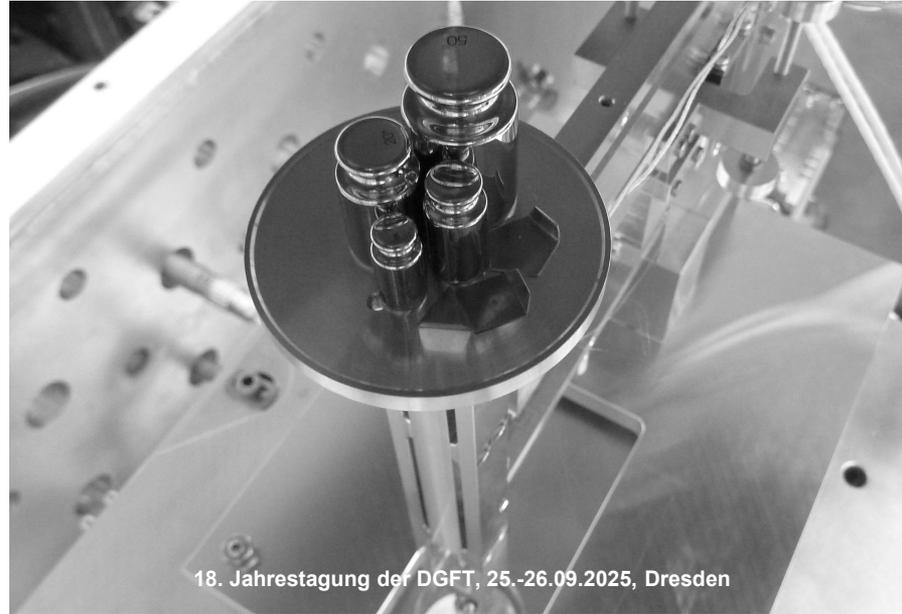


# Die Neudefinition des Kilogramms und deren Umsetzung in der Kraftmess- und Wägetechnik

**René Theska**

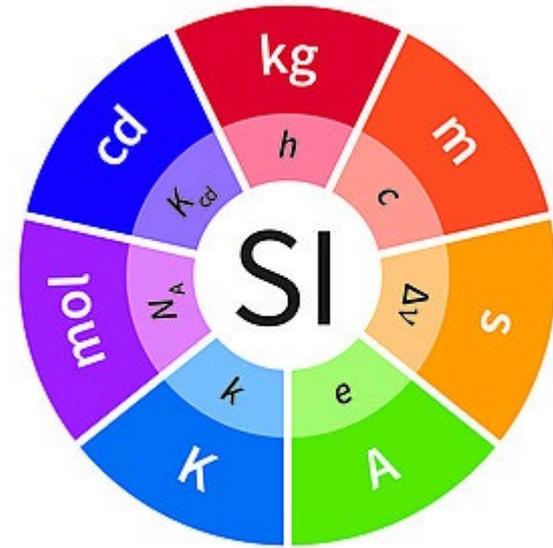
Technische Universität Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau  
Institut für Maschinen- und Gerätekonstruktion



# Die Neudefinition des Kilogramms und deren Umsetzung in der Kraftmess- und Wägetechnik

## Inhalt

Einführung in die Geschichte des Messens  
Die Definition des Kilogramms  
Stand der Technik  
Laufende Forschung  
Zusammenfassung



SONNEOBSERVATORIUM GOSECK



## ÄLTESTES SONNEN-OBSERVATORIUM DER WELT

Die Kreisgrabenanlage von Goseck ist der früheste archäologische Beleg für systematische Himmelsbeobachtungen. Das imposante Monument mit einem Durchmesser von rund 75 m wurde komplett ausgegraben und an der originalen Stelle exakt rekonstruiert.

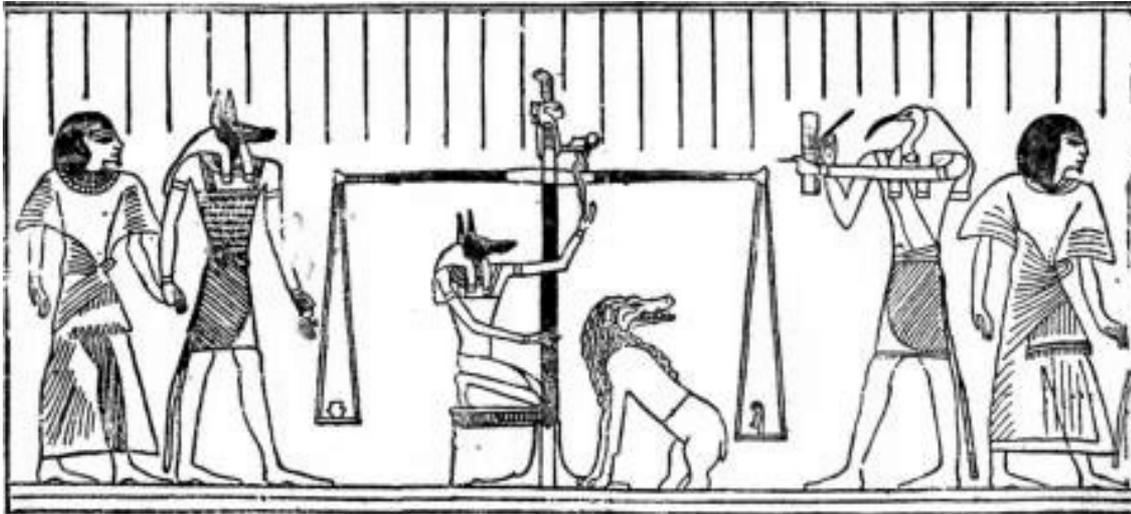


© LDA Sachsen-Anhalt, Karol Schauer

# Gerechtes Teilen



# Erste Waagen und Massestücke



© The Trustees of British Museum

# Längenbestimmung



Die Neudefinition des Kilogramms und deren  
Umsetzung in der Kraftmess- und Wägetechnik, René Theska

27.09.2025 The **SPiRiT**  
of science

  
TECHNISCHE UNIVERSITÄT  
ILMENAU

# Sächsisches Pfund

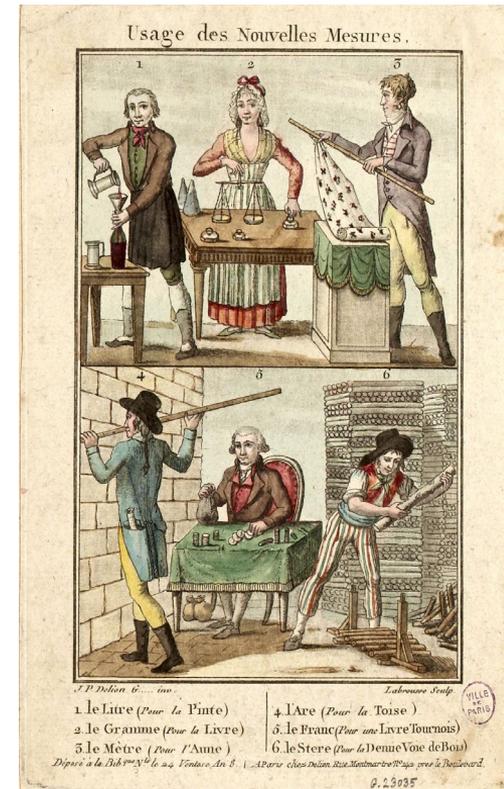


# Systeme Metrique 1793

## Länge, Masse, Zeit

Die Grundannahmen für das metrischen Systems:

- Naturphänomene als Basis
- für alle Länder
- für alle Menschen
- für alle Zeiten



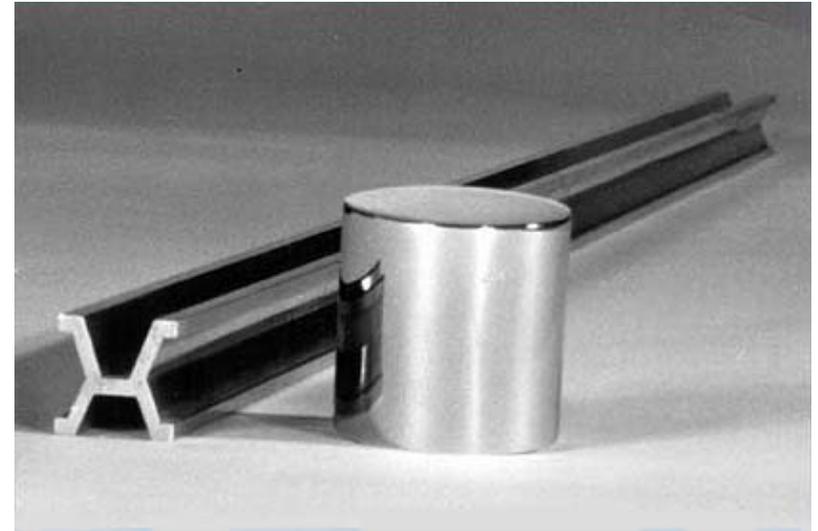
Von L. F. Labrousse (engraver). J. P. Delion, Paris (publisher). - Paris Musées, Gemeinfrei, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=65375730>

# Internationale Meterkonvention von 1875 und Generalkonferenz 1889



# Bureau International des Poids et Mesures BIPM

Pavillon de Breteuil in [Sèvres](#)

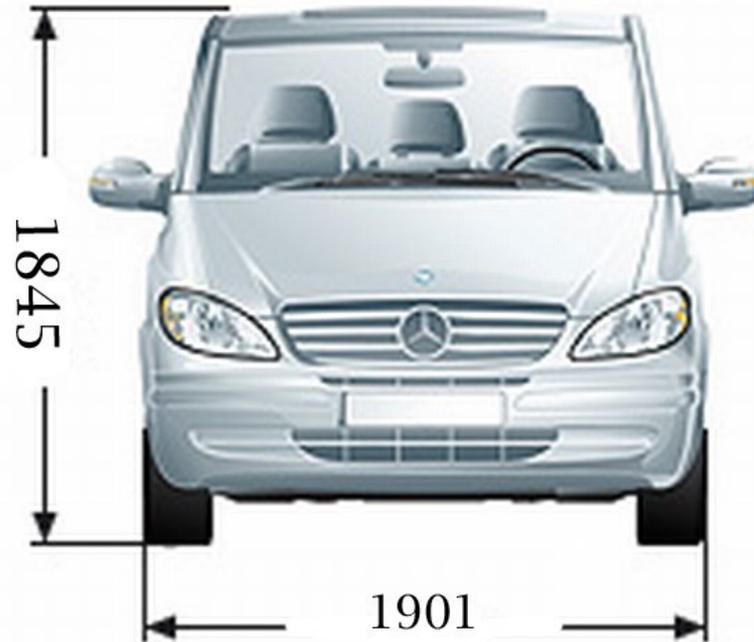


# Verlust des Mars-Klima-Orbiters der NASA (1999)

Die NASA verlor den 125 Millionen Dollar teuren Mars Climate Orbiter aufgrund eines Fehlers bei der Umrechnung von **imperialen** in **metrische** Einheiten.

