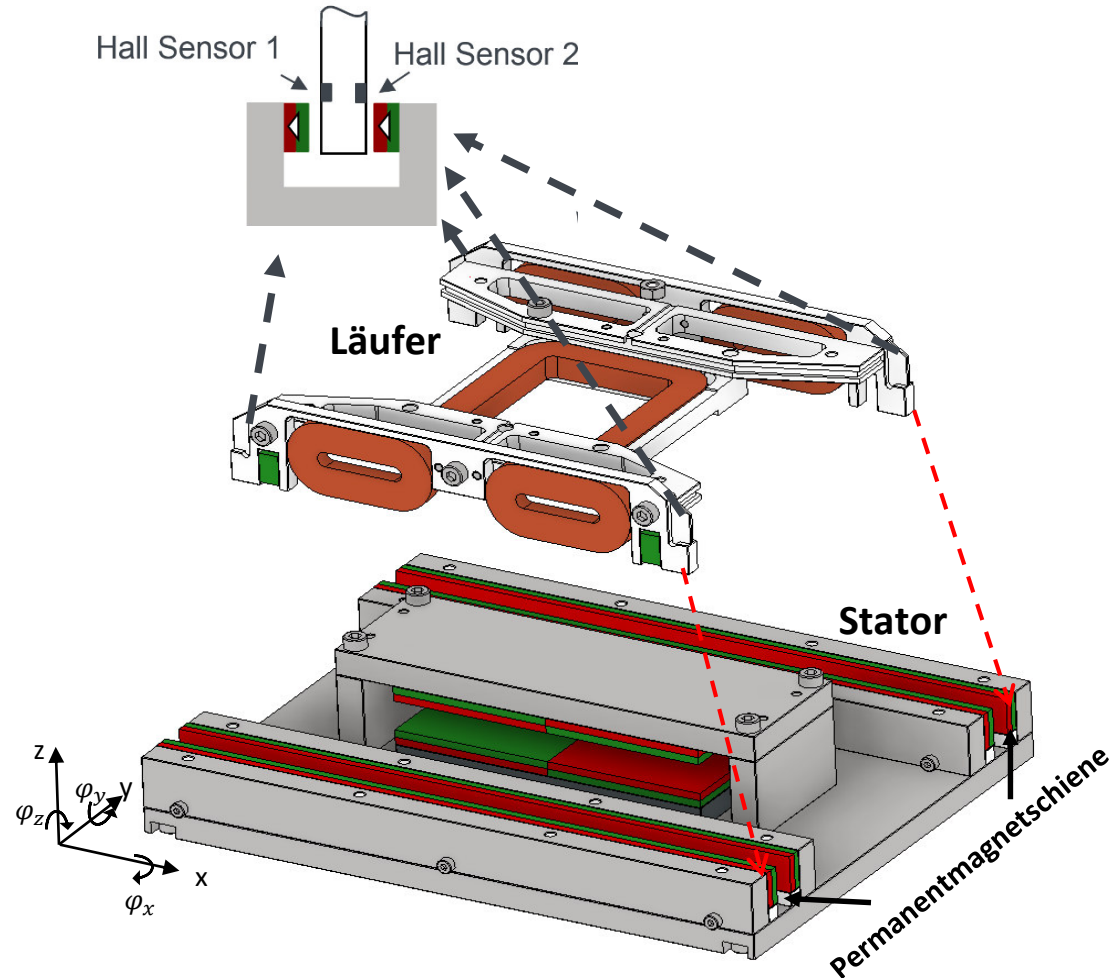
- Homopolarer Flachspulantrieb in der Vorschubachse
- Passive Stabilisierung von zwei Freiheitsgraden (Y und φ_z)
- Aktive Stabilisierung der verbleibenden Freiheitsgrade (Z, φ_x und φ_y) durch vier Spulen



