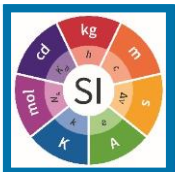


Anforderungen an Temperaturmessbrücken und deren Kalibrierung

Steffen Rudtsch



1

Widerstandsthermometrie

2

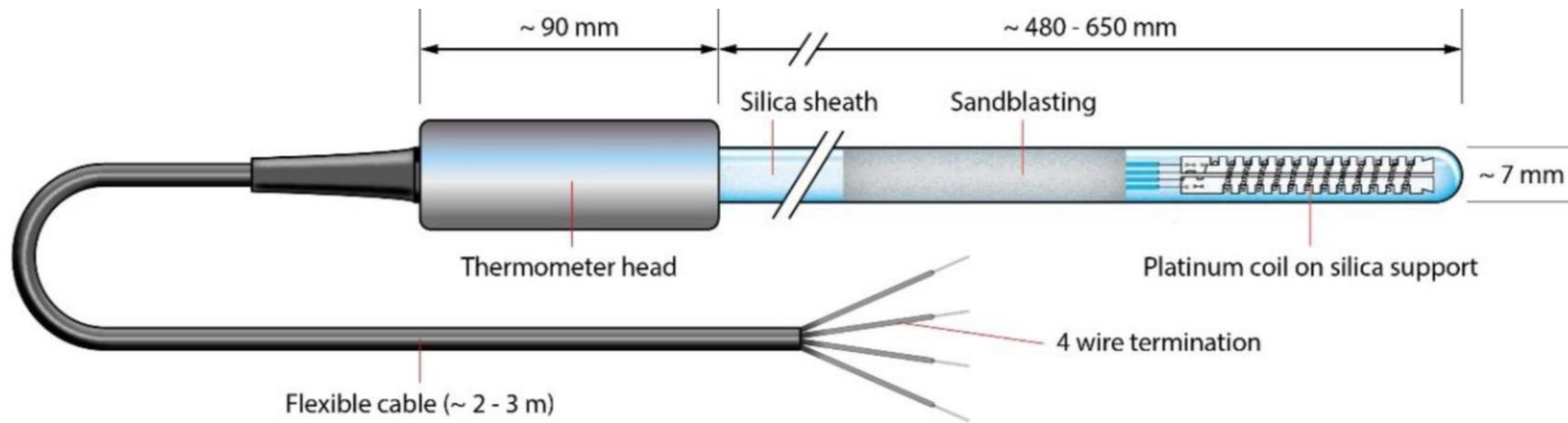
Mess- und Kalibrierverfahren + MU

3

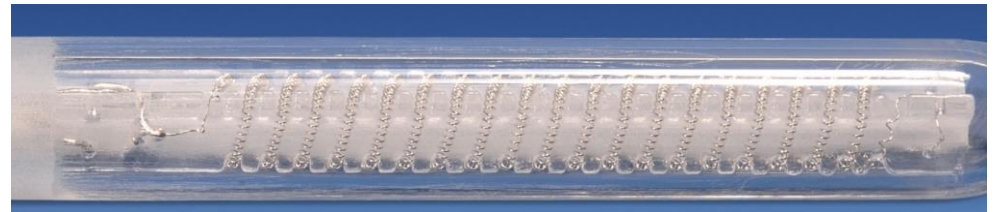
Kalibrierung und Linearitätstest

4

Beispiele



ca. 25 Ohm bei 0 °C



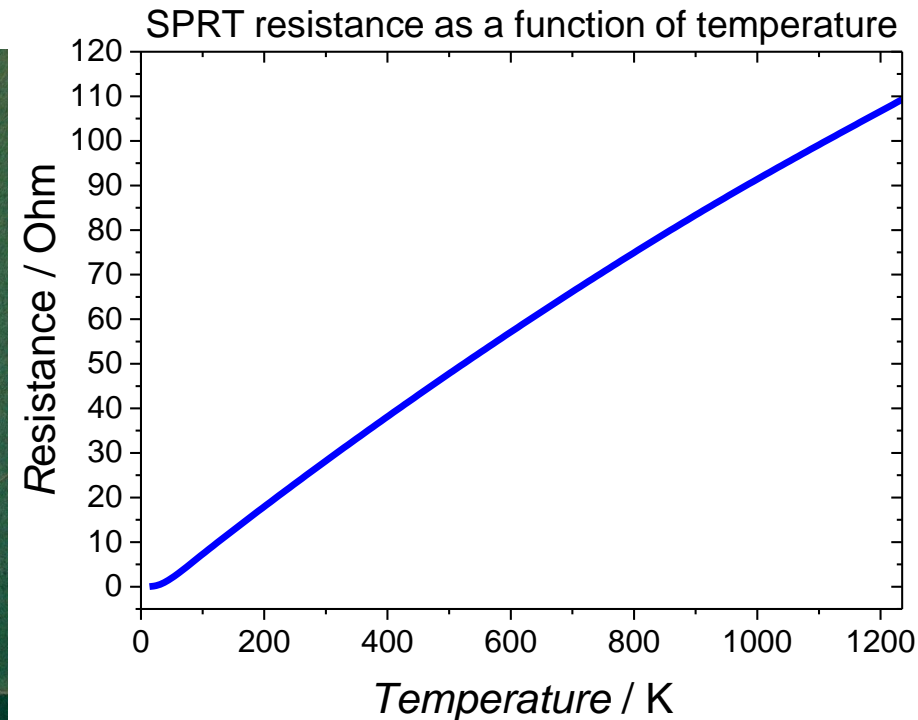
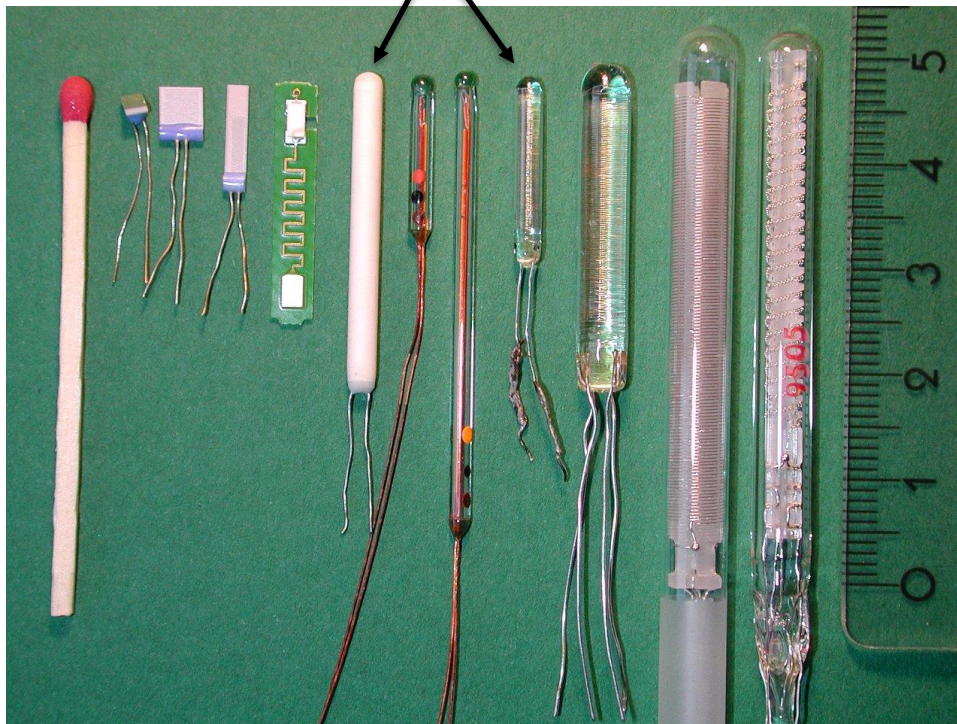
- Platindraht mit höchster Reinheit
- "induktionsfreier" Aufbau
- mechanisch spannungsfreier Aufbau
- spezifische Gasfüllung (zur Kontrolle der Oxidation und der Verhinderung von Kontaminationen)
- spezielle Wärmebehandlung (Kontrolle der Versetzungen im Pt-Kristall)

