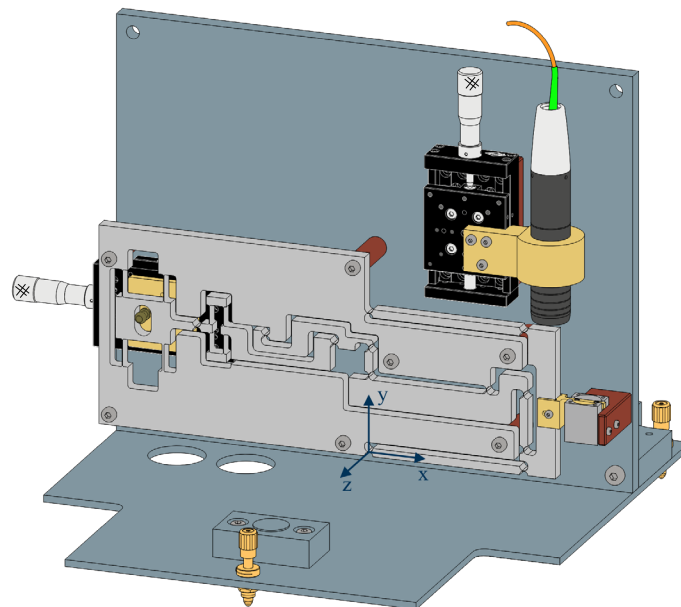


Entwicklung kompakter Systeme für hochpräzise rückführbare Kraftmessungen

Martin Wittke, Matthias Wolf, Mario André Torres Melgarejo
René Theska

Technische Universität Ilmenau
Fakultät für Maschinenbau
Institut für Maschinen- und Gerätekonstruktion
Fachgebiet Feinwerktechnik

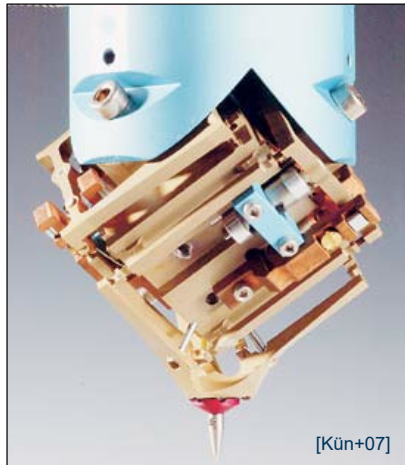
Deutsche Gesellschaft für Feinwerktechnik e.V.
17. Jahrestagung „Feinwerktechnische Konstruktion“
26. & 27.09.2024 – SLUB Dresden



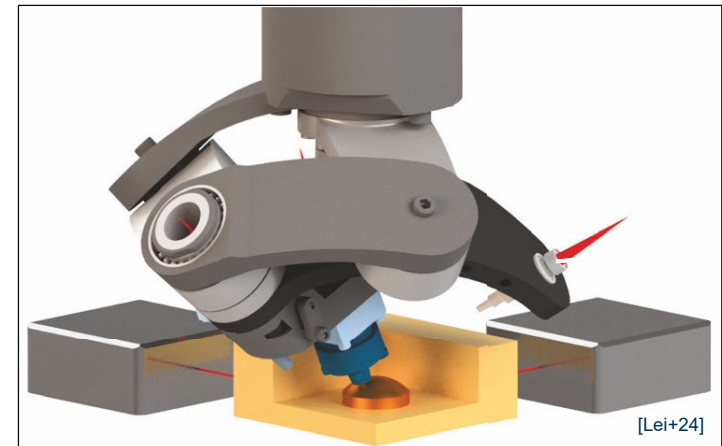
1. Einleitung

Trends in der Präzisionstechnik

Stand der Technik



Zielsysteme



- translatorisch bewegte Messsysteme mit konstanter Orientierung im Schwerfeld
- indirekte Kraftmessung durch Verformungskörper

- translatorisch und rotatorisch frei bewegte Messsysteme
- Kompensationskraftmessung über Aktor

1. Einleitung

Darstellung der SI-Einheit Kilogramm

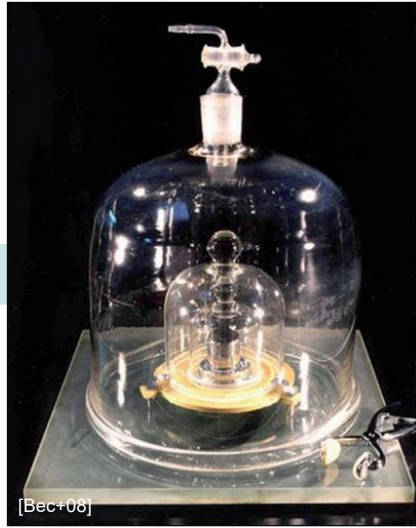
verschiedene nationale
Artefakte (z.B. Grave)



[NIST23]

1889

Internationaler
Kilogrammprototyp

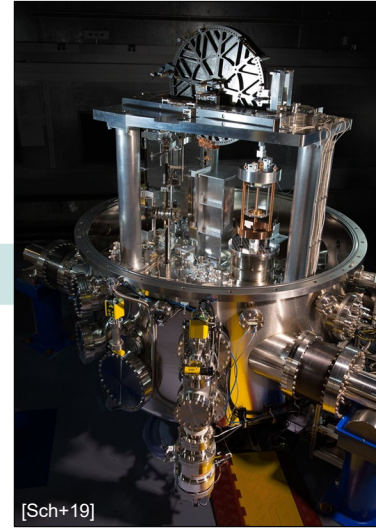


[Bec+08]

2019

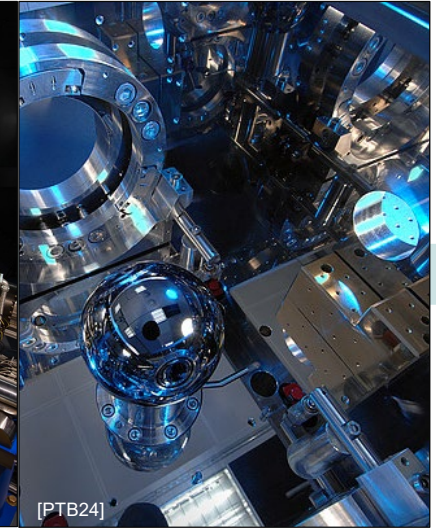
Physikalische Konstanten

Planck'sches
Wirkungsquantum



[Sch+19]

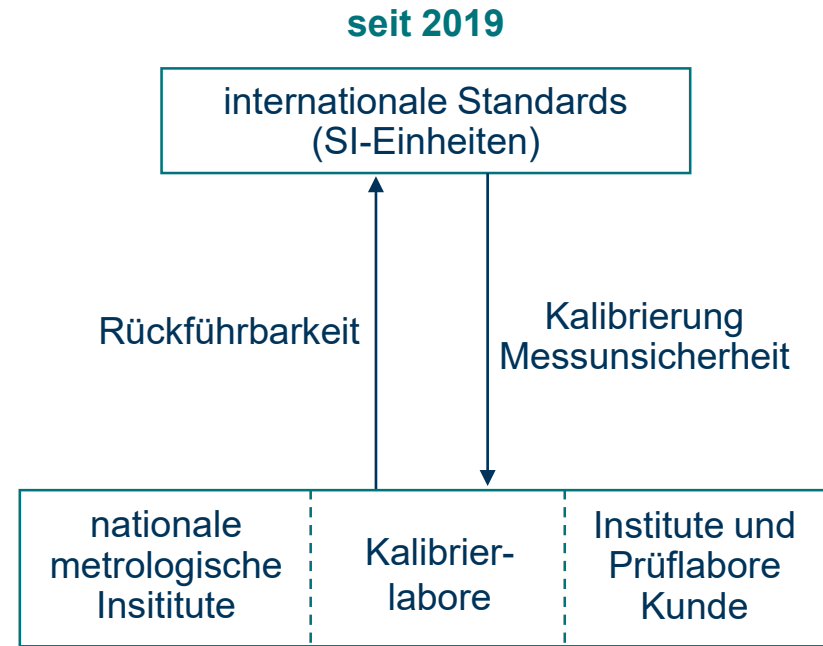
Avogadro-Konstante



[PTB24]