Die Diskrepanz führte dazu, dass die Raumsonde in der falschen Höhe in die Marsatmosphäre eintrat, was zu ihrer Zerstörung führte.

# Sicher?

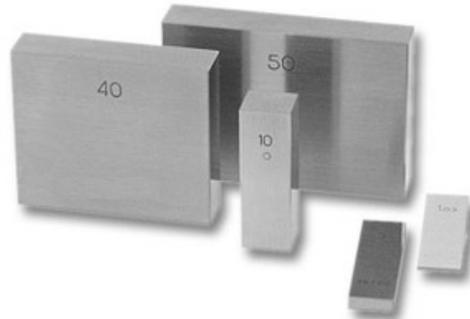
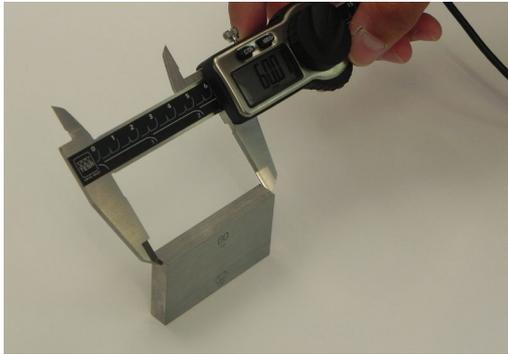


# Jede Messung...



© By Simon A. Eugster - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=7900253>

# ...muss rückführbar kalibriert sein.



# Entwicklung der Waagen

Erste Waagen: Gleicharmige Balkenwaagen (>5000 Jahre)

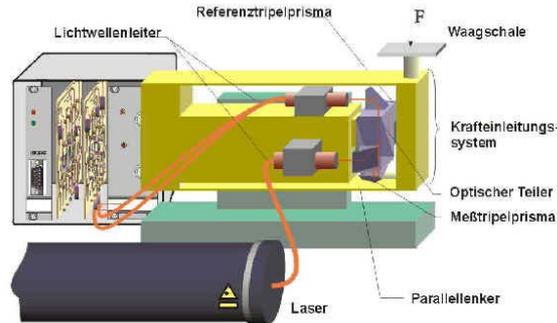
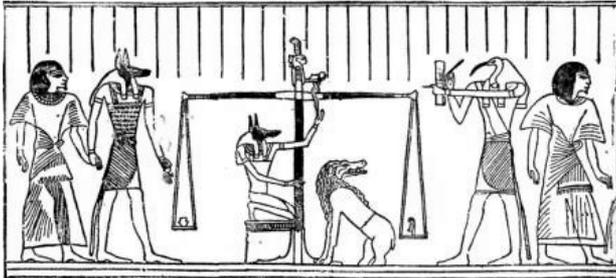
Laufgewichtswaagen (>4000 Jahre)

Federwaagen

EMK Waagen (Gast 1950, Kibble 1976)

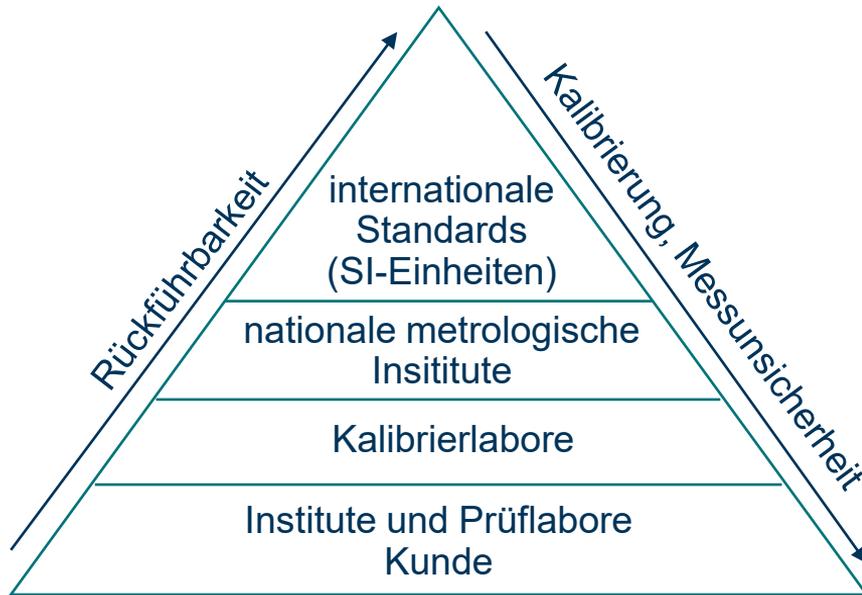
Interferenzoptische Waagen (Jäger 1985)

Elektronische Waagen (Mikroprozessoren + A/D Umsetzung)



© Sartorius

# Rückführbarkeit der SI-Einheit Kilogramm bis 2019



- Urkilogramm (IKP)
- Nationale Normale
- Bezugsnormale
- Werksnormale
- Mess- und Prüfmittel



# Massekomparator historisch

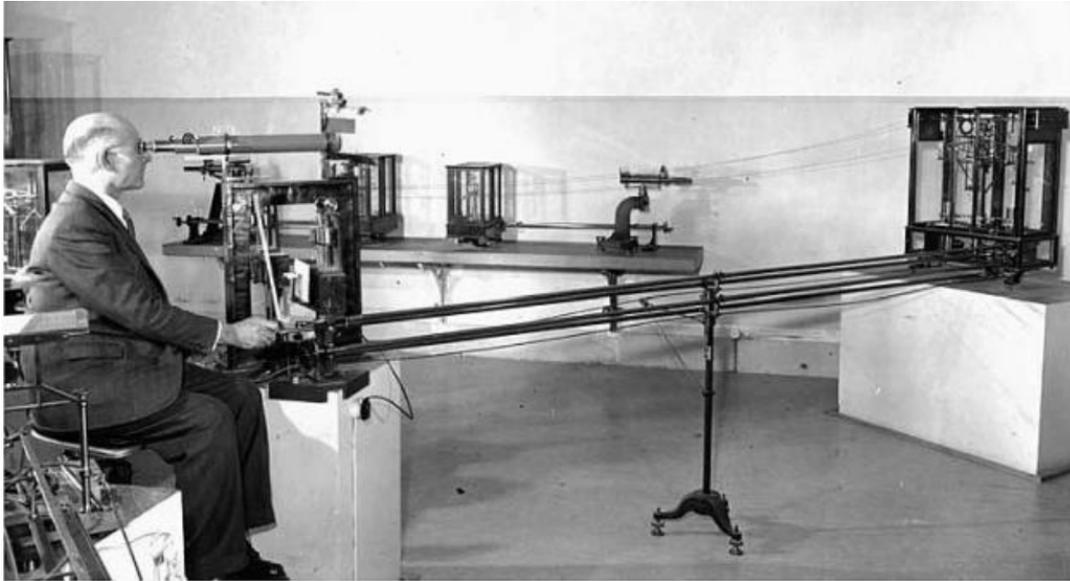


Plate 34: Albert Bonhoure operating the Ruprecht No.1 balance in Room 5 of the Observatoire, date unknown but probably in the 1940s or 1950s; all balances were operated at a distance to avoid heating by close proximity of the operator. (Courtesy BIPM.)

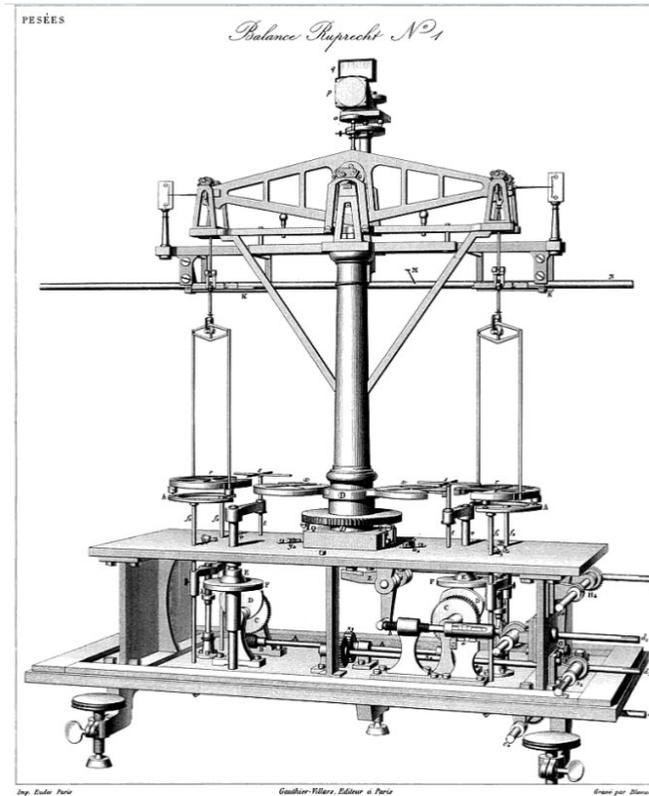


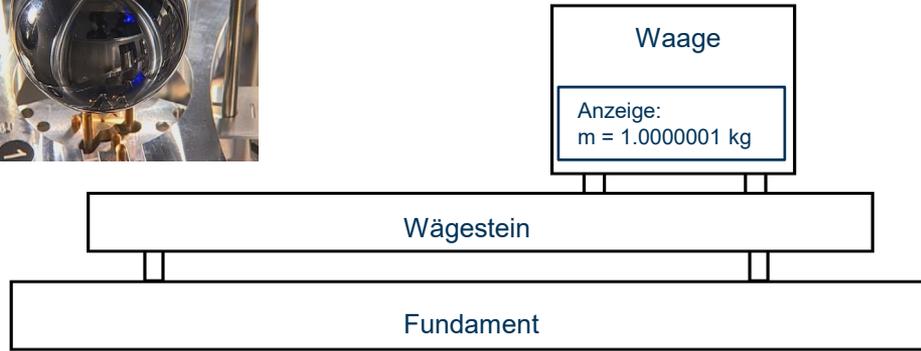
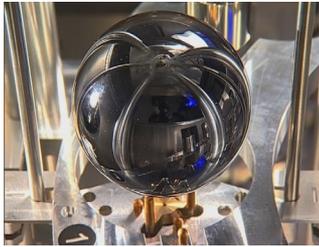
Plate 17: The Ruprecht No. 1 balance, installed in Room 5 with all the other balances, was the principal balance for the comparison of 1 kg prototypes from 1878 until 1973, it still exists at the BIPM, *Travaux et Mémoires*, Vol I, 1881. (Courtesy BIPM.)

