

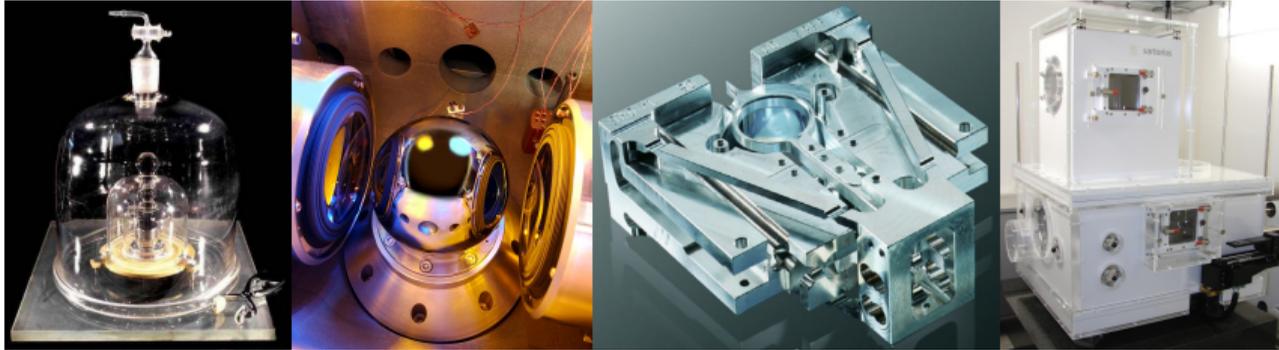
Optimierung monolithischer Mechanismen in der Kraftmess- und Wägetechnik

Maximilian Darnieder

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

DGFT - 11. Tagung *Feinwerktechnische Konstruktion* 21. und 22.09.2017

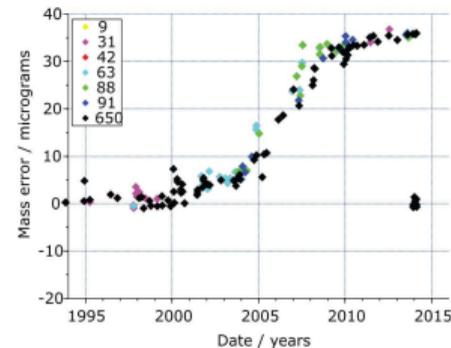
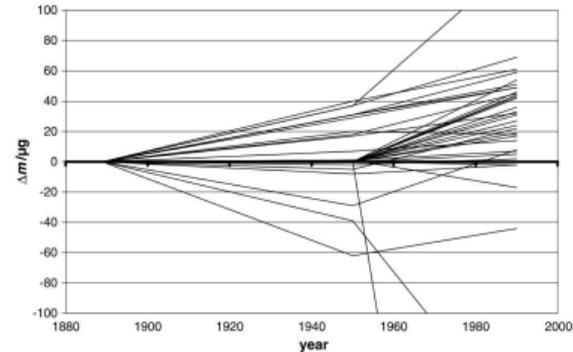
- ① Einleitung
- ② Modellierung
 - Analytisches Modell
 - Finite Elemente Methode
- ③ Ergebnis
- ④ Zusammenfassung und Ausblick



[1],[2],[3]

- hochauflösende Massekomparatoren unverzichtbar für weltweit rückführbare Messungen der Masse
- auch nach der bevorstehenden Neudefinition der Einheit *Kilogramm* (kg)
- monolithische Mechanismen mit konzentrierten Nachgiebigkeiten
- Prinzip der elektromagnetischen Kraftkompensation
- druckdichte Einhausungen

- BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) - außerordentliche Vergleichskampagne von 1 kg-Standards (2014)
- seit letztem Vergleich mit dem Internationalen Kilogrammprototyp (1992, 3rd) entstanden Abweichungen zu seinen offiziellen Kopien von $\approx 35 \mu\text{g}$, [4] \rightarrow Sandkorn ($\varnothing 0.5 \text{ mm}$) $\approx 200 \mu\text{g}$
- Masseänderung des Internationalen Kilogrammprototyps? - ungeklärt