Antriebskonzept 1 - Passive Stabilisierung von horizontalen Achsen

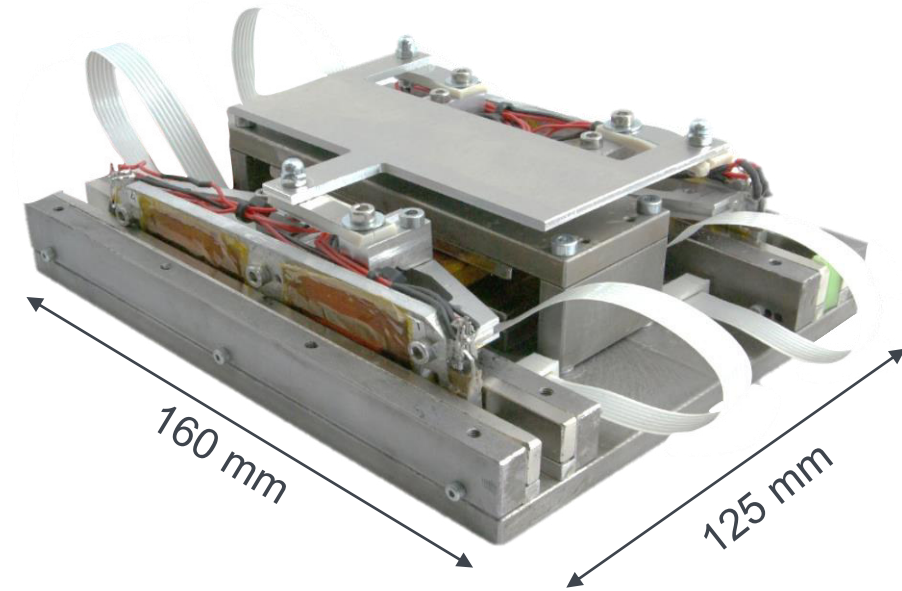
Positionsmessung

- Homopolarer Flachspulantrieb in der Vorschubachse
- Passive Stabilisierung von zwei Freiheitsgraden (Y und φ_z)
- Aktive Stabilisierung der verbleibenden Freiheitsgrade (Z , φ_x und φ_y) durch vier Spulen
- Positionsmessung durch vier Hallsensorpaare



Antriebskonzept 1 - Kenndaten

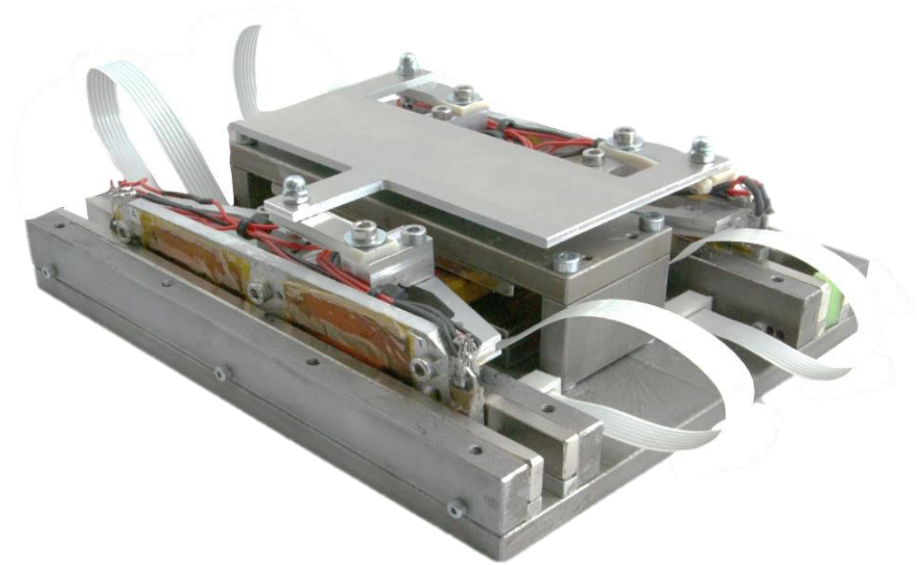
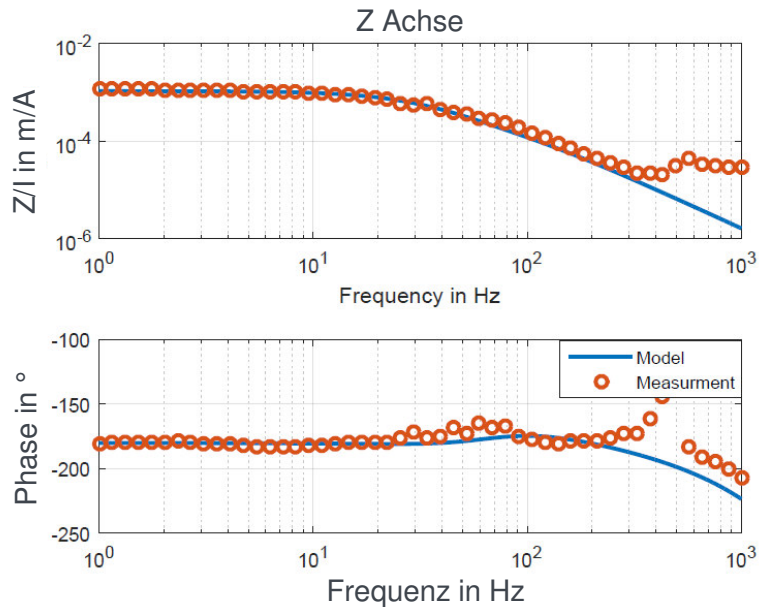
- **Verfahrweg:**
 - X-Achse: 30 mm
 - Z-Achse: 2 mm
- **Steifigkeiten:**
 - Passive Steifigkeit (Y): 6.5 N/mm (Simulation: 9.2 N/mm)
 - Negative Steifigkeit (Z): -10.1 N/mm (Simulation: -11.2 N/mm)
- **Kräfte:**
 - Vorschubkraft X-Achse: 20 N (kurzzeitig)
 - Stabilisierung Z-Achse: 23 N (kurzzeitig)
- **Belastbarkeit:** 500 g



