

Justierung nachgiebiger Mechanismen für Vakuummassekomparatoren - Herausforderungen und Ziele

M. Darnieder¹, M. Wittke¹, M. Pabst², T. Fröhlich², R. Theska¹

Technische Universität Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau,

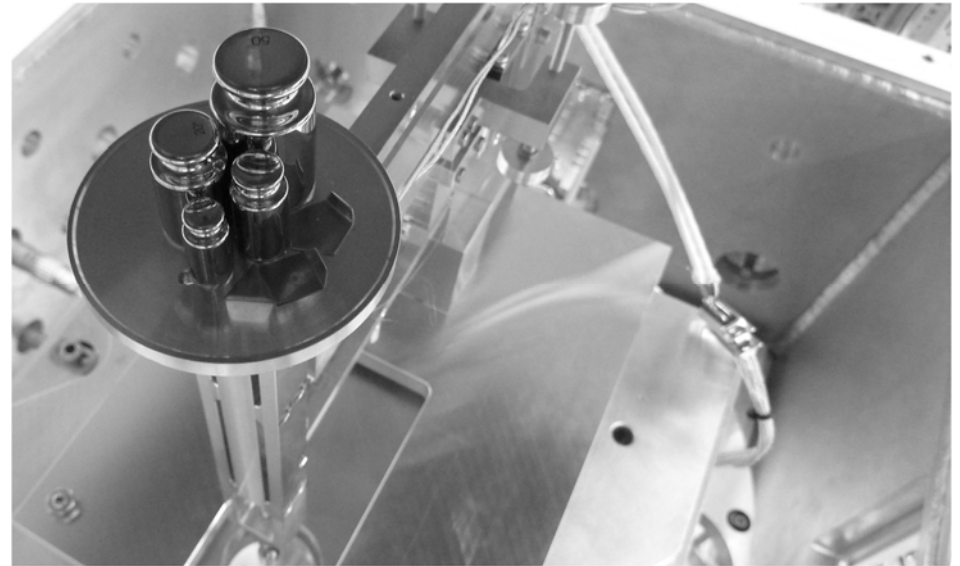
¹ – Fachgebiet Feinwerktechnik, ² – Fachgebiet Prozessmesstechnik

14. Tagung: *Feinwerktechnische Konstruktion*

Deutsche Gesellschaft für Feinwerktechnik e.V.

Online - Tagung

11. November 2021

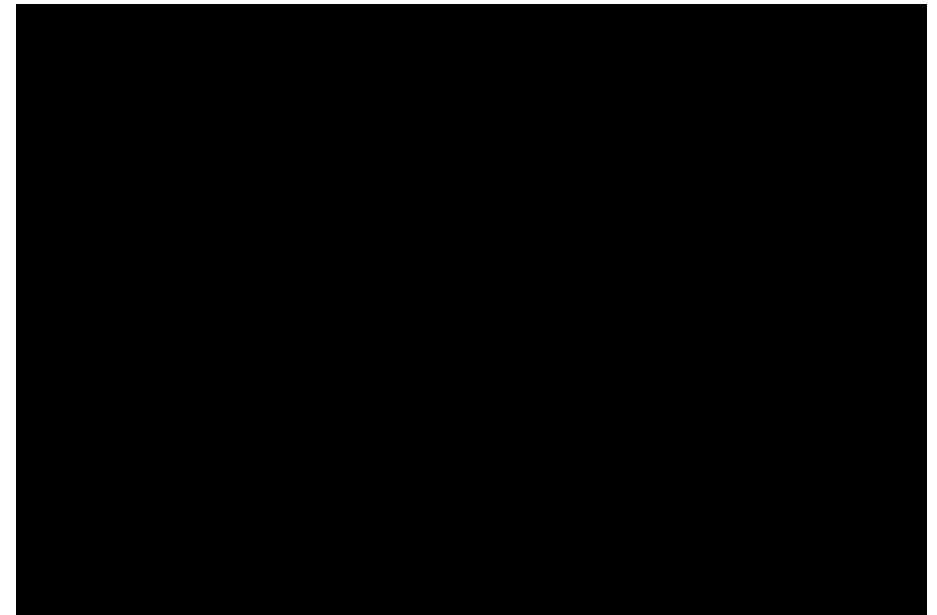


Einleitung

Inhalt

$$u(\Delta m) = 5 \times 10^{-12}$$

- (1) Einleitung und Ziele
- (2) Feinwerktechnische Herausforderungen
- (3) Zusammenfassung und Ausblick



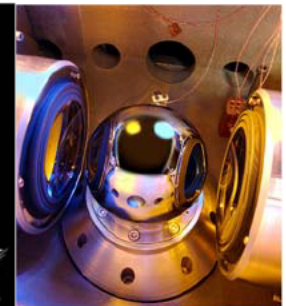
Einleitung

Funktion und Aufbau Massekomparator

- Weitergabe der Einheit *Kilogramm*
- *Rückführbarkeit* von Messungen sicherstellen
- Vervielfältigung von hochgenauen Primärnormalen für die praktische Anwendung



[Gläser 2009]



[Becker et al. 2009]



[www01]

Einleitung

Funktion und Aufbau Massekomparator

- Sartorius CCL1007
- Mettler-Toledo *M_one*
- Auflösung: 0,1 µg
1 x 10⁻¹⁰ kg
- Standardabw.: 0,2 - 0,3 µg
- vakuumdichte Einhausung
- automatische Lastwechselvorrichtung mit Magazin (evtl. Vakuumtransfereinheit)



[www02]

Einleitung

Anwendung Nachgiebiger Mechanismen in der Metrologie

- + Spielfreiheit
- + wiederholbare Bewegungsbahn
- + geringe Reibung, Hysterese
- + vakuumtauglich

- elastische Verformung - Rückstellkräfte
- eingeschränkter Lastbereich
- Eigenspannung
- Einfluss von Fertigungsabweichungen