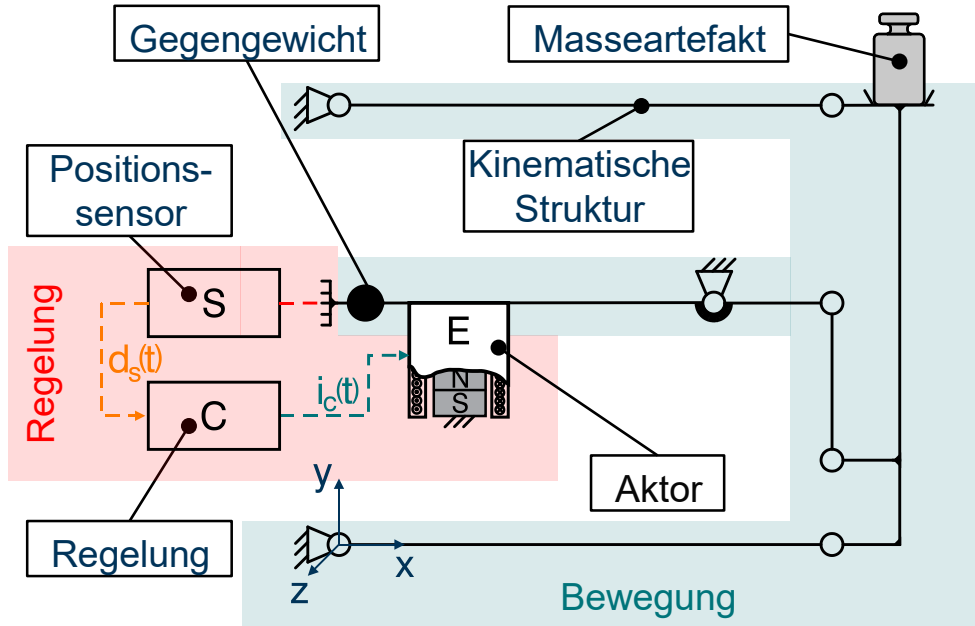
1. Einleitung

Rückführbarkeit der SI-Einheit Kilogramm



2. Stand der Technik

Relative Massebestimmung – EMK-Wägezelle



Typische Eigenschaften:

- Messbereich: $\pm 1 \text{ mg}$ ($1 \times 10^{-6} \text{ kg}$)
- Messauflösung: $0,1 \text{ }\mu\text{g}$ ($1 \times 10^{-10} \text{ kg}$)
- Standardabweichung (typ.): $0,2 \text{ }\mu\text{g}$ ($2 \times 10^{-10} \text{ kg}$)

[Bec+16, PTB23]

Kalibrierung:

- Massenormal

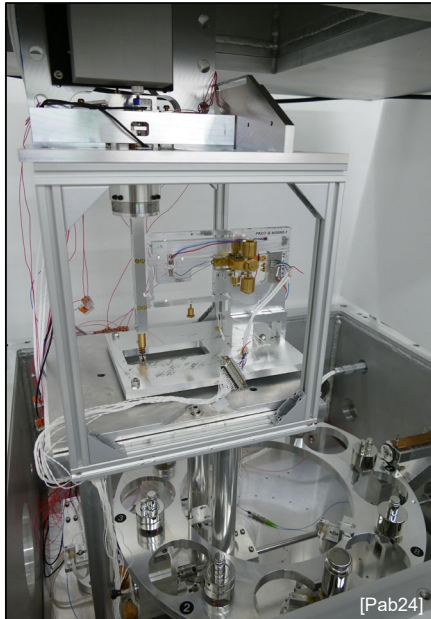
Rückführbarkeit:

- über Kalibrierkette auf Internationalen Kilogrammprototyp

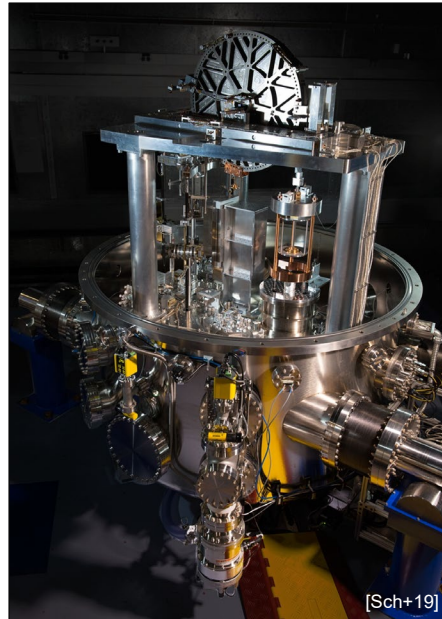
2. Stand der Technik

Absolute Massebestimmung – Planck-, Kibble- und Joule-Waagen

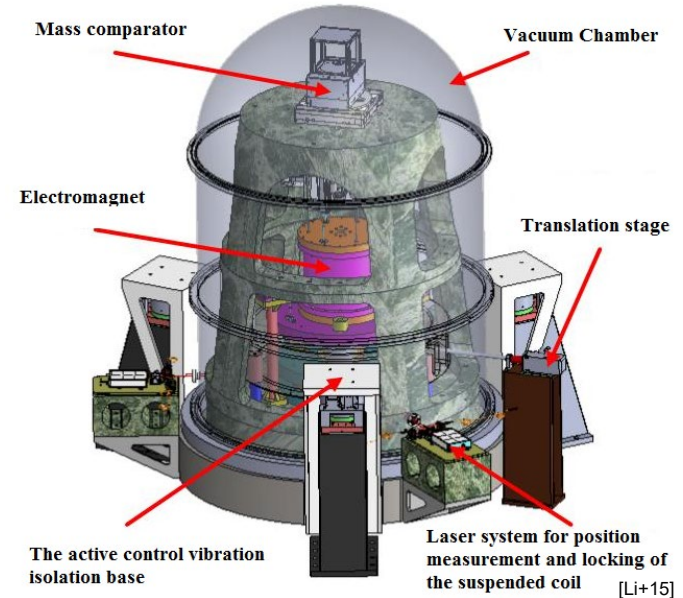
Planck-Waage (TU Ilmenau)



Kibble-Waage (NIST)

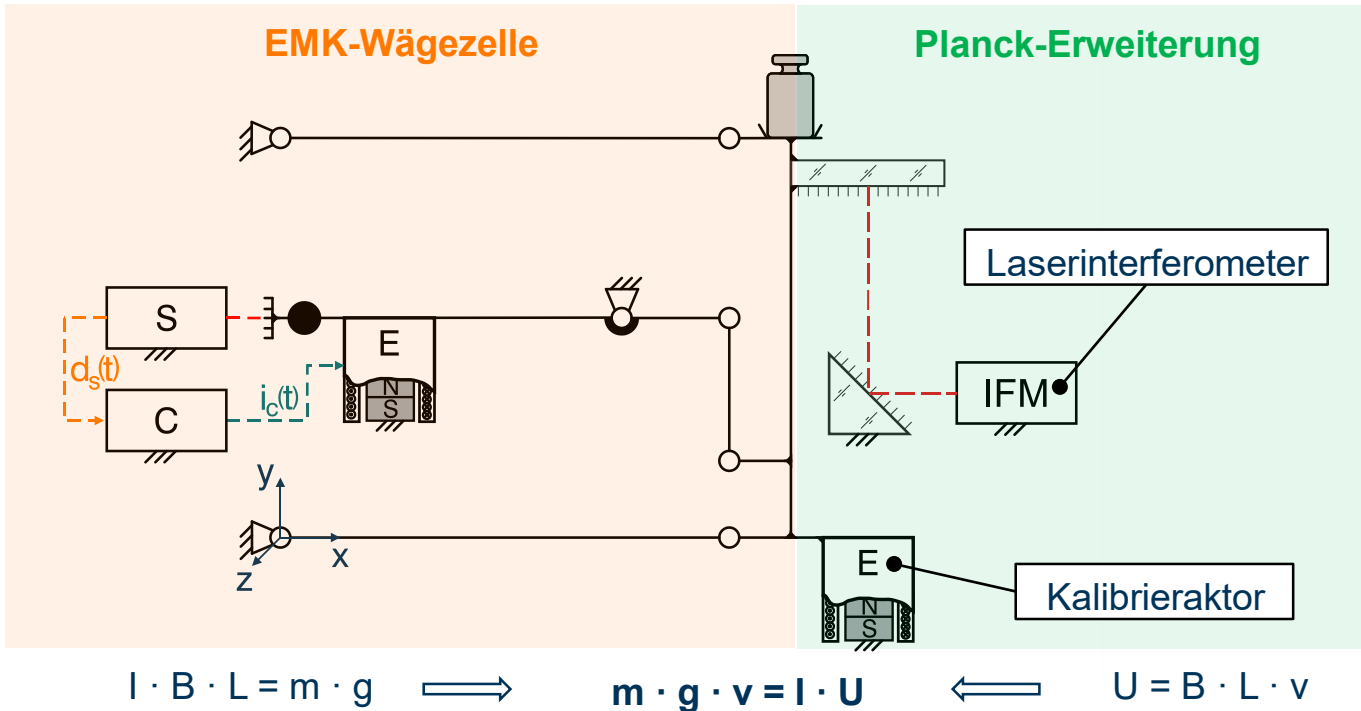


Joule-Waage (NIM)