Antriebskonzept 1– Charakterisierung

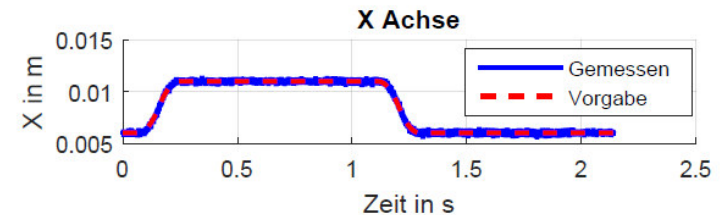
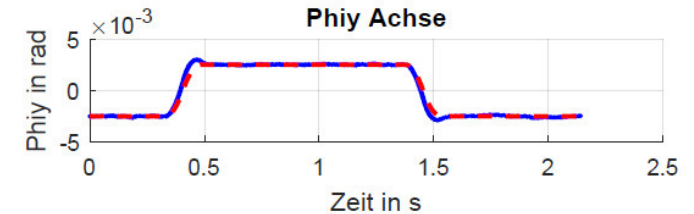
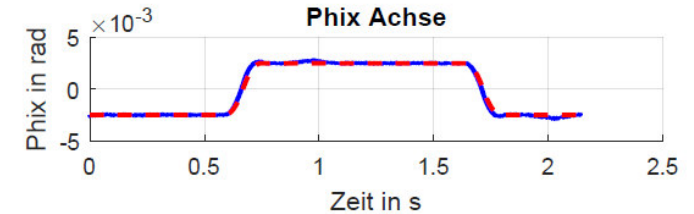
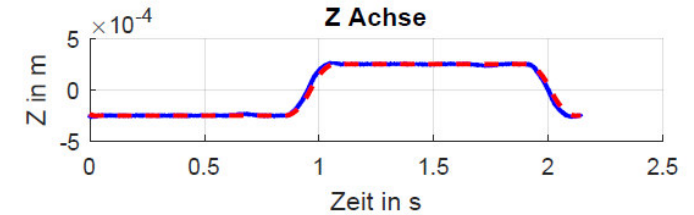
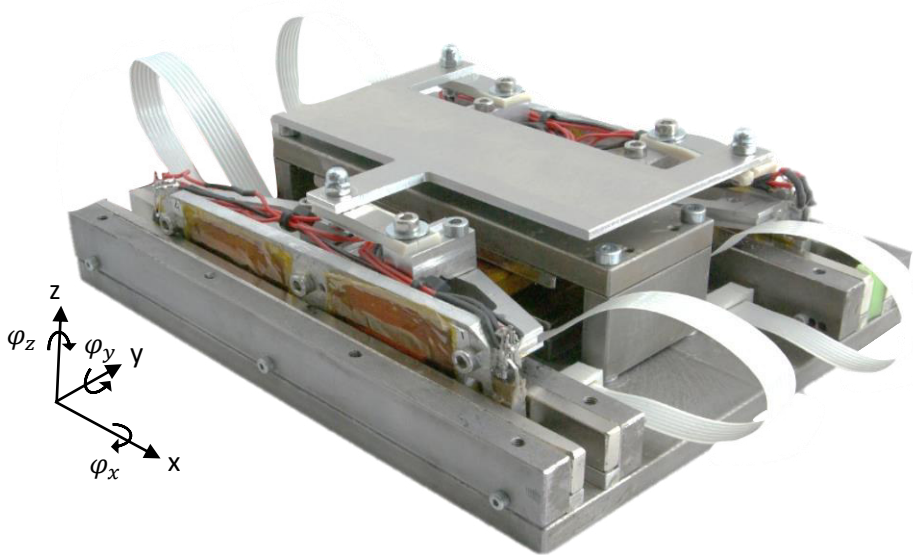
Ermittlung des dynamischen Verhaltens

- Abweichungen < 10 % bis 200 Hz
- Mechanische Resonanzen bei höheren Frequenzen wurden nicht modelliert.



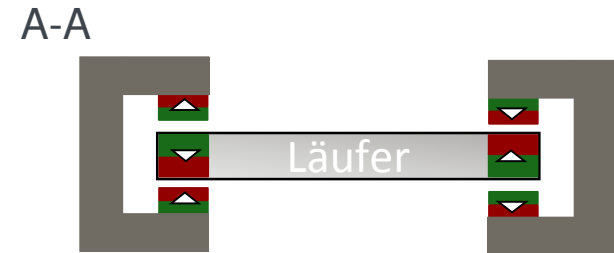
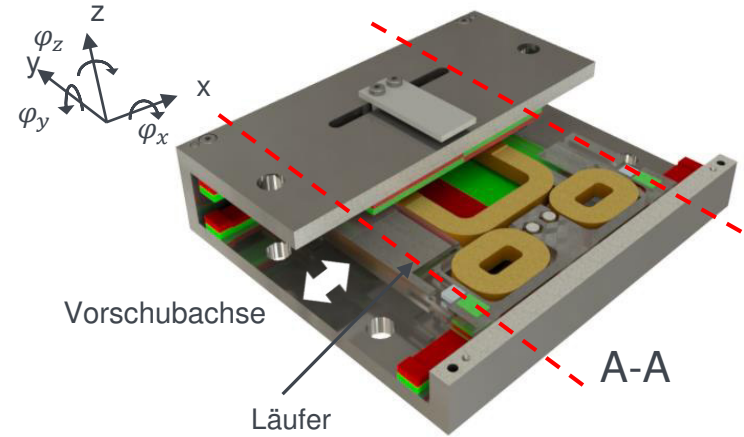
Antriebskonzept 1 - Verfahrensprofile

