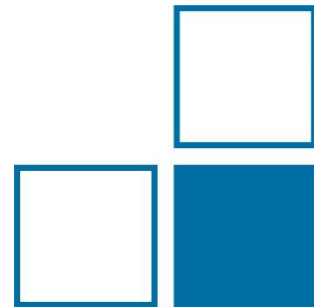


# Einsatz eines Kryostromkomparators in der Widerstandsthermometrie

Martin Götz,  
AG „Gleichstrommesstechnik“



- Kryostromkomparator- oder CCC-Messbrücke
- Wasser-Tripelpunkt-Zelle & Platin-Widerstandsthermometer (SPRT) & CCC-Messbrücke
- Messunsicherheit & Allan-Varianz-Analyse
- Bestimmung des hydrostatischen Druckkoeffizienten
- Zusammenfassung & Ausblick

- Kryostromkomparator- oder CCC-Messbrücke
- Wasser-Tripelpunkt-Zelle & Platin-Widerstandsthermometer (SPRT) & CCC-Messbrücke
- Messunsicherheit & Allan-Varianz-Analyse
- Bestimmung des hydrostatischen Druckkoeffizienten
- Zusammenfassung & Ausblick

... und warum eine Wiederholung großartig wäre!

# Kryostromkomparator (CCC)

- Erstveröffentlichung vor rund 50 Jahren:  
I. K. Harvey, „A precise low temperature  
**dc ratio transformer**,“ *Rev. Sci. Instrum.*  
43, 1626 (1972),



PTB-Entwicklung (2008-12),  
danach Markteinführung

# Kryostromkomparator (CCC)

- Erstveröffentlichung vor rund 50 Jahren:  
I. K. Harvey, „A precise low temperature  
dc ratio transformer,“ *Rev. Sci. Instrum.*  
43, 1626 (1972),
- Messung von Widerstandsverhältnissen  
mit Unsicherheiten bis zu wenigen  $10^{-9}$ ,



PTB-Entwicklung (2008-12),  
danach Markteinführung

# Kryostromkomparator (CCC)

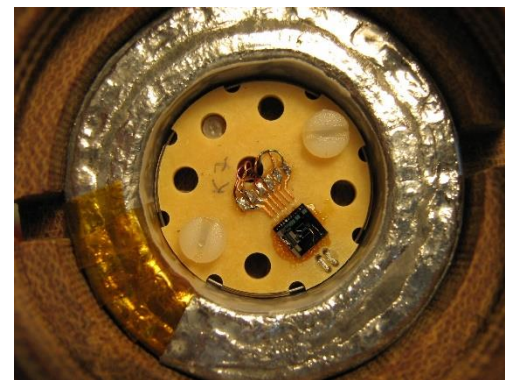
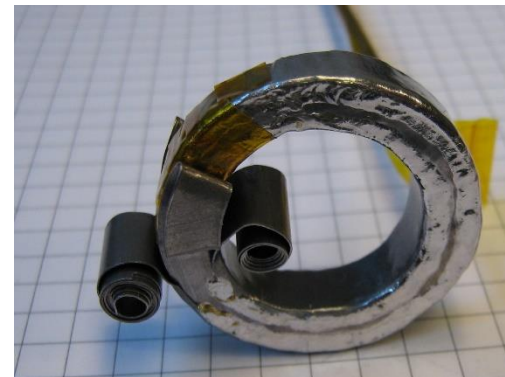
- Erstveröffentlichung vor rund 50 Jahren:  
I. K. Harvey, „A precise low temperature  
dc ratio transformer,“ *Rev. Sci. Instrum.*  
43, 1626 (1972),
- Messung von Widerstandsverhältnissen  
mit Unsicherheiten bis zu wenigen  $10^{-9}$ ,
- Brückenelektronik: Nanovoltmeter, syn-  
chrone Stromrichtungsumkehr (Unter-  
drückung von Thermospannungen), ...



PTB-Entwicklung (2008-12),  
danach Markteinführung

# Kryostromkomparator (CCC)

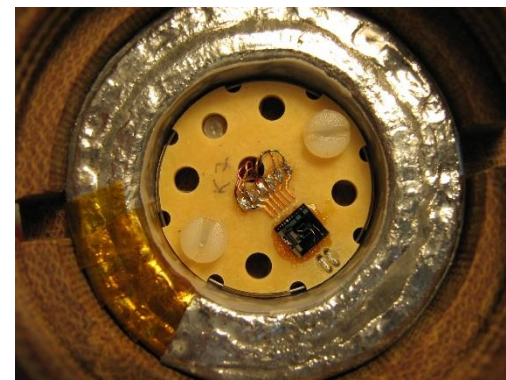
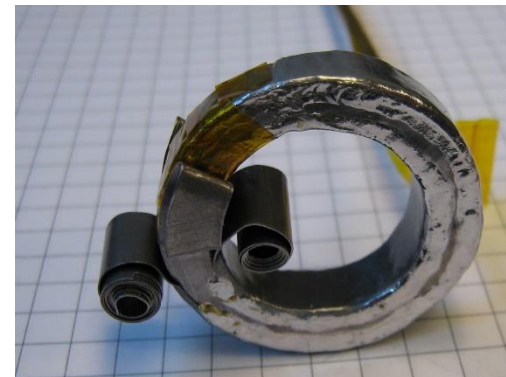
- basiert auf Supraleitung (Meissner-Ochsenfeld- & Josephson-Effekte) → benötigt LHe zur Kühlung,





# Kryostromkomparator (CCC)

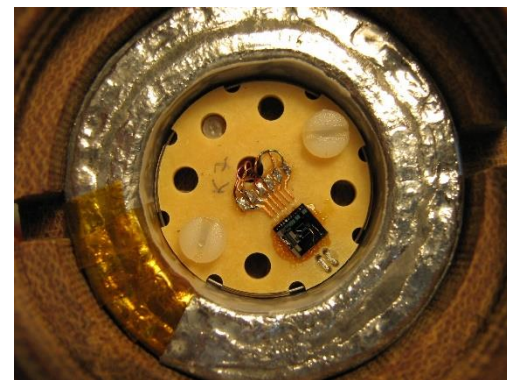
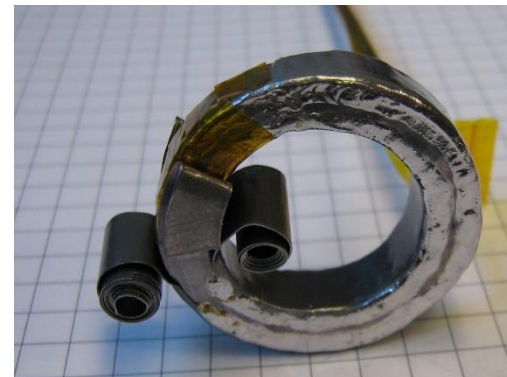
- basiert auf Supraleitung (Meissner-Ochsenfeld- & Josephson-Effekte) → benötigt LHe zur Kühlung,
- Schirmung ist entscheidend (hochpermeable & supraleitende Schirme) → ausreichend robust für Betrieb in ungeschirmter Umgebung (z.B. Thermometrielabor),