# Massekomparator heute



© Sartorius

# Massekomparator morgen

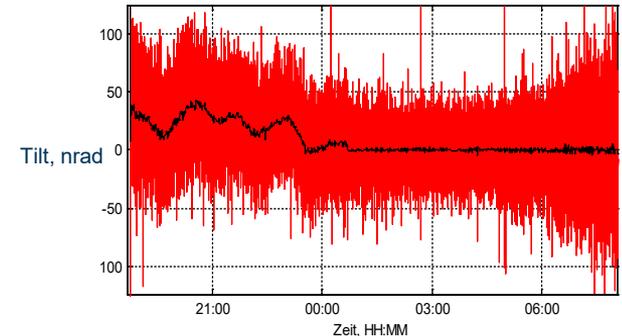


- Standardabweichung von 50ng
- Wägeprozess ist u.a. kippempfindlich

**Ziele:** - Steigerung der Messauflösung  
- Verringerung der Störempfindlichkeit



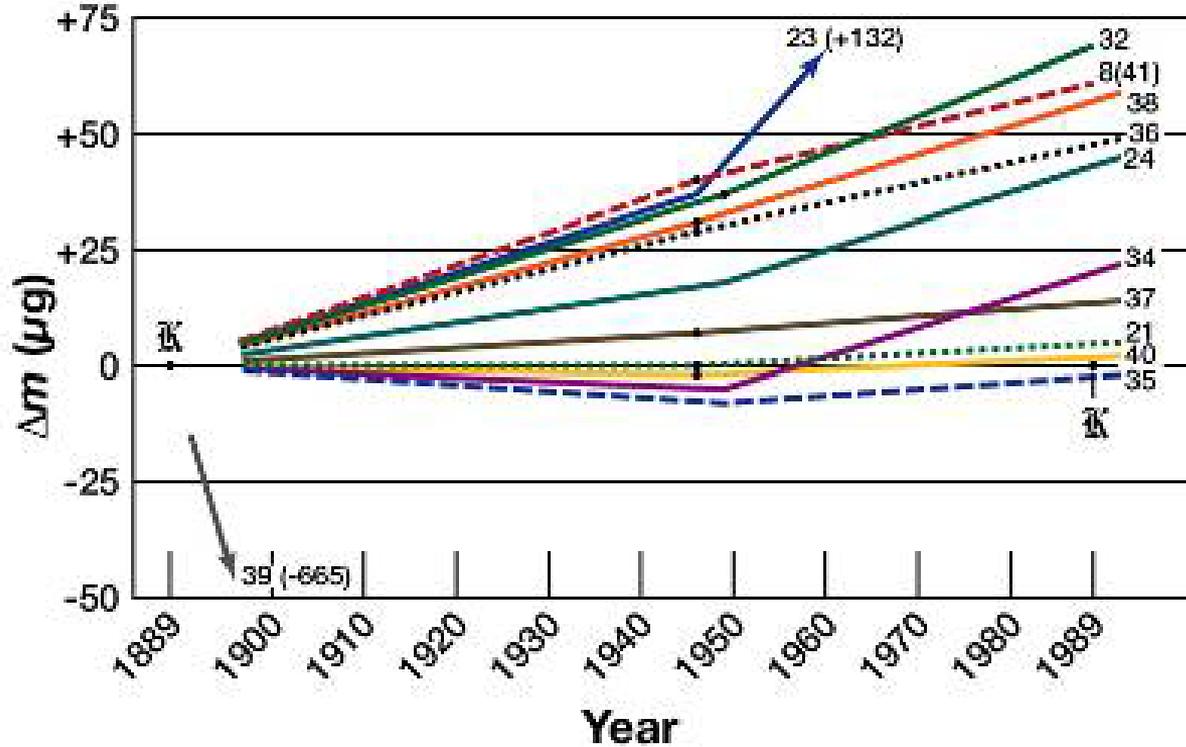
© Sartorius



# Warum eine neue Definition?

- alle anderen SI-Basiseinheiten sind auf Naturkonstanten zurückgeführt
- das Urkilogramm ist ein Unikat, es könnte beschädigt werden oder verloren gehen
- es ist nur am BIPM verfügbar
- eine regelmäßige Nutzung ist nicht möglich
- es hat sich wahrscheinlich schon verändert

# Warum eine neue Definition?



© BIPM

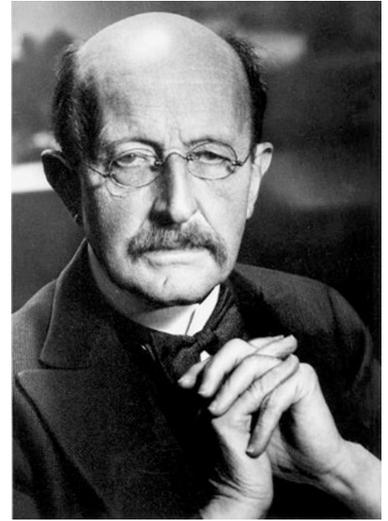
# Fundamentalkonstanten

- Fundamentale Rolle in der Physik
- Betreffen allgemeine Eigenschaften von Raum, Zeit und physikalischen Vorgängen
- Zu ihnen gehören (u.a.):
  - Lichtgeschwindigkeit  $c$
  - Elementarladung  $e$
  - Plancksche Wirkungsquantum  $h$
  - Newtonsche Gravitationskonstante  $G$
  - Avogadro-Konstante  $N_A$
  - Boltzmann-Konstante  $k_B$

Committee on Data for Science and Technology CODATA pflegt aktuelle Werte (und Unsicherheit)

# Fundamentalkonstanten

- Ob die Naturkonstanten auch über astronomische Zeiträume hinweg wirklich konstant sind, ist Gegenstand laufender Forschung.
- Aus Fundamentalkonstanten lassen sich die physikalischen Einheiten für Masse, Länge, Temperatur und Strom ableiten.
- Die Idee hierzu hatte schon Max Planck (1858- 1947).
- Ziel: Neue Definition basierend auf Naturkonstanten an Stelle von Artefakten.



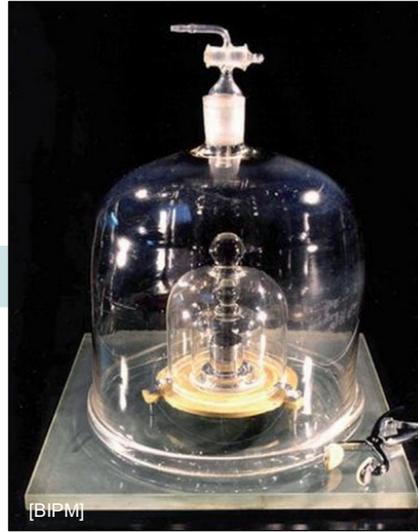
# Repräsentation des Kilogramms

Verschiedene nationale  
Artefakte (z.B. Grave)



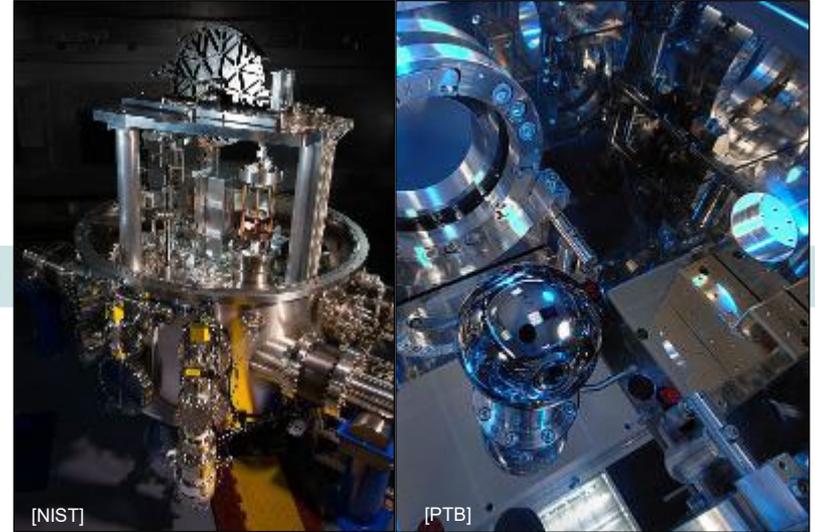
1889

Internationaler Kilogramm  
Prototyp (IKP)



2019

Naturkonstanten  
Planck Konstante



# Definition des Kilogramms

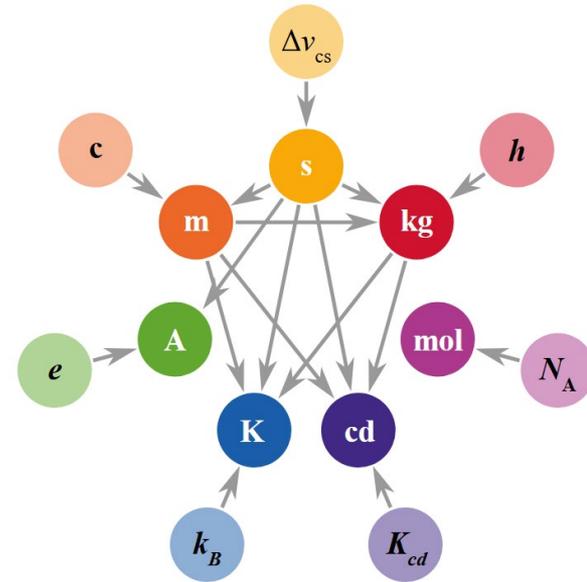
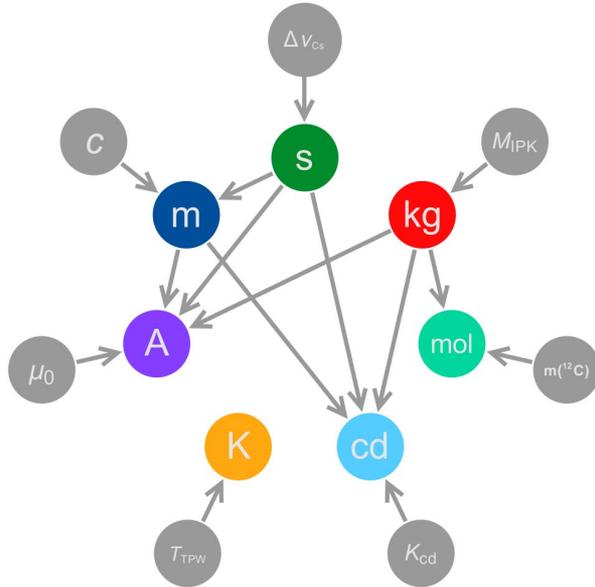
Das Kilogramm ist die SI-Einheit der Masse. Seine Größe ist festgelegt durch den numerischen Wert der Planck-Konstante, der exakt  $6,626\,070\,150 \times 10^{-34}$  beträgt, wenn dieser in der Einheit  $\text{J} \cdot \text{s}$  ausgedrückt wird.

Das Kilogramm ist die Einheit der Masse.  
Es ist gleich der Masse des Internationalen  
Kilogrammprototyps.