- Positionierung mittels beschleunigungsreduzierter Bahnplanung
- Geringe Beeinflussung der verschiedenen Achsen



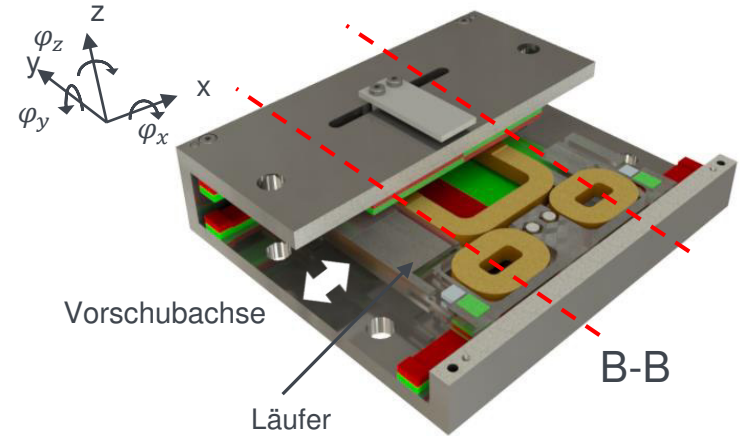
Antriebskonzept 2 – Passive Stabilisierung von vertikalen Achsen

- Homopolarer Flachspulantrieb in der Vorschubachse
- Passive Stabilisierung von drei Freiheitsgraden (Z, φ_x, φ_y)
- Aktive Stabilisierung der verbleibenden Freiheitsgrade (Y, φ_z) durch vier Spulen
- Steifigkeit in der Z Achse: 9,1 N/mm
- Belastbar bis 700 g



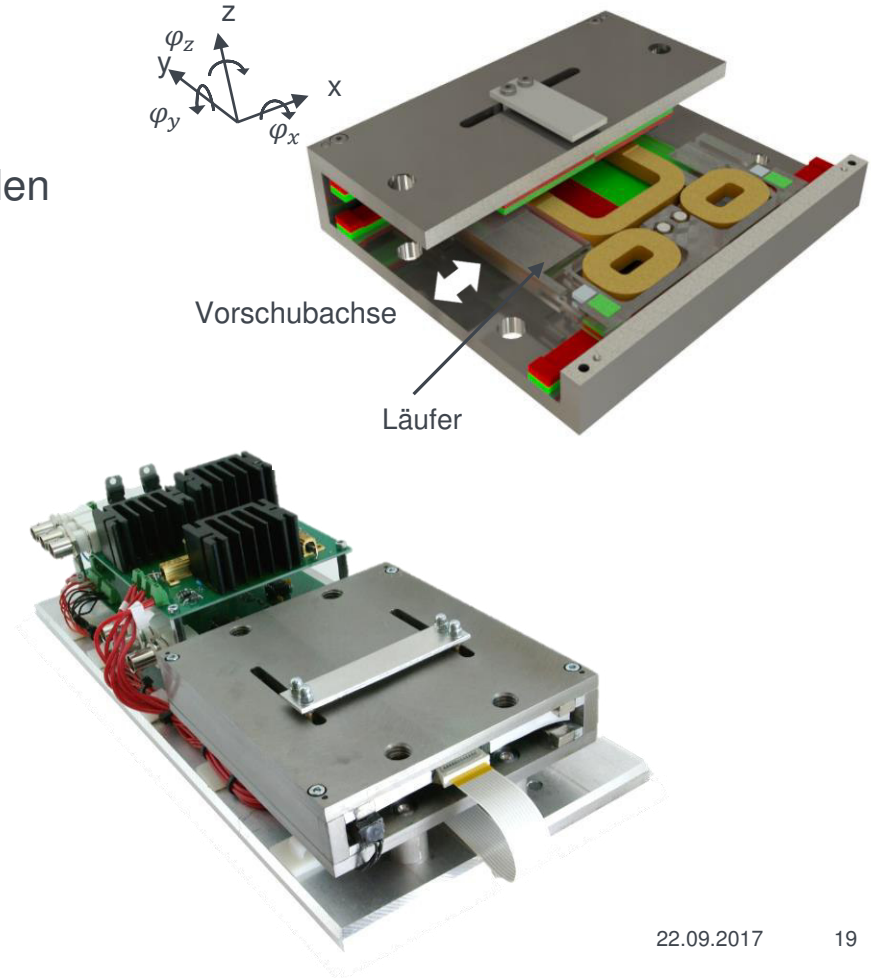
Antriebskonzept 2 – Passive Stabilisierung von vertikalen Achsen