[www03]



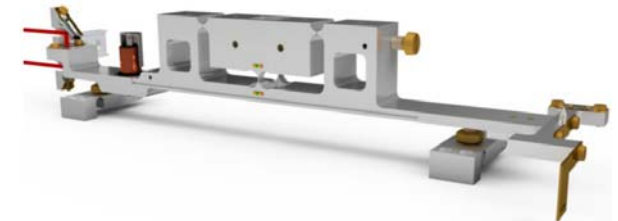
[Theska et al. 2019]



[Meli et al. 2005]



[www04]

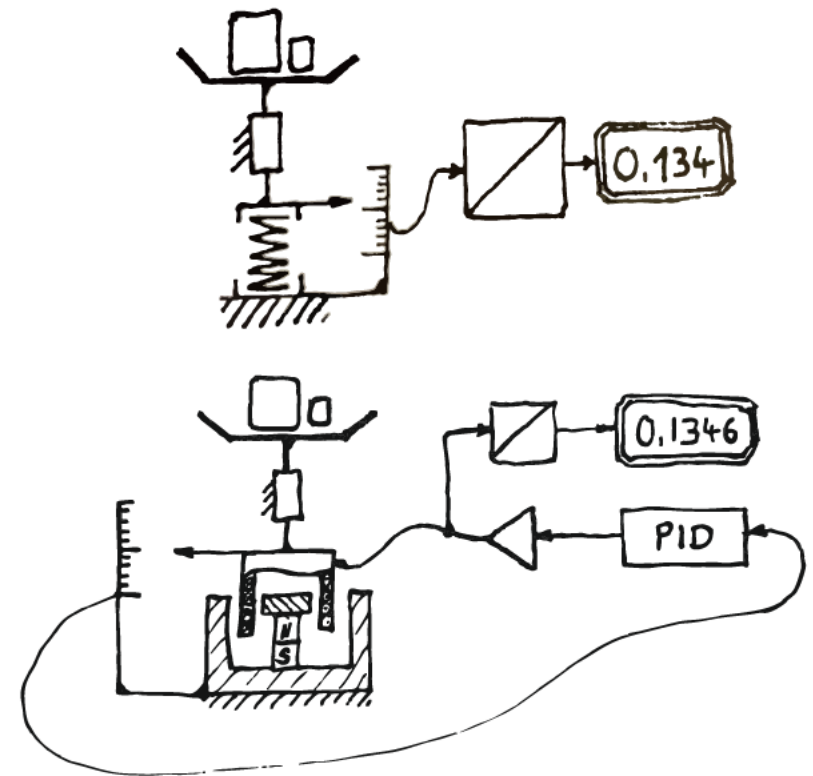


[Dannberg et al. 2020]