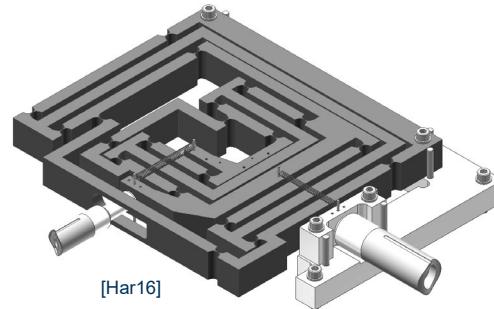
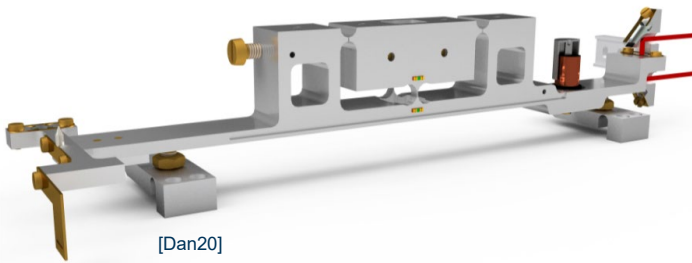
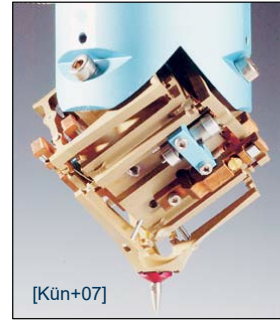
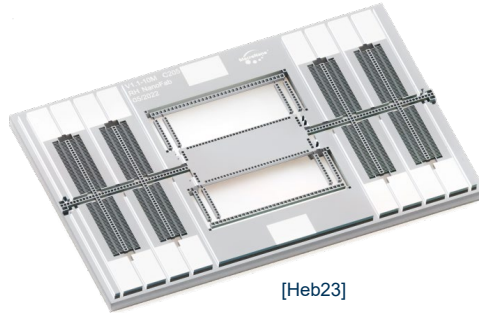
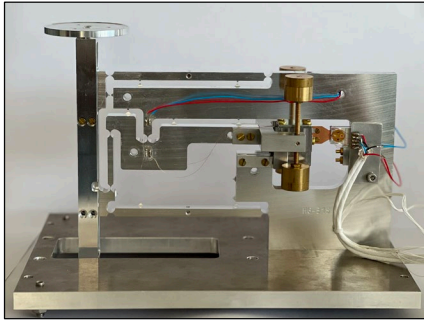
2. Stand der Technik

Absolute Massebestimmung – Planck-Erweiterung / Velocity Mode



2. Stand der Technik

Mechanismen mit konzentrierten Nachgiebigkeiten



Vorteile:

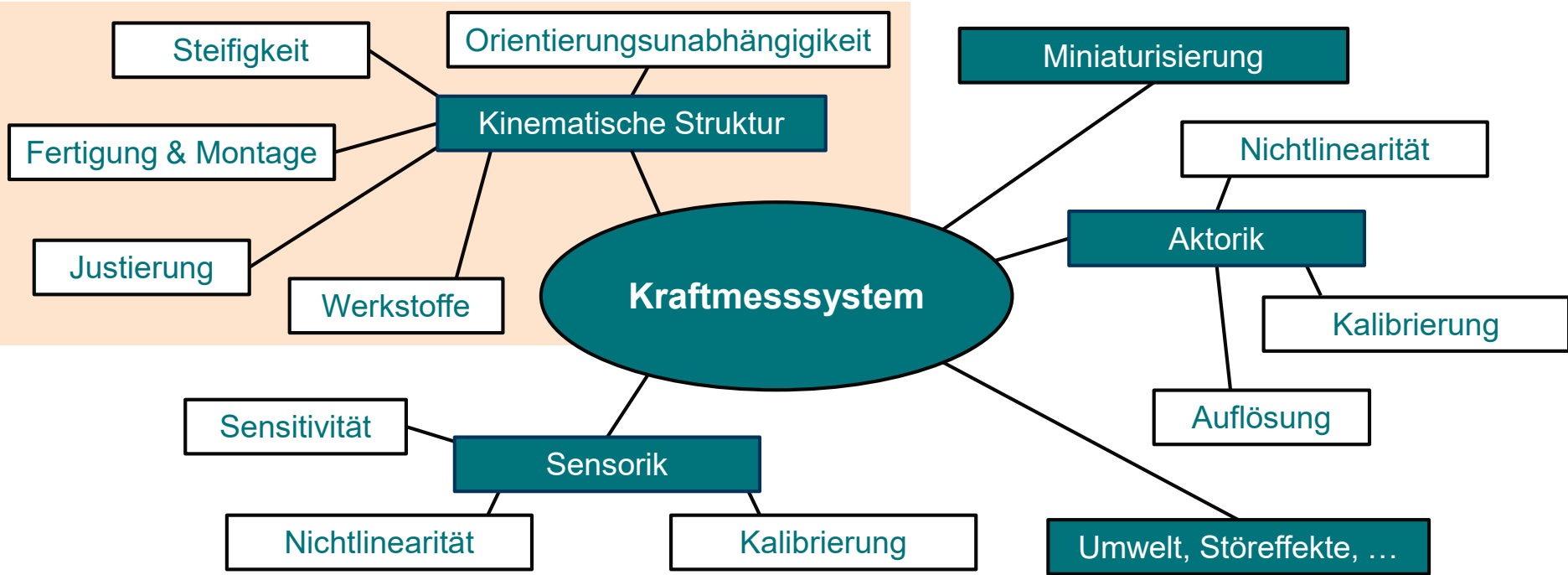
- Reproduzierbarkeit
- Spielfreiheit
- Festkörperreibung
- Vakuumtauglichkeit
- Verschleißfreiheit
- Miniaturisierbarkeit

Nachteile:

- Rückstellkräfte
- Bewegungsbereich
- Fertigungsabweichungen
- Materialeinflüsse
- Schwingungsanfälligkeit

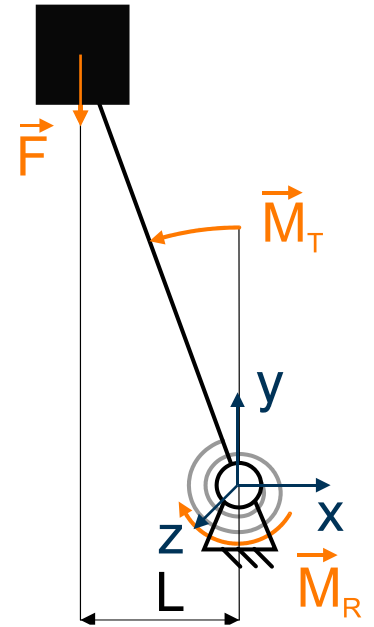
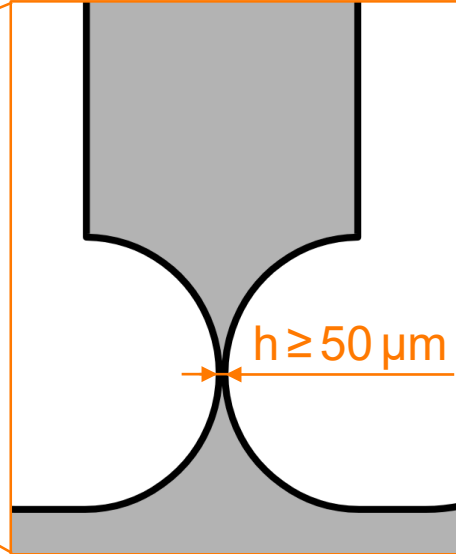
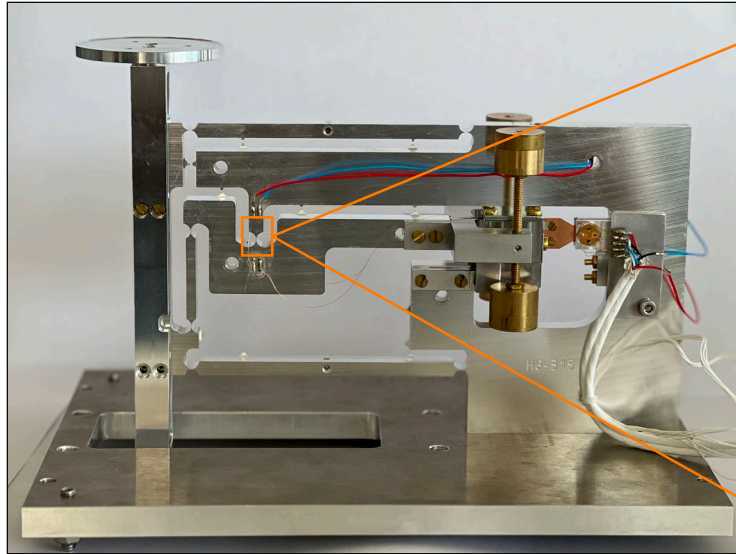
3. Feinwerktechnische Herausforderungen