- Homopolarer Flachspulantrieb in der Vorschubachse
- Passive Stabilisierung von drei Freiheitsgraden (Z, φ_x, φ_y)
- Aktive Stabilisierung der verbleibenden Freiheitsgrade (Y, φ_z) durch vier Spulen
- Steifigkeit in der Z Achse: 9,1 N/mm
- Belastbar bis 700 g



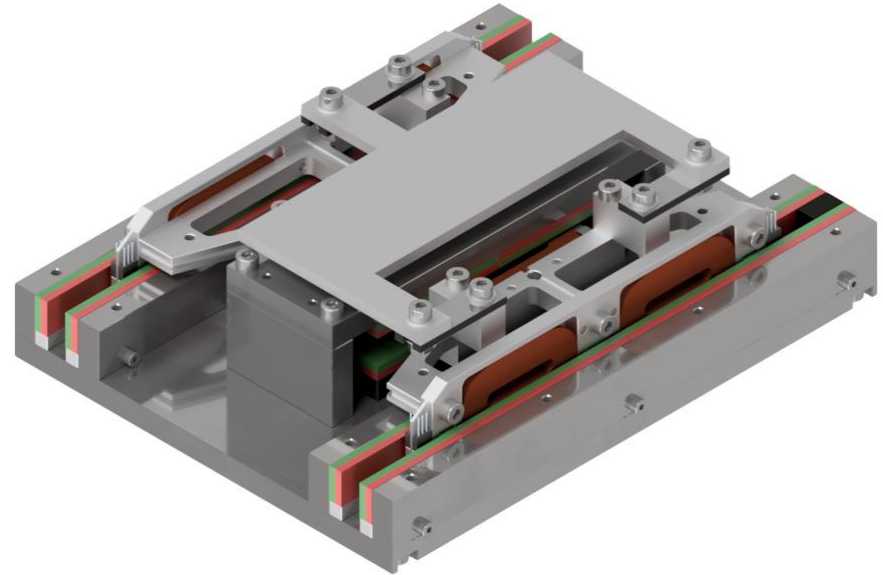
Antriebskonzept 2 – Passive Stabilisierung von vertikalen Achsen

- Homopolarer Flachspulantrieb in der Vorschubachse
- Passive Stabilisierung von drei Freiheitsgraden (Z, φ_x, φ_y)
- Aktive Stabilisierung der verbleibenden Freiheitsgrade (Y, φ_z) durch vier Spulen
- Steifigkeit in der Z Achse: 9,1 N/mm
- Belastbar bis 700 g



Gliederung

- Motivation
- Entwicklung feinwerktechnischer Magnetschwebeantriebe
- Leistungsloses Schweben
- Zusammenfassung

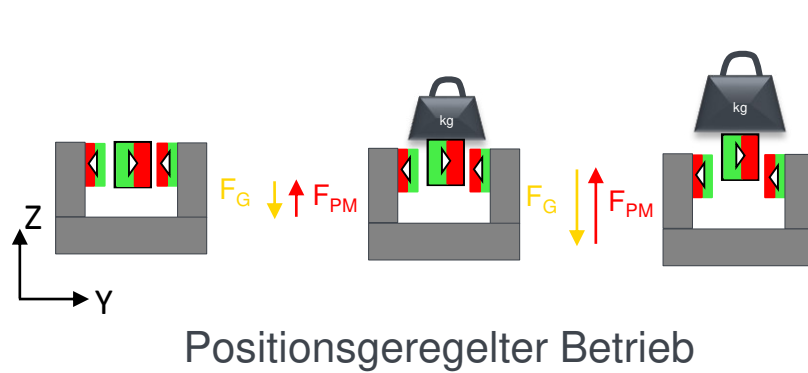


Leistungsloses Schweben

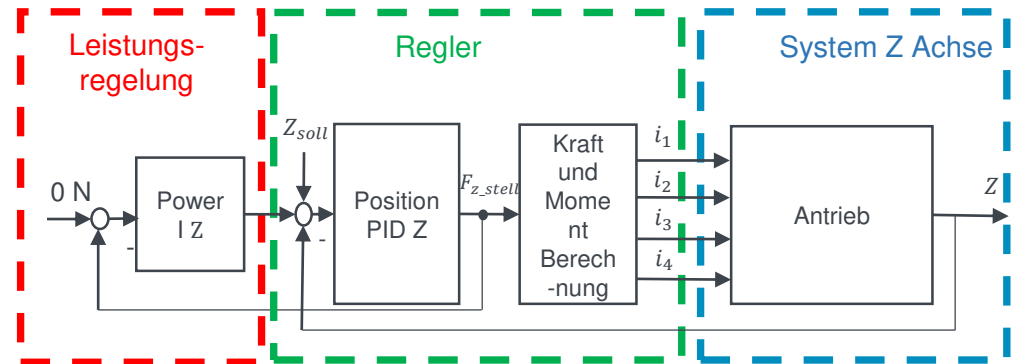
Konzept

- Anpassung der Schwebehöhe an die Gewichtskraft des Läufers
- Rückführung des Stellsignals des Positionsreglers zur Leistungsregelung
- Schwebeleistungen begrenzt durch Sensorrauschen $\rightarrow$ aktuell 10 mW