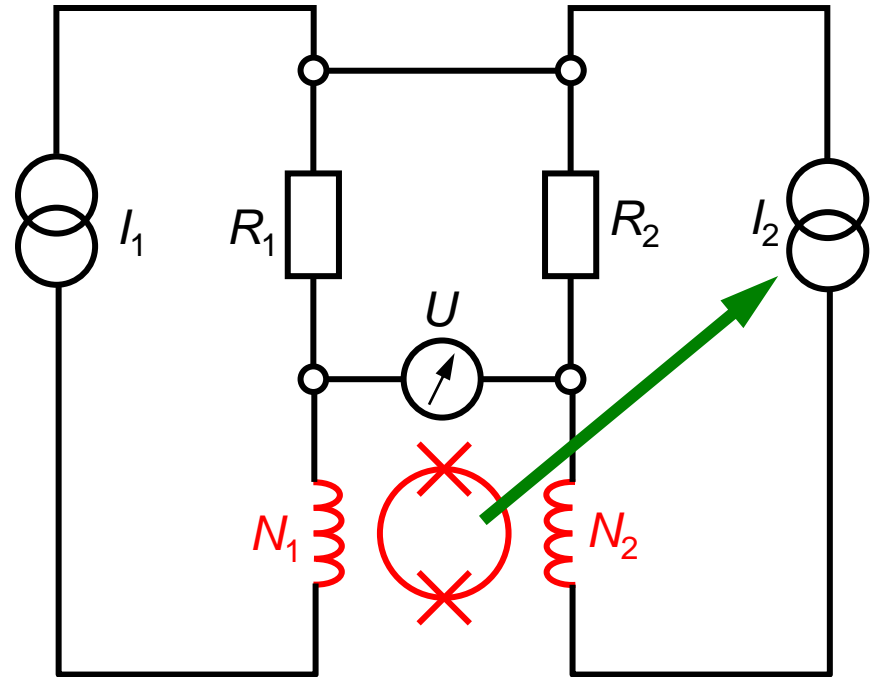


# Kryostromkomparator (CCC)

- basiert auf Supraleitung (Meissner-Ochsenfeld- & Josephson-Effekte) → benötigt LHe zur Kühlung,
- Schirmung ist entscheidend (hochpermeable & supraleitende Schirme) → ausreichend robust für Betrieb in ungeschirmter Umgebung (z.B. Thermometrielabor),
- sehr flexibel hinsichtlich der zu messenden Widerstandsverhältnisse.

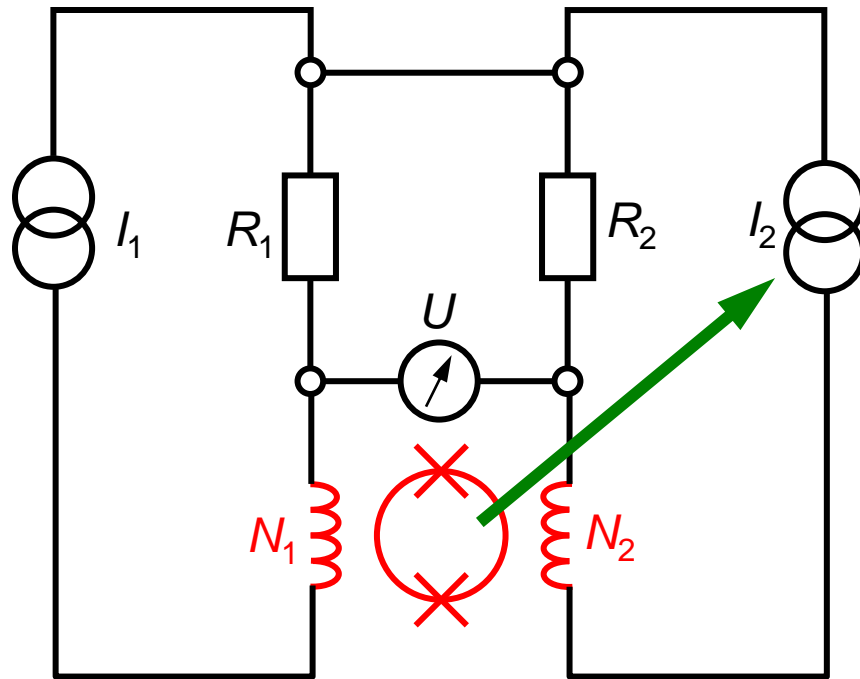


Was kann eine solche Brücke für die Thermometrie bringen?



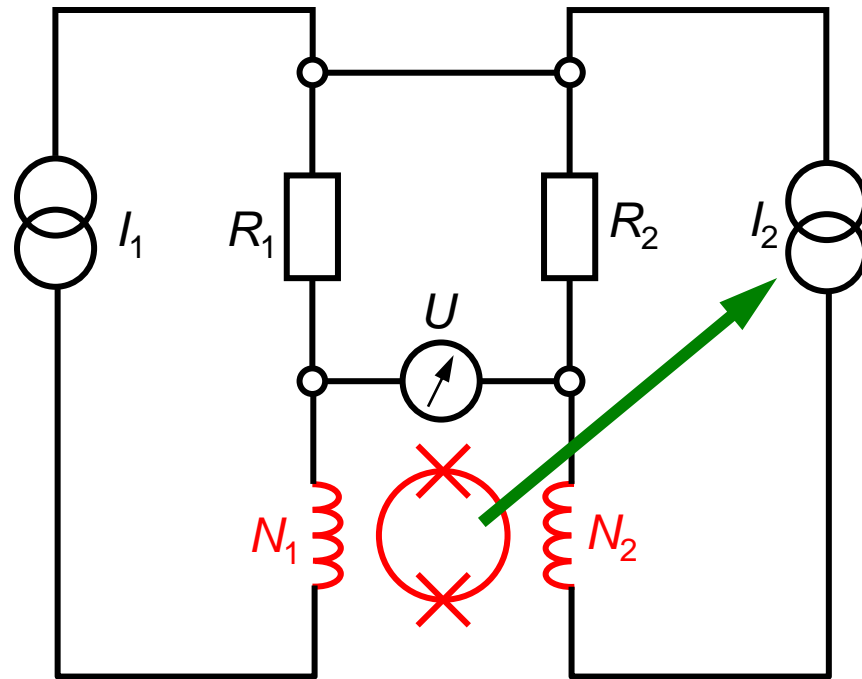
## Was kann eine solche Brücke für die Thermometrie bringen?

- Back-up-Brücke: gut zu wissen, dass es sowas gibt!



## Was kann eine solche Brücke für die Thermometrie bringen?

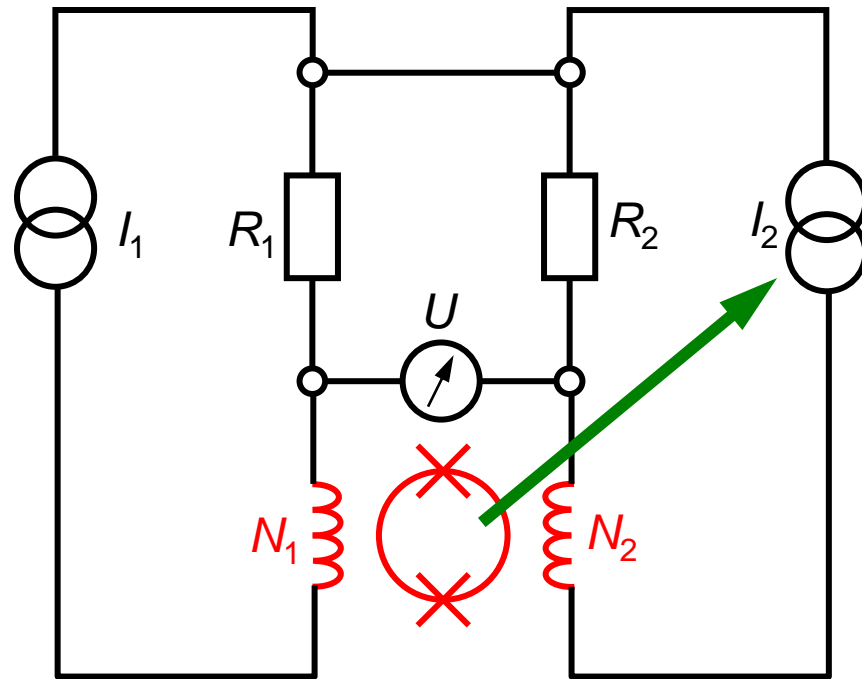
- Back-up-Brücke: gut zu wissen, dass es sowas gibt!,
- besonders herausfordernde Experimente (Auflösung):



