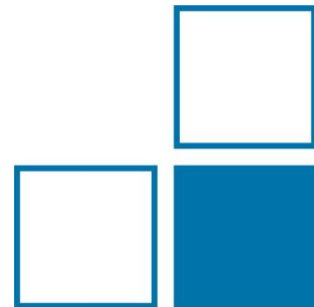


# Graphen-basiertes Quanten-Hall-Widerstandsnormale im Kleinkühler-Betrieb

330. PTB-Seminar, 07.05.2025

Johanna Lengsfeld, AG 2.61

Johanna Lengsfeld, Mattias Kruskopf, Eckart Pesel, Hansjörg Scherer



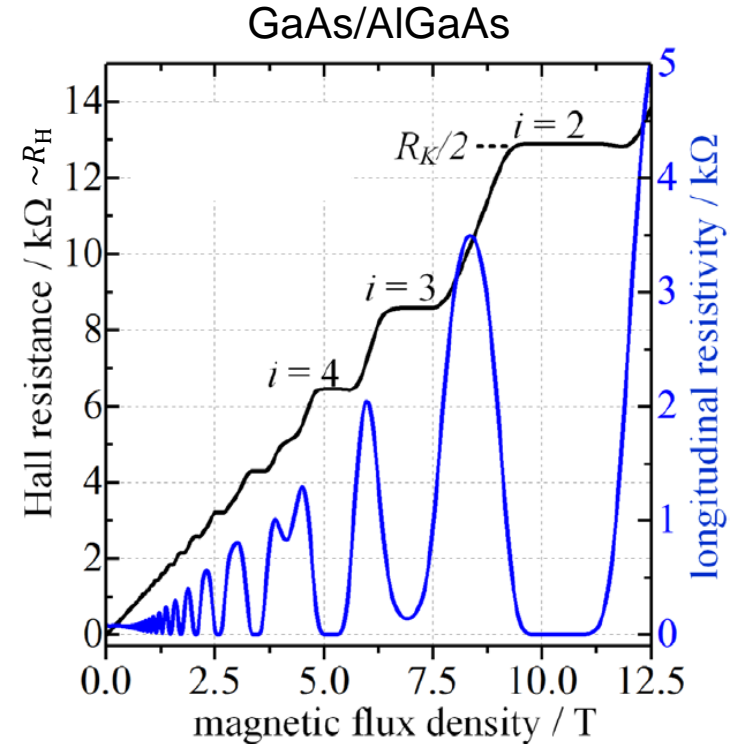
1. Quanten-Hall-Effekt
2. Quanten-Hall-Probe
3. Kühlsysteme
4. Charakterisierung von Quanten-Hall-Widerstands(QHR)-Proben
5. Zusammenfassung und Ausblick



- Wert des Quanten-Hall-Widerstandes ist magnetfeldunabhängig und quantisiert  
 Quanten-Hall-Widerstand (QHR):  $R_H = \frac{h}{i \cdot e^2}$   
 Von-Klitzing-Konstante:  $R_K = \frac{h}{e^2} \approx 25,8128 \text{ k}\Omega$

**1980** Klaus von Klitzing  
 entdeckt Quanten-Hall-Effekt  
 bei Untersuchungen an  
 MOS-Feldeffekttransistoren

**1985** Nobelpreis für Physik



Quanten-Hall-  
Widerstand

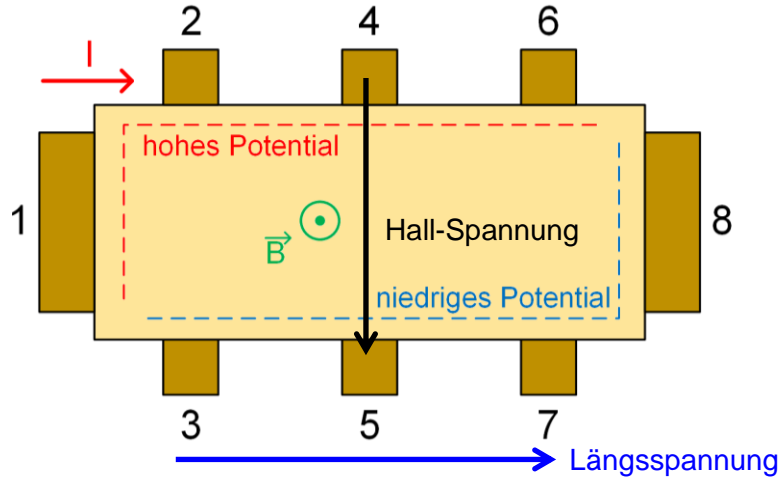
$$R_H = \frac{h}{i \cdot e^2}$$

Der Quanten-Hall-Effekt tritt in einigen Materialien bei niedrigen Temperaturen und hohen Magnetfeldern auf.