Funktion:



Regelung:

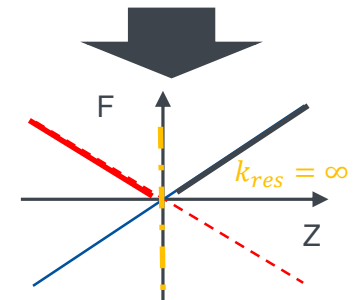
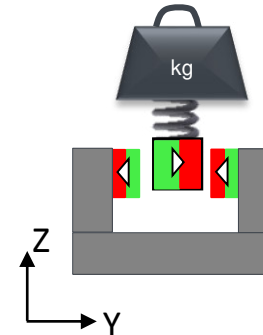
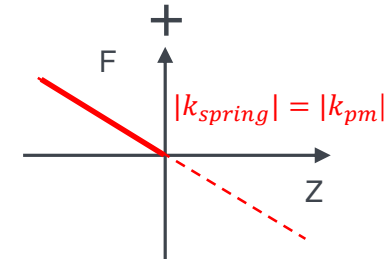
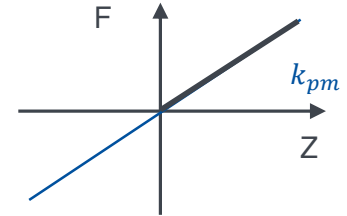
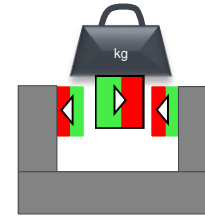
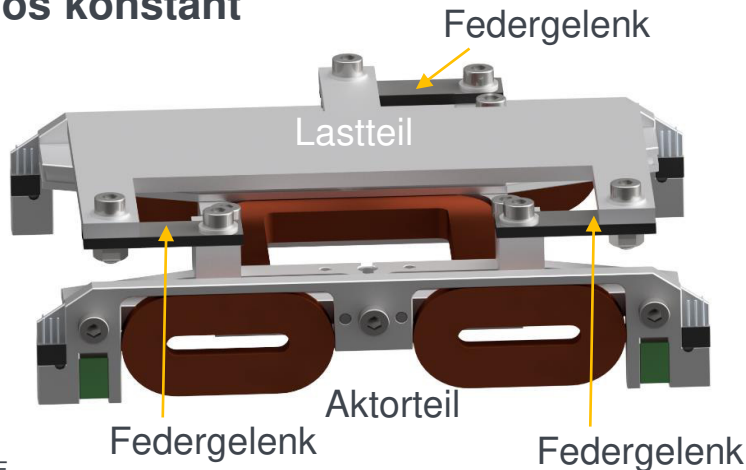


Leistungsloses Schweben

Konstant halten der Schwebeposition

- Anpassung der Schwebehöhe an die Gewichtskraft des Läufers
- Zusätzliche Federsteifigkeit im Läufer mit gleicher Steifigkeit und umgekehrten Vorzeichen
- Federsteifigkeiten heben sich auf