Einleitung

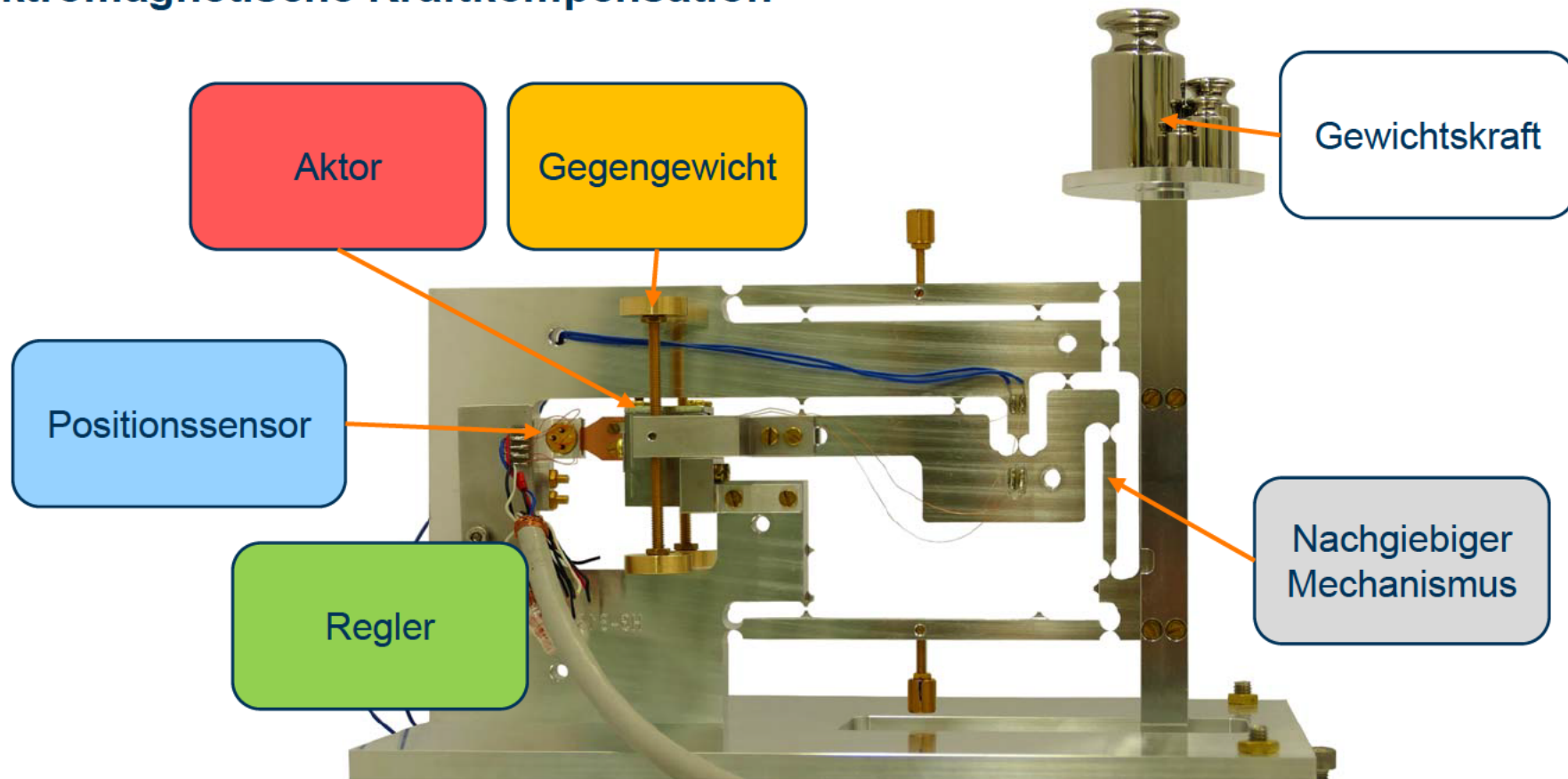
Elektromagnetische Kraftkompensation

- Sensorprinzip:
 - Ausschlagverfahren
 - **Kompensationsverfahren**
- Kompensationskraft durch elektromagnetische Kraft
- geschlossener Regelkreis mit Positionssensor



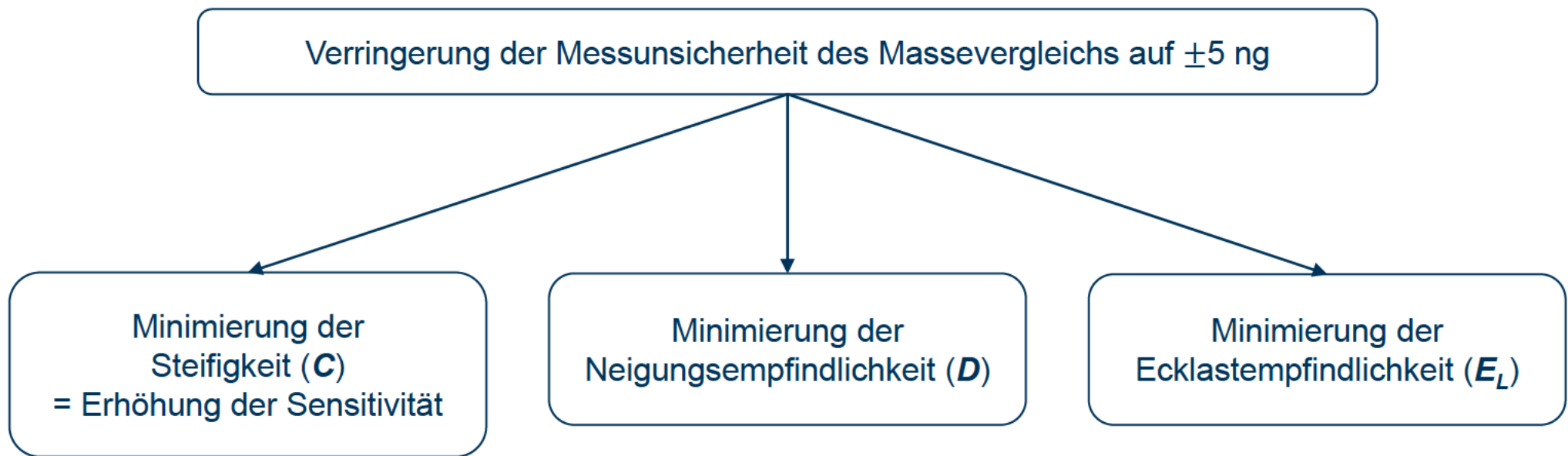
Einleitung

Elektromagnetische Kraftkompensation



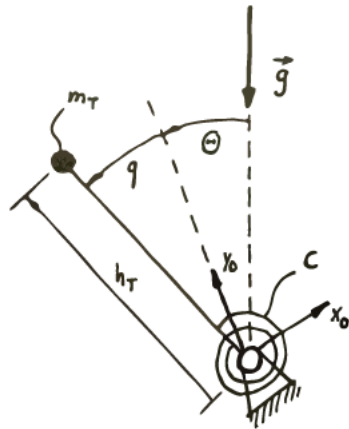
Einleitung

Ziele



Feinwerktechnische Herausforderungen

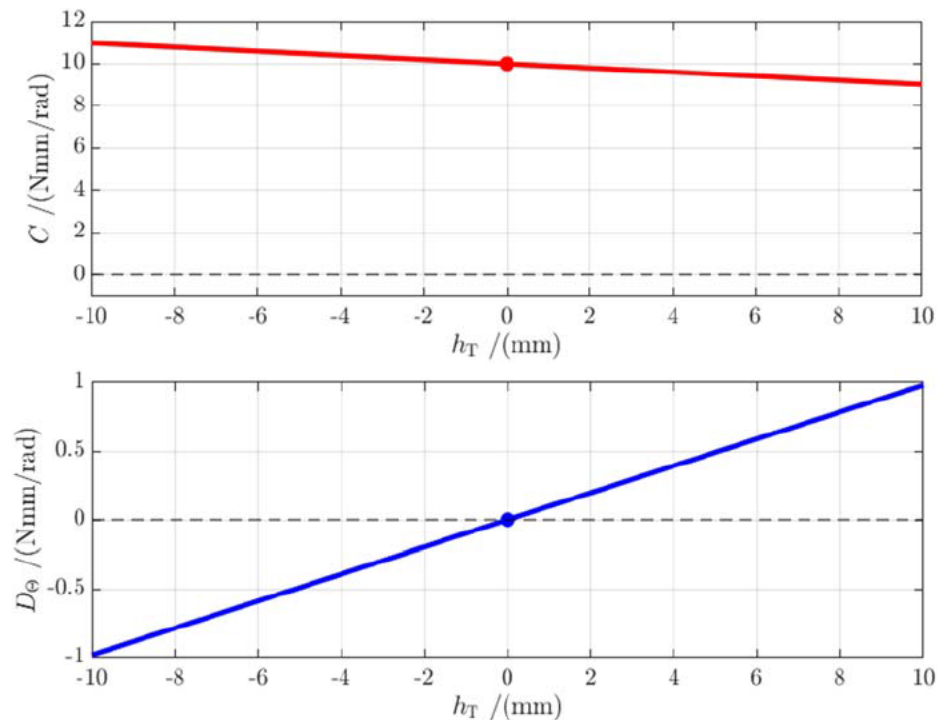
Justierung



Einfluss auf die Systemeigenschaften:

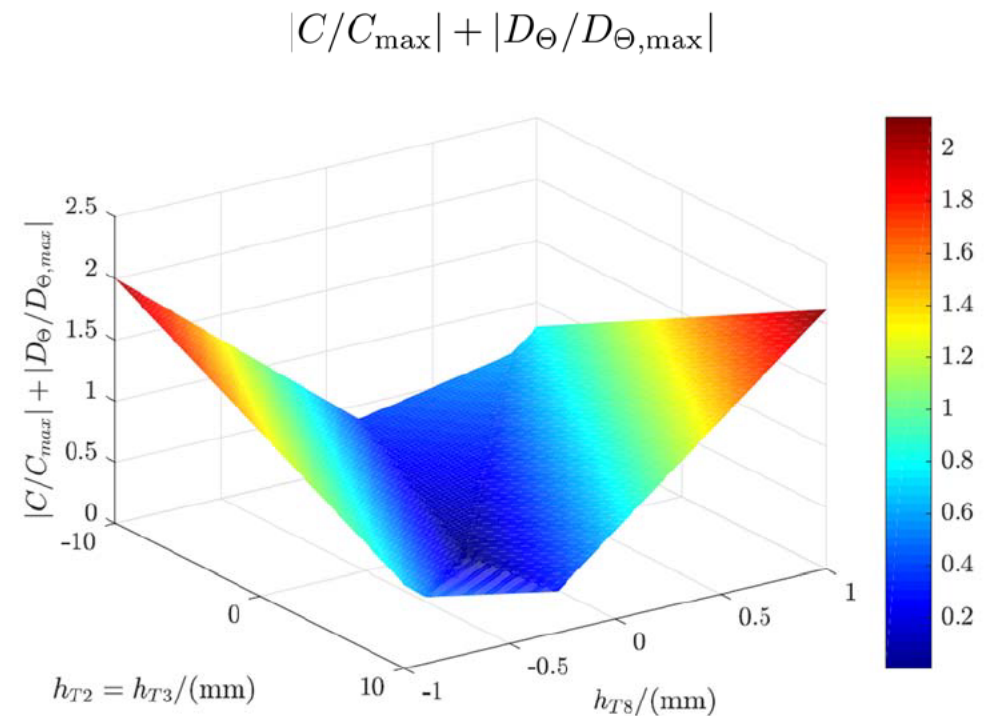
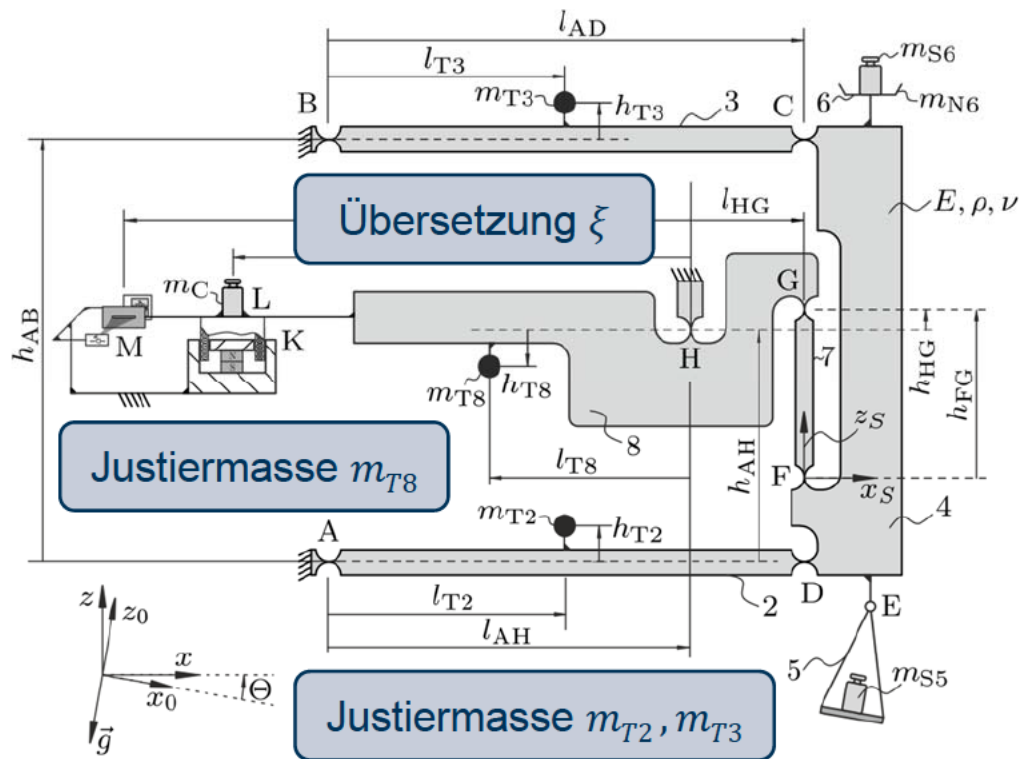
$$\frac{\delta^2 U}{\delta^2 q}(\Theta = 0) = C_T = -m_T g h_T \quad /(\text{Nmm/rad}) \quad \bullet$$

$$\frac{\delta^2 U}{\delta^2 q}(q = 0) = D_T = m_T g h_T \quad /(\text{Nmm/rad}) \quad \bullet$$