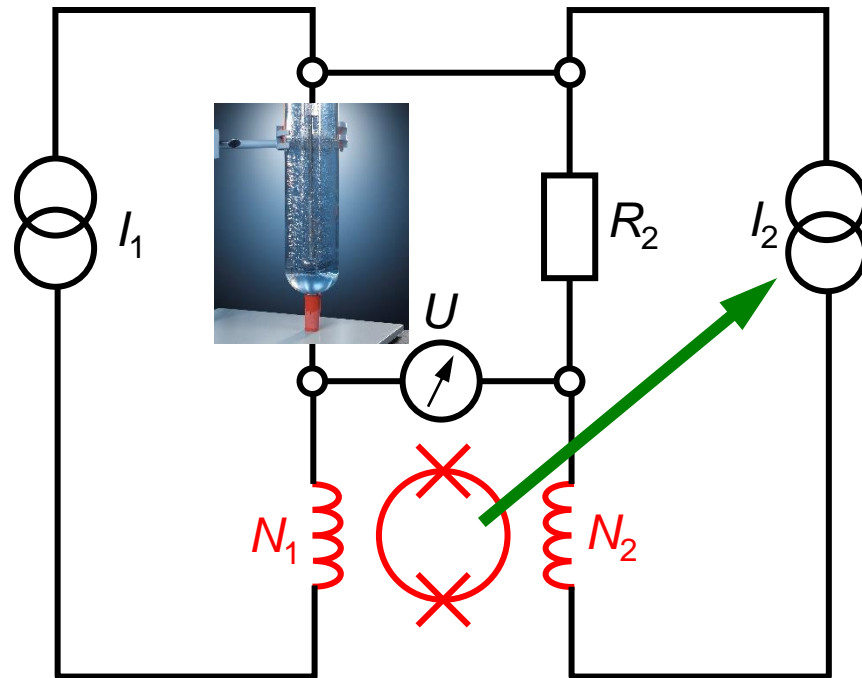
## Was kann eine solche Brücke für die Thermometrie bringen?

- Back-up-Brücke: gut zu wissen, dass es sowas gibt!,
- besonders herausfordernde Experimente (Auflösung): z.B.

Bestimmung des hydrostat. Druckkoeffizienten in einer TPW-Zelle mit einem SPRT!

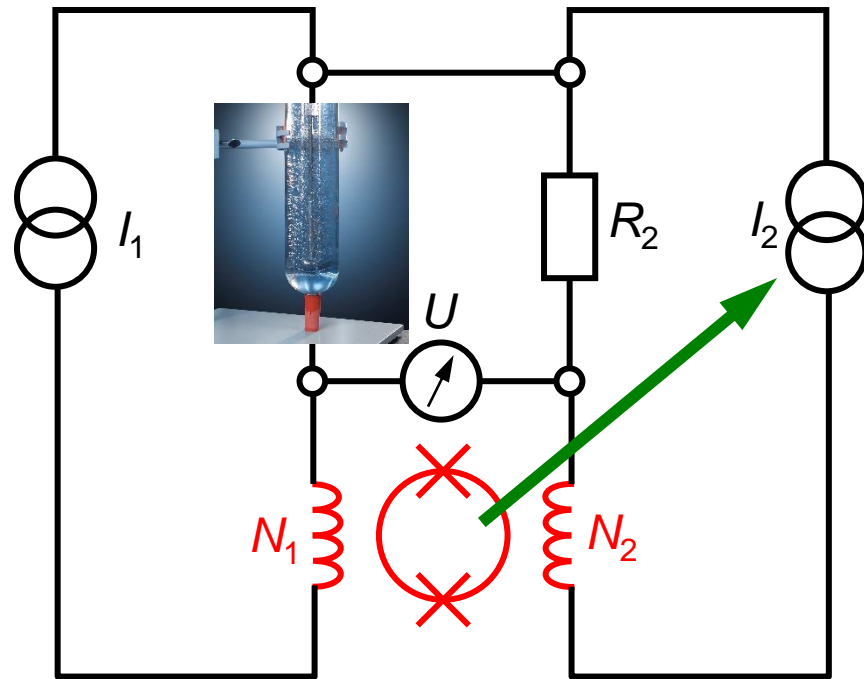


# Kryostromkomparator (CCC)



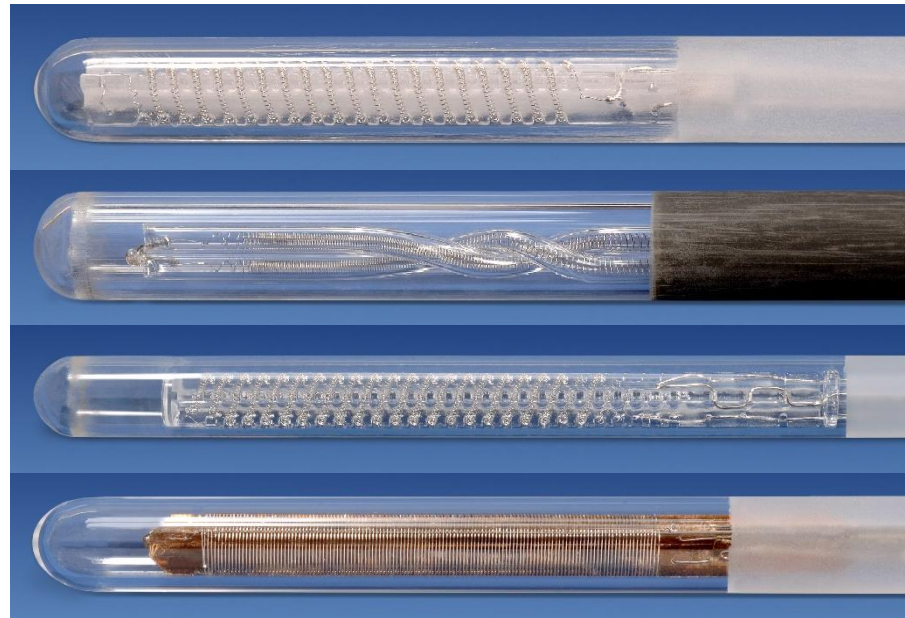
# Kryostromkomparator (CCC)

Frühere Arbeit (und Inspiration):  
M. Nakanishi and H. Sakurai,  
„Precise Determination of  
Hydrostatic Pressure Correction  
Coefficient of Triple Point Cell of  
Water using Cryogenic Current  
Comparator Bridge,“ *Japanese  
Journal of Applied Physics* 44,  
4206 (2005).