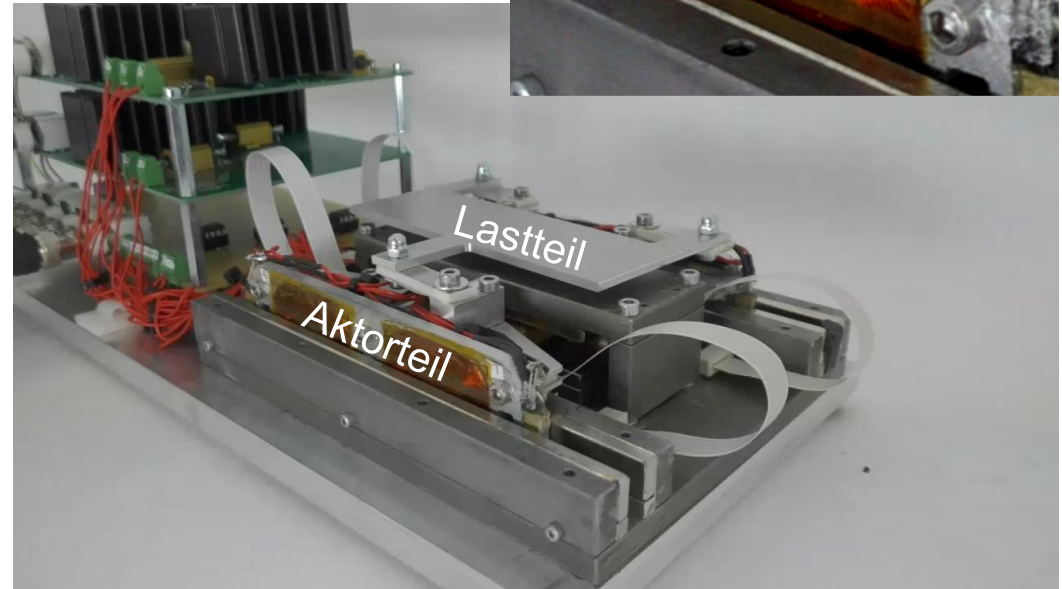
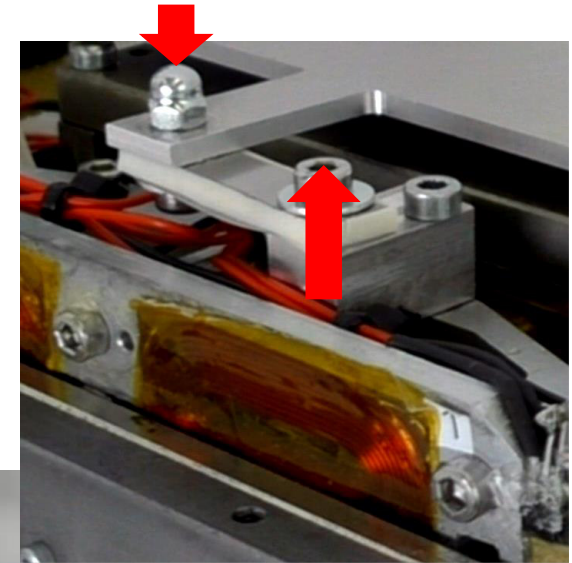
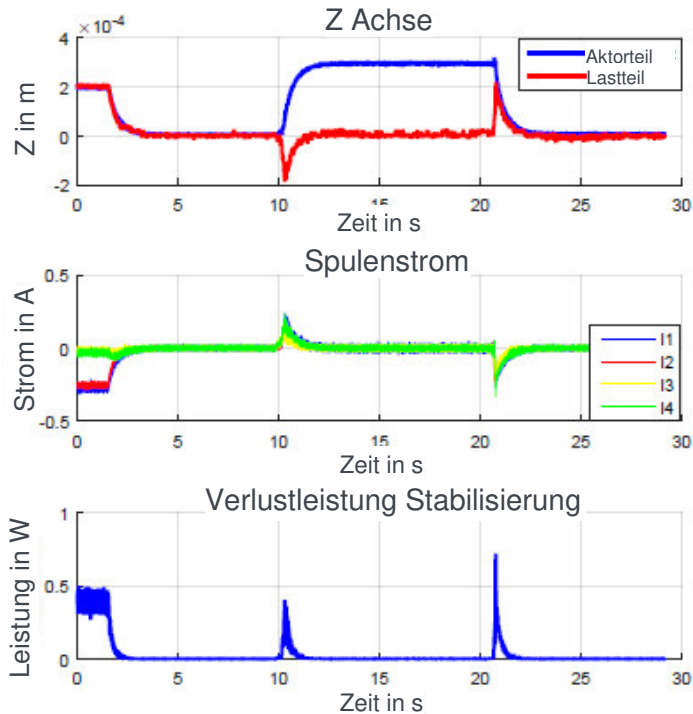
→ **Schwebeposition bleibt lastunabhängig und leistungslos konstant**