© BIPM

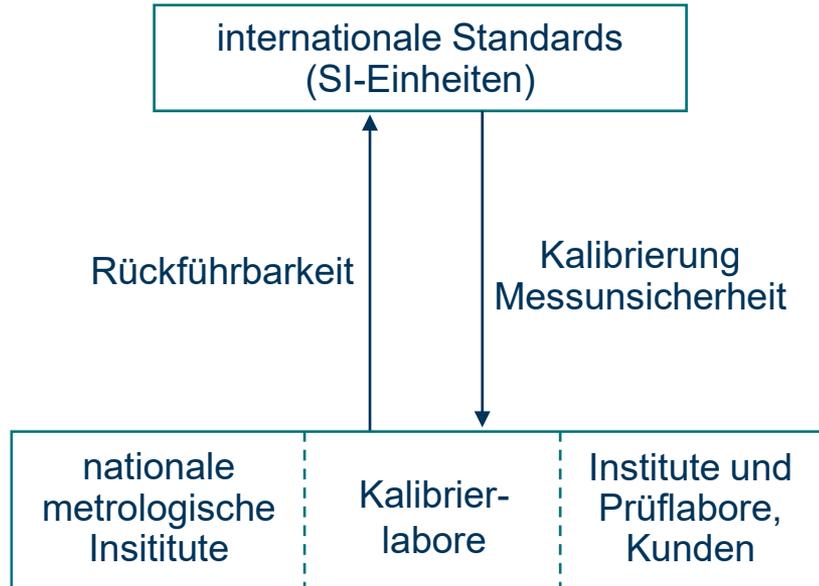
# Altes und neues Einheiten-System (SI)



Quelle: Wikipetzi, IngenieroLoco

# Neue Definition des Kilogramms ab 2019

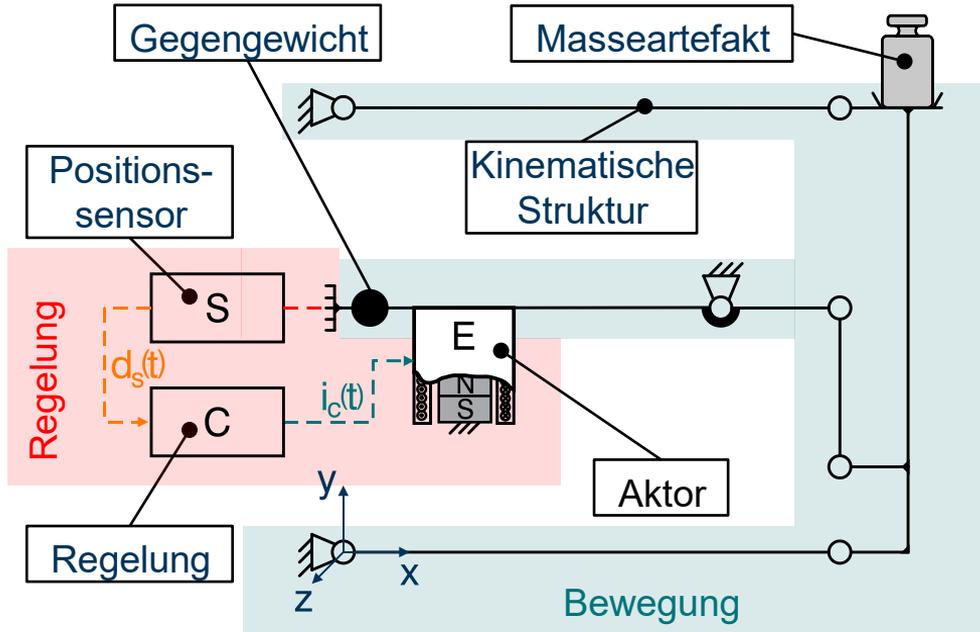
## Vorteile



- Keine Unsicherheitsbeitrag durch Artefakt
- Darstellung für jeden beliebigen Nennwert möglich
- direkte Realisierung für jedermann an jedem Ort möglich
- statt eines relativen Vergleichs erfolgt eine absolute Messung

# 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:

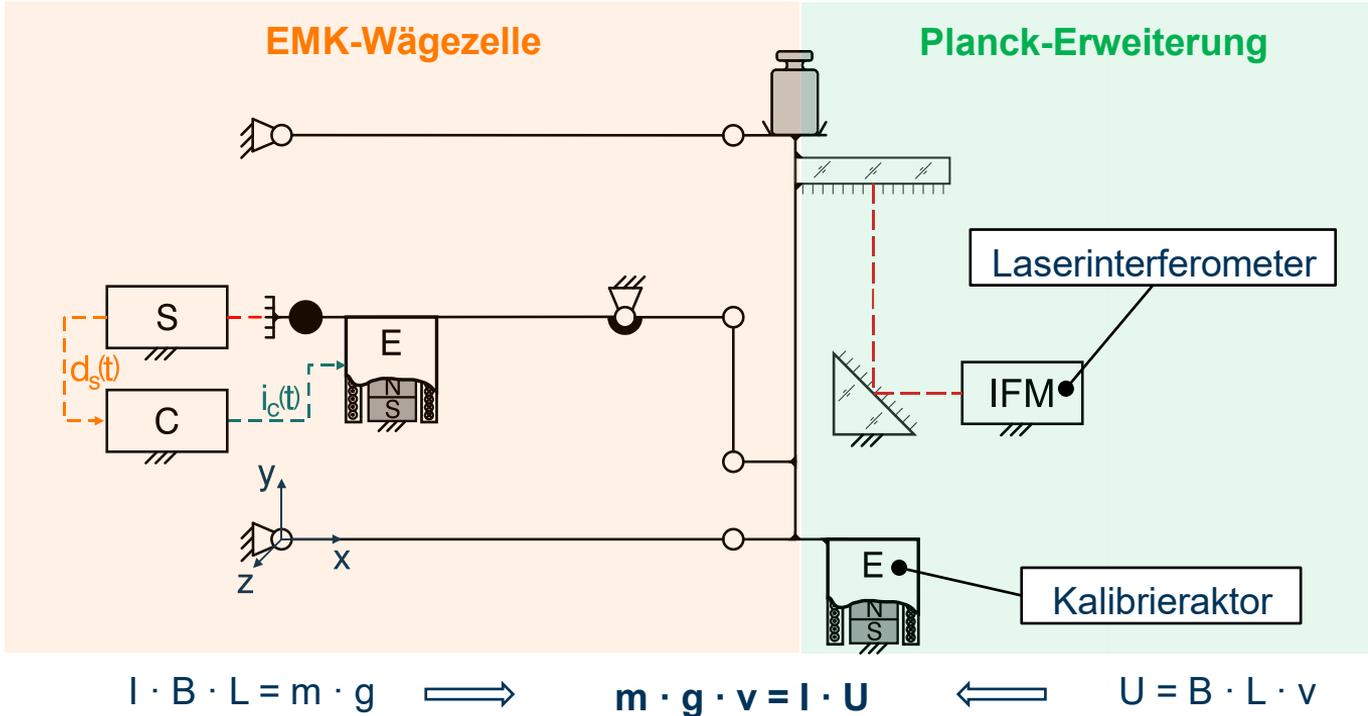
- Massenormal

### Rückführbarkeit:

- über Kalibrierkette auf Internationalen Kilogrammprototyp

# Stand der Technik

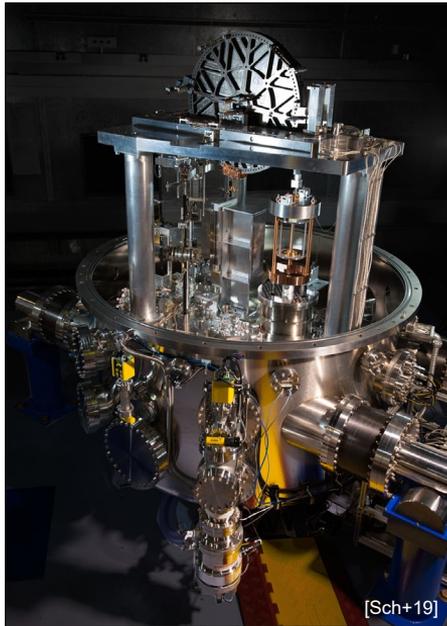
## Absolute Massebestimmung – Planck-Erweiterung / Velocity Mode



# Stand der Technik

## Absolute Massebestimmung, Kibble-, Joule- und Planck- Waage

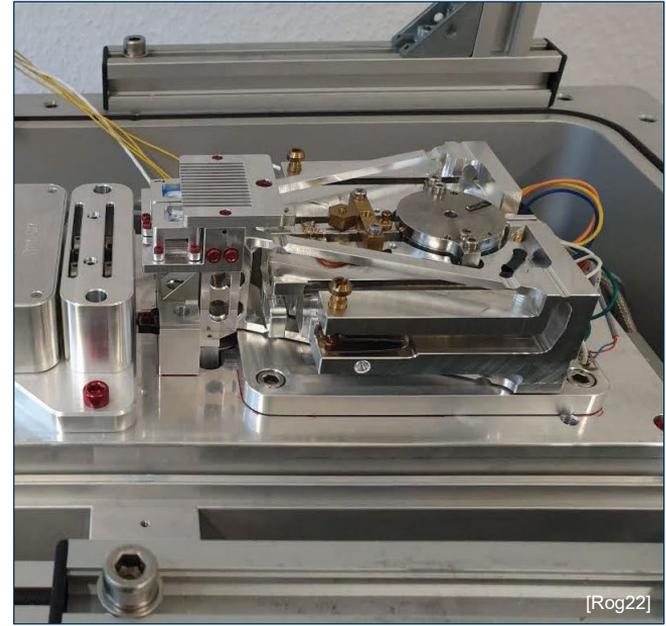
Kibble Waage (e.g. NIST)



Joule Waage (NIM)



Planck Waage (TU Ilmenau / PTB)



# Stand der Technik

## Rückführbarkeit der absoluten Massebestimmung

Josephson effect

$$U = n \cdot \frac{h}{2e} \cdot f_J$$

Quantum Hall effect

$$R = \frac{h}{e^2 \cdot p}$$

Hyperfine splitting  
frequency  $^{133}\text{Cs}$

$$f = k_t \cdot \Delta\nu(CS^{133})_{hfs}$$

$$m = k_m \cdot \frac{h \cdot \Delta\nu(CS^{133})_{hfs}}{c^2}$$

Speed of light  
times frequency

$$g = k_{cg} \cdot c \cdot f_g$$

Speed of light

$$v = k_c \cdot c$$

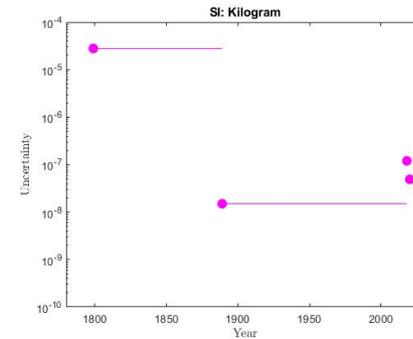
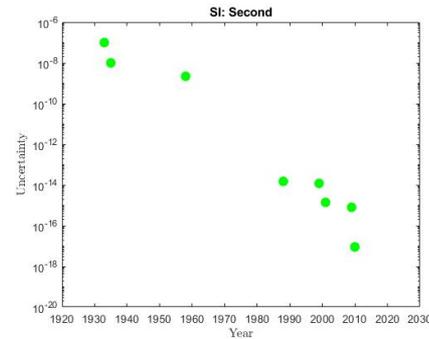
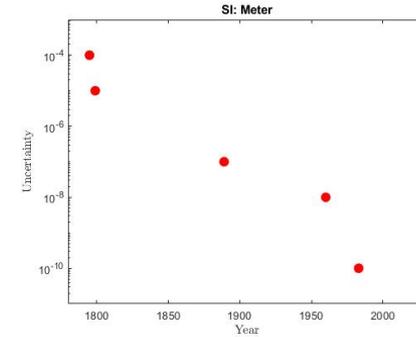
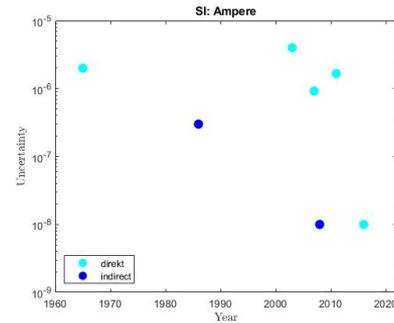
[Had+16]