Aspekte bei der Sensorentwicklung



3. Feinwerktechnische Herausforderungen

Kompensation der vorhandenen Reststeifigkeit



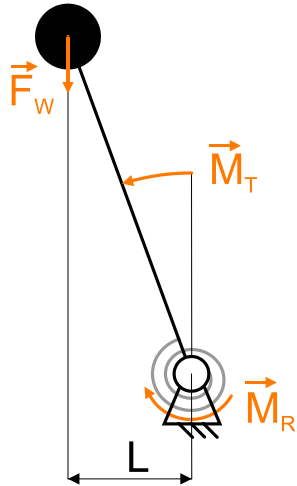
$$M_z: M_T = M_R - F \cdot L$$

- technologiebedingte Reststeifigkeit vorhanden
- Kompensation auf nahezu null notwendig

4. Entwicklungsprozess

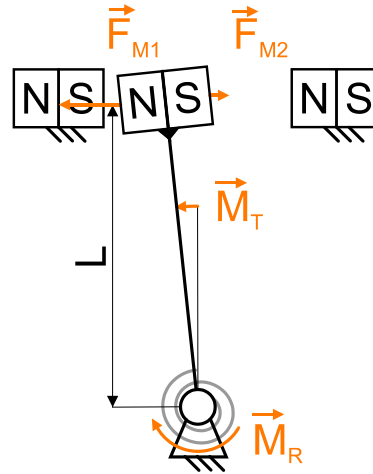
Prinzip der Steifigkeitskompensation

Masse



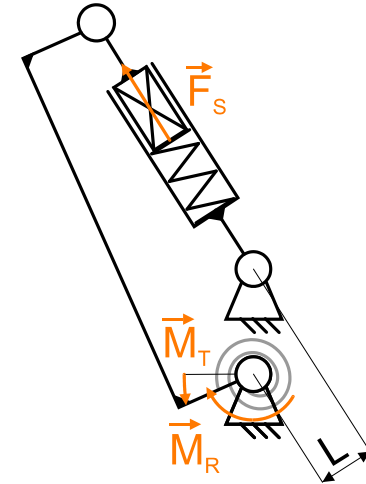
➤ Orientierungsabhängigkeit

Magnet



➤ Störeffekte