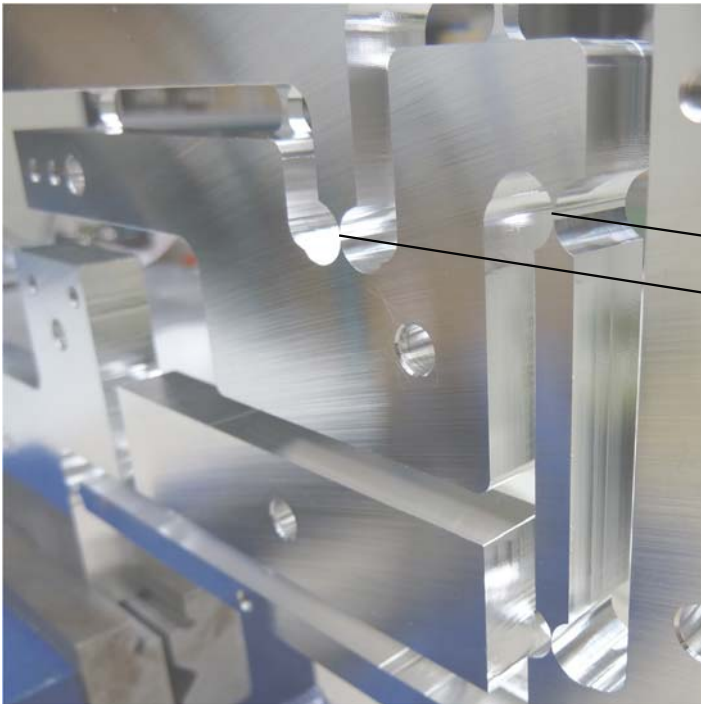
Feinwerktechnische Herausforderungen

Justierung



Feinwerktechnische Herausforderungen

Justierung – Kompensation der Steifigkeit - Astasierung



$$h_{\text{HG}}^* = \frac{C_0 l_{\text{HG}}}{m_{\text{S}} g}$$

Parameter:

$$C_0 = 50 \text{ N/m}$$

$$l_{\text{HG}} = 27 \text{ mm}$$

$$m_{\text{S}} = 1000 \text{ g}$$

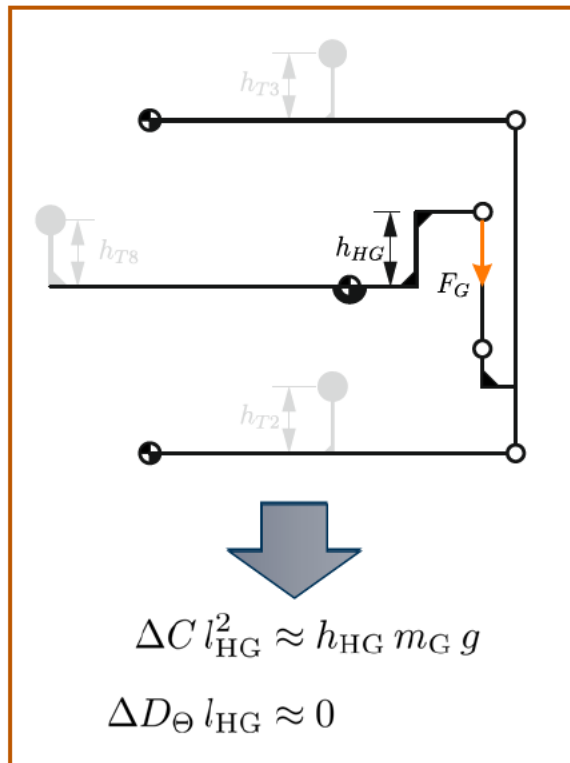
$$g = 9.81 \text{ m/s}^2$$

Astasierung:

$$h_{\text{HG}}^* \approx +3.7 \text{ mm}$$

Feinwerktechnische Herausforderungen

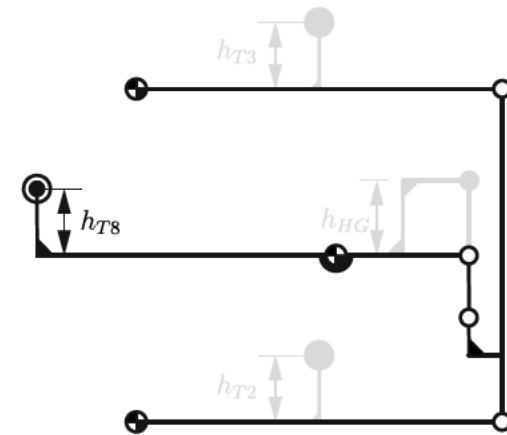
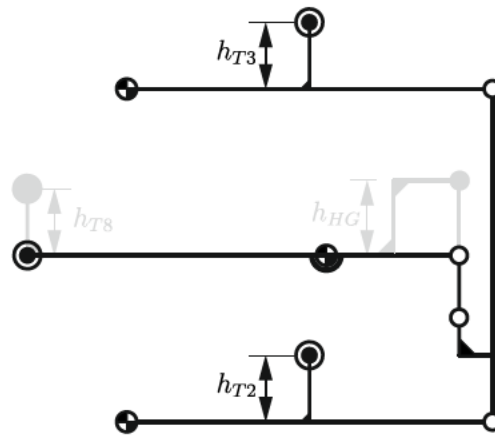
Justierung