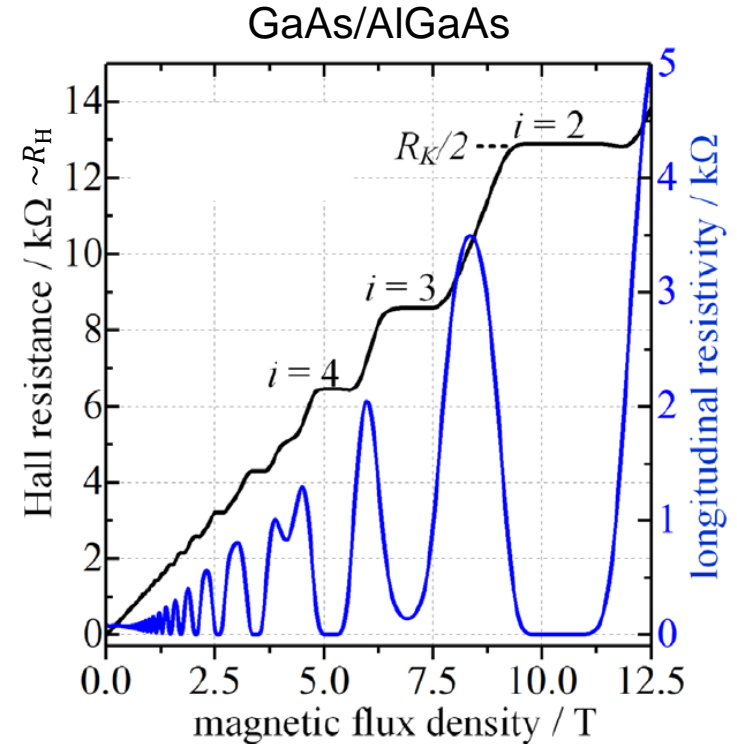
Rückführung  
der Einheit Ohm

## Elektrischer Widerstand

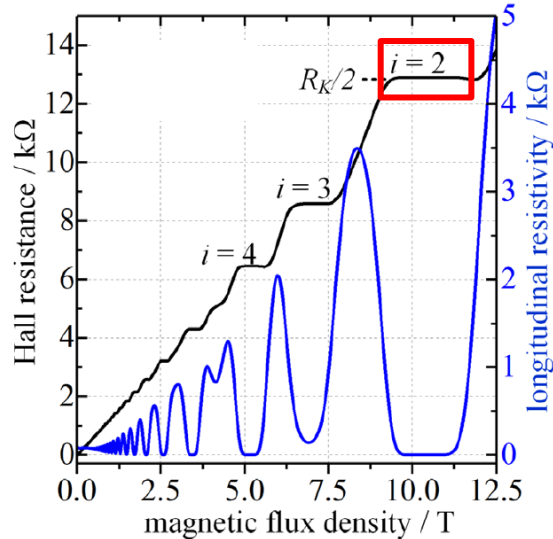
- Einheit Ohm
- $1 \Omega = 1 \frac{V}{A} = 1 \frac{kg \cdot m^2}{A^2 \cdot s^2}$
- Bestimmt durch Naturkonstanten: Planck-Konstante  $h$  und Elementarladung  $e$