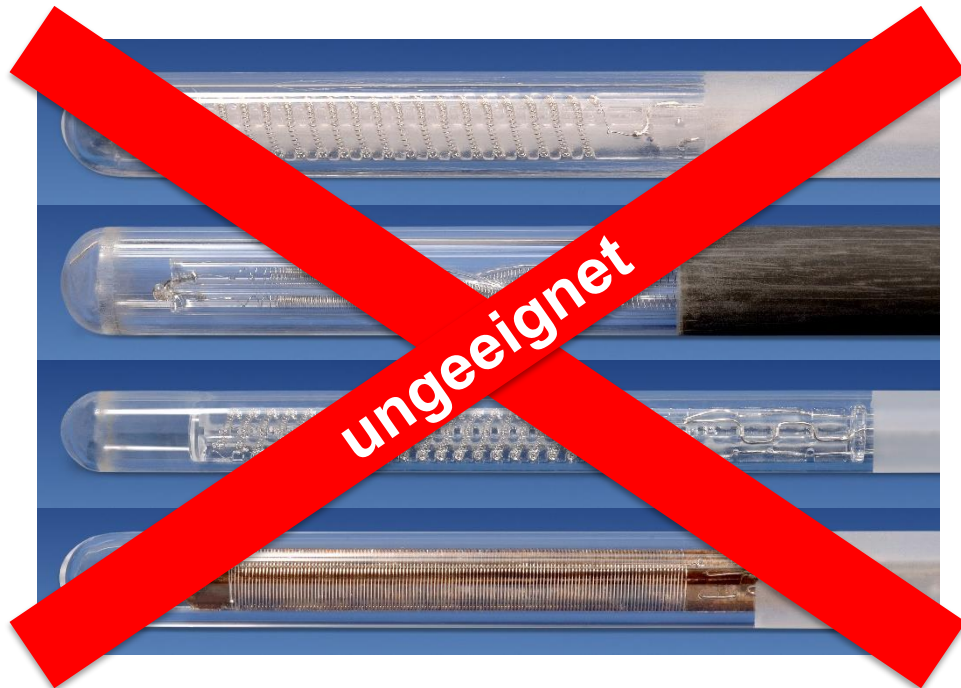




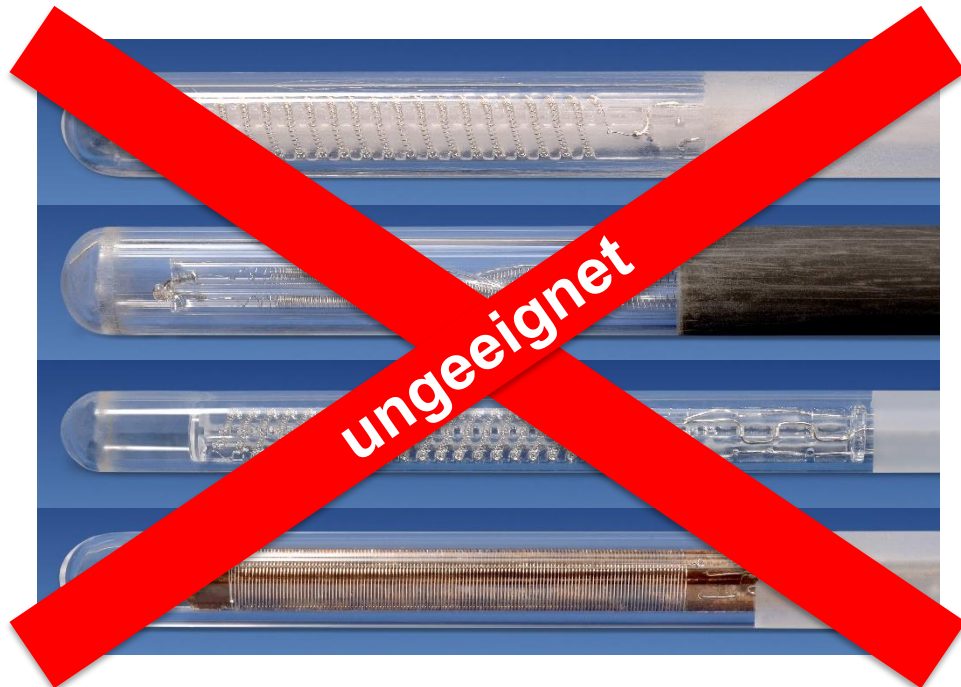
- Auswahl des SPRTs:



- Auswahl des SPRTs:  
Schirmungsanforderung!  
→ metallumhüllte Version



- Auswahl des SPRTs:  
Schirmungsanforderung!  
→ metallumhüllte Version



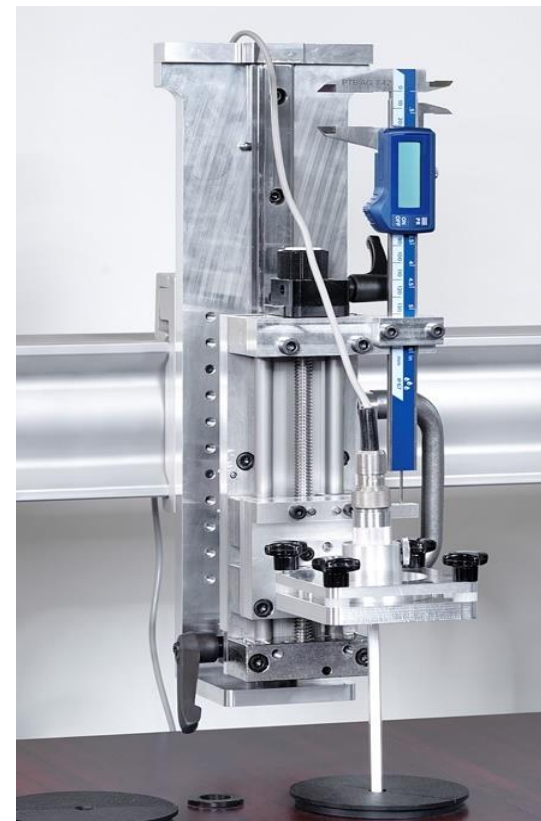
- Auswahl des SPRTs:  
Schirmungsanforderung!  
→ metallumhüllte Version



- Auswahl des SPRTs:  
Schirmungsanforderung!  
→ metallumhüllte Version
- Verwendung eines kommerziellen TPW-Erhaltungsbades



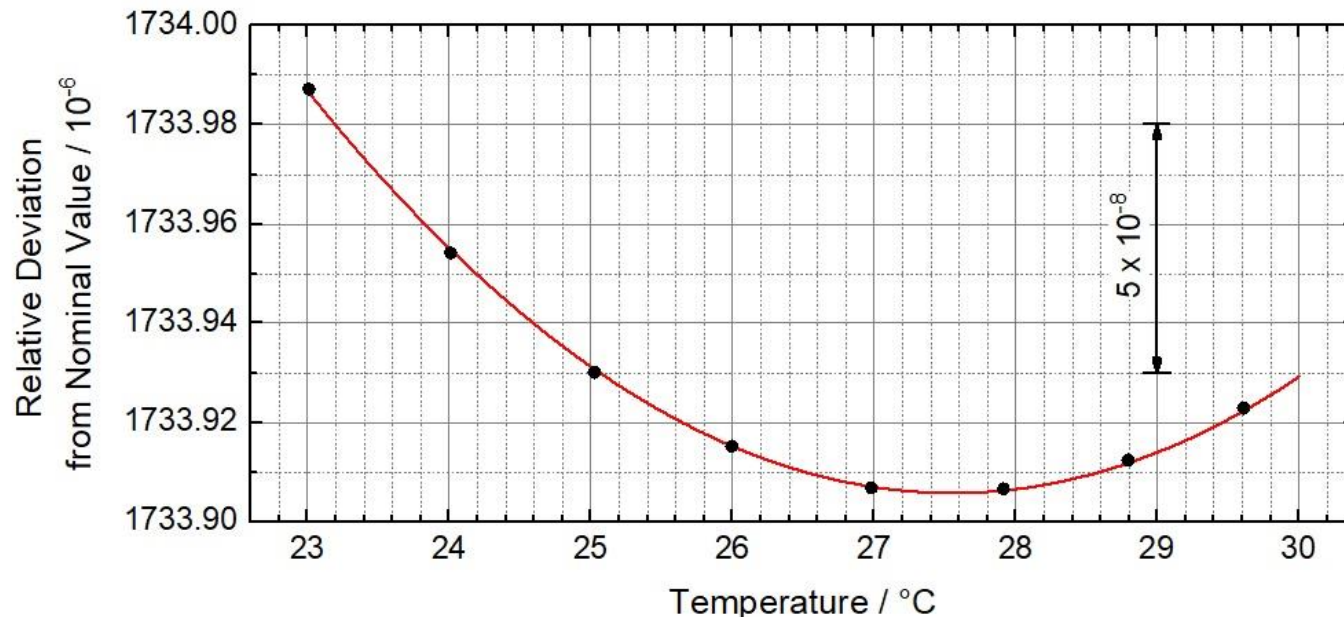
- Auswahl des SPRTs:  
Schirmungsanforderung!  
→ metallumhüllte Version
- Verwendung eines kommerziellen TPW-Erhaltungsbades
- Eigenbau-Höhenverstellungseinheit (ca. 100 mm)