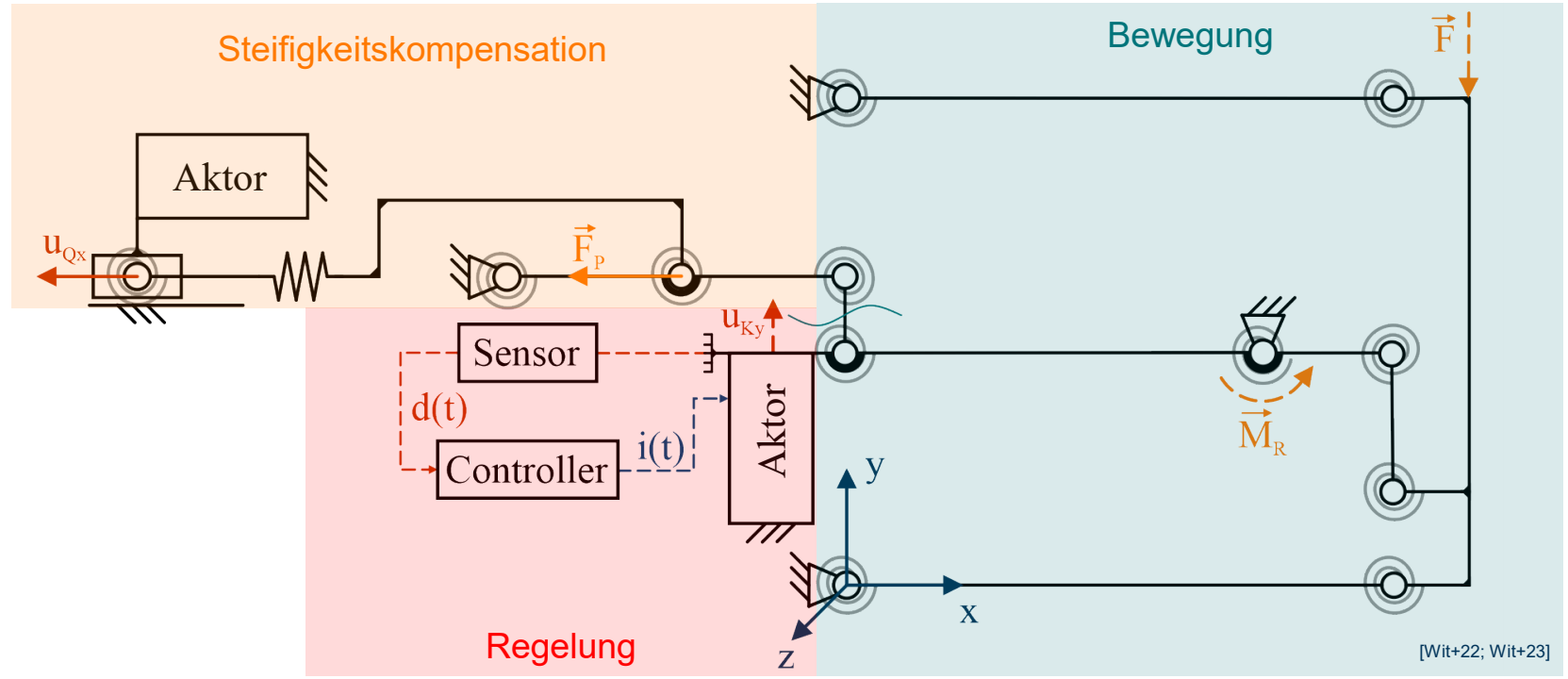
Feder



➤ Weiterbetrachtung

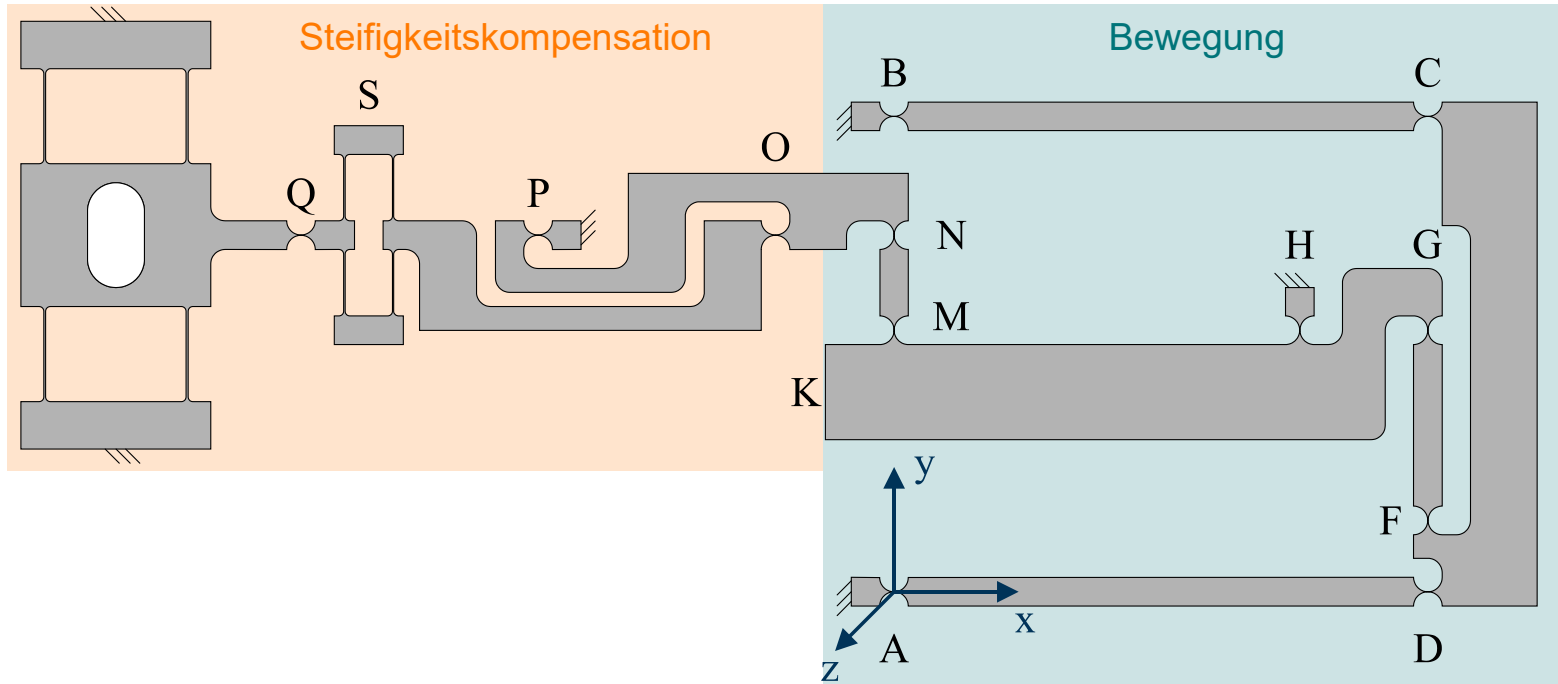
4. Entwicklungsprozess

Federbasierte Steifigkeitskompensation – Funktionsprinzip



4. Entwicklungsprozess

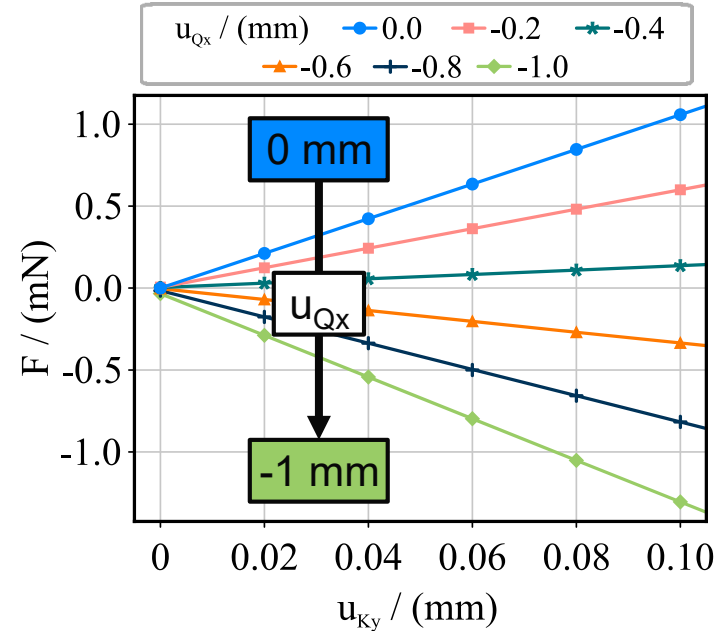
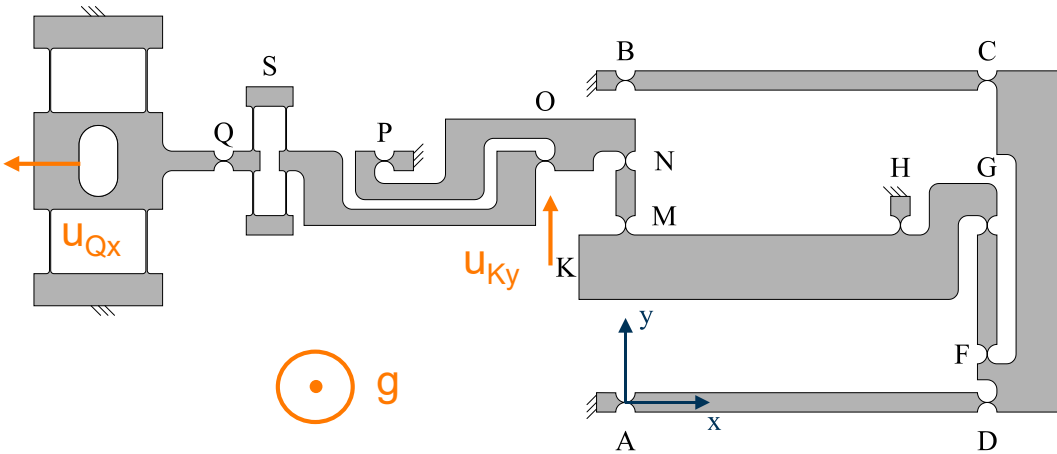
Federbasierte Steifigkeitskompensation – Design



4. Entwicklungsprozess

Numerische Untersuchungen – Kraft-Weg-Diagramm

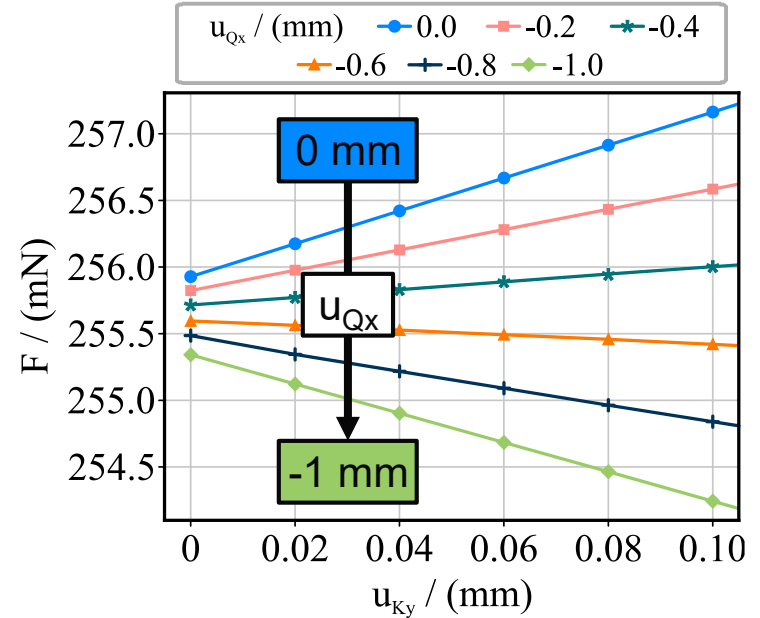
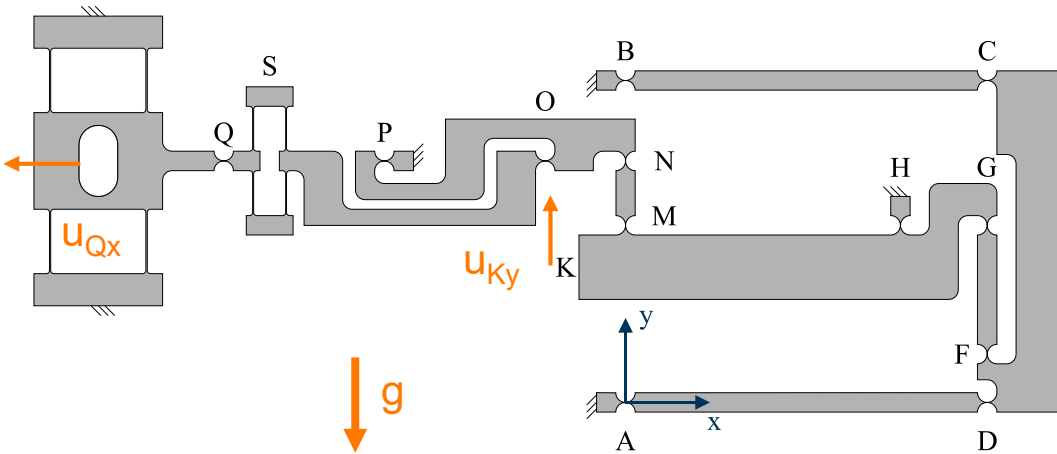
horizontale Ausrichtung