- Standard Platinum Resistance Thermometer (SPRT)
- Industrial Platinum Resistance Thermometer (IPRT)

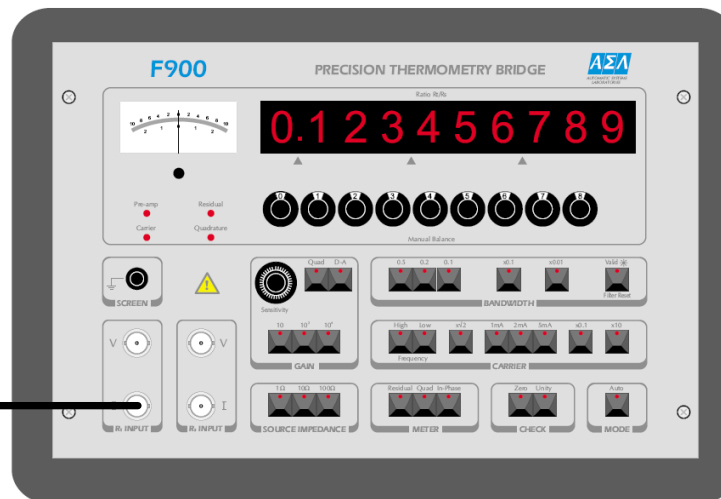
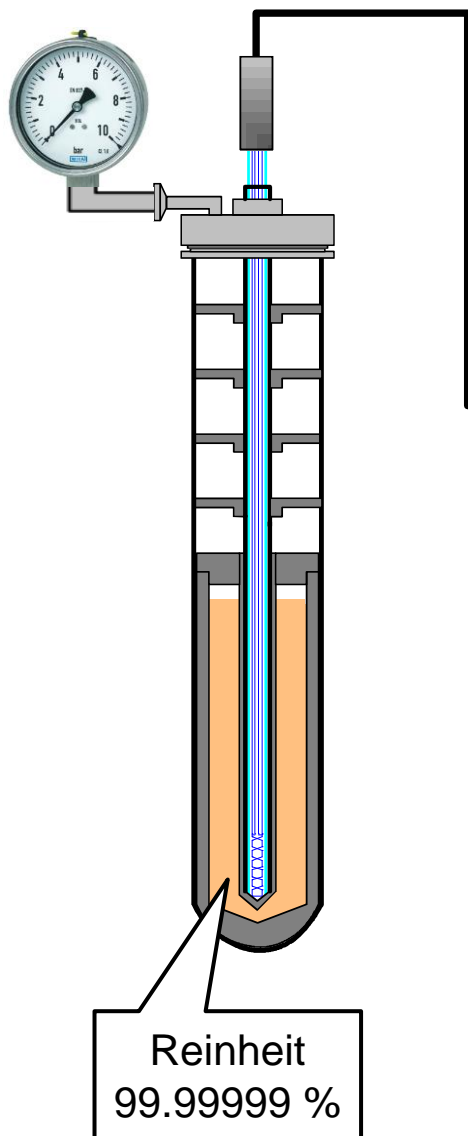
Dünnsfilm-IPRTs