# Einstellungen der Messbrücke

- SPRT (#1 mit  $25,759\ \Omega$ , #2 mit  $25,403\ \Omega$ ) vs  $10\ \Omega$  Referenz-Widerstand (kommerz. Metallfolienwiderstand bei  $27,50\ ^\circ\text{C}$ )

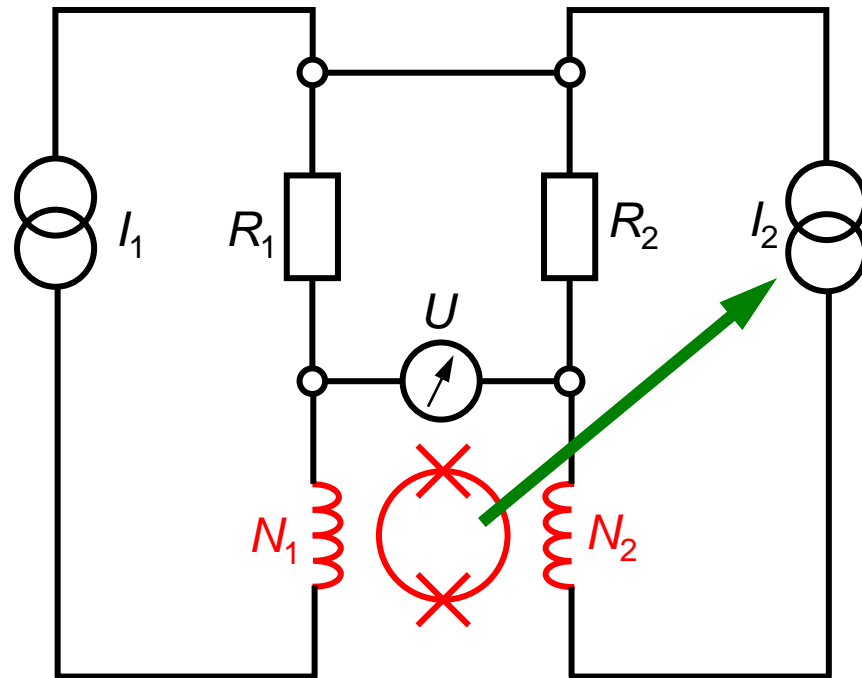


Jahresdrift:  
ca.  $+3 \cdot 10^{-8}$



# Einstellungen der Messbrücke

- Windungszahlverhältnis:  
 $N_1 = 1656 // N_2 = 653$
- Stromstärke durch SPRT:  
 $I_1 = \pm 100 \mu\text{A}$  (Startwert)
- Stromumkehrzyklen:  
 $2 \times 10 \text{ s}$  mit  $t_{\text{Rampe}} = 0,8 \text{ s}$   
und  $t_{\text{Plateau}} = 9,2 \text{ s}$



- Beispiel:

Mittel von  $\Delta U$  nach 300 Zyklen (1:40 h):  $(1,696 \pm 0,047) \text{ nV}$



Typ A  
( $k = 1$ )

- Beispiel:

Mittel von  $\Delta U$  nach 300 Zyklen (1:40 h):  $(1,696 \pm 0,047) \text{ nV}$

→  $(25,403\,273\,709 \pm 0,000\,000\,276) \, \Omega$

$= 25,403\,273\,709 \, \Omega \cdot (1 \pm 1,09 \cdot 10^{-8})$

- Beispiel:

Mittel von  $\Delta U$  nach 300 Zyklen (1:40 h):  $(1,696 \pm 0,047) \text{ nV}$

→  $(25,403\,273\,709 \pm 0,000\,000\,276) \, \Omega$

$= 25,403\,273\,709 \, \Omega \cdot (1 \pm 1,09 \cdot 10^{-8})$

- Berechnung der Unsicherheit ( $k = 1$ ):

Annahme  $\delta R_2 / R_2 = 1 \cdot 10^{-8}$  (RE-Vert.) →  $\delta R_{\text{SPRT}} = 147 \text{ n}\Omega$

$\delta(\Delta U) = 0,047 \text{ nV}$  (Normal-Vert.) →  $\delta R_{\text{SPRT}} = 234 \text{ n}\Omega$

sonstige Beiträge →  $\delta R_{\text{SPRT}} < 10 \text{ n}\Omega$

- Beispiel:

Mittel von  $\Delta U$  nach 300 Zyklen (1:40 h):  $(1,696 \pm 0,047) \text{ nV}$

$$\rightarrow (25,403\,273\,709 \pm 0,000\,000\,276) \, \Omega$$

$$= 25,403\,273\,709 \, \Omega \cdot (1 \pm 1,09 \cdot 10^{-8})$$

- Berechnung der Unsicherheit ( $k = 1$ ):

Annahme  $\delta R_2 / R_2 = 1 \cdot 10^{-8}$  (RE-Vert.)

$\delta(\Delta U) = 0,047 \text{ nV}$  (Normal-Vert.)

sonstige Beiträge

1 dominanter  
Beitrag

$$\rightarrow \delta R_{\text{SPRT}} = 147 \text{ n}\Omega$$

$$\rightarrow \delta R_{\text{SPRT}} = 234 \text{ n}\Omega$$

$$\rightarrow \delta R_{\text{SPRT}} < 10 \text{ n}\Omega$$

- Tendenz:  
mit abnehmender Anregung dominiert der Typ-A-Beitrag  
immer stärker

Strom- stärke	Typ-A- Beitrag	Gesamtmess- unsicherheit
$\pm 200 \mu\text{A}$	117 n $\Omega$	188 n $\Omega$
$\pm 100 \mu\text{A}$	234 n $\Omega$	276 n $\Omega$
$\pm 50 \mu\text{A}$	467 n $\Omega$	490 n $\Omega$
$\pm 20 \mu\text{A}$	1168 n $\Omega$	1178 n $\Omega$

- Tendenz:  
mit abnehmender Anregung dominiert der Typ-A-Beitrag  
immer stärker