- **Bedingung für Quantisierung:**  
**Längswiderstand Null**



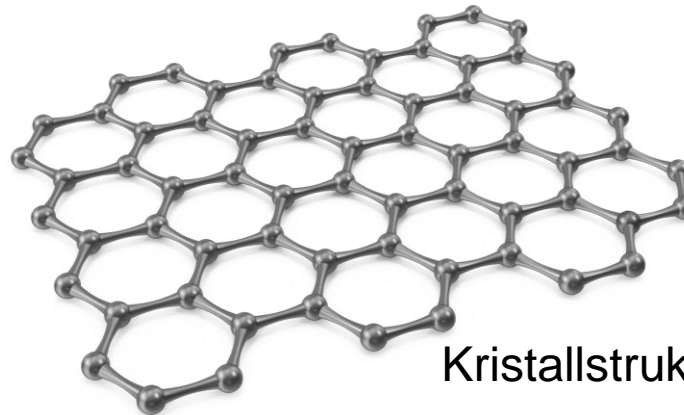
GaAs/AlGaAs



2,2 K, 11 T

### Ziele:

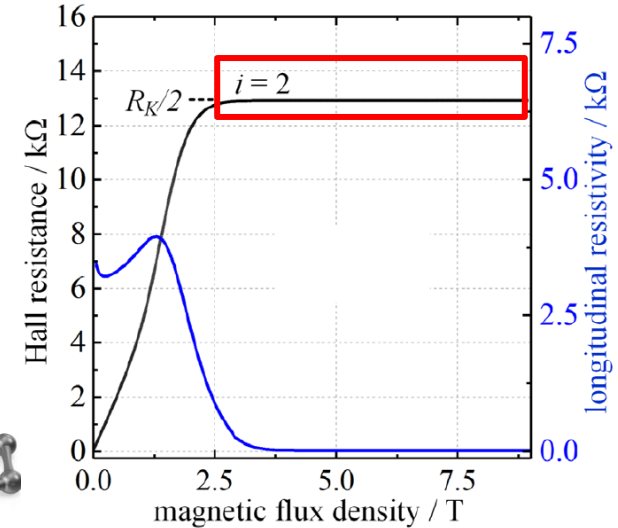
- Höhere Temperaturen und kleinere Magnetfelder
- Einfachere Handhabung
- Einsatz außerhalb von nationalen Metrologie-Instituten



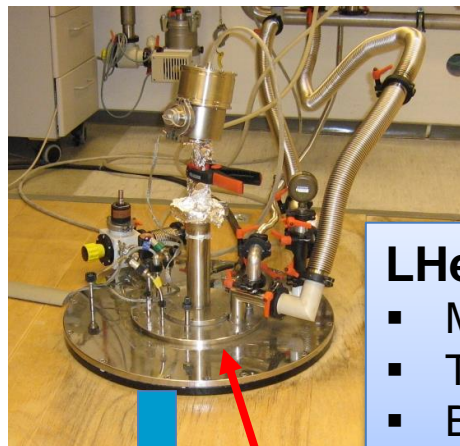
Kristallstruktur

<https://www.avanzarematerials.com/graphene/>

Graphen



4,2 K, 5 T

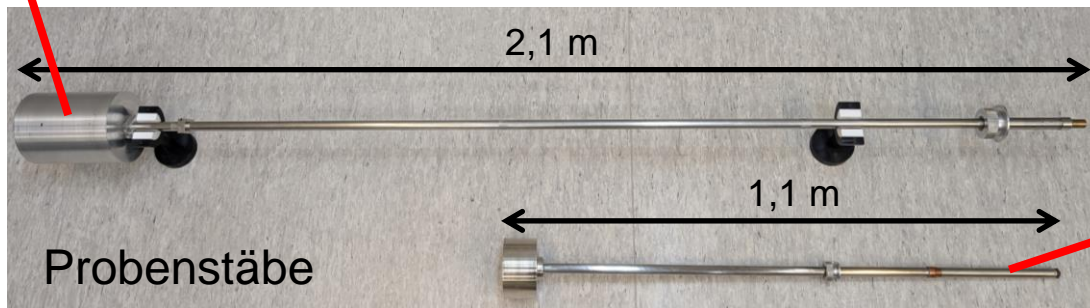


**Deutsches  
Ohm-Normal**

## LHe-Kryostat

- Magnetfeld bis zu 12 T
- Temperatur: 2,2 K
- Benötigt 200 l flüssiges Helium in der Woche (ca. 6.000 €)