$$\Delta C l_{HG}^2 \approx h_{HG} m_G g$$

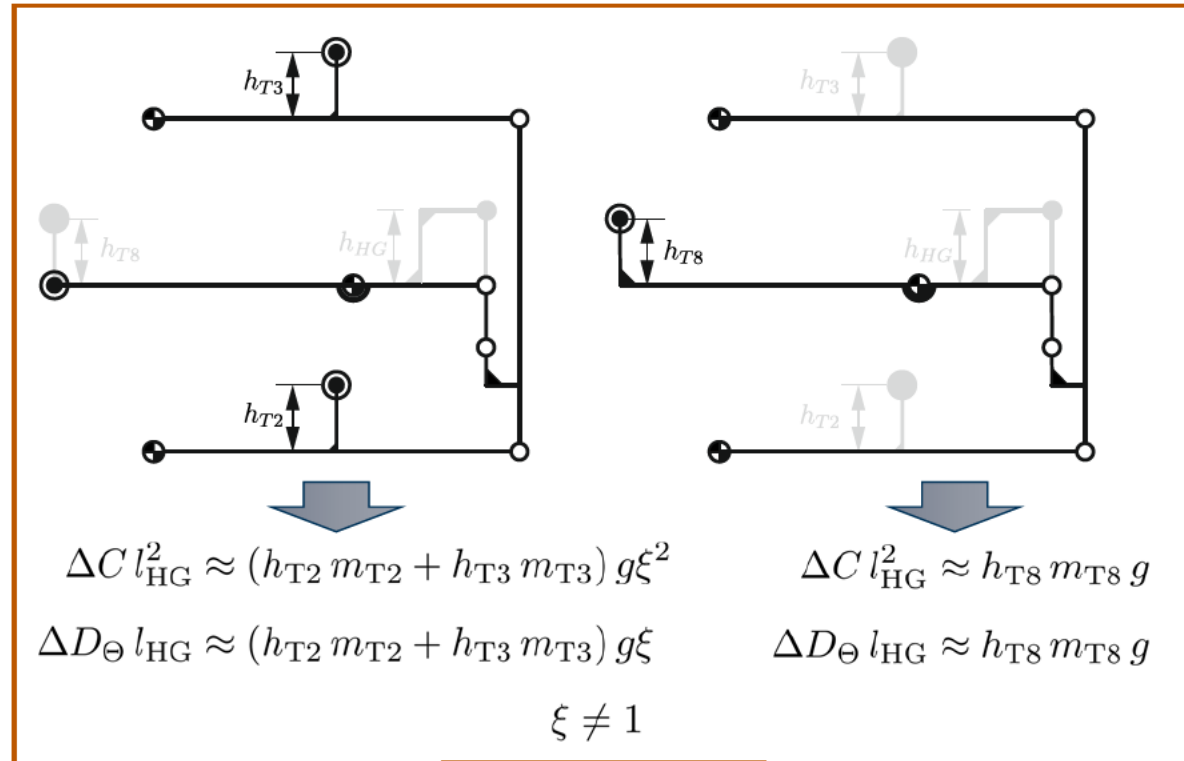
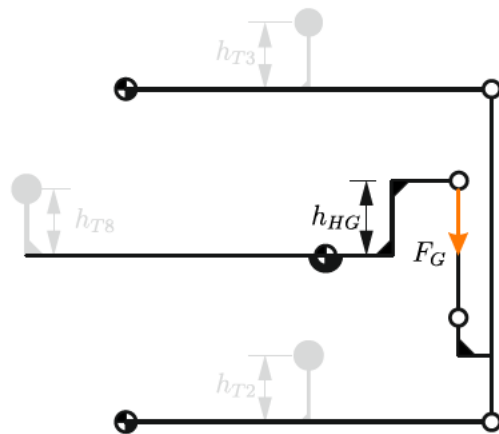
$$\Delta D_{\Theta} l_{HG} \approx 0$$