Strom- stärke	Typ-A- Beitrag	Gesamtmess- unsicherheit	Temperatur- Auflösung
$\pm 200 \mu\text{A}$	117 n $\Omega$	188 n $\Omega$	1,9 $\mu\text{K}$
$\pm 100 \mu\text{A}$	234 n $\Omega$	276 n $\Omega$	2,7 $\mu\text{K}$
$\pm 50 \mu\text{A}$	467 n $\Omega$	490 n $\Omega$	4,8 $\mu\text{K}$
$\pm 20 \mu\text{A}$	1168 n $\Omega$	1178 n $\Omega$	11,6 $\mu\text{K}$

← Standardunsicherheiten ( $k = 1$ ) →



- Tendenz:  
mit abnehmender Anregung dominiert der Typ-A-Beitrag  
immer stärker

Strom- stärke	Typ-A- Beitrag	Gesamtmess- unsicherheit	Temperatur- Auflösung	Leistungsumsatz im SPRT
$\pm 200 \mu\text{A}$	117 n $\Omega$	188 n $\Omega$	1,9 $\mu\text{K}$	1016 nW
$\pm 100 \mu\text{A}$	234 n $\Omega$	276 n $\Omega$	2,7 $\mu\text{K}$	254 nW
$\pm 50 \mu\text{A}$	467 n $\Omega$	490 n $\Omega$	4,8 $\mu\text{K}$	63,5 nW
$\pm 20 \mu\text{A}$	1168 n $\Omega$	1178 n $\Omega$	11,6 $\mu\text{K}$	10,2 nW

← Standardunsicherheiten ( $k = 1$ ) →

Können wir diesen Werten trauen – ist das Rauschen wirklich weiß?



Stromstärke	Typ-A-Beitrag	Gesamtmessunsicherheit	Temperatur-Auflösung	Leistungsumsatz im SPRT
$\pm 200 \mu\text{A}$	117 n $\Omega$	188 n $\Omega$	1,9 $\mu\text{K}$	1016 nW
$\pm 100 \mu\text{A}$	234 n $\Omega$	276 n $\Omega$	2,7 $\mu\text{K}$	254 nW
$\pm 50 \mu\text{A}$	467 n $\Omega$	490 n $\Omega$	4,8 $\mu\text{K}$	63,5 nW
$\pm 20 \mu\text{A}$	1168 n $\Omega$	1178 n $\Omega$	11,6 $\mu\text{K}$	10,2 nW

- David W. Allan (\*1936): NBS/NIST-Kollege (Time & Frequ. Div.) – Frequenzstabilität von Uhren, Oszillatoren etc.
- Allan-Varianz = *time-domain statistical approach*: „... simple test for a white spectrum ...“
- Klassifizierung von Rauschen anhand von Potenzgesetzen

weißes Rauschen



1/f-Rauschen



lineare Drift, Fluktuationen



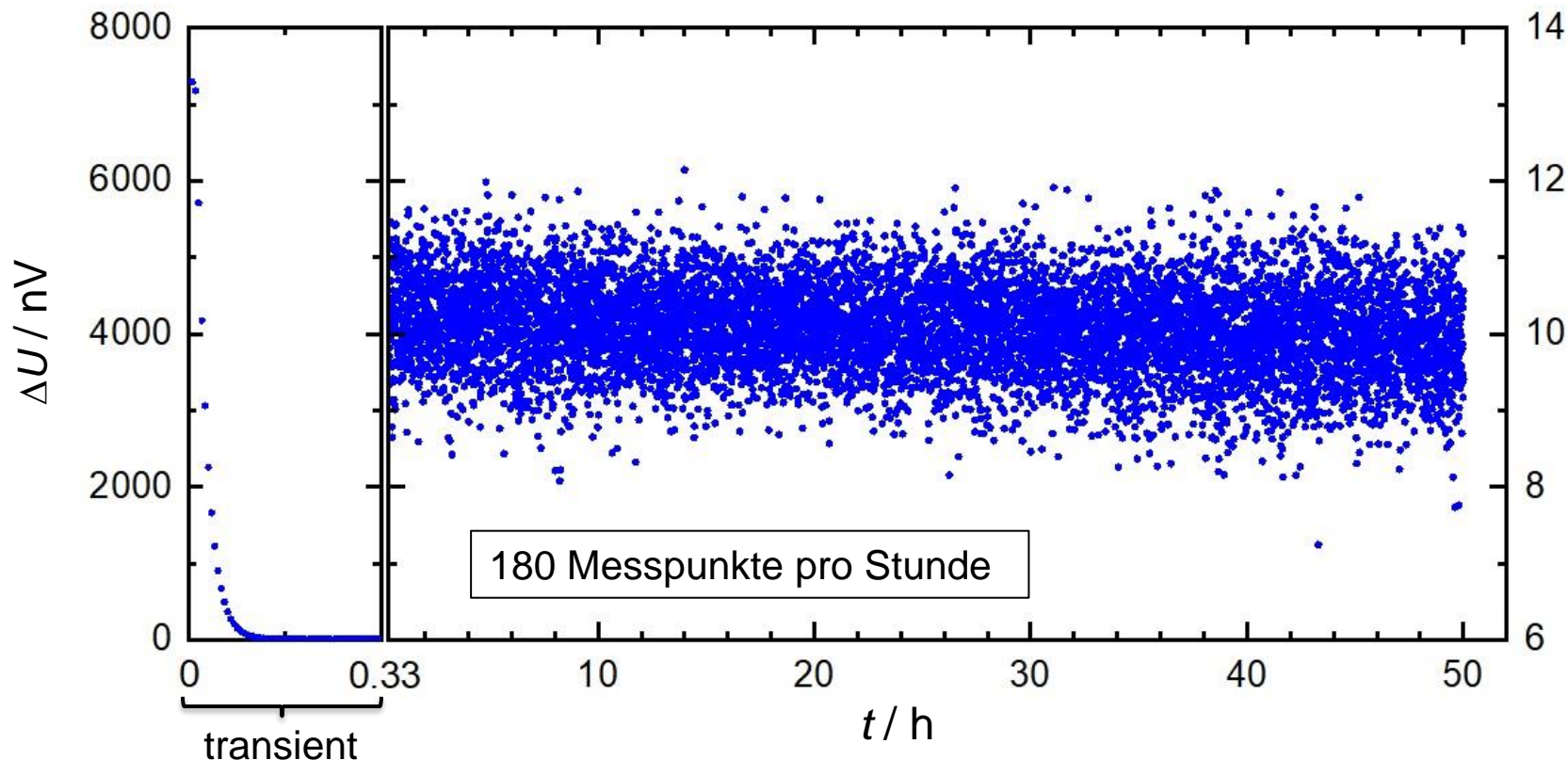
} Messzeitverlängerung  
hilft nicht weiter !