# Was wird gebraucht?

- Laser interferometer  $v(t)$
- Absolutgravimeter  $g(x, y, z, t)$
- Komplexes System: Wägebalkem, Spule und Magnet
- Vakuumkammer, -pumpen
- Josephson Spannungsstandard  $U$
- Quanten-Hall Widerstand  $R$  für  $I = U/R$
- Zeit- und Frequenzstandards  $t, f$

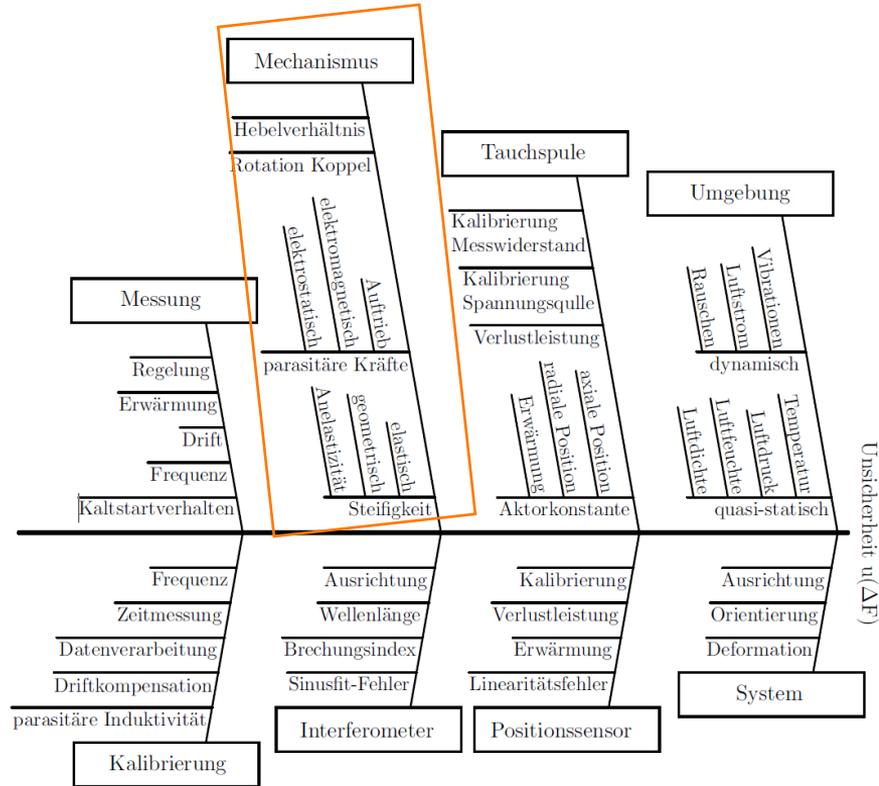
# Stand der Technik

## Messunsicherheiten



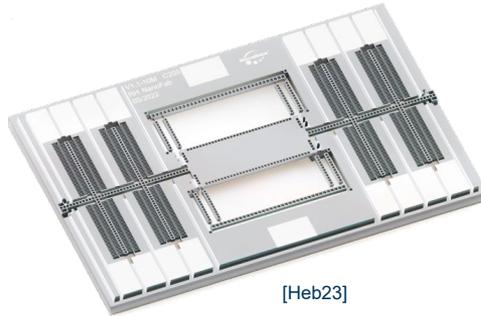
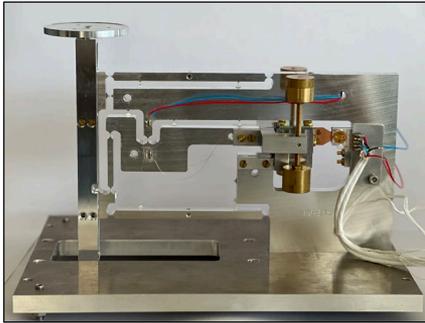
i, IngenieroLoco

# Fehlereinflussmöglichkeiten



# Stand der Technik

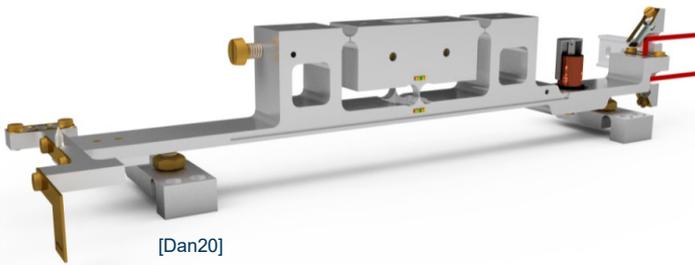
## Mechanismen mit konzentrierten Nachgiebigkeiten



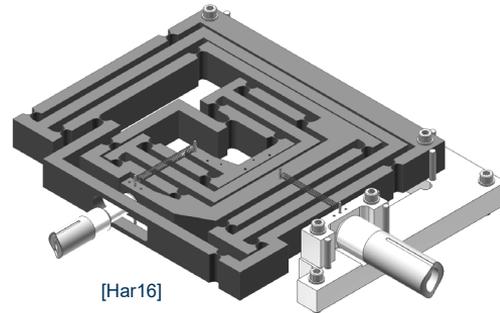
[Heb23]



[Kün+07]



[Dan20]



[Har16]

### Vorteile:

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

### Nachteile:

- Rückstellkräfte
- Bewegungsbereich
- Fertigungsabweichungen
- Materialeinflüsse
- Schwingungsanfälligkeit

# Forschungsfeld Nachgiebige Mechanismen

Analytische und  
numerische Modellierung

Konstruktionswissenschaft

Fertigungstechnik

Materialwissenschaft



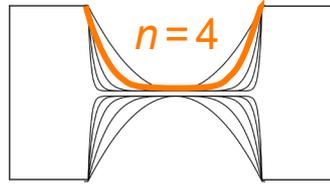
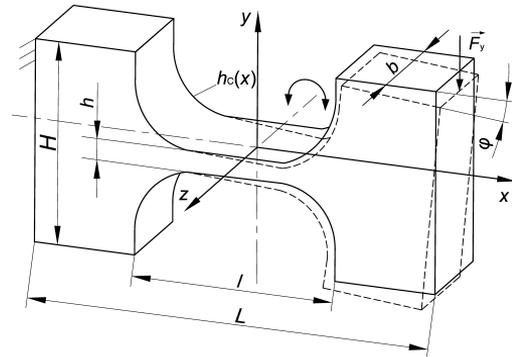
Tolerierung, Justierung

Statistische  
Versuchsplanung

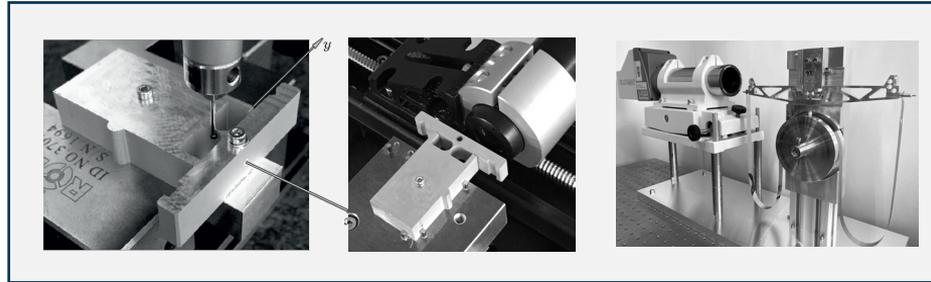
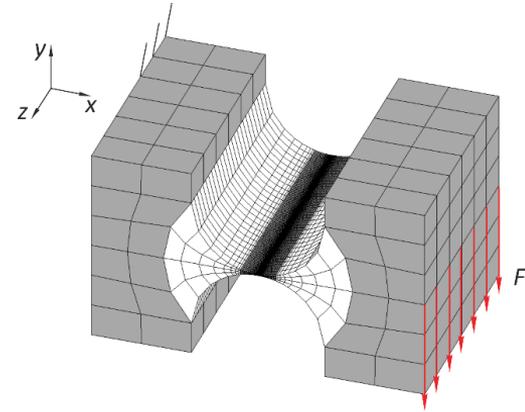
Messung makroskopischer  
und mikroskopischer  
Gestaltabweichungen

Messung mechanischer  
Kenngrößen (Steifigkeit, max.  
Auslenkung, anelastisches  
Materialverhalten,  
Betriebsfestigkeit,...)

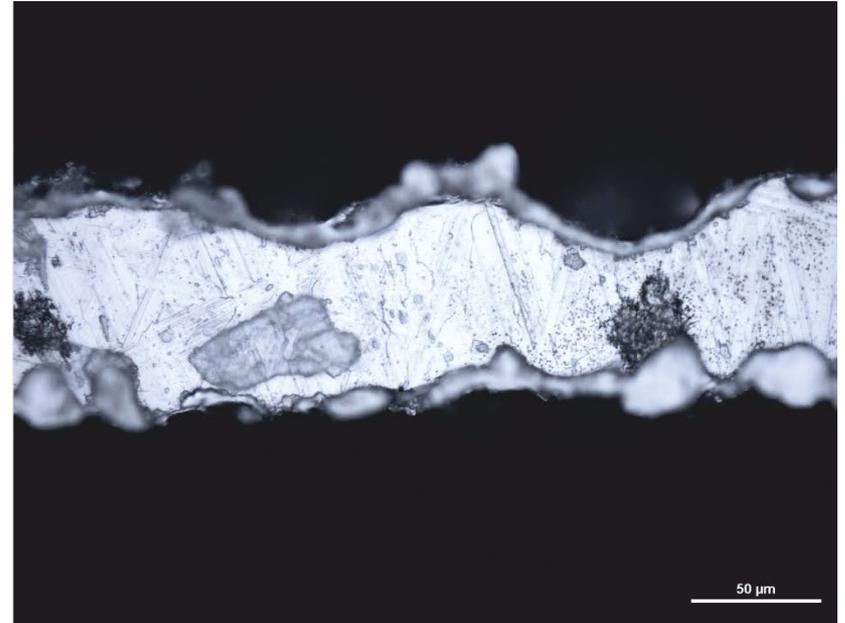
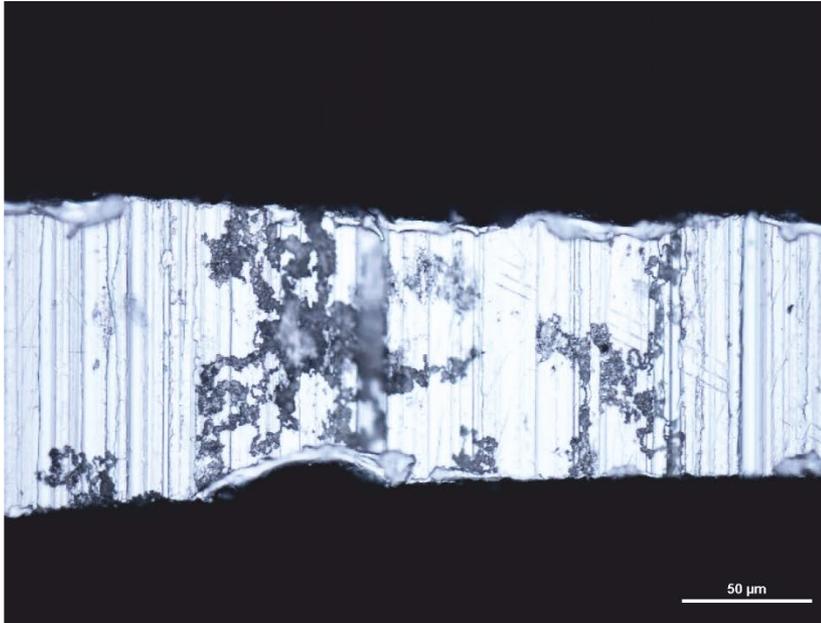
# Einzelgelenk