4. Entwicklungsprozess

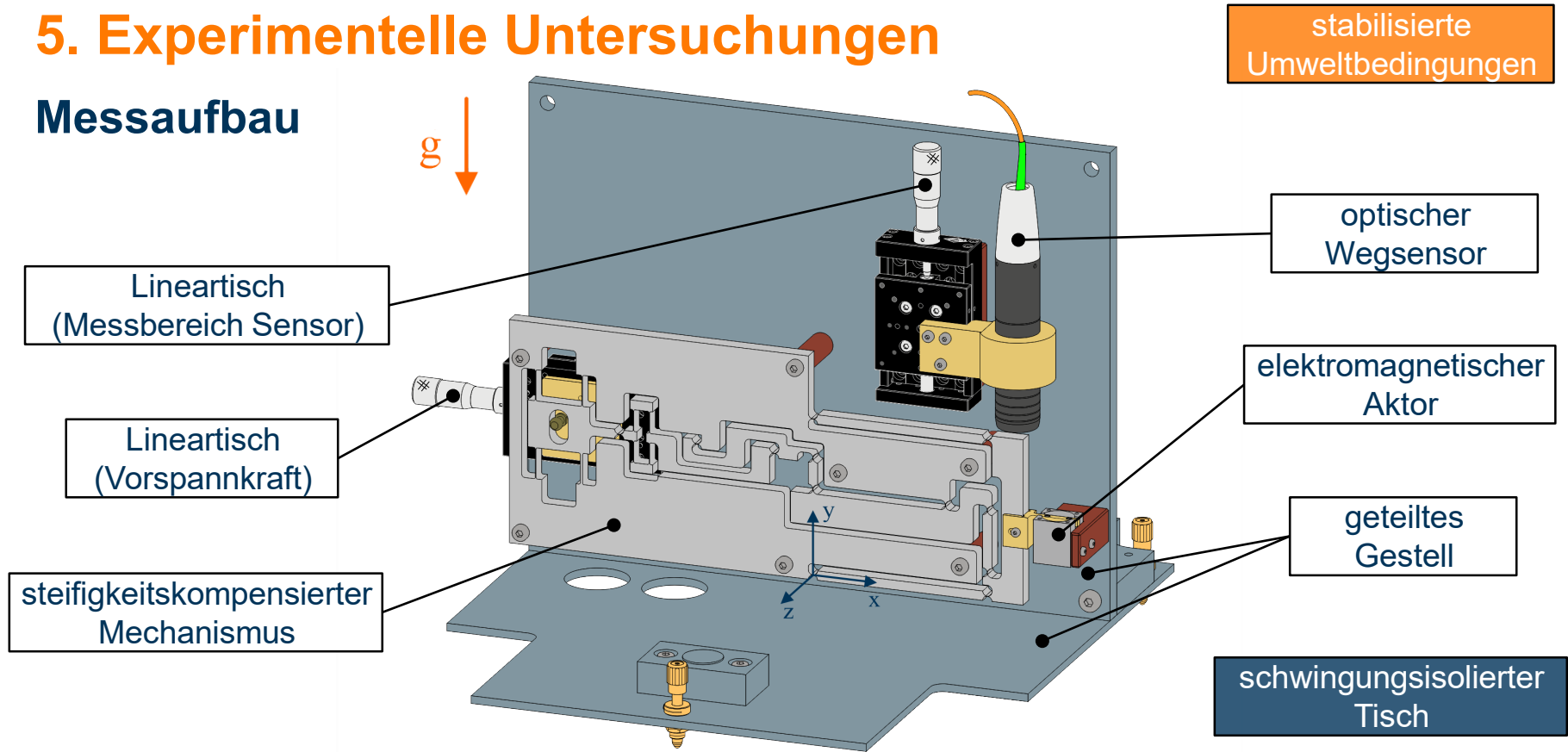
Numerische Untersuchungen – Kraft-Weg-Diagramm

vertikale Ausrichtung



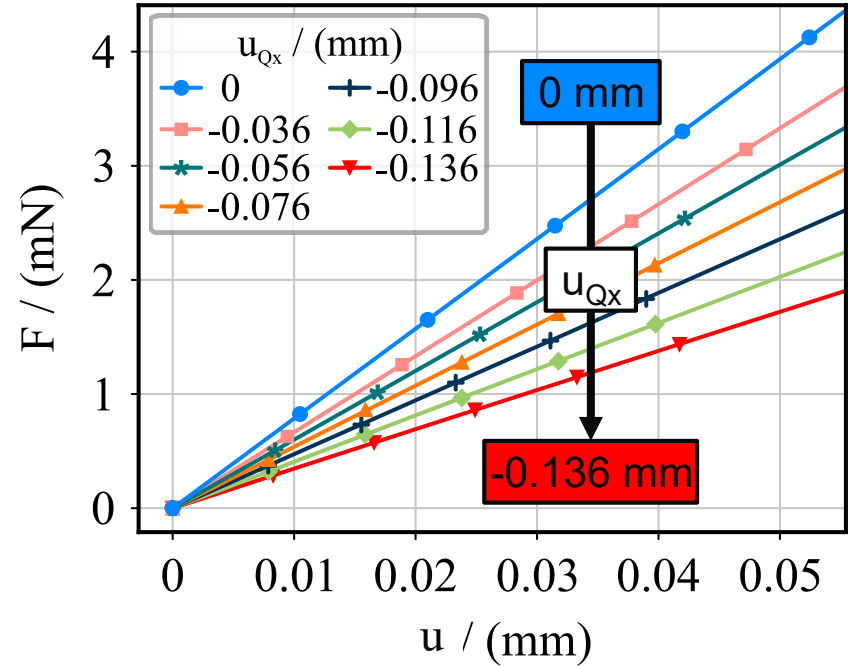
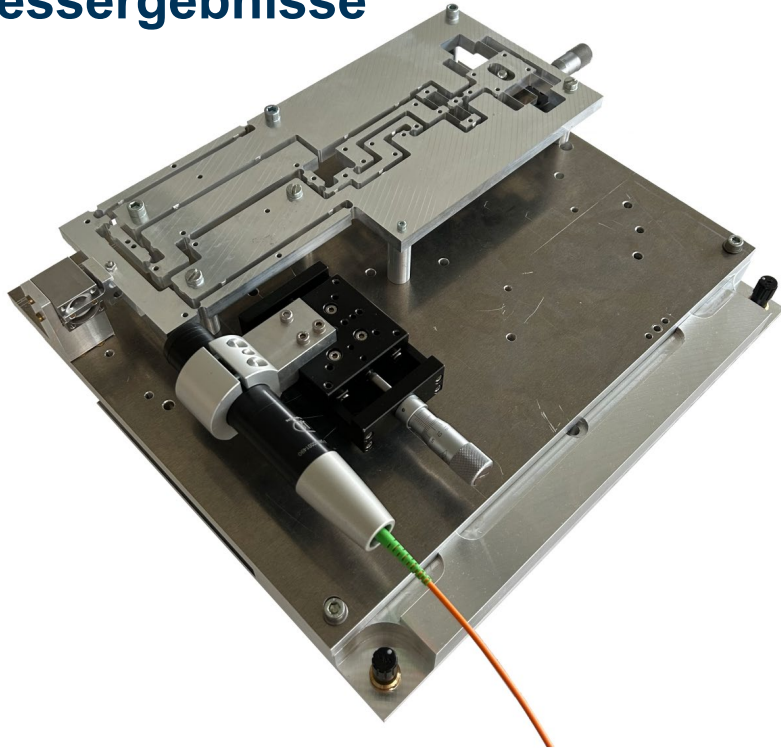
5. Experimentelle Untersuchungen