“drahtgewickelte“
IPRTs SPRTs

SPRTs



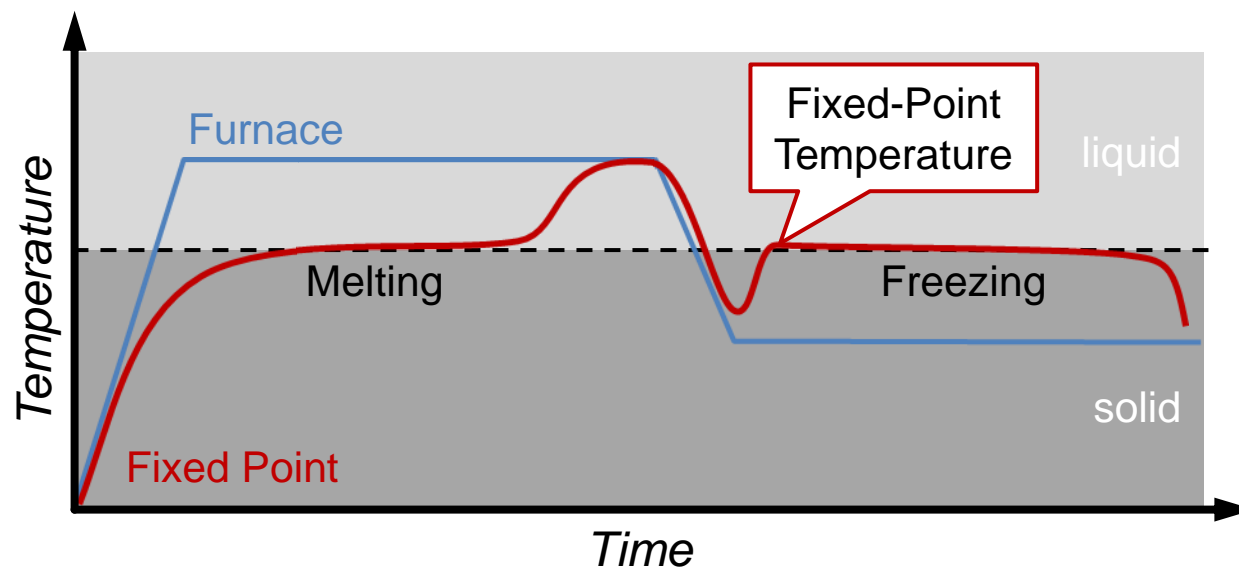
Kalibrierung eines Normalthermometers

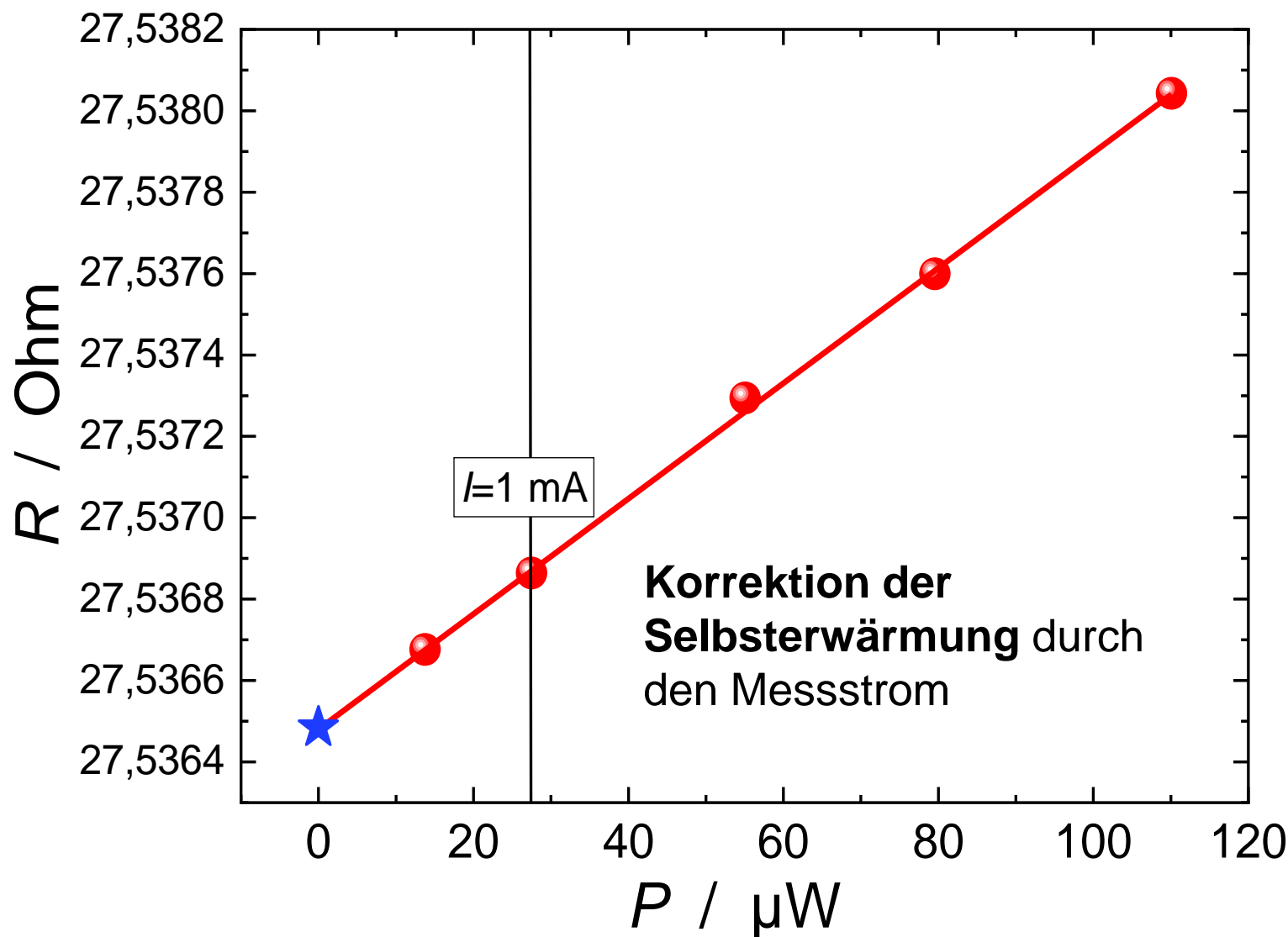


Elektrische Präzisions-
messung

$$\frac{\Delta R}{R} = 2 \cdot 10^{-8} \text{ (0.02 ppm)}$$

$$\Delta T \approx 5 \mu\text{K}$$





Unterscheidung: Fixpunktkalibrierung / Thermometerkalibrierung (SPRT)

1. Fixpunktvergleiche: kleiner Messbereich, ca. 0,1 Ohm
 - hohe Genauigkeit der R -Differenz erforderlich
 - sehr geringe Temperaturdifferenzen mit einer Unsicherheit $< 5 \mu\text{K}$ messen:
rückgeführte Messung einer **Widerstandsänderung**
 $U(R \approx 25 \Omega) = 0,5 \mu\Omega$ (= rel. $2 \cdot 10^{-8}$)
2. SPRT: ca. 5 Ohm bis 90 Ohm (-190°C bis 660°C)
 - unmittelbar aufeinander folgende Messungen des Widerstands bei einer Fixpunkttemperatur und am Wassertripelpunkt
 $W_{\text{AI}} = R_{\text{AI}} / R_{\text{TPW}} \approx 86,1 \Omega / 25,5 \Omega = 3,376$
3. HT-SPRT: ca. 0,2 Ohm bis 1,1 Ohm (0°C bis 962°C)

Beispiel: SPRT im Bereich von 5 Ω bis 90 Ω mit $R_N = 100 \Omega$

Vorgabe: Messunsicherheit der Widerstandsmessung soll 20 % der CMC-MU entsprechen

**Anforderungen an
die Linearität im
Gesamtbereich**

	R Ohm	$U_{\text{CMC}}(T)$ mK	$U(R)$ $\mu\Omega$	$U(\text{Ratio}_{\text{Br}})$ ppm
Ar	5,5	0,62	14	2,5
Hg	21,5	0,3	6	0,3
TPW	25,5	0,1	2	0,08
Ga	28,5	0,25	5	0,2
In	41,0	0,9	2	0,4
Sn	48,3	0,9	2	0,4
Zn	65,5	1,3	2	0,4
Al	86,1	2	3	0,4

Anforderungen an die (absolute) Genauigkeit der Widerstandsmessung

Thermometerwiderstand am Wassertripelpunkt (25,5 Ohm, $MU=0,1$ mK, davon 20 %)

$U(R) = 2 \mu\Omega$ (= rel. $8 \cdot 10^{-8}$)

Spezifikation „0,1 mK“ oder besser

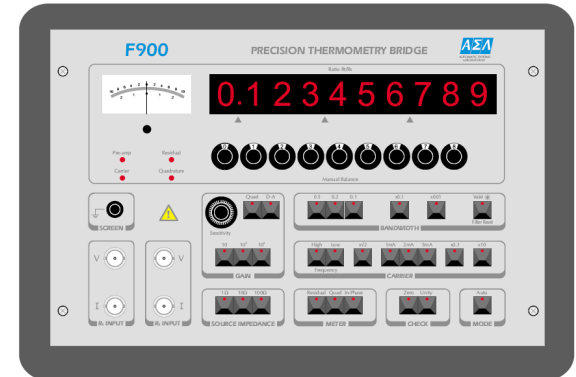
Messgröße: Widerstandsverhältnis

AC-Messbrücken (25 Hz, 75 Hz)

basieren auf induktiven Spannungsteilern

Messbereich: 0,1 bis 1,3

spezif. Unsicherheit: $2 \cdot 10^{-8}$



www.wika.de

DC-Messbrücken (mit Stromumkehr)

Prinzip des Stromkomparators

Messbereich: 0,1 bis 5

spezif. Unsicherheit: $1,5 \cdot 10^{-8}$



www.mintl.com

Messbereich: 0,1:1 bis 13:1

spezif. Unsicherheit: $1,5 \cdot 10^{-8}$



www.guildline.com

Spezifikation: „0,1 mK“ oder besser

Verfahren: „AD-Wandler“

Bereich: bis 100 k Ω
spezif. Unsicherheit: bis $3 \cdot 10^{-8}$ (abhäng. von Typ und Bereich)