$$h_K(x) = \frac{h}{2} + \frac{\left(\frac{H}{2} - \frac{h}{2}\right)}{\left(\frac{l}{2}\right)^n} \cdot x^n$$



# Gestaltabweichungen in der Gelenkzone



# Anwendungsfelder



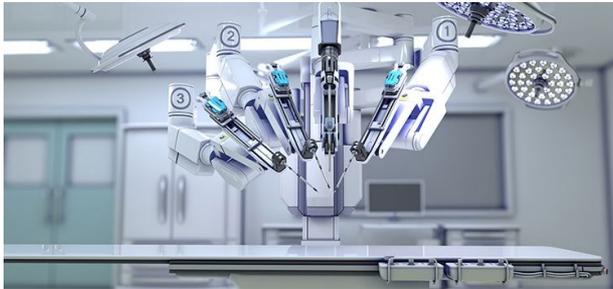
[www.zeiss.de](http://www.zeiss.de)



[www.metroshift.de](http://www.metroshift.de)



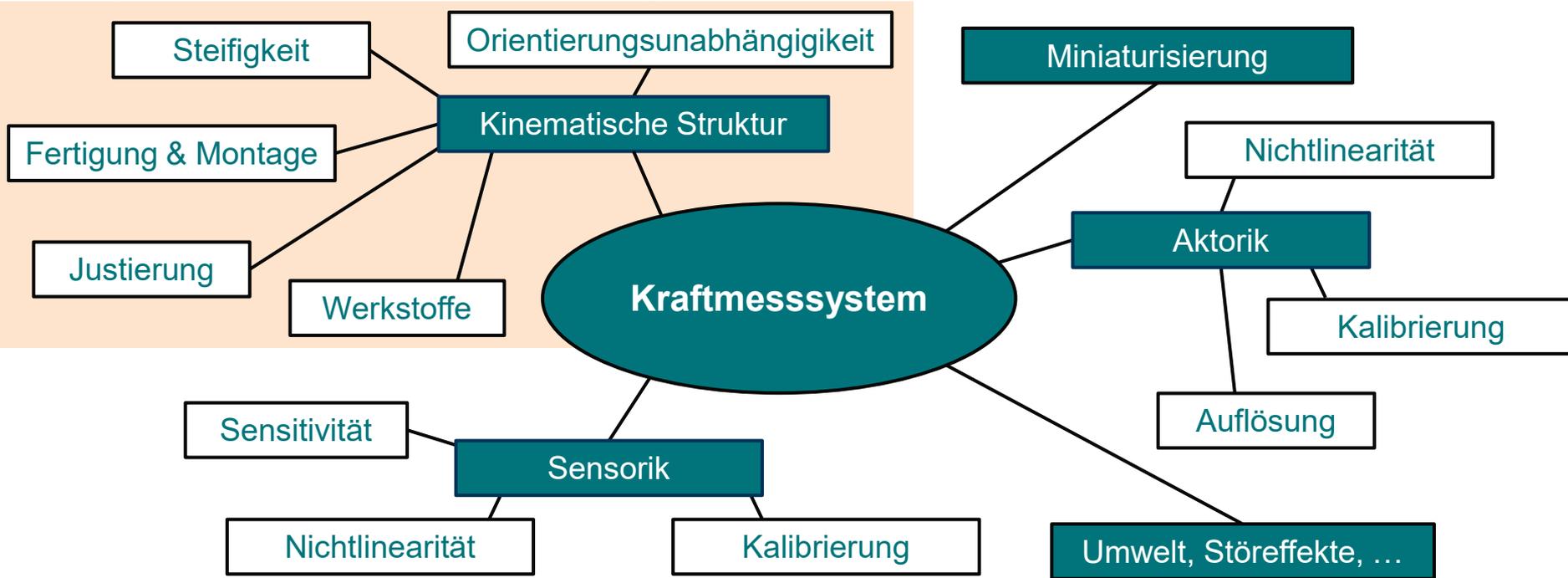
[www.hexagonmi.com](http://www.hexagonmi.com)



[www.fc-gruppe.de](http://www.fc-gruppe.de)

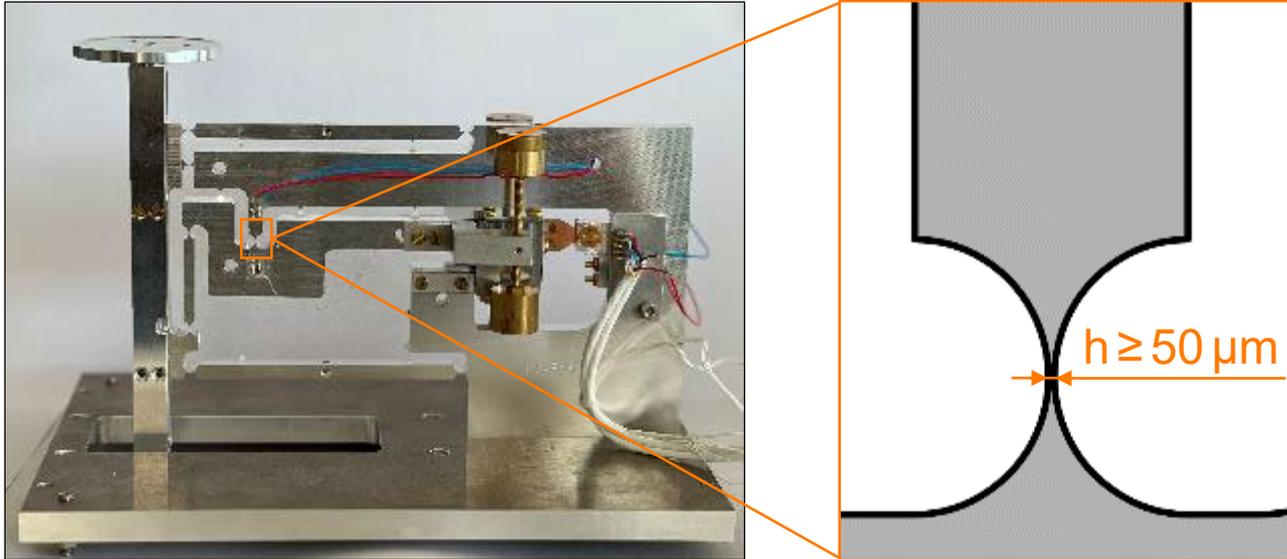
# Feinwerktechnische Herausforderungen

## Aspekte bei der Entwicklung

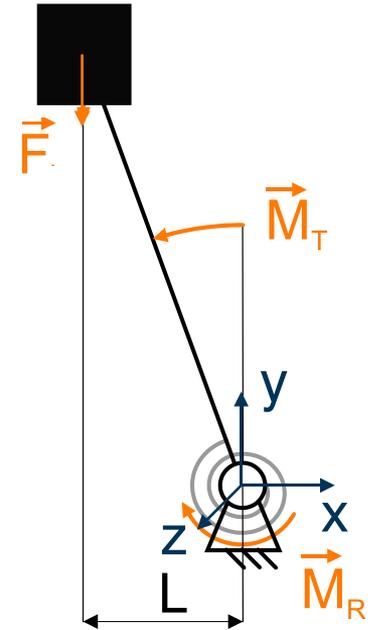


# Feinwerktechnische Herausforderungen

## Kompensation der Reststeifigkeit



- technologisch bedingte Reststeifigkeit
- Kompensation

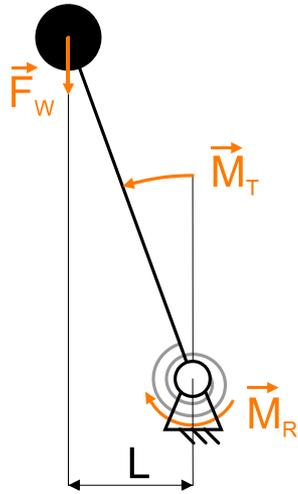


$$M_z: M_T = M_R - F \cdot L$$

# Feinwerktechnische Herausforderungen

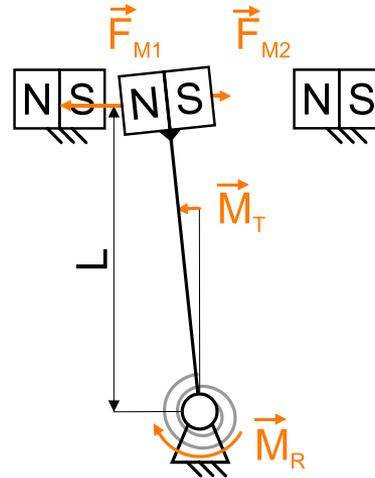
## Varianten der Steifigkeitskompensation