Messaufbau



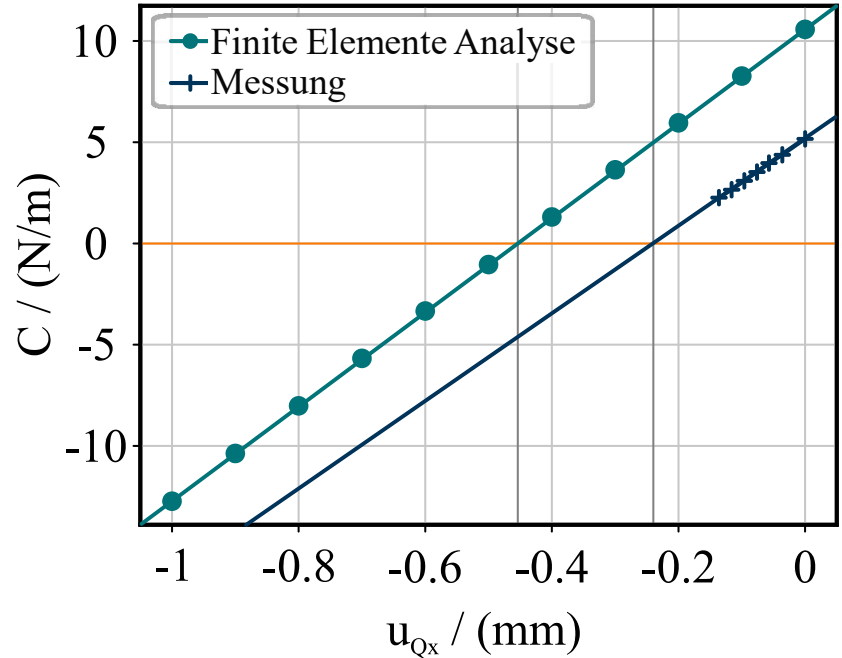
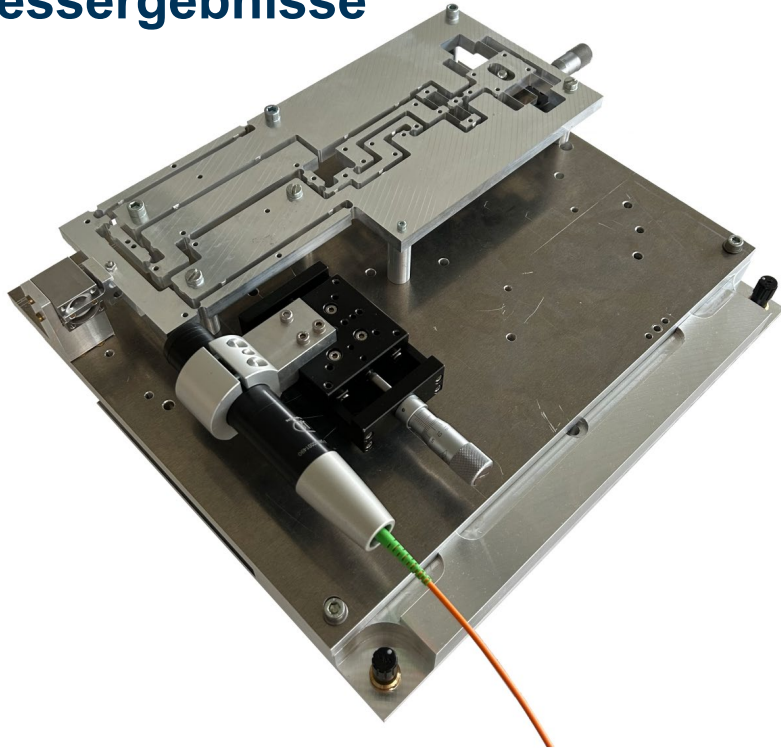
5. Experimentelle Untersuchungen

Messergebnisse



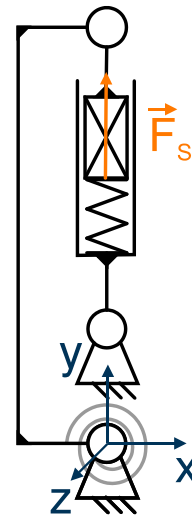
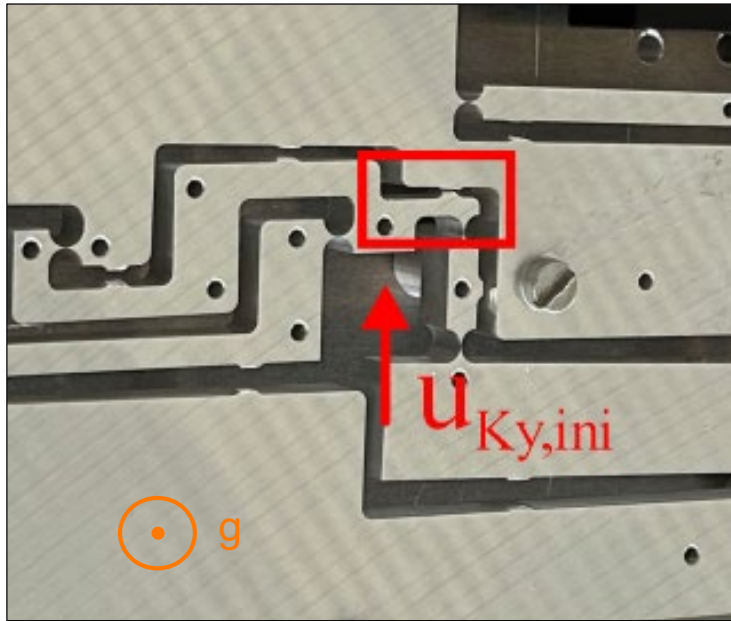
5. Experimentelle Untersuchungen

Messergebnisse

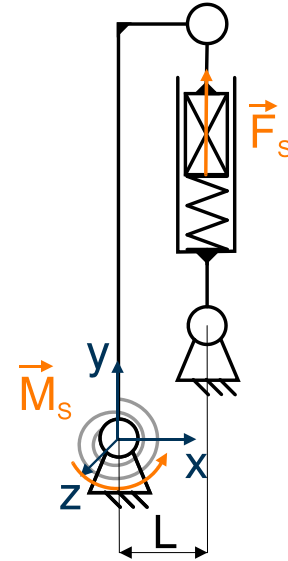


5. Experimentelle Untersuchungen

Feinwerktechnische Herausforderung – Fertigungsabweichungen



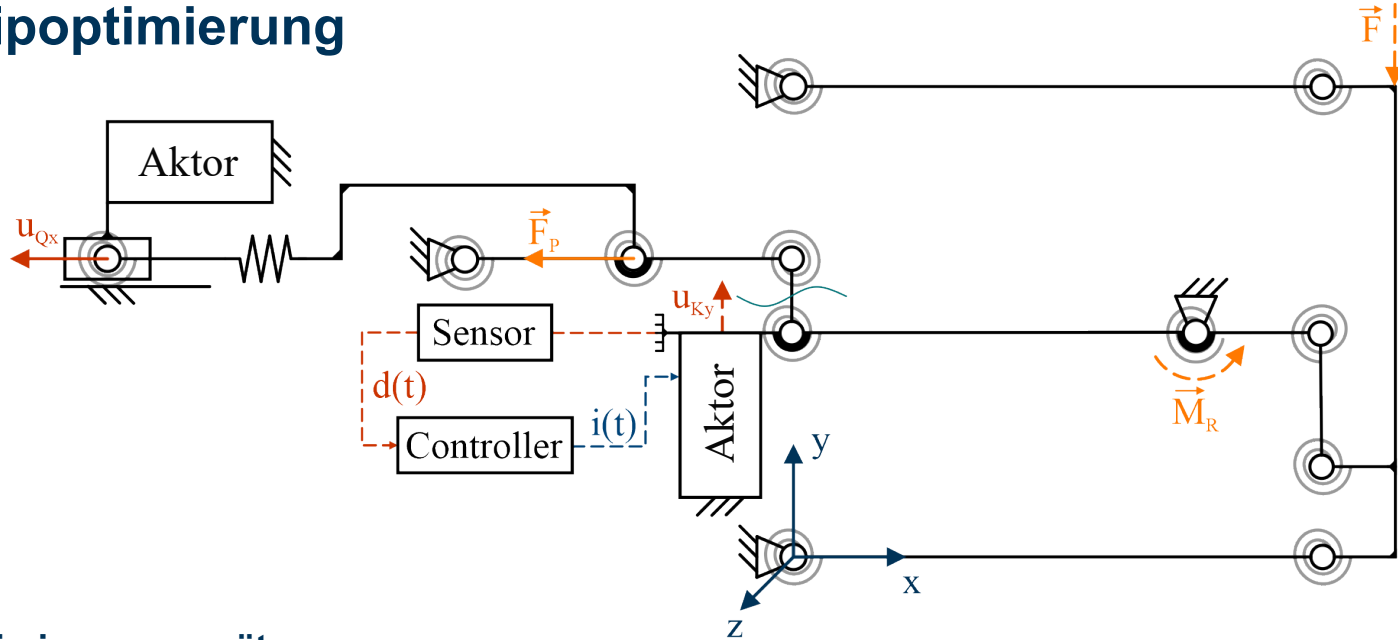
$$M_z: M_S = 0$$



$$M_z: M_S = F_S \cdot L$$

6. Neuartiger Kraftsensor

Prinzipoptimierung



Optimierungsansätze:

kontaktlose Kraft oder Moment ↔ taktile Kraft oder Moment ↔ innozente Anordnung

6. Neuartiger Kraftsensor

Ausgewähltes Prinzip

Eigenschaften:

- Grundstruktur einer Wägezelle mit elektromagnetischer Kraftkompensation
- Kompensation der Steifigkeit durch Mechanismen mit vorgespannten Federelementen
- Doppelanordnung des Kompensationsmechanismus zur aufeinanderfolgenden Justierung von Steifigkeit und initialer Auslenkung
- Rückführbarkeit auf Planck'sches Wirkungsquantum und Lichtgeschwindigkeit durch Planck-Erweiterung
- Umsetzung der kinematischen Struktur als nachgiebiger Mechanismus

Zielgrößen:

- Messbereich > 10 mN
- Auflösung < 100 pN
- Messunsicherheit < 1 μ N
- Bauraum < 100 mm x 100 mm x 100 mm