Bereich: bis 500 k Ω
spezif. Unsicherheit: $6 \cdot 10^{-8}$ to $5 \cdot 10^{-7}$ (abh. vom Bereich)



www.klasmeier.com



www.calplus.de

Spezifikation: (1 bis 2) mK



www.wika.de



www.isotech.co.uk

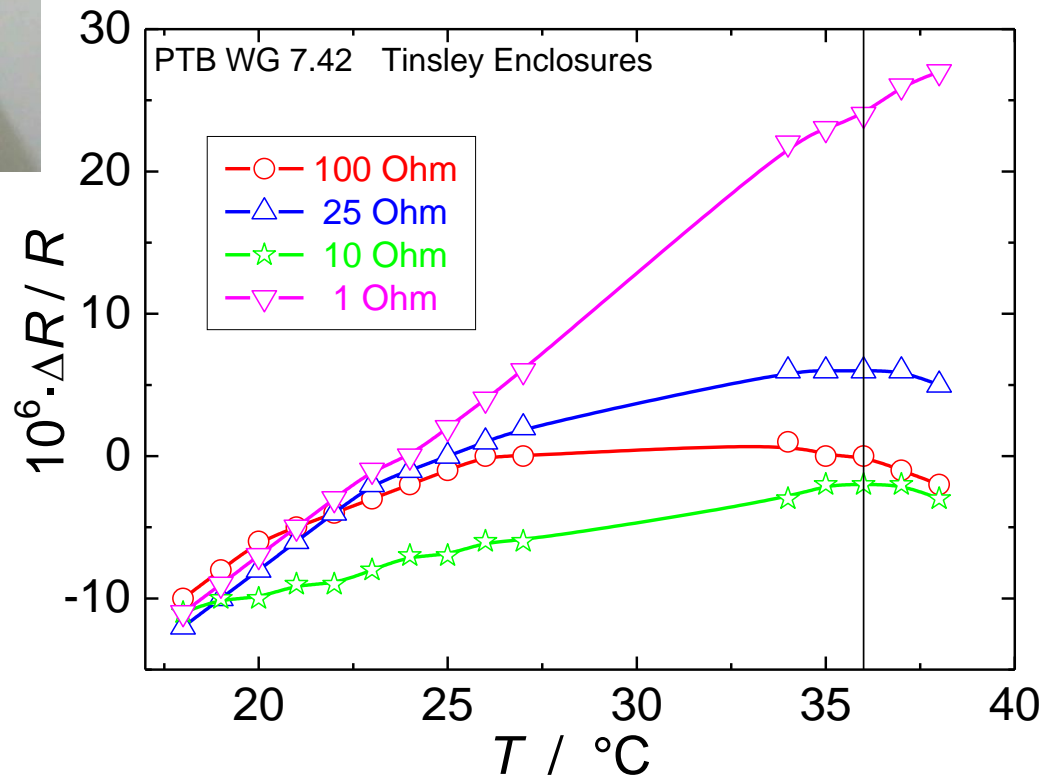


www.anton-paar.com



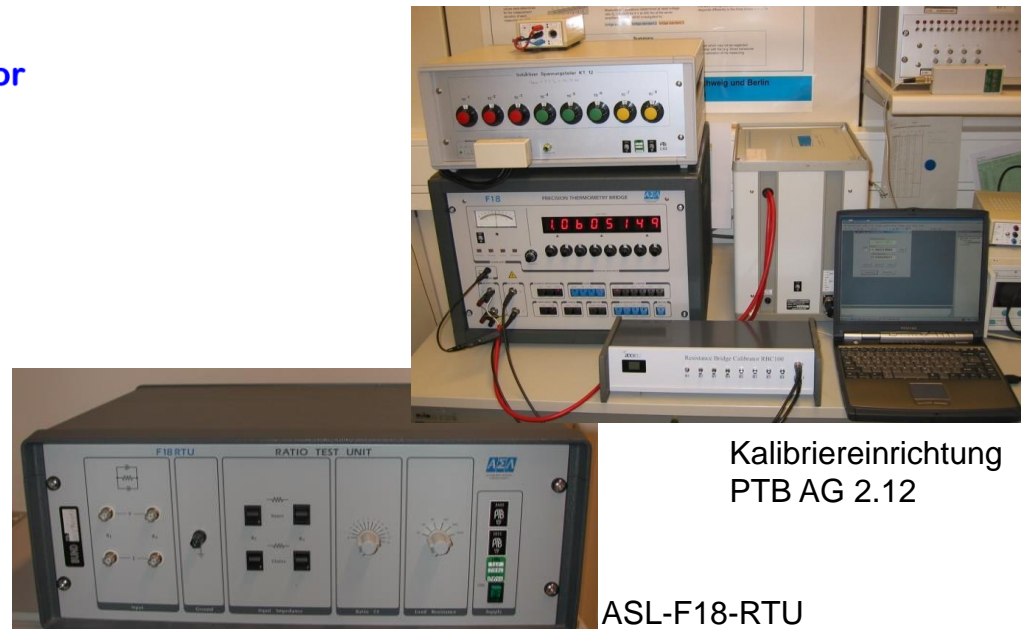
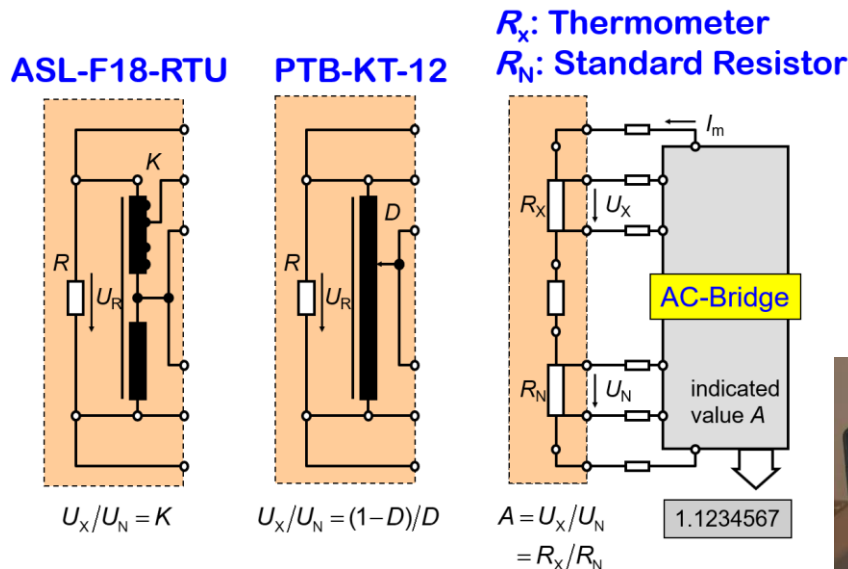
Kalibrierunsicherheit: $1 \cdot 10^{-8}$ möglich
 Langzeitstabilität variiert sehr stark
 d.h.: $\Delta R_s(\text{Zeit}) = (50 \text{ to } 300) \cdot 10^{-8} / \text{Jahr} !$

Temperaturabhängigkeit: ca. 2 ppm / °C



Kalibrierung mittels Vergleich mit bekanntem Widerstandsverhältnis

- kalibrierte Normalwiderstände (AG 2.11)
 - nur wenige Verhältnisse verfügbar
 - Langzeitstabilität des Normalwiderstands
- Vergleich mittels Kryostromkomparator (AG 2.11)
 - limitierte Verfügbarkeit
- Kalibrierung von AC-Brücken mittels induktiver Spannungsteiler (AG 2.12)



Linearitätstests und Vertauschungsfehler

Resistance Bridge Calibrator (RBC) für AC- und DV-Messbrücken einsetzbar !