[1]

[5]

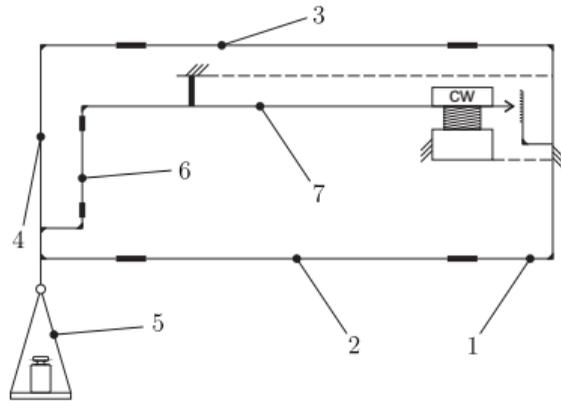
Herausforderung bei der Massebestimmung nach [6]

Einflussgröße	Effekt
Luftdichte	Auftrieb in Luft
Temperaturgradienten/änderung	Drift, Volumenänderung, Konvektion
Luftdruckänderung	Drift
Luftfeuchtigkeit	Drift
Adsorptionsschichten	Messwertänderung
Magnetfelder	system. Fehler
elektrostat. Felder	system. Fehler
Zentrierung Wägegut	Ecklastfehler
horiz. Bodenvibrationen	Standardabweichung
quasistat. Bodenneigung	system. Fehler



[3]

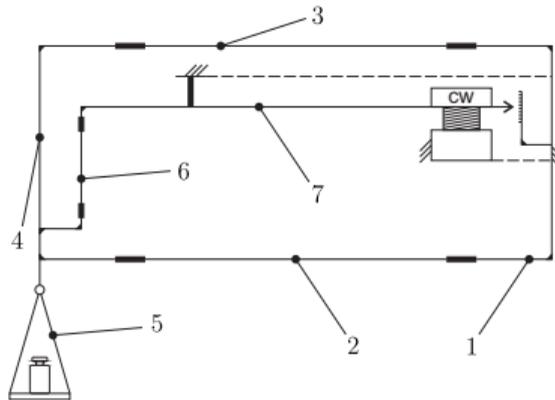
monomolekulare Schicht: $m_{H_2O} \approx 2 \mu g$ [7]



Legende

	- Festkörpergelenk (vert.)	1 - Gestell
	- Festkörpergelenk (horiz.)	2 - unterer Lenker
	- kardanisches Gelenk	3 - oberer Lenker
	- Gegengewicht	4 - Lastaufnehmer
	- Tauchspule	5 - Waagschale
	- Positionssensor	6 - Koppelement
	- Wägegut	7 - Übersetzungshebel

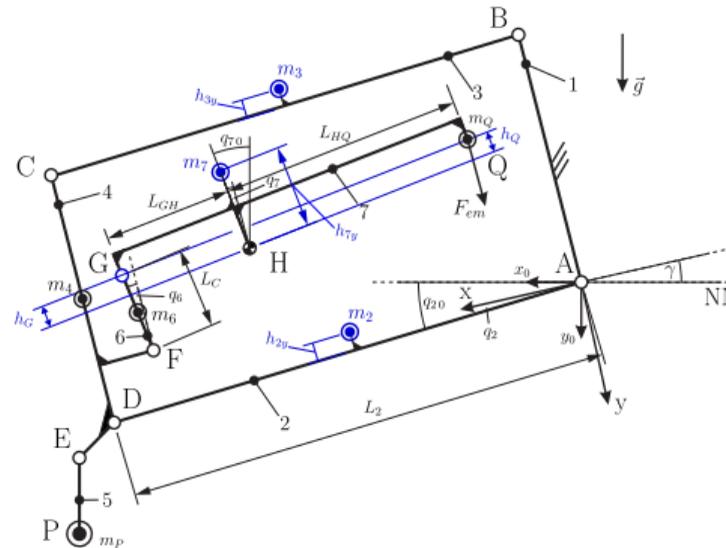
- Modellierung des mechanischen Systems → gezielte und präzise Justierung
- Steifigkeit: Kompensation der Rückstellkräfte der Festkörpergelenke
- Unempfindlichkeit gegenüber äußeren Umwelteinflüssen, z.B.: Bodenneigung
- **Messunsicherheit:** ≤ 100 ng (Luft); ≈ 50 ng (Vakuum) → Ziel: ≤ 5 ng