3 m



Probenstäbe

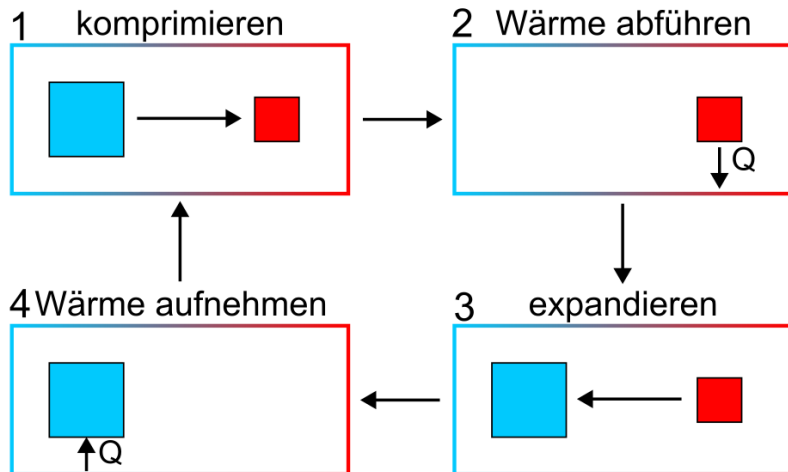
## Kleinkühler

- Magnetfeld bis zu 7 T
- Temperatur: 2,9 K
- Table-Top System
- Verwendet Helium-Gas in geschlossenem Kreislauf



- Entwicklung von Kühlsystemen ohne kryogene Flüssigkeiten begann 1964 mit den Arbeiten von Gifford und Longworth auf Grundlage des Joule-Thomson-Effekts

- Prozessablauf: **Stirling-Prozess**



## Vorteile:

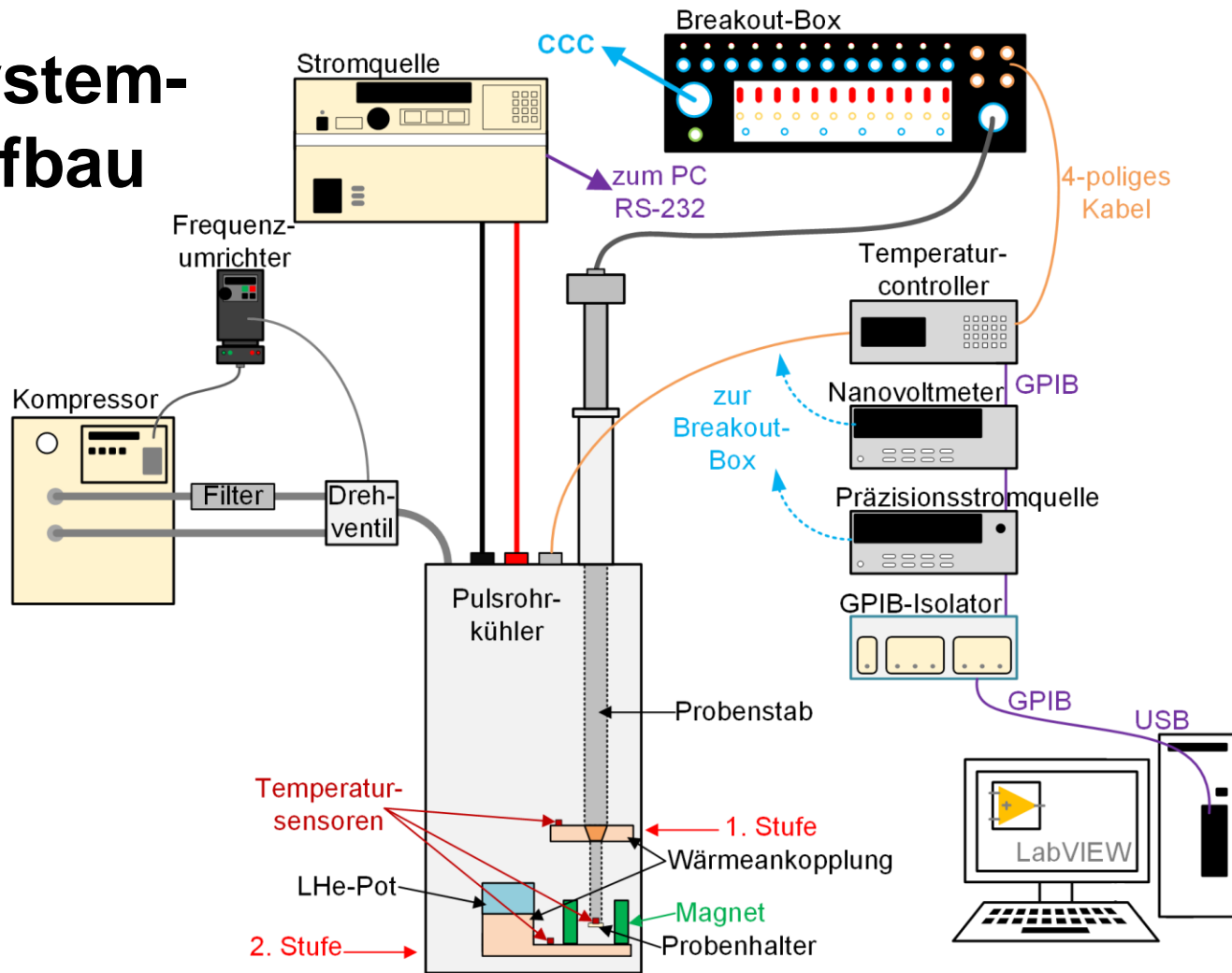
- Geschlossener Kreislauf mit Helium-Gas
- Keine beweglichen Teile im Kaltbereich
- Verschleißfrei
- Wartungsarm
- Geringere Kosten (Anschaffung / Betrieb)