7. Zusammenfassung und Ausblick

Entwicklungsprozess

- wachsender Bedarf an Lösungen für hochpräzise rückführbare Kraftmessungen
- Neudefinition der SI-Einheit Kilogramm und Verbesserung der Rückführbarkeit
- neuartiges Sensorkonzept auf Basis einer EMK-Wägezelle mit orientierungsunabhängiger Steifigkeitskompensation
- theoretische und experimentelle Untersuchungen bestätigen Arbeitsprinzip
- Einschränkung der Funktion durch den Einfluss von Fertigungsabweichungen
- optimiertes Technisches Prinzip

Zukünftige Arbeiten

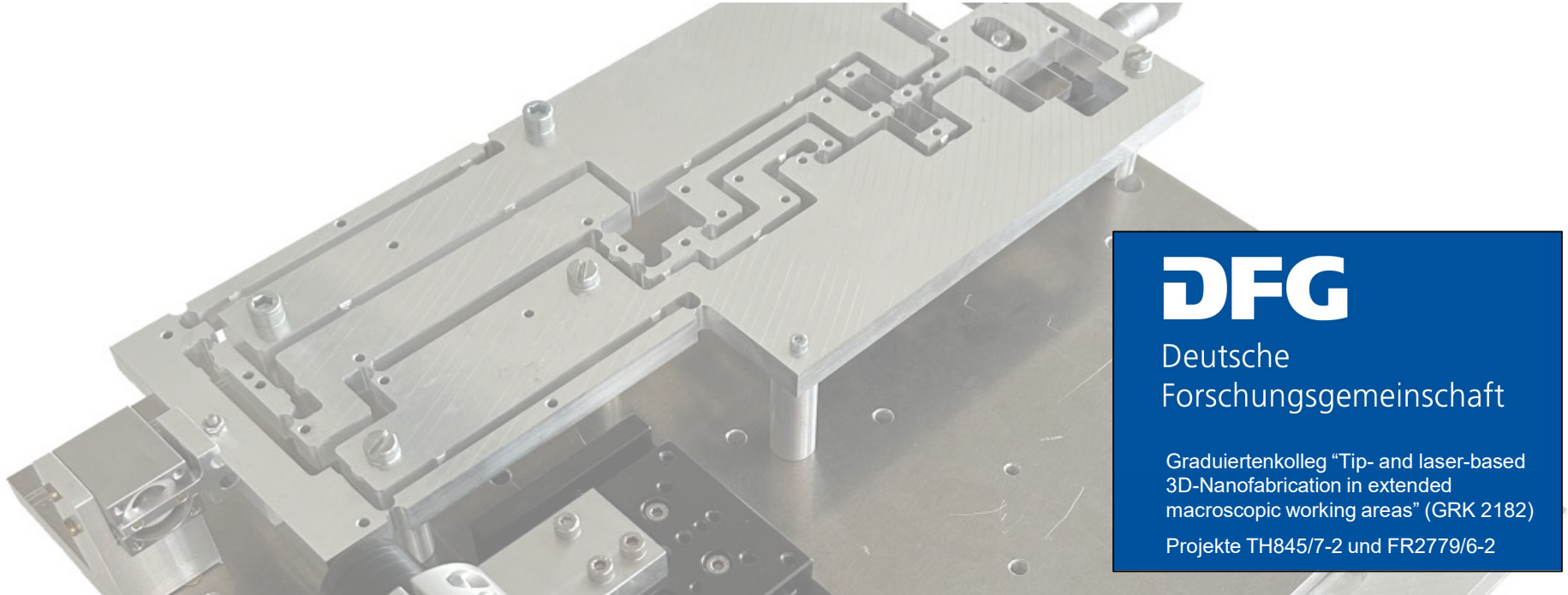
- Gestaltung der kinematischen Struktur als nachgiebiger Mechanismus
- Dimensionierung und Integration aller notwendigen Komponenten
- Fertigung, Montage und Inbetriebnahme des ersten Prototyps
- experimentelle Untersuchung des Justierkonzepts in verschiedenen Raumlagen
- Integration in eine Zielanwendung z.B. Nanofabrikationsmaschine

Quellen

- [Bec+08] Becker, P.; Nicolaus, A. (2008): Hat das Urkilogramm bald ausgedient? In: Phys. Unserer Zeit 39, S. 164–165.
- [Bec+16] Becker, P.; Bettin, H. (2016): Atome zählen für Masse und Stoffmenge. In: PTB-Mitteilungen 126.2: Experimente für das neue Internationale Einheitensystem (SI), S. 63–77.
- [Dan20] Dannberg O. (2020): Entwicklung eines Prüfstandes zur rückführbaren Kalibrierung von Cantilevern. Dissertation, Ilmenau.
- [Lei+24] Leineweber, J.; Hebenstreit, R.; Häcker, A.-V.; Meyer, C.; Füßl, R.; Manske, E.; Theska, R. (2024): Charakterisierung eines parallelkinematisch aktuierten In-situ Referenzmesssystems für 5D-Nanomess- und Fabrikationsanwendungen. In: tm – Technisches Messen 91 (2), S. 102-155. doi: 10.1515/teme-2023-0109
- [Li+15] Li, Z.; Zhang, Z.; He, Q.; Han, B.; Lu, Y.; Xu, J.; Li, S.; Li, C.; Wang, G.; Zeng, T.; Bai, Y. (2015): The Improvement of Joule Balance NIM-1 and the Design of New Joule Balance NIM-2. In: IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 64, doi: 10.1109/TIM.2015.2395552.
- [Kün+07] Küng, A.; Meli, F.; Thalmann, R. (2007): Ultraprecision micro-CMM using a low force 3D touch probe. In: Measurement science and technology 18, S. 319–327, doi: 10.1088/0957-0233/18/2/S01
- [Har16] Harfensteller, F. (2016): Konstruktion und Untersuchung eines räumlichen Applikationsbeispiels für monolithische Mechanismen mit konzentrierter Nachgiebigkeit zur Realisierung von hochpräzisen Bewegungen. Masterarbeit, Ilmenau.
- [Heb23] Hebenstreit, R.; Oertel, E.; Thier, D.; Manske, E.; Theska, R. (2023): Investigating the kinematic performance of a positioning device with subatomic resolution. Präsentation bei: 23rd international conference of the european society for precision engineering and nanotechnology (euspen). https://www.researchgate.net/publication/371857091_investigating_the_kinematic_performance_of_a_positioning_device_with_subatomic_resolution (Besucht: 21.06.2024)
- [NIST23] National Institute of Standards and Technology: Kilogram: The Past. <https://www.nist.gov/si-redefinition/kilogram/kilogram-past> (Besucht: 06.03.2023)
- [Pab24] Pabst, M. (2024): Planck Extension for a Prototype Vacuum Mass Comparator. Dissertation, Ilmenau.
- [PTB23] Physikalisch-Technische Bundesanstalt: Das Kilogramm - die Einheit der Masse. <https://www.ptb.de/cms/ptb/fachabteilungen/abt1/fb-11/ag-111/das-kilogramm-die-einheit-der-masse.html#c14861> (Besucht: 07.03.2023)
- [PTB24] Physikalisch-Technische Bundesanstalt: Das Kilogramm. <https://www.ptb.de/cms/forschung-entwicklung/forschung-zum-neuen-si/countdown-zum-neuen-si/das-kilogramm.html> (Besucht: 13.03.2024)
- [Sch+19] Schlamminger, S.; Haddad, D. (2019): The Kibble balance and the kilogram, Comptes Rendus Physique 20, S. 55–63.
- [Wit+22] Wittke, M.; Torres Melgarejo, M.A.; Theska, R. (2022): Concept of a monolithic stiffness-compensated mechanism for high-resolution force sensors. In: Tagungsband der 21. ITG/GM-Fachtagung Sensoren und Messsysteme, S. 461-464.
- [Wit+23] Wittke, M.; Torres Melgarejo, M. A.; Darnieder, M.; R. Theska (2023): Investigation of a novel monolithic stiffness-compensated mechanism for high-precision load cells. In: Engineering for a changing world: Proceedings: 60th ISC, Ilmenau Scientific Colloquium, Technische Universität Ilmenau, September 04-08, 2023, Ilmenau: ilmedia, doi: 10.22032/dbt.58735.

Kontakt und Förderung

martin.wittke@tu-ilmenau.de | www.tu-ilmenau.de/fwt



DFG

Deutsche
Forschungsgemeinschaft

Graduiertenkolleg "Tip- and laser-based
3D-Nanofabrication in extended
macroscopic working areas" (GRK 2182)
Projekte TH845/7-2 und FR2779/6-2