Legende

	- Festkörpergelenk (vert.)	1 - Gestell
	- Festkörpergelenk (horiz.)	2 - unterer Lenker
	- kardanisches Gelenk	3 - oberer Lenker
	- Gegengewicht	4 - Lastaufnehmer
	- Tauchspule	5 - Waagschale
	- Positionssensor	6 - Koppellement
	- Wägegut	7 - Übersetzungshebel

- monolithisches mechanisches System im Fokus
- elektrische/elektronische Komponenten idealisiert
- Fertigungstoleranzen wichtig für Justierung
- linear-elastisches Materialverhalten, Temperatur=konst.
- quasi-statische Modelle

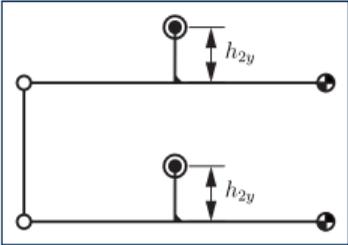


Analytisches Modell:

- Festkörpergelenke vereinfacht (feste Rotationsachse, konstante Drehsteifigkeit, keine Reibung)
- Lenker und Balkenelemente werden als unendlich steif angenommen
- die Masse der Körper konzentriert sich auf den jeweiligen Schwerpunkt

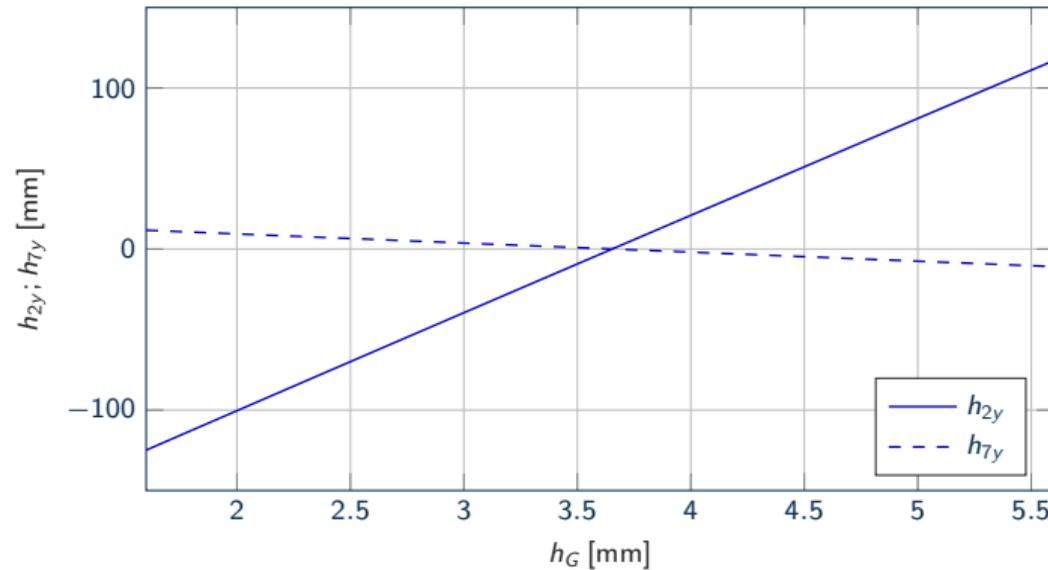
2.1 Analytisches Modell

Justierkonzept Ziel: Minimierung von Steifigkeit (C) und Neigungsempfindlichkeit (D)