Leistungsloses Schweben

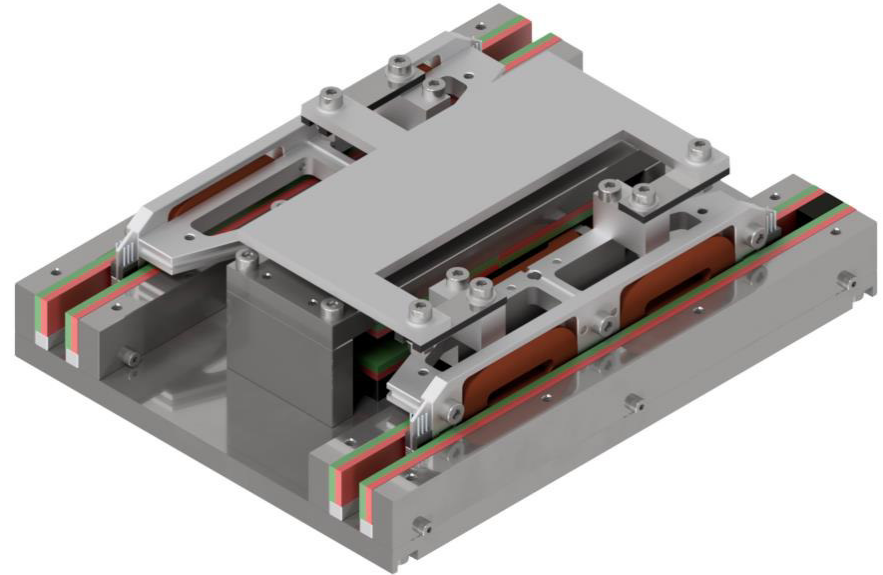
Funktionsbeispiel

- Schwebeleistung unter 10 mW
- Lastunabhängiges Halten einer Schwebeposition



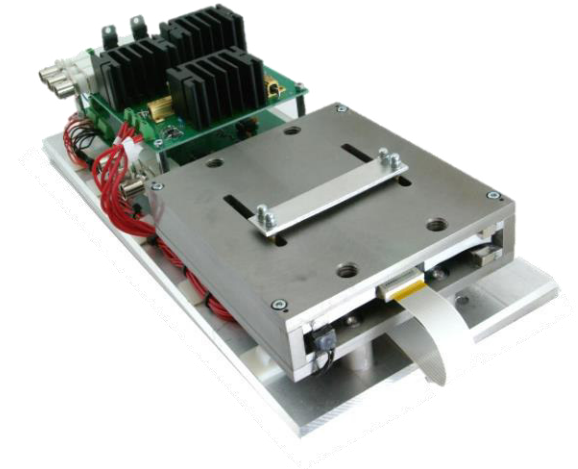
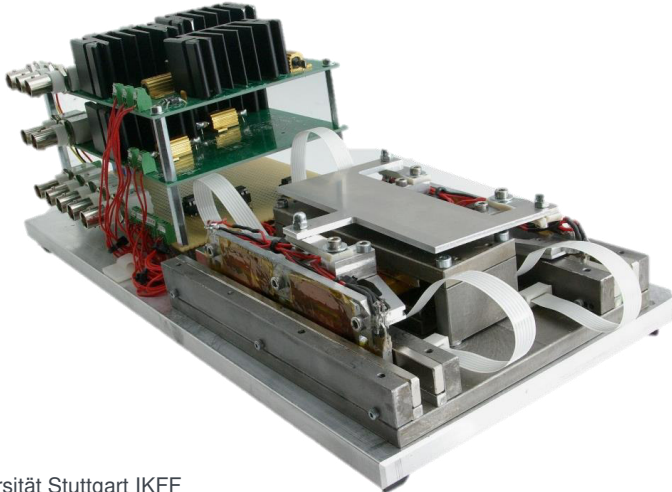
Gliederung

- Motivation
- Entwicklung feinwerktechnischer Magnetschwebeantriebe
- Leistungsloses Schweben
- Zusammenfassung



Zusammenfassung

- Feinwerktechnische Magnetschwebeantriebe mit abstoßenden Magnetkräften wurden entwickelt
- Nutzung von Magnetkräften zur passiven Stabilisierung sowie zur passiven Gewichtskraftkompensation
- Schwebeleistung von wenigen mW
- Leistungsloses Halten verschiedener Lasten ohne stationäre Positionsänderung





Universität Stuttgart

Institut für Konstruktion und Fertigung in der
Feinwerktechnik

Vielen Dank!



Markus Raab

E-Mail markus.raab@ikff.uni-stuttgart.de

Telefon +49 (0) 711 685-66408

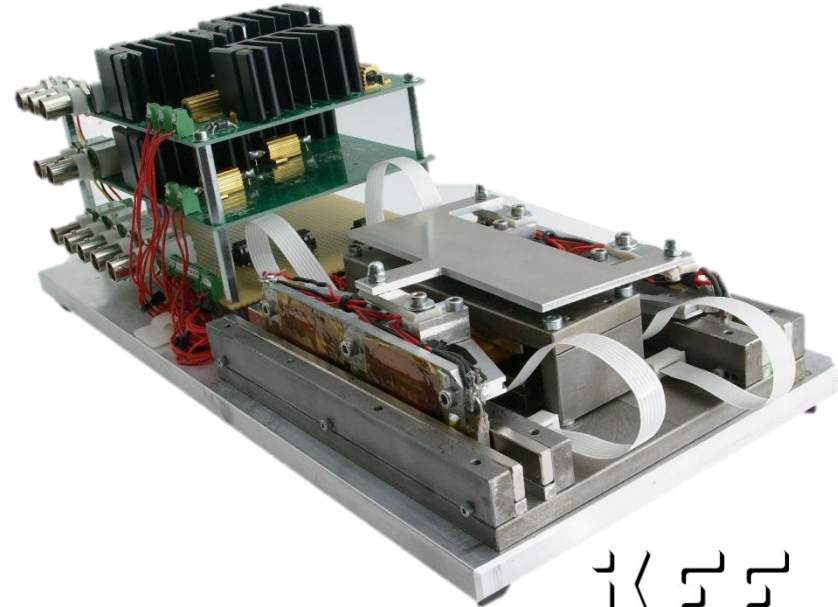
www.ikff.uni-stuttgart.de

Universität Stuttgart

Institut für Konstruktion und Fertigung in der
Feinwerktechnik

Pfaffenwaldring 9

70550 Stuttgart



ikff