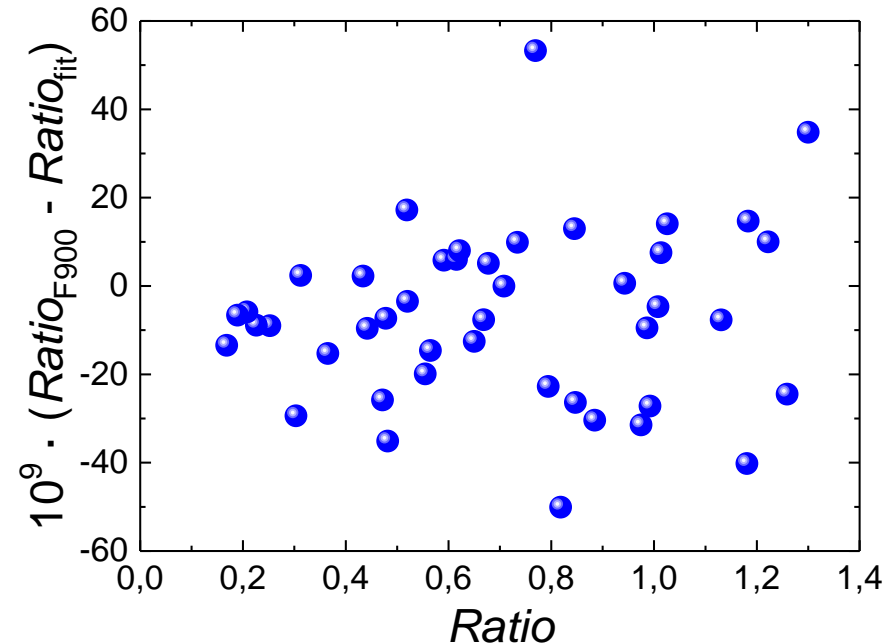
kommerziell erhältlich, vier Widerstände (Hamon-Netzwerk),
Reihen- und Parallelschaltung \Rightarrow max. 35 verschied. Widerstände

untersch. Versionen: RBC-100: 17 Ω ...130 Ω , Spezifik.: 0,01 ppm (thermostatisiert)

RBC-400: 30 Ω ...400 Ω



www.isotech.co.uk



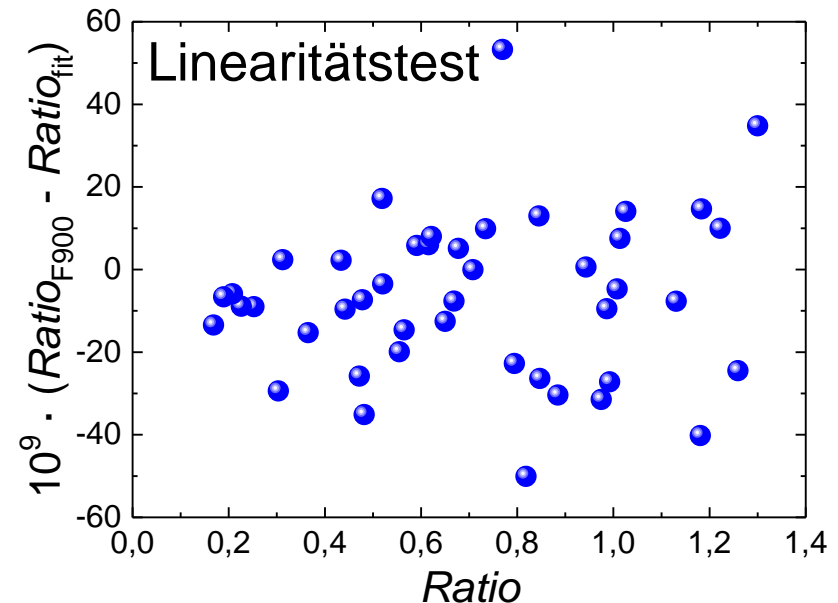
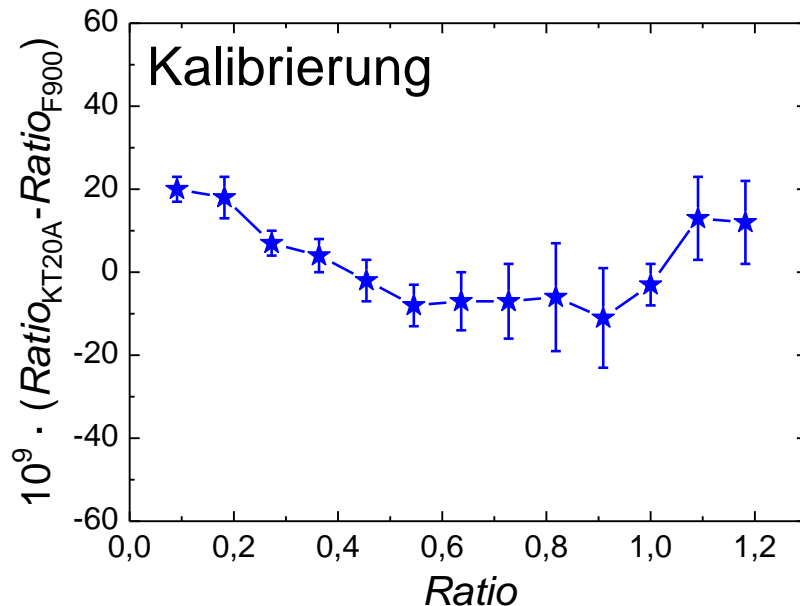
Spezialfall Vertauschungsfehler V für ausgewählte Widerstandsverhältnisse