Masse



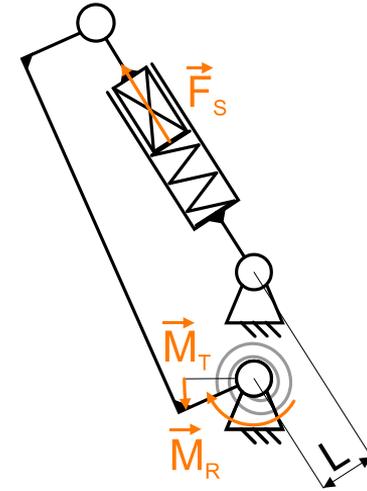
➤ lageabhängig

Magnet



➤ Nebeneffekte

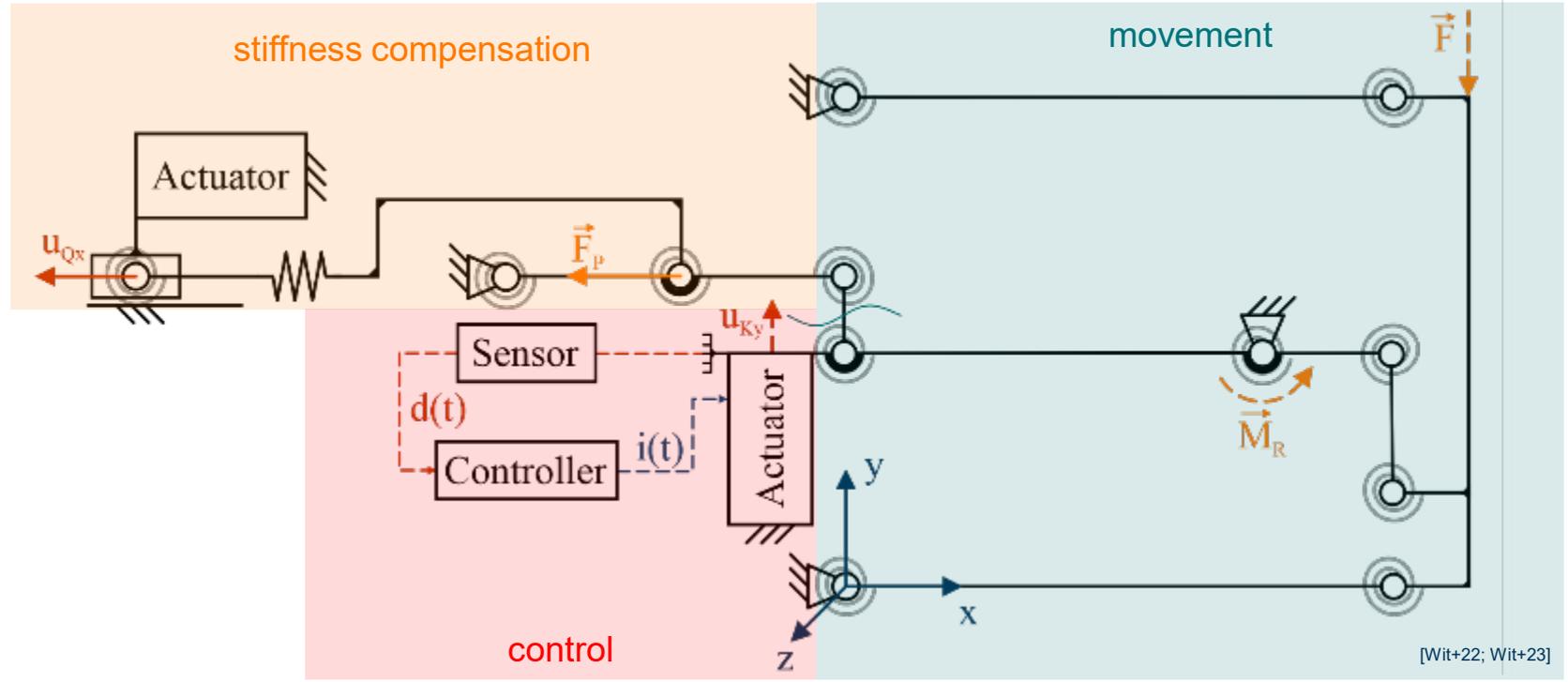
Feder



➤ lageunabhängig

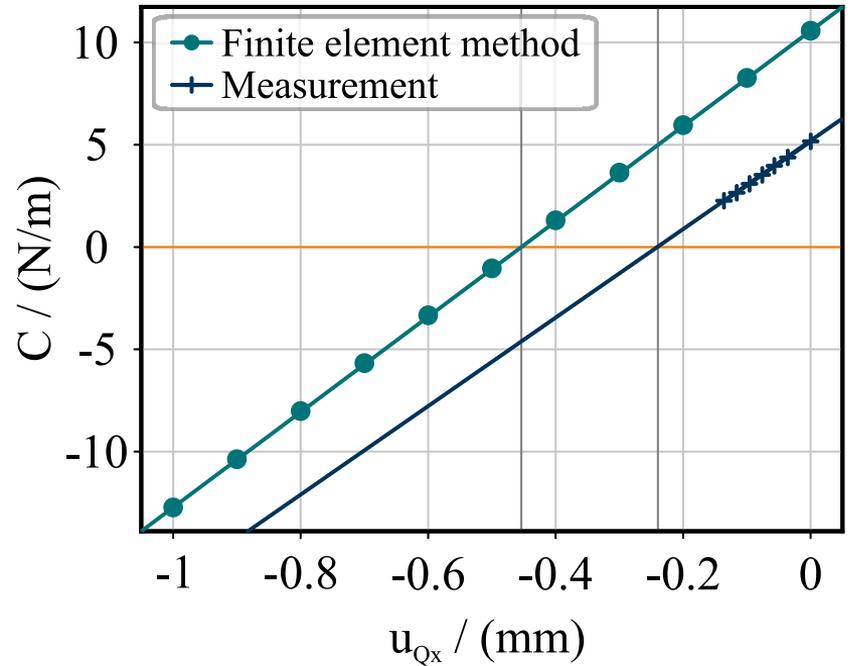
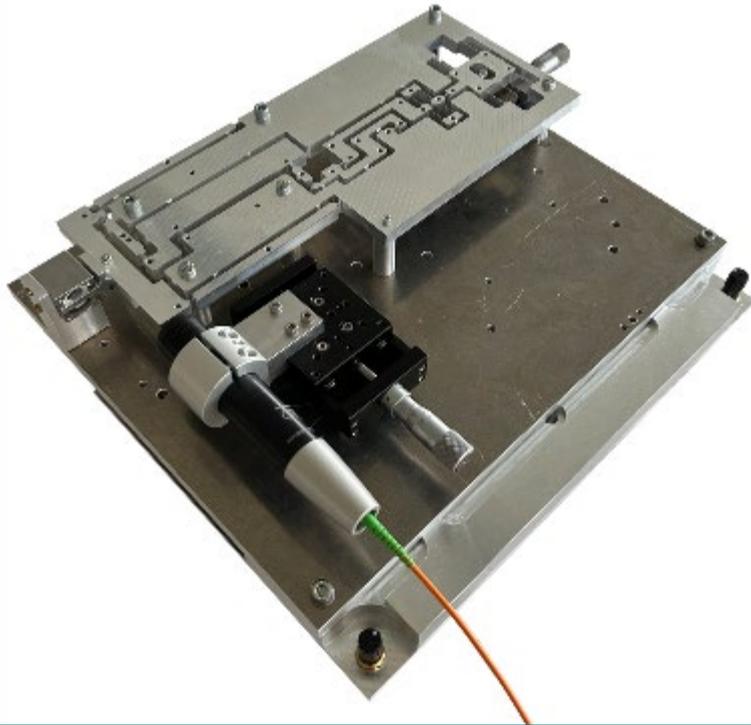
# Feinwerktechnische Herausforderungen

## Federbasierte Steifigkeitskompensation – Konzept



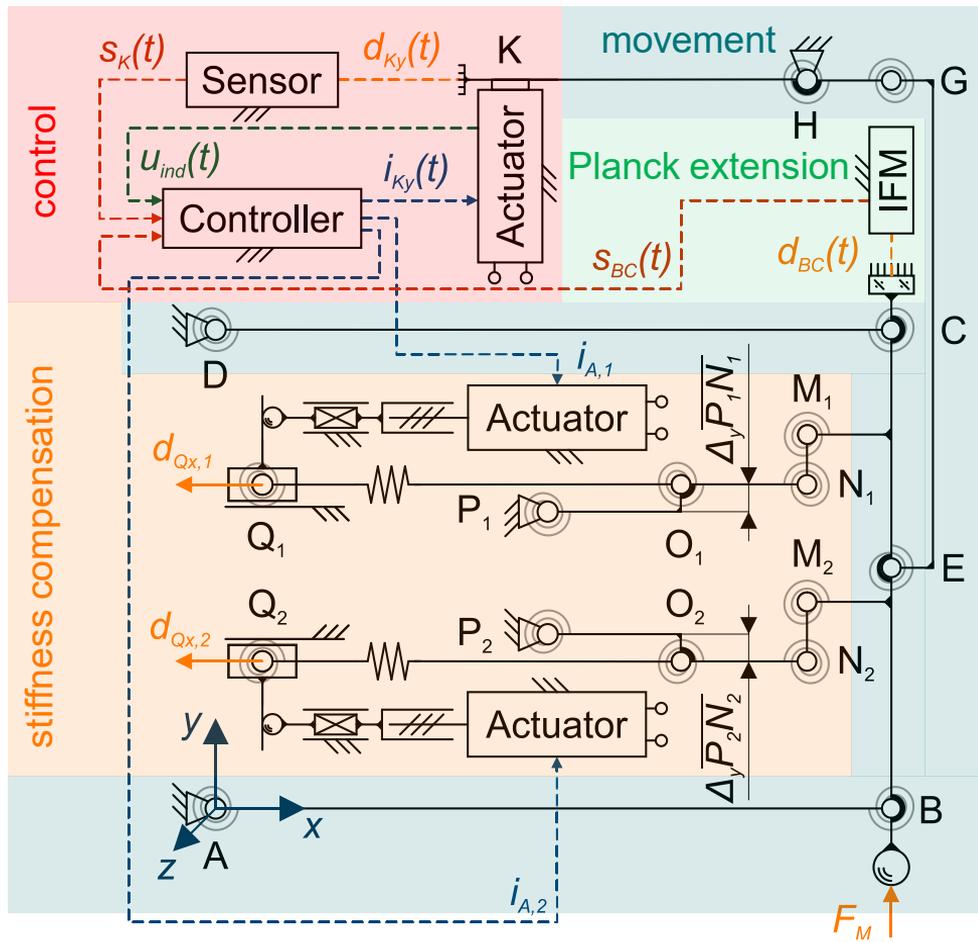
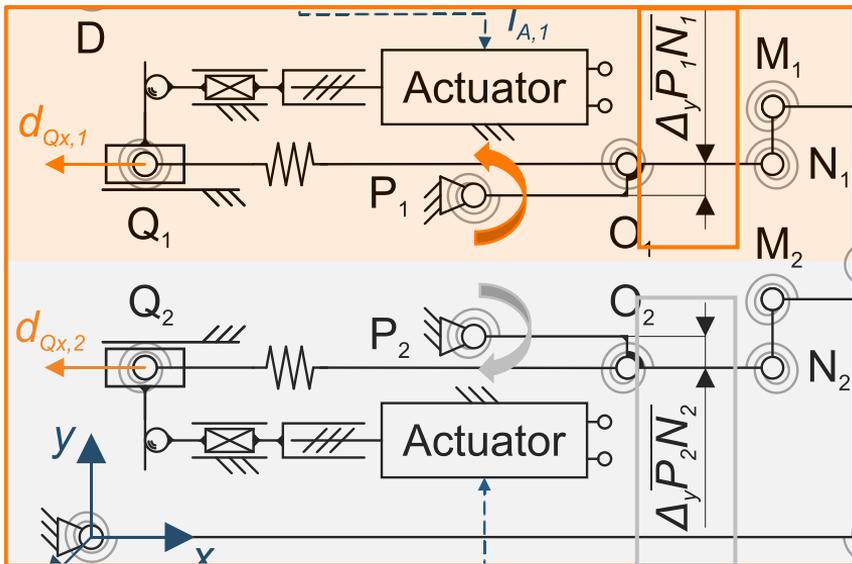
# Feinwerktechnische Herausforderungen