Astasierung



Feinwerktechnische Herausforderungen

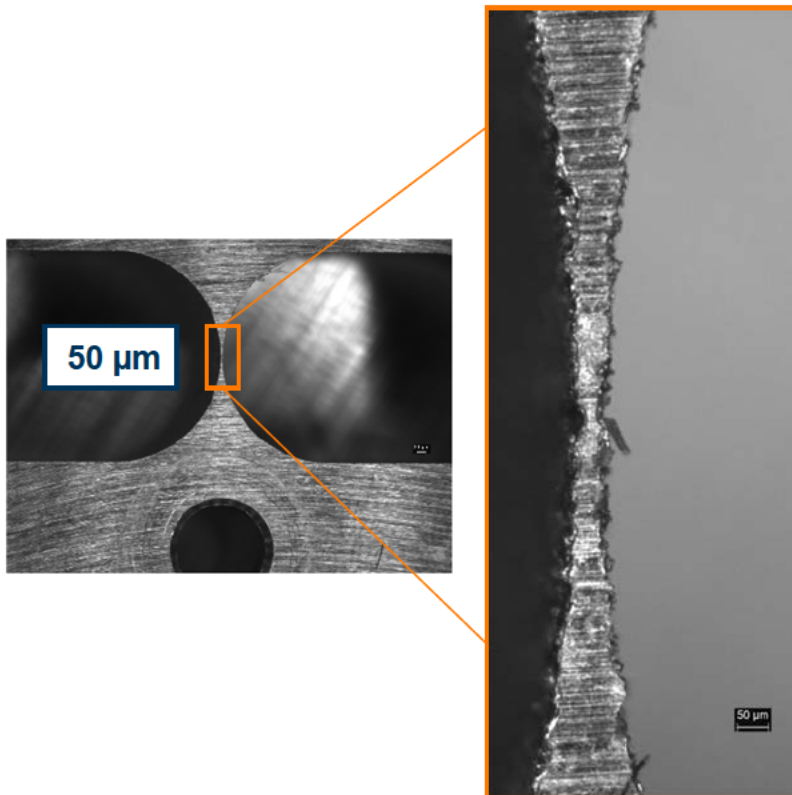
Justierung



Feinjustierung

Feinwerktechnische Herausforderungen

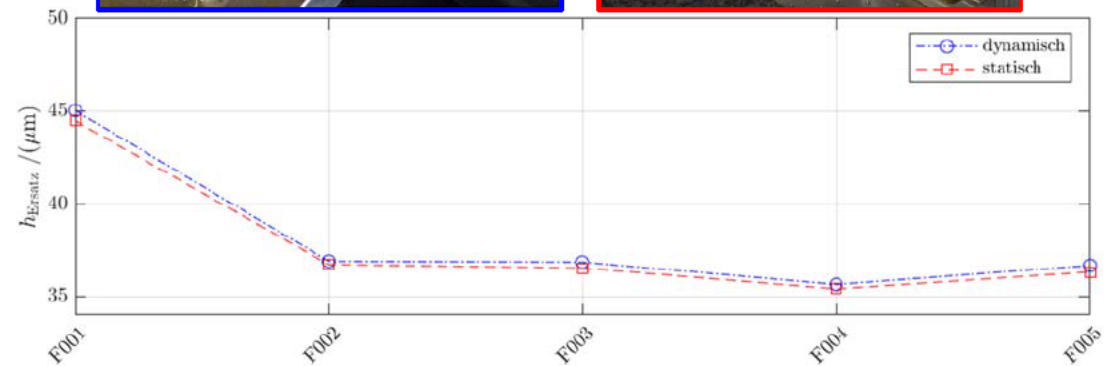
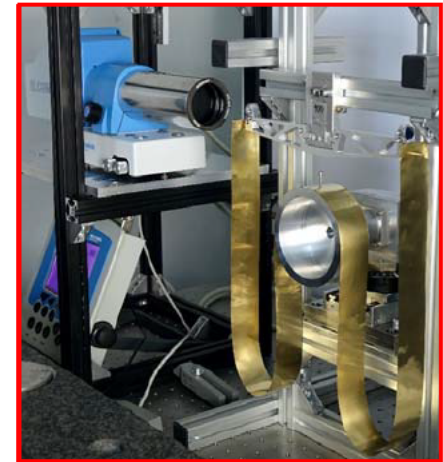
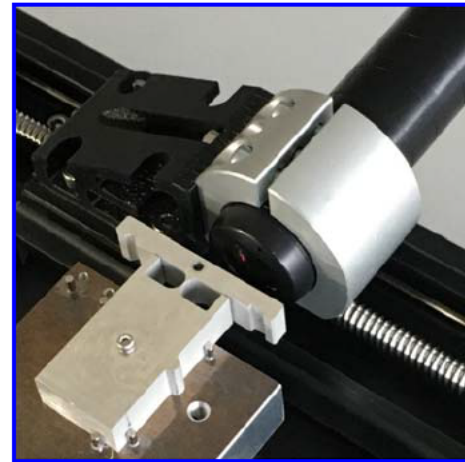
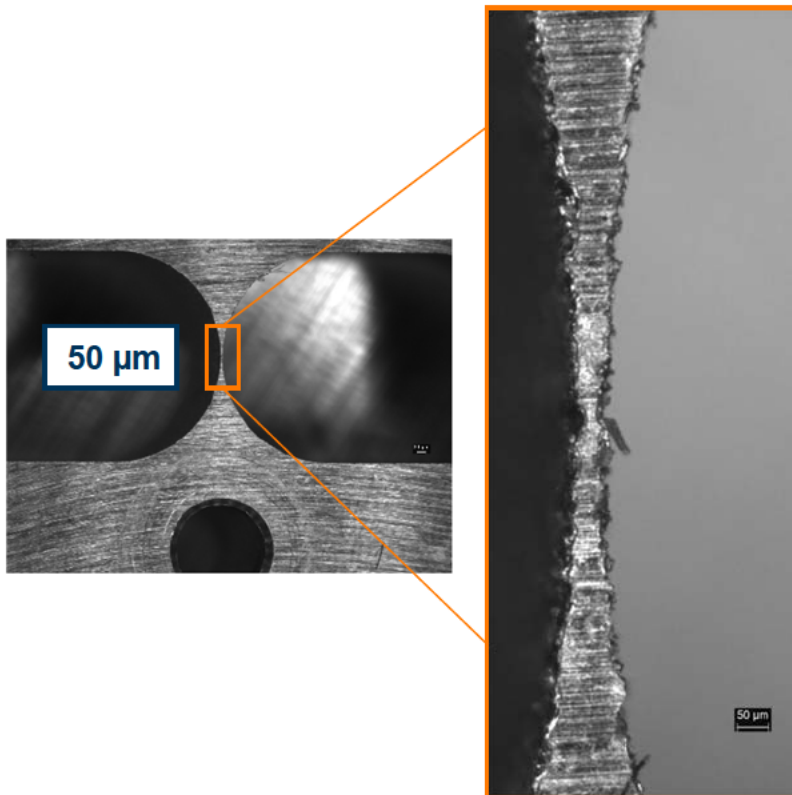
Fertigungsabweichungen Festkörpergelenke



- quasi-statische Messung
- dynamische Bestimmung durch erste Eigenfrequenz
- Messung mit Koordinatenmessgerät
- Oberflächentopografie mittels Weißlichtinterferenzmikroskop
- numerische Modelle (Balkentheorie, FEM)