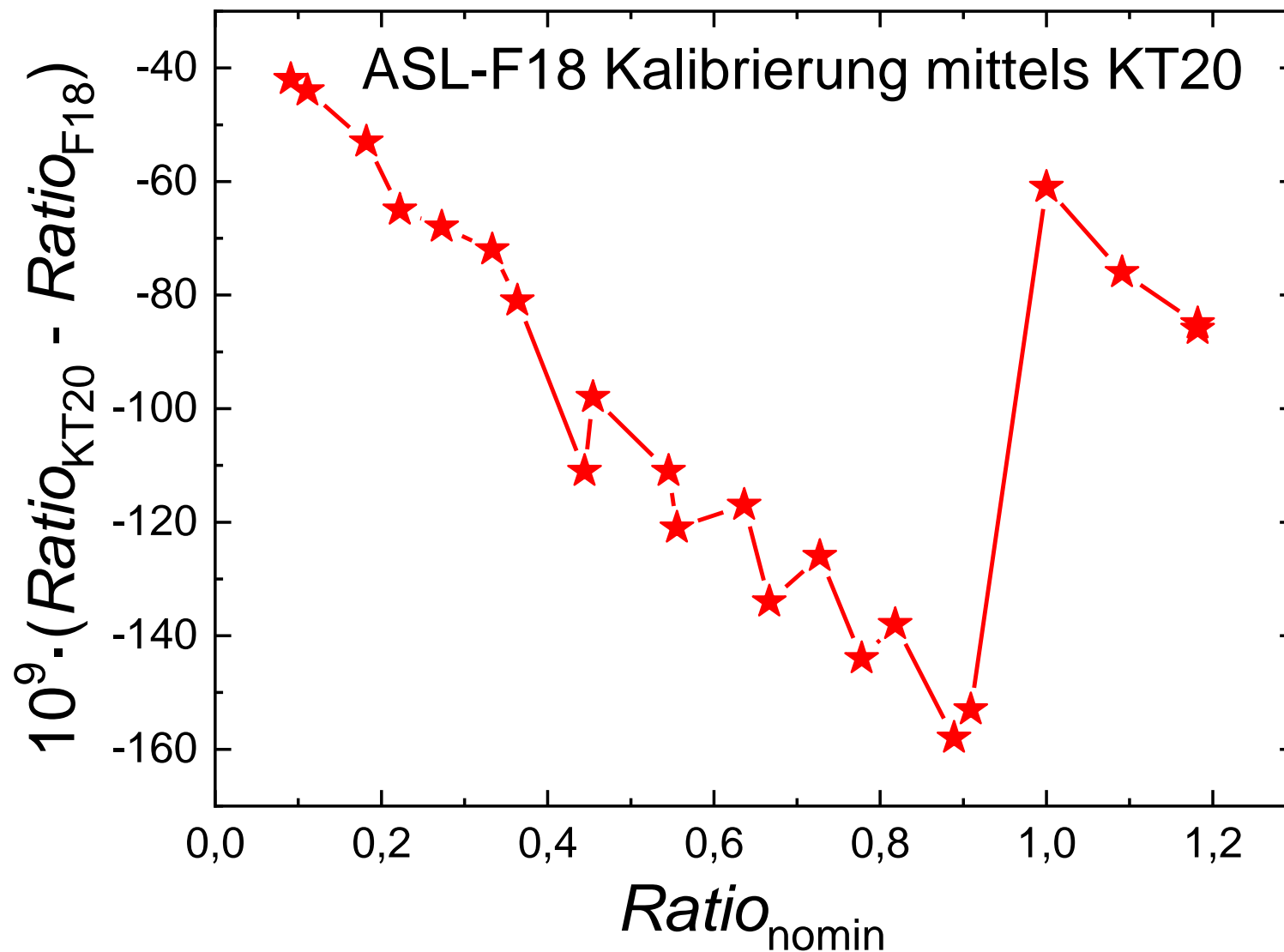
bei bekannten
Widerstandswerten

= Kalibrierung bei
einigen
Widerstandsverhältnissen

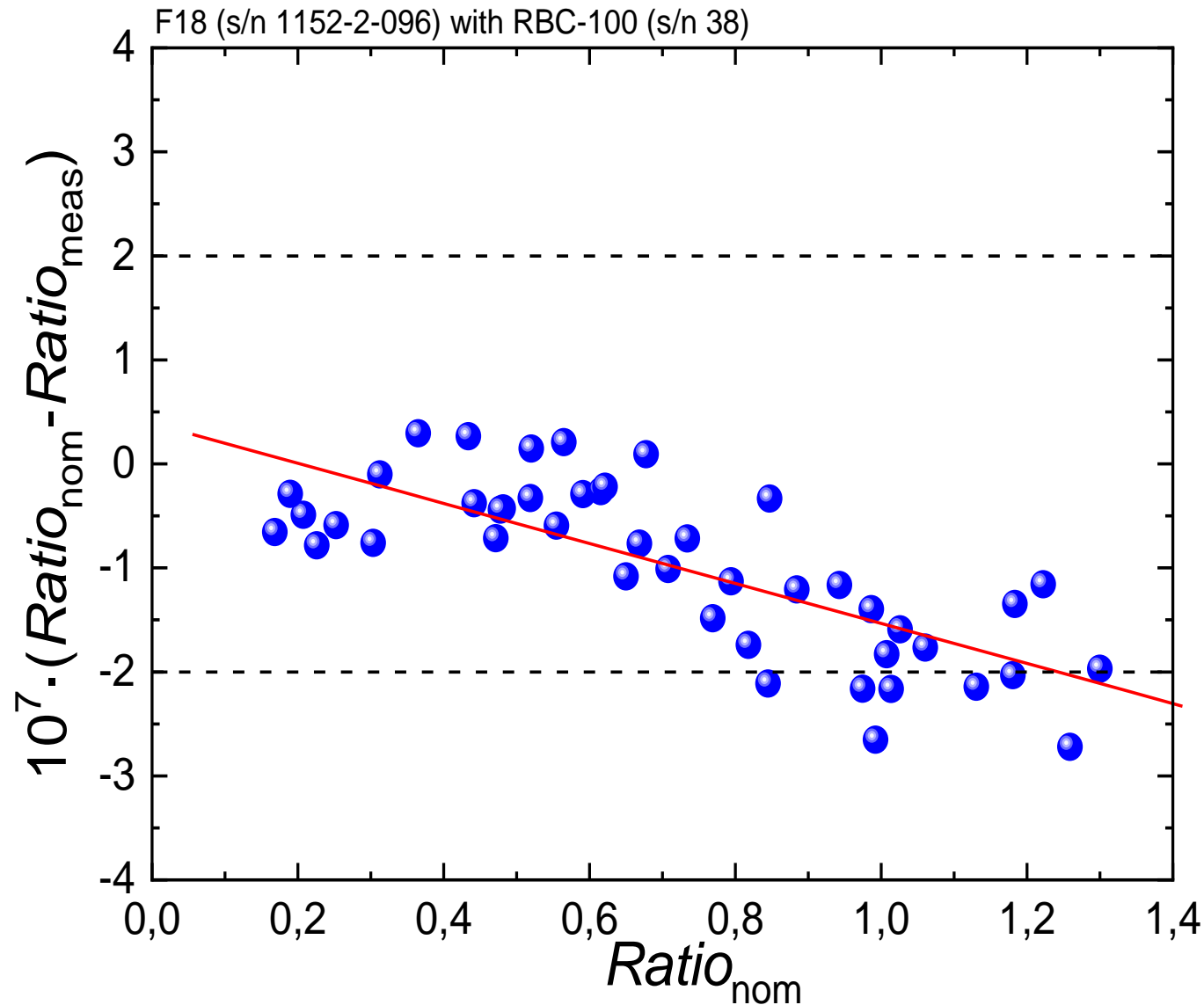
$$V = \left(\frac{\left(\frac{R_1}{R_2} \cdot \frac{R_2}{R_1} \right) - 1}{2} \right)$$

1. *Widerstandsverhältnis* = R_T / R_N
2. Kalibrierung einer Messbrücke für Widerstandsverhältnisse
3. Linearitätstest bei einer Messbrücke