## Nachteil:

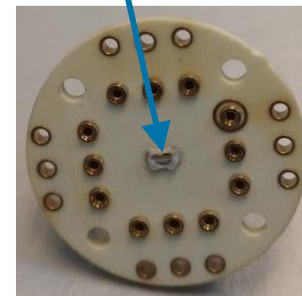
- Geräuschbelastung durch Drehventil



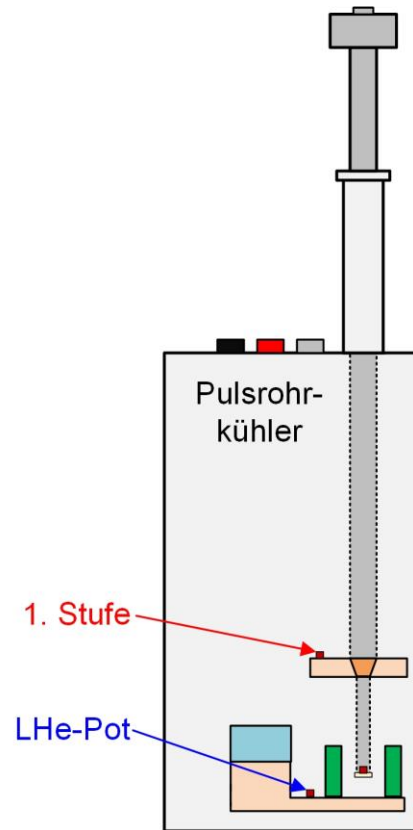
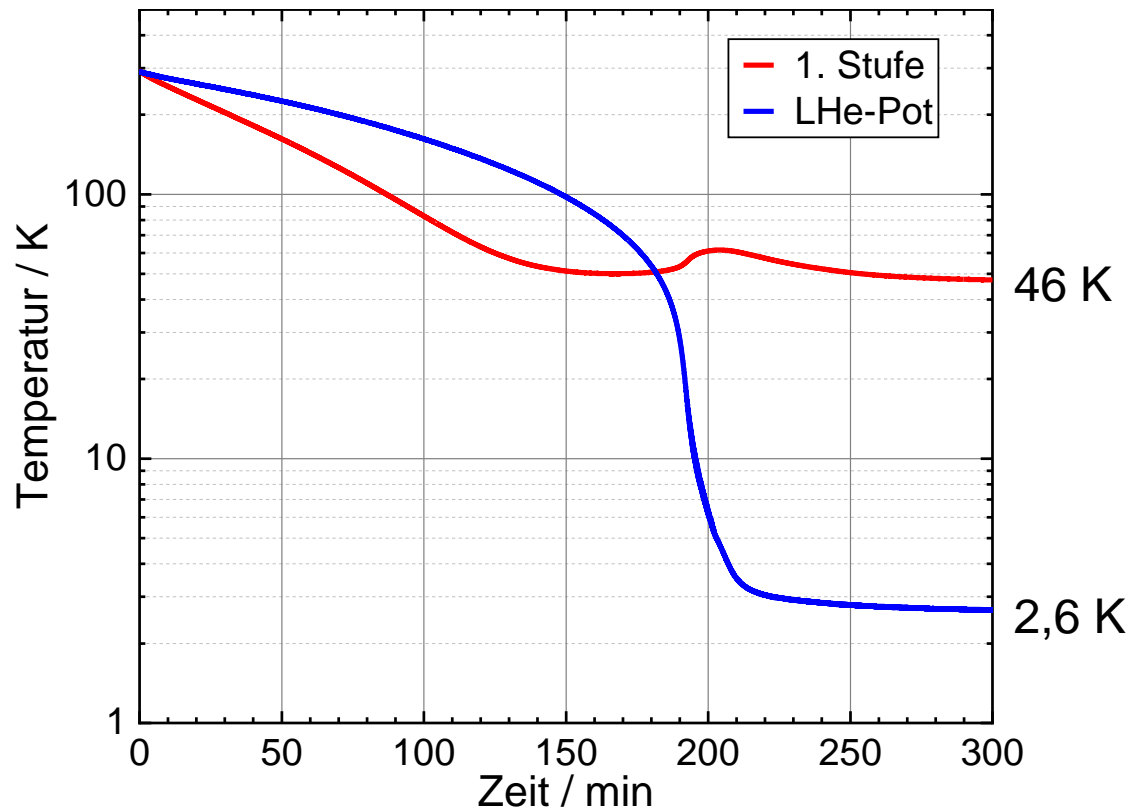
# System- aufbau