## Federbasierte Steifigkeitskompensation – Experiment



# Feinwerktechnische Herausforderungen Doppelanordnung

## Justage der Steifigkeitskompensation und des Messbereichs



# Definierte Kraftverzweigung

## Gestaltung des Mechanismus

### Messkreis

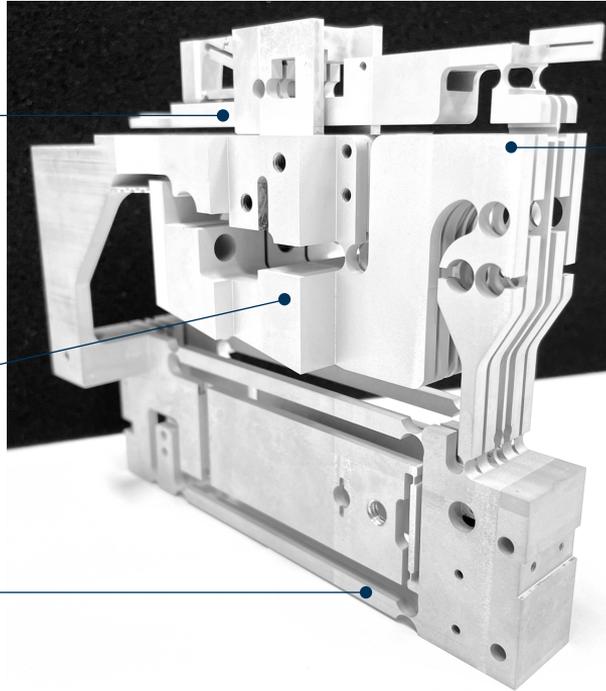
Konstruktionsprinzip: Funktionentrennung

### Nennlastkompensation/ Justierung Steifigkeit

Konstruktionsprinzip: Funktionentrennung

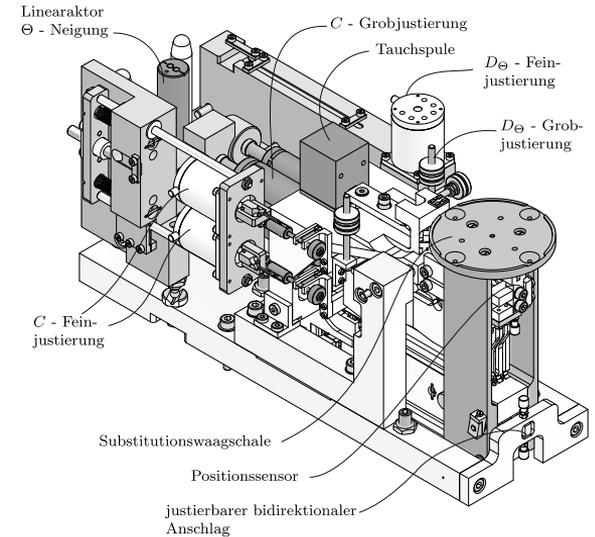
### Linearführung

Konstruktionsprinzip: Funktionentrennung



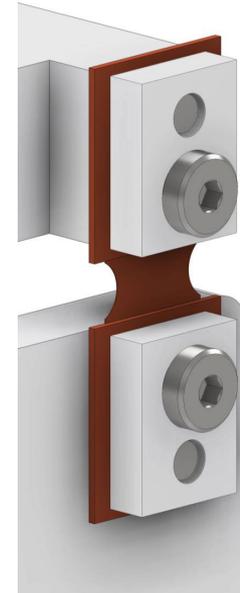
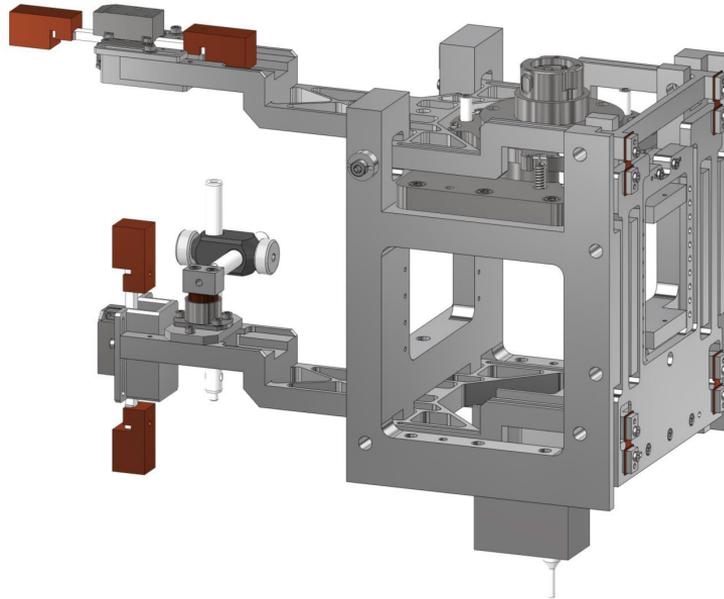
### Geschichtetes Hebelsystem

Konstruktionsprinzip: Kraftausgleich (Symmetrie)



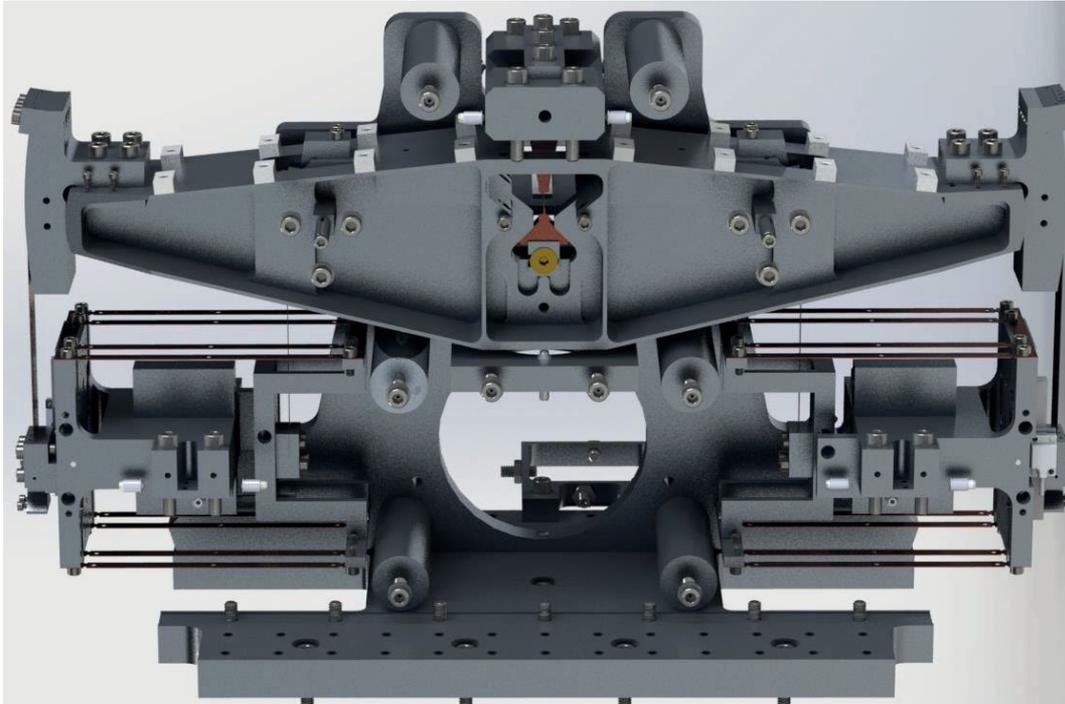
# Feinwerktechnische Herausforderungen

Gestaltung des Mechanismus für eine Vorrichtung zur Darstellung des Bequerell für das NIST



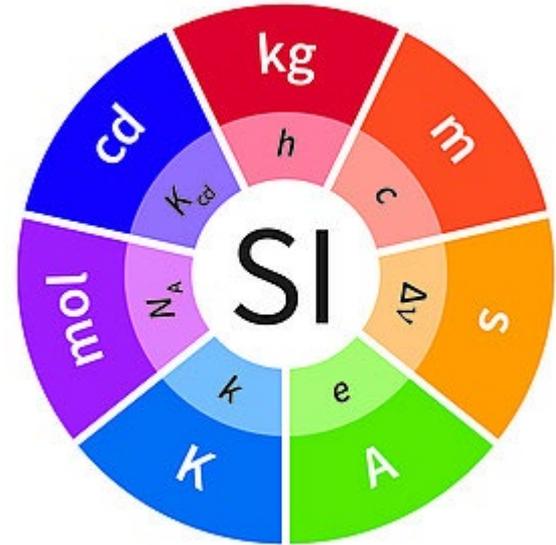
# Feinwerktechnische Herausforderungen

Gestaltung des Mechanismus einer Kibble Waage für das NIST



# Zusammenfassung

- Messen heist Vergleichen
- Die Entwicklung der Zivilisation ist eng mit Messtechnik verbunden
- Waagen gibt es seit mindestens 5000 Jahren
- Das Urkilogramm im BIPM bei Paris hat ausgedient
- Alle SI-Einheiten basieren seit 2019 auf Naturkonstanten
- Eine direkte Rückführung ist möglich aber aufwändig
- Komparatoren und Masseartefakte bleiben unverzichtbar
- Viele Anwendungen über das Wägen hinaus:
  - Nanomesstechnik und –fabrikation
  - Kleinste Kräfte und Momente
  - Mehrdimensional
- Messen ist kein Selbstzweck



# Zusammenfassung

- Methodisches Vorgehen unter Anwendung der Prinzipien der Feinwerktechnik
  - Fehlerarme Anordnungen
  - Funktionstrennung
  - Kraftfluss
  - Funktionswerkstoff an Funktionsstelle
- Domänenübergreifende Zusammenarbeit
- Theoretische und experimentelle Arbeiten
- Vakuumgerechte Konstruktion
- Fertigungsgerechte Konstruktion



# Danke für Ihre Aufmerksamkeit!

Prof. Dr.-Ing. René Theska

Institut für Maschinen- und Gerätekonstruktion

Fachgebiet Feinwerktechnik/ Precision Engineering

rene.theska@tu-ilmenau.de | [www.tu-ilmenau.de/fwt](http://www.tu-ilmenau.de/fwt)



## Besucheradresse:

Technische Universität Ilmenau  
Gustav-Kirchhoff-Platz 2  
D-98693 Ilmenau