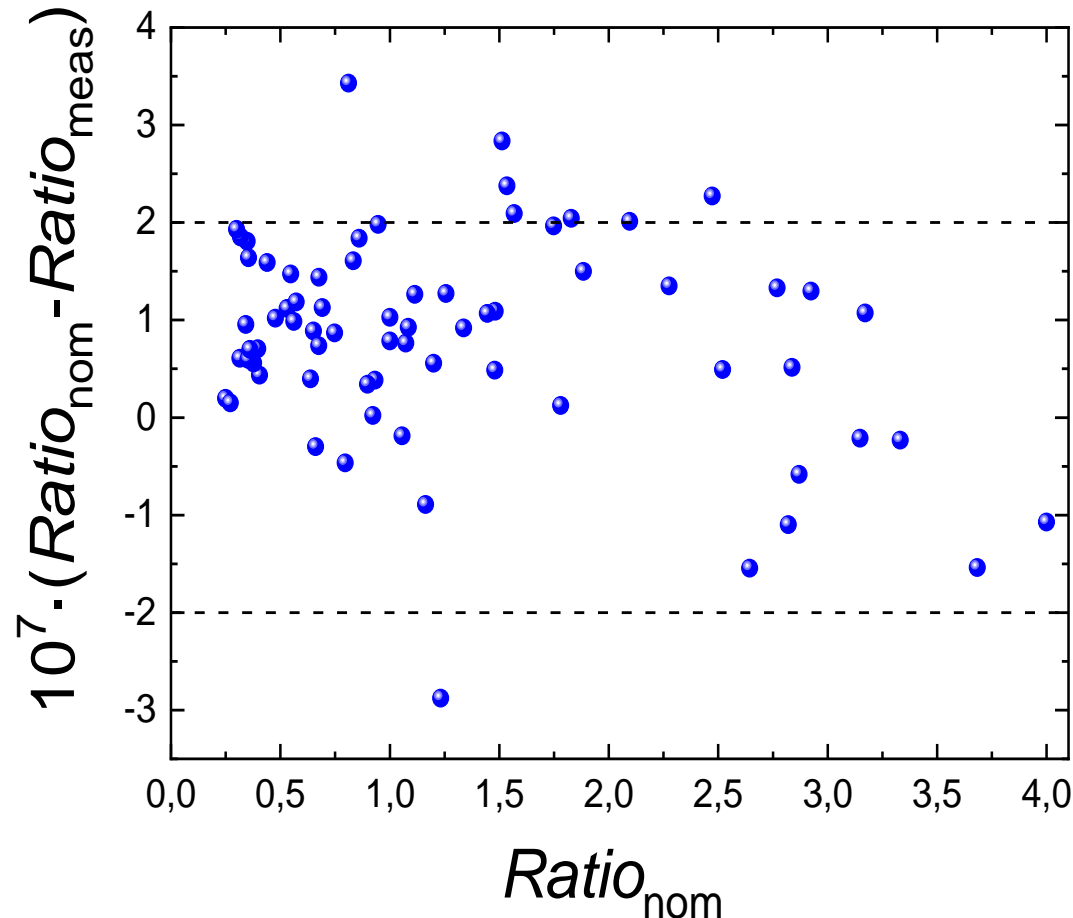




Beispiel für einen „Anstiegsfehler“

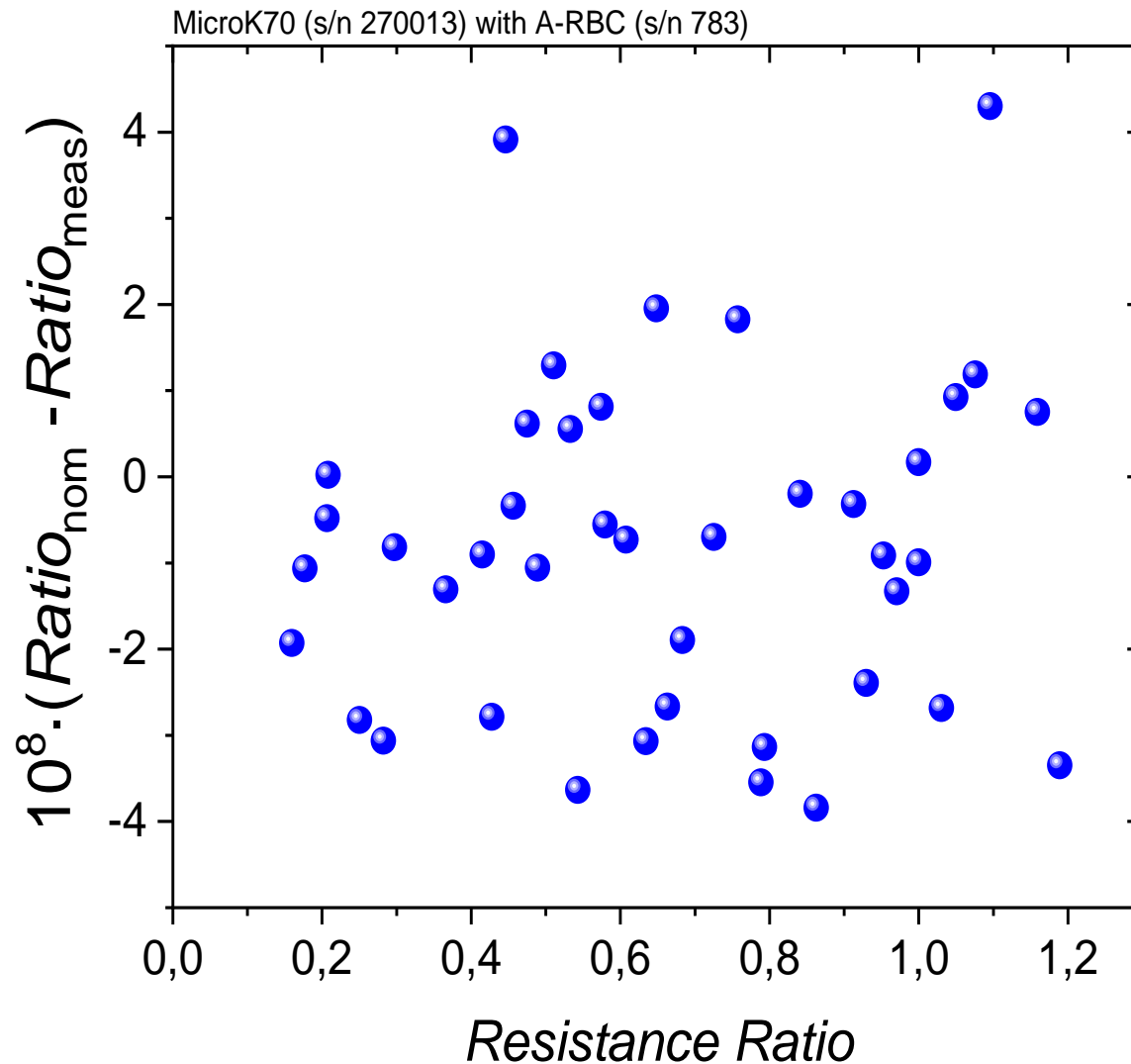


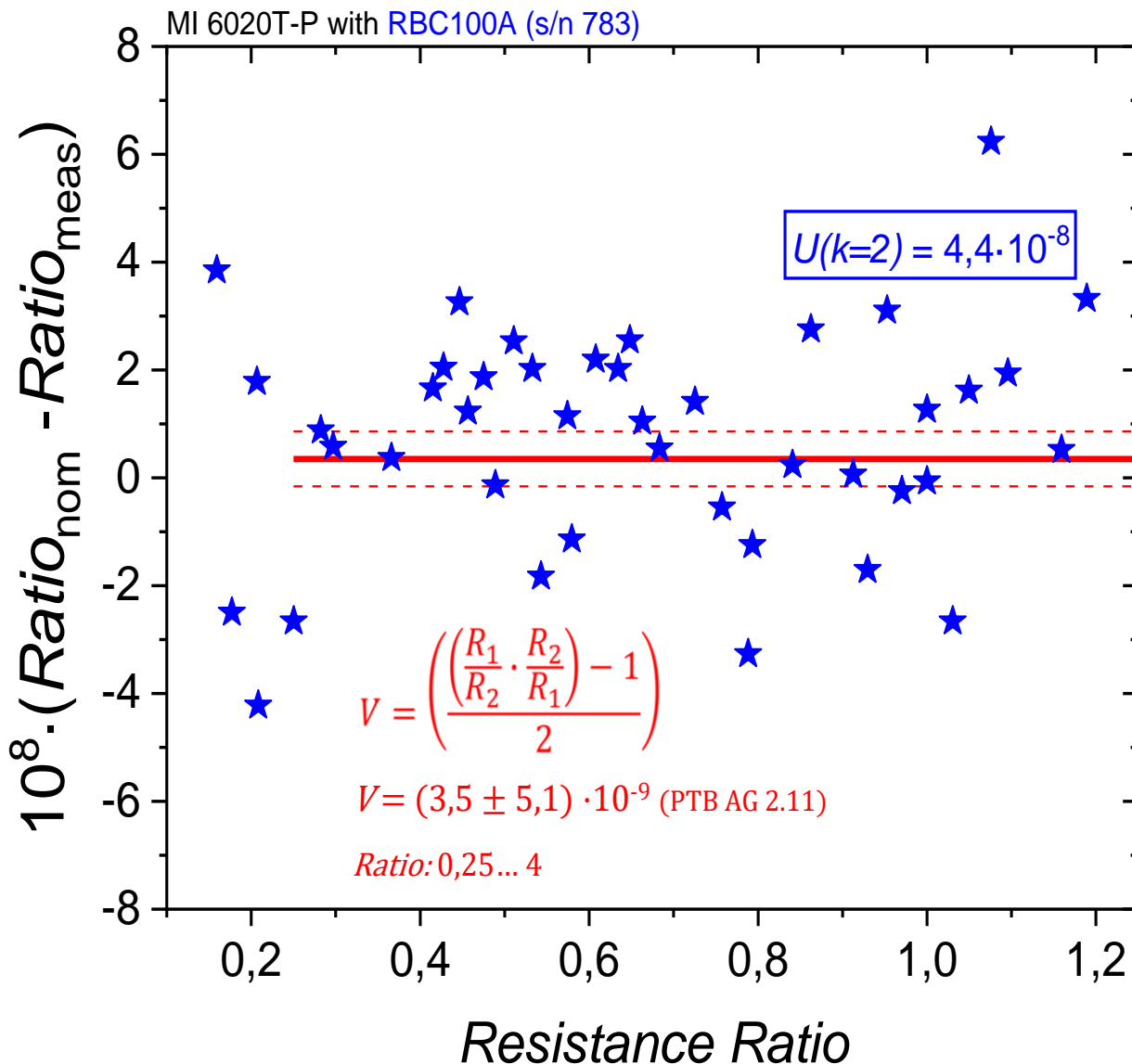
Linearität der Messbrücke war vom Hersteller mit $5 \cdot 10^{-8}$ spezifiziert



Ursache: Messbrücke ist so ausgelegt, dass die spezifizierte MU nur im Ratiobereich von 1 bis 10 erreicht wird.

Nachweis der Spezifikation durch Vertauschungsmessung ist nicht möglich





- 1 AC-Messbrücken: PTB-Kalibrierverfahren (AG 2.12) ist die Methode der Wahl, hat sich bewährt und erfüllt derzeit alle Anforderungen ($3 \cdot 10^{-8}$), konsistent mit RBC-Linearitätstest ($4 \cdot 10^{-8}$)
- 2 DC-Messbrücken: Linearitätstest mittels RBC hat sich für moderate Genauigkeitsanforderungen bewährt ($5 \cdot 10^{-7}$)
- 3 DC-Messbrücken: Mit dem Linearitätstest mittels RBC können in Einzelfällen sehr geringe MU erreicht werden ($4 \cdot 10^{-8}$).
- auf diesem Niveau sehr störanfällig (Schirmung, Thermostatisierung,...)
- 4 DC-Messbrücken: Es ist derzeit noch nicht abschließend geklärt, in welchen Fällen eine Kalibrierung/Linearitätstest bei wenigen Punkten ausreicht.
- 5 Normalwiderstände: unbefriedigende Situation wegen der oft unzureichenden zeitlichen Stabilität des Widerstandswertes

Measurement of the Universal Gas Constant R Using a Spherical Acoustic Resonator

Volume 93

Number 2

March–April 1988

M. R. Moldover, J. P. M. Trusler¹,
and T. J. Edwards²
National Bureau of Standards
Gaithersburg, MD 20899