- David W. Allan (\*1936): NBS/NIST-Kollege (Time & Frequ. Div.) – Frequenzstabilität von Uhren, Oszillatoren etc.
- Allan-Varianz = *time-domain statistical approach*: „... simple test for a white spectrum ...“
- Klassifizierung von Rauschen anhand von Potenzgesetzen

Was zu tun ist:

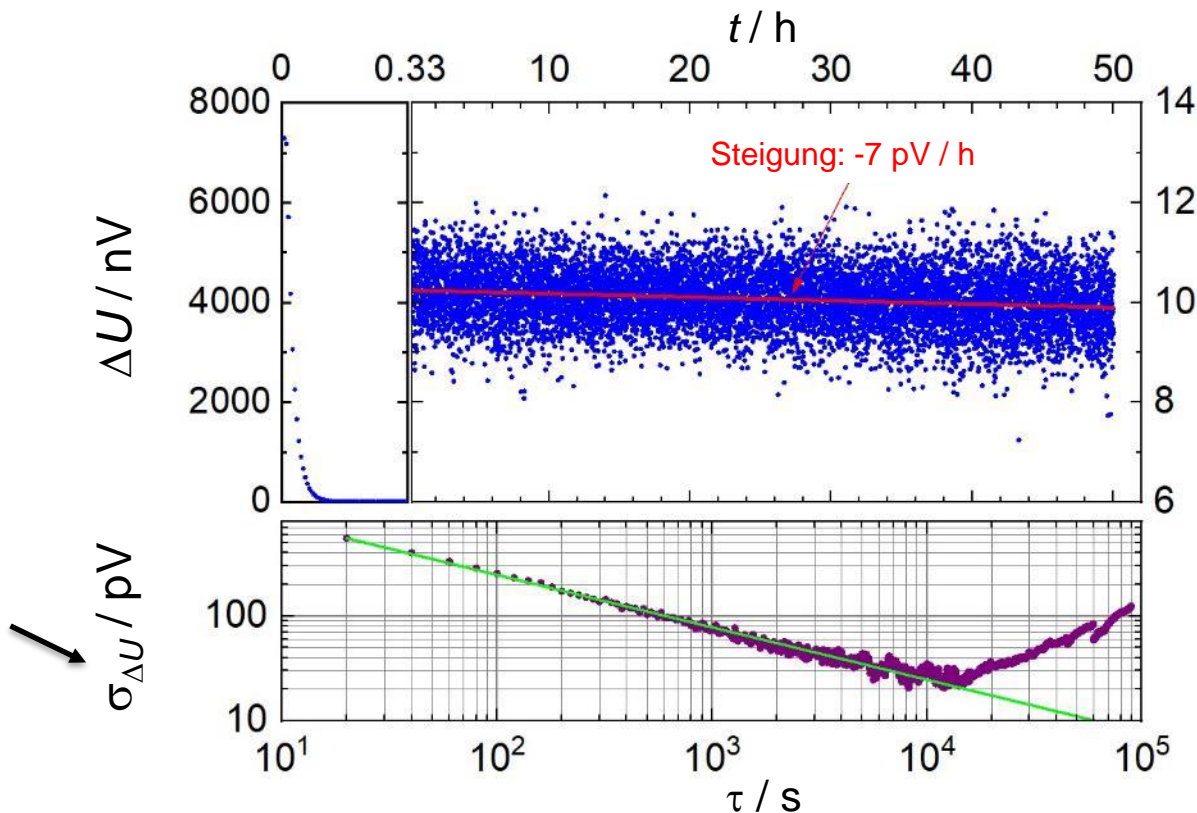
**DURCHFÜHRUNG SEHR, SEHR LANGER MESSUNGEN!**

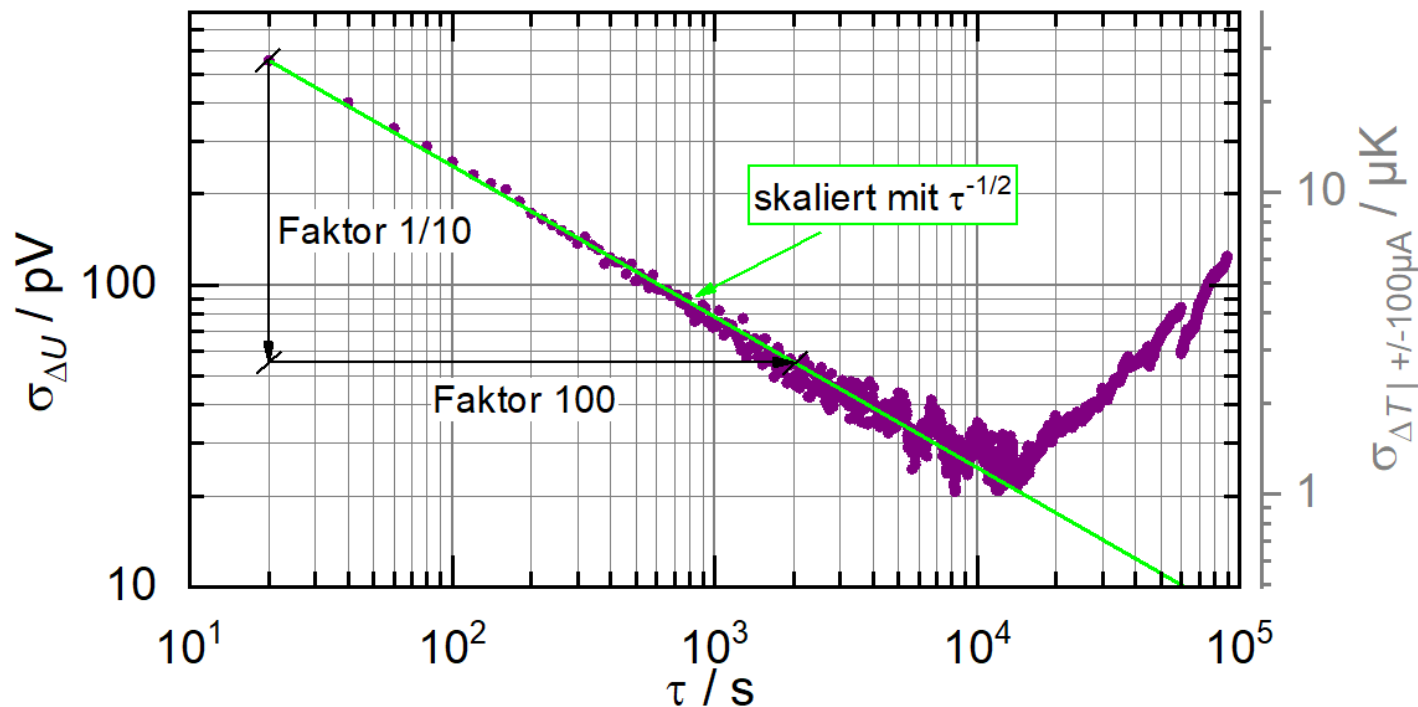
# Allan-Varianz-Analyse



# Allan-Varianz-Analyse


*Allan deviation*  
=  
Quadratwurzel  
aus der  
Allan-Varianz





Charakteristisch für weißes Rauschen ist das Skalieren mit  $\tau^{-1/2}$  – die *Allan deviation* ist in dem Fall gleich der Standardabweichung des Mittelwerts.

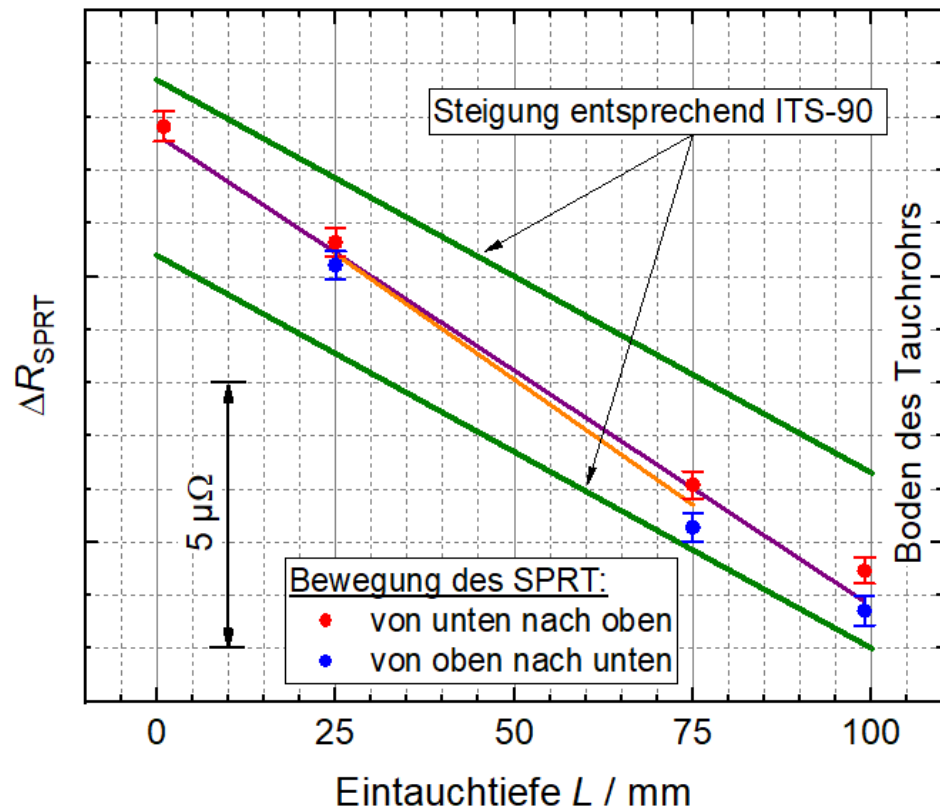
JA, wir können diesen Werten trauen – das Rauschen ist weiß  
für eine Messdauer von 2 Stunden!