Feinwerktechnische Herausforderungen

Fertigungsabweichungen Festkörpergelenke



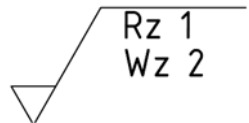
Feinwerktechnische Herausforderungen

Berücksichtigung der Fertigungsabweichungen bei der Konstruktion

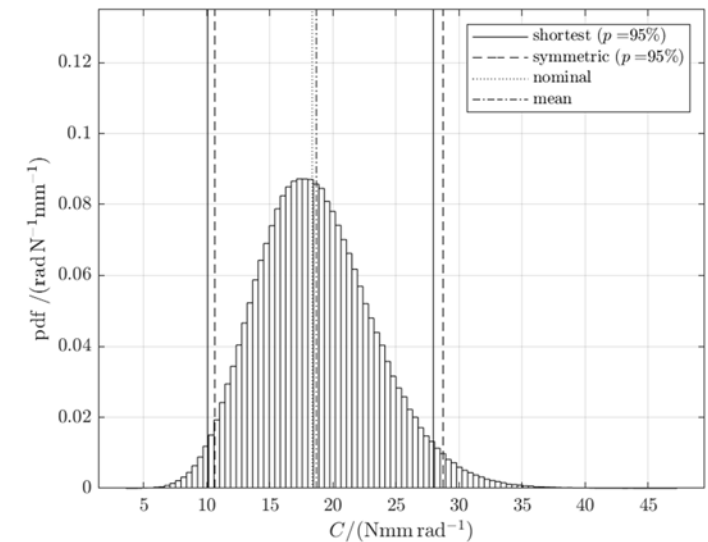
Monte-Carlo Simulation (GUM supplement 1)



$E, \nu, \rho, R_{p0,2}$

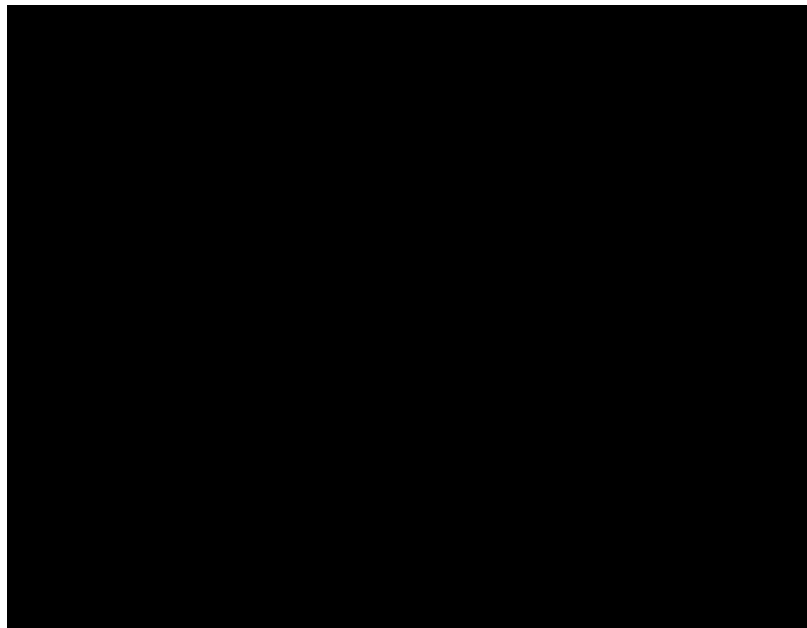


$$C = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$



Feinwerktechnische Herausforderungen

In-vacuo Justierung von Steifigkeit und Neigungsempfindlichkeit



- manuelle Grobjustierung unter atmosphärischen Bedingungen
- Feinjustierung von Steifigkeit und Neigungsempfindlichkeit im Vakuum
- Abnehmbare Justiervorrichtung
- Querempfindlichkeiten der Wägezelle stark reduziert

Zusammenfassung und Ausblick

- ✓ Entwicklung drei Prototypen
 - ✓ Experimentelle Untersuchung
 - ✓ Messung und Qualifizierung von extrem dünnen Festkörpergelenken
 - ✓ Quasi-unabhängigen Justierung von Steifigkeit und Neigungsempfindlichkeit
 - ✓ Kompensation von Fertigungsabweichungen und Feinjustierung der Steifigkeit
-

- Experimentelle Untersuchung von Prototyp #3
- Überprüfung der mechanischen Modellbildung und Ermittlung der Systemparameter

Quellenangaben

- [Gläser et al. 2009] Gläser, M.; Borys, M. (2009): Precision mass measurements. In: Rep. Prog. Phys. 72 (12), S. 126101. DOI: 10.1088/0034-4885/72/12/126101.
- [Becker et al. 2009] Becker P. , Friedrich H., Fujii K., Giardini W., Mana G., Picard A., Pohl H.-J., Riemann H. und Valkiers S. The Avogadro constant determination via enriched silicon-28. Measurement Science and Technology 20.9 (2009), S. 092002.
- [Theska et al. 2019] Theska, R.; Zentner, L.; Fröhlich, T.; Weber, C.; Manske, E.; Linß, S. et al. (2019): Compliant Mechanisms for Ultra-precise Applications. In: Andrés Kecskeméthy, Francisco Geu Flores, Eliodoro Carrera und Dante A. Elias (Hg.): Interdisciplinary Applications of Kinematics. Cham: Springer International Publishing (71).
- [Meli 2016] Meli, F.; Küng, A.; Thalmann, R. (2005): Ultrapräzises Koordinatenmessgerät für Mikroteile. In: metINFO 12 (3), S. 4–10, access date: 2020-09-14.
- [Dannberg et al. 2020] Dannberg, O.; Kühnel, M.; Fröhlich, T. (2020): Entwicklung einer Cantileverkalibriereinrichtung. In: tm - Technisches Messen 87 (10), S. 622–629.
- [www01] <https://www.ep-e.com/branchen/kalibrierlaboratorien/> ; access date: 2021-10-30
- [www02] <https://www.ptb.de/cms/ptb/fachabteilungen/abt1/fb-11/ag-111/das-kilogramm-die-einheit-der-masse.html#c14861> ; access date: 2021-10-31
- [www03] https://www.polymedia.ch/wp-content/uploads/2020/04/311-Romann_Bild7-OK.jpg ; access date: 2020-11-22.
- [www04] <https://uscustomer.store.mt.com/medias/> ; access date: 2021-10-30

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung des Forschungsprojektes mit den Fördernummern: TH 845/7-2 und FR 2779/6-2.

Vielen Dank!

maximilian.darnieder@tu-ilmenau.de

Bildnachweis: TU Ilmenau