J. B. Mehl
University of Delaware
Newark, DE 19716

and

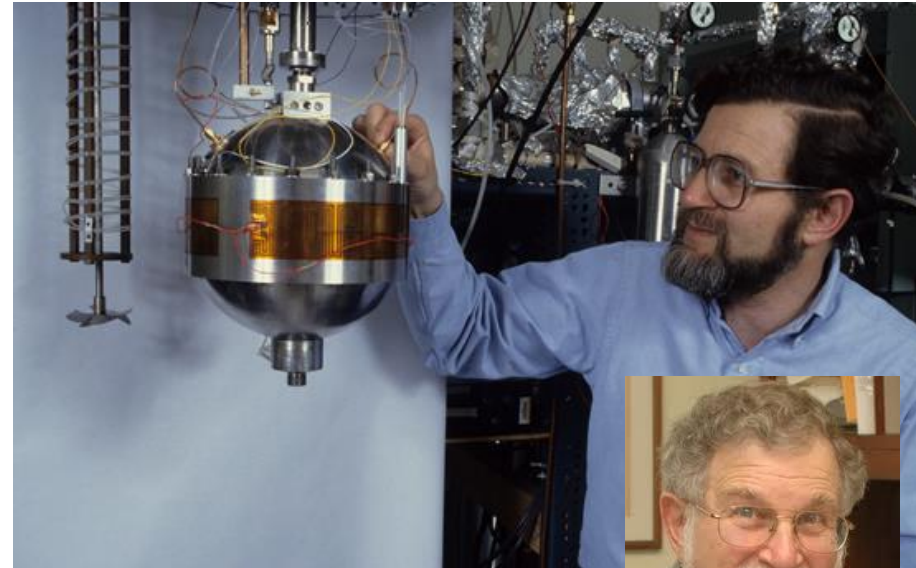
R. S. Davis
National Bureau of Standards
Gaithersburg, MD 20899

We report a new determination of the Universal Gas Constant R : $(8.314\,471 \pm 0.000\,014) \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$. The uncertainty in the new value is 1.7 ppm (standard error), a factor of 5 smaller than the uncertainty in the best previous value. The gas constant was determined from measurements of the speed of sound in argon as a function of pressure at the temperature of the triple point of water. The speed of sound was measured with a spherical resonator whose volume was determined by weighing the mercury required to fill it at the tem-

perature of the triple point. The molar mass of the argon was determined by comparing the speed of sound in it to the speed of sound in a standard sample of argon of accurately known chemical and isotopic composition.

Key words: argon; fundamental constants; ideal gas; mercury; molar gas constant; R ; resonator; speed of sound; spherical resonator; temperature; thermometry; Universal Gas Constant.

Accepted: October 30, 1987



Paraphrasing Meyers, we are willing to bet our own money at even odds that our reported value is correct to 5 parts in 10^6 , and if by any chance our value is shown to be in error by more than 10 parts in 10^6 , we are prepared to eat the apparatus, drink the mercury, and breathe the argon!