Stromstärke	Typ-A-Beitrag	Gesamtmessunsicherheit	Temperaturauflösung	Leistungsumsatz im SPRT
$\pm 200 \mu\text{A}$	117 n $\Omega$	188 n $\Omega$	1,9 $\mu\text{K}$	1016 nW
$\pm 100 \mu\text{A}$	234 n $\Omega$	276 n $\Omega$	2,7 $\mu\text{K}$	254 nW
$\pm 50 \mu\text{A}$	467 n $\Omega$	490 n $\Omega$	4,8 $\mu\text{K}$	63,5 nW
$\pm 20 \mu\text{A}$	1168 n $\Omega$	1178 n $\Omega$	11,6 $\mu\text{K}$	10,2 nW

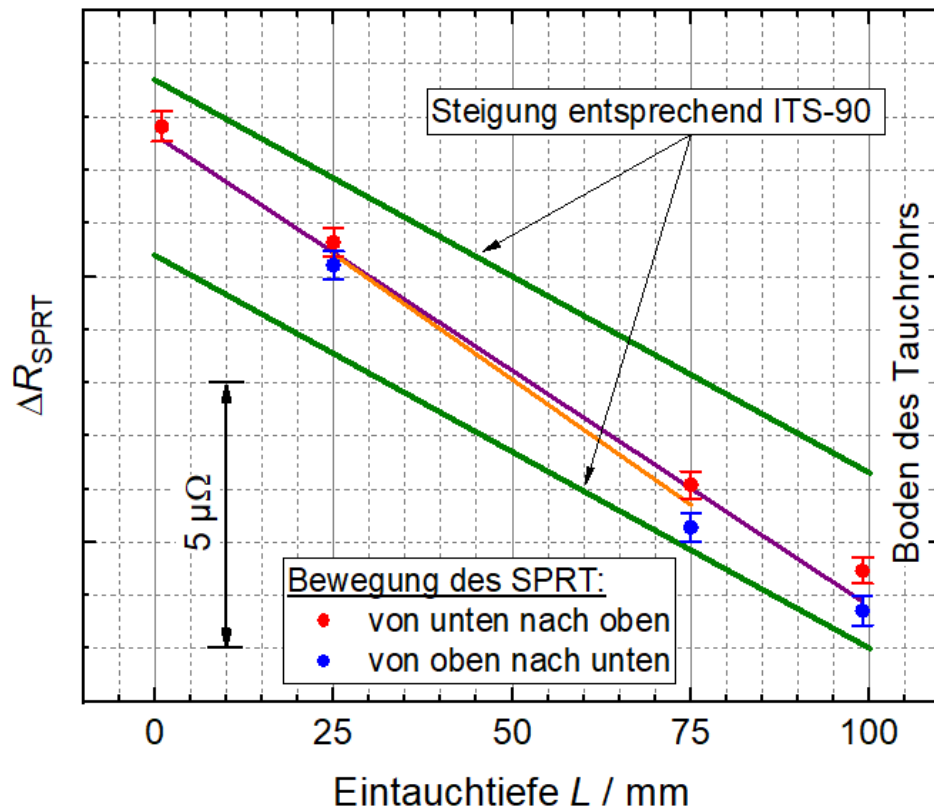


# Einfluss des hydrostatischen Drucks



- Gesamtdauer: 14,5 h
- $\pm 100 \mu\text{A}$  durch SPRT
- Messung über 2 h pro Datenpunkt, aber nur jeweils letzte 1:40 h gehen in Rechnung ein
- $dT/dL$ -Werte (Linearfits):
  - $(-0,876 \pm 0,049) \text{ mK} / \text{m}$
  - $(-0,931 \pm 0,090) \text{ mK} / \text{m}$

# Einfluss des hydrostatischen Drucks



Vergleich von  $dT/dL$ -Werten:

- hier:

$(-0,876 \pm 0,049) \text{ mK} / \text{m}$

$(-0,931 \pm 0,090) \text{ mK} / \text{m}$

- Nakanishi & Sakurai:

$(-0,854 \pm 0,038) \text{ mK} / \text{m}$

- ITS-90:

$-0,73 \text{ mK} / \text{m}$

## CCC-Messbrücke:

- kommerziell verfügbare Messbrücke ist bestens geeignet für anspruchsvolle Thermometrieexperimente in TPW-Zelle

## CCC-Messbrücke:

- kommerziell verfügbare Messbrücke ist bestens geeignet für anspruchsvolle Thermometrieexperimente in TPW-Zelle
- keine besonderen Anforderungen an Schirmung solange geeignetes SPRT verwendet wird

## CCC-Messbrücke:

- kommerziell verfügbare Messbrücke ist bestens geeignet für anspruchsvolle Thermometrieexperimente in TPW-Zelle
- keine besonderen Anforderungen an Schirmung solange geeignetes SPRT verwendet wird
- Messbrücke ist außerordentlich flexibel hinsichtlich des Windungszahlverhältnisses und der Stromaussteuerung

## CCC-Messbrücke:

- kommerziell verfügbare Messbrücke ist bestens geeignet für anspruchsvolle Thermometrieexperimente in TPW-Zelle
- keine besonderen Anforderungen an Schirmung solange geeignetes SPRT verwendet wird
- Messbrücke ist außerordentlich flexibel hinsichtlich des Windungszahlverhältnisses und der Stromaussteuerung
- Messunsicherheit sehr attraktiv – bessere Temperaturauflösung als mit anderen Brücken

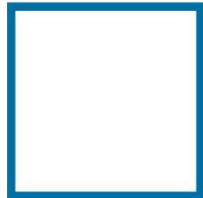
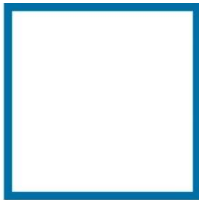
## PTB Berlin:

Lars Bünger  
Dietmar Drung  
Stephan Hauschild  
Dieter Heyer  
Steffen Rudtsch (†)

## PTB Braunschweig:

Eckart Pesel  
Frank Schmaljohann  
Lukas Schulze

# **VIELEN DANK!**



**Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
Braunschweig and Berlin**

Bundesallee 100  
38116 Braunschweig

Dr. Martin Götz

Telefon: 0531 592-2110

E-Mail: [martin.goetz@ptb.de](mailto:martin.goetz@ptb.de)

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