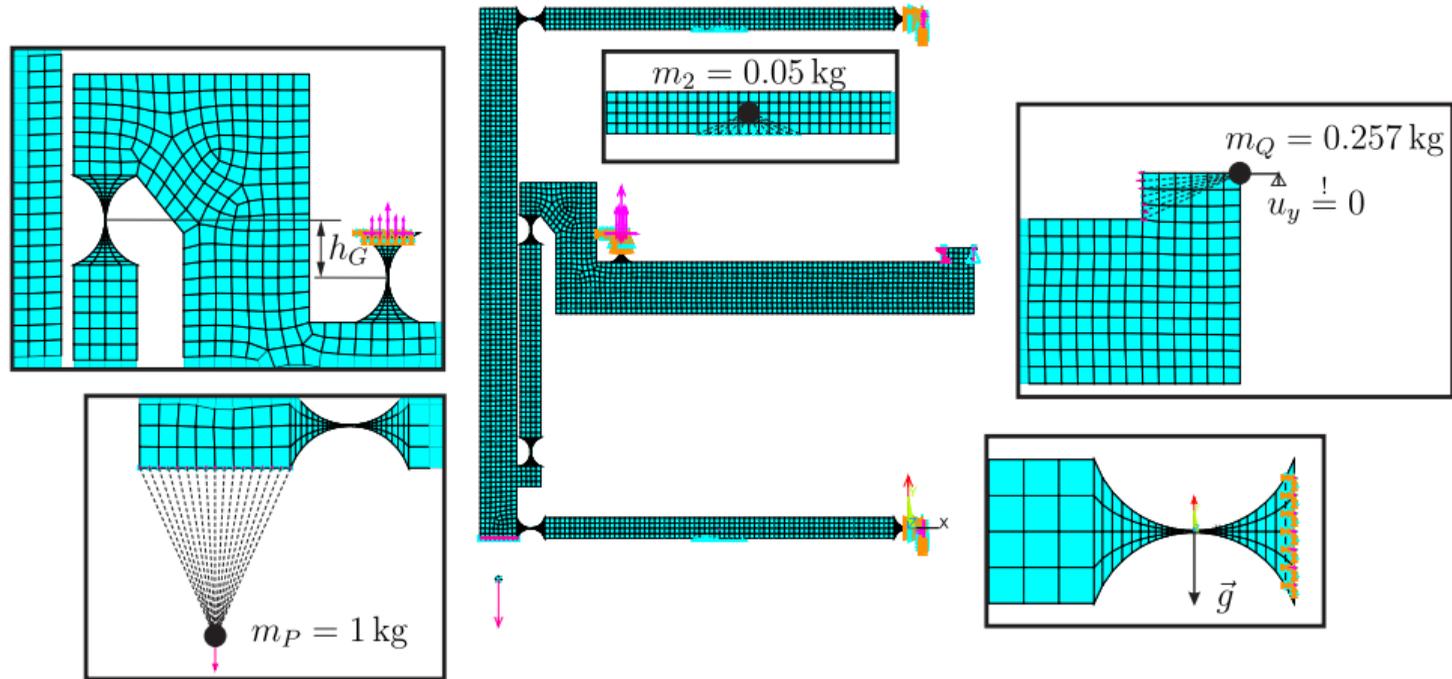
Justierung	h_G	h_{7y}	h_{2y}
Skizze			
Steifigkeitsterm	$-h_G (m_P + m_4 + m_6) g$	$-h_{7y} m_7 g$	$-h_{2y} m_2 g \frac{L_{GH}^2}{L_2^2}$
Vorteile	+ großer Einfluss auf Steifigkeit + keine Zusatzmassen	+ Kombination für $C = D = 0$ (vgl. [8],[9]) + Gegengewicht als Justiermasse	
Nachteile	- Lastabhängigkeit		- Zusatzmassen nötig - Neigungsempfindlichkeit

2.1 Analytisches Modell

Beispielhafte Lösung des Gleichungssystems ($C = 0; D = 0$) für veränderliches h_G :