Temperatur-  
sensor



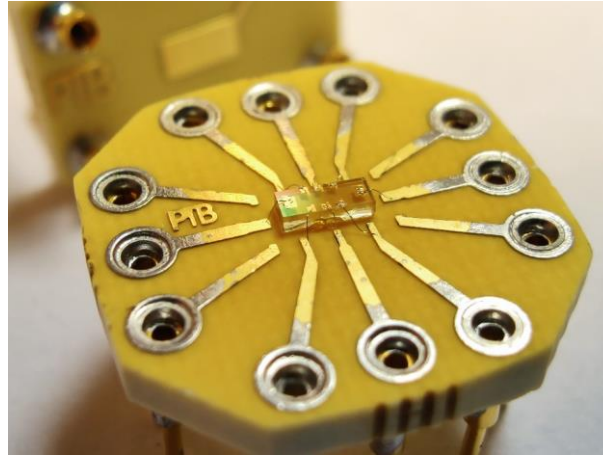
Probenhalter



## Kühlsystem



## Graphen-Probe



Hergestellt im  
PTB-Reinraumzentrum  
auf TO8-Probenhalter

Anwendung einer Graphen-  
Probe für die  
Widerstandsmetrologie:

→ Langzeitstabilität

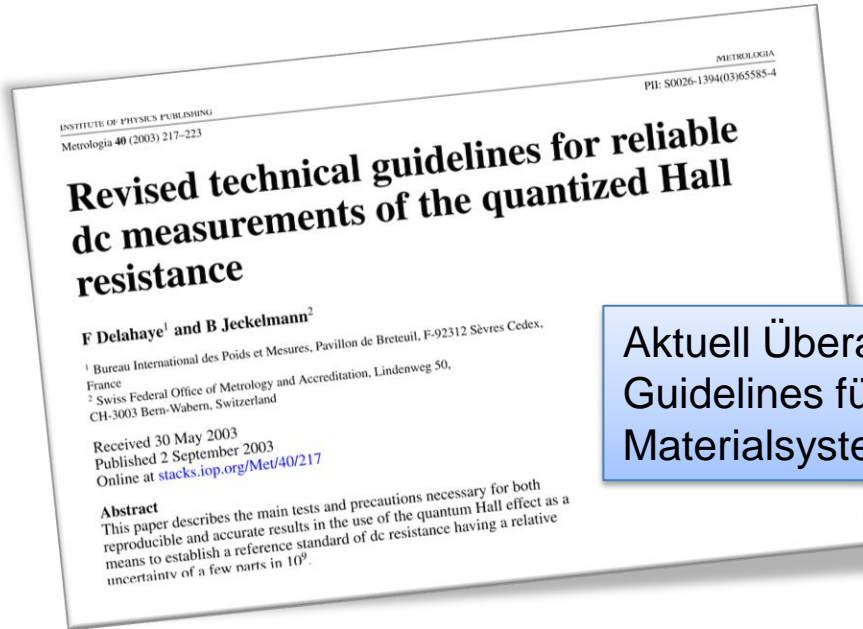
→