2.2 Finite Elemente Methode

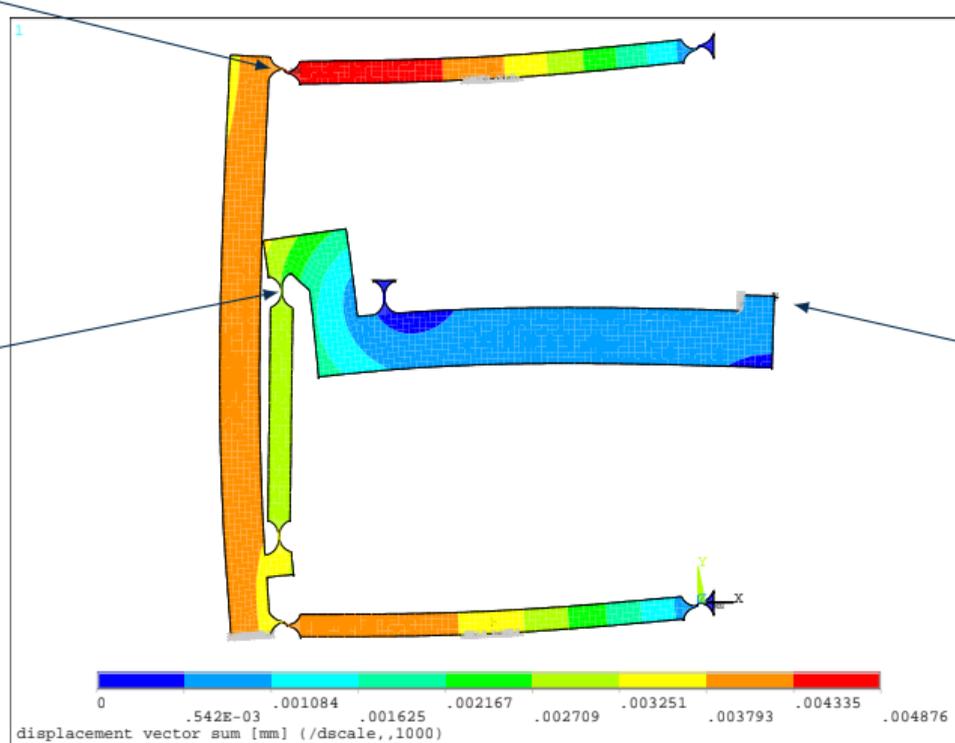


2.2 Finite Elemente Methode

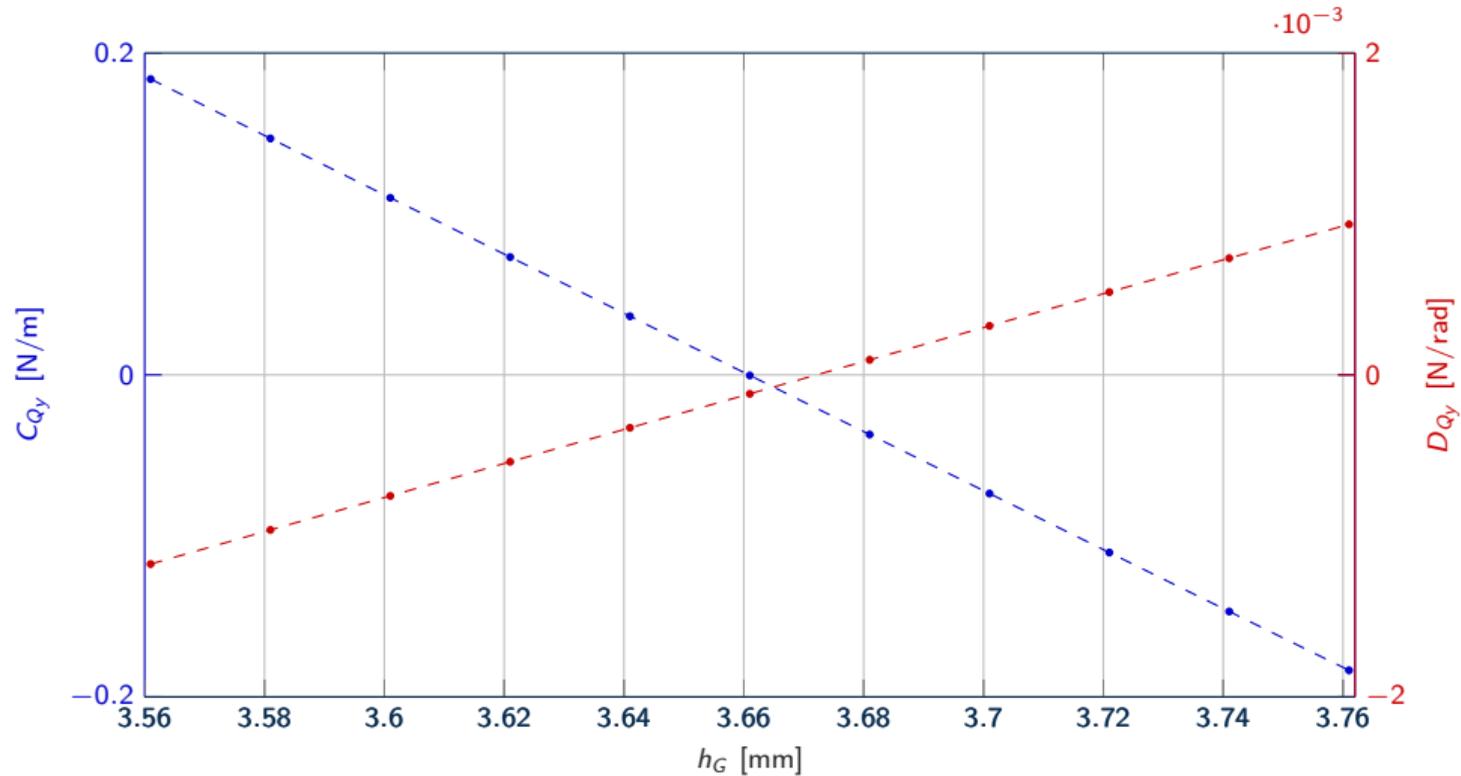
s-Verformung = parasitäre Momente

Verschiebung von Gelenk G

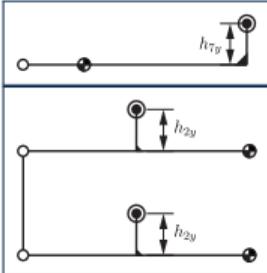
u_x beeinflusst Messwert



2.2 Finite Elemente Methode



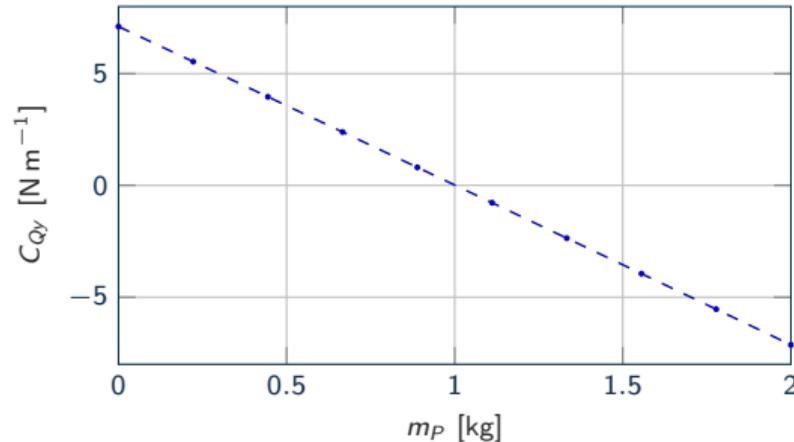
3. Ergebnis

Parameter	Einheit	Ausgangszustand	1. Justierschritt $C \approx 0$	2. Justierschritt $C \approx 0, D \approx 0$
h_G	[mm]	0.0	3.661	3.661
h_{2y}	[mm]	0.0	0.0	-0.0395
h_{7y}	[mm]	0.0	0.0	0.0003
				
C_{Qy}	[N m ⁻¹]	7.383	-3.140 e-4	-1.971 e-5
D_{Qy}	[N rad ⁻¹]	-4.254 e-2	-1.172 e-4	2.404 e-7

Lastabhängigkeit der h_G -Justierung.

$$-h_G (m_P + m_4 + m_6) g$$

negativer Steifigkeitsbeitrag für $h_G \geq 0$



- starker Einfluss der h_G -Justierung auf Gesamtsteifigkeit
- Justierung von h_G ungeeignet für durchwiegende Systeme
- Lösung: Befestigung des elektromagnetischen Aktors am Lastaufnehmer

4. Zusammenfassung und Ausblick

- Bemessungsgleichungen für grobe Dimensionierung der Wägezelle
 - FE-Modell zur Bestimmung der Anforderungen an die Justierung
 - Justiergrößen (h_G , h_{2y} , h_{7y}) in Kombination reduzieren Steifigkeit und Neigungsempfindlichkeit zu sehr kleinen Werten
 - h_G -Justierung führt zu lastabhängiger Steifigkeitscharakteristik
-
- experimentelle Verifizierung
 - Prototyp einer weiterentwickelten Wägezelle
 - Anwendung des Justierkonzeptes auf verschiedene Strukturen von Wägezellen
 - in-situ Justierungskonzept für Vakuummassekomparatoren

- [1] M. Gläser und M. Borys. Precision mass measurements. *Reports on Progress in Physics* 72.12 (2009), S. 126101.
- [2] P. Becker, H. Friedrich, K. Fujii, W. Giardini, G. Mana, A. Picard, H.-J. Pohl, H. Riemann und S. Valkiers. The Avogadro constant determination via enriched silicon-28. *Measurement Science and Technology* 20.9 (2009), S. 092002.
- [3] M. Borys, T. Fehling, T. Fröhlich, D. Heydenbluth, M. Mecke und R. Schwartz. Design and performance of the new Sartorius 1 kg vacuum mass comparator at PTB. In: *XVIII IMEKO WORLD CONGRESS Metrology for a Sustainable Development*. 2006.
- [4] M. Stock, P. Barat, R. S. Davis, A. Picard und M. J. T. Milton. Calibration campaign against the international prototype of the kilogram in anticipation of the redefinition of the kilogram part I: Comparison of the international prototype with its official copies. *Metrologia* 52.2 (2015), S. 310–316.
- [5] E. de Mirandés, P. Barat, M. Stock und M. J. T. Milton. Calibration campaign against the international prototype of the kilogram in anticipation of the redefinition of the kilogram, part II: Evolution of the BIPM as-maintained mass unit from the 3rd periodic verification to 2014. *Metrologia* 53.5 (2016), S. 1204–1214.
- [6] M. Borys, R. Schwartz, A. Reichmuth und R. Nater. *Fundamentals of Mass Determination*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [7] T. J. Quinn. The beam balance as an instrument for very precise weighing. *Measurement Science and Technology* 3.2 (1992), S. 141.
- [8] R. R. Marangoni, I. Rahneberg, F. Hilbrunner, R. Theska und T. Fröhlich. Analysis of weighing cells based on the principle of electromagnetic force compensation. *Measurement Science and Technology* (2017).
- [9] M. Darnieder, R. R. Marangoni, R. Theska, T. Fröhlich und I. Rahneberg. Contribution to the mechanical enhancement of load cells in precision weighing technology by means of advanced adjustment strategies. In: *Proceedings of the 17th international conference of the european society for precision engineering and nanotechnology*. Hrsg. von D. Billington und D. Phillips. 2017, S. 411–412.

Danksagung Der Autor dankt der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung des Forschungsprojektes mit den Fördernummern: TH 845/7-1 und FR 2779/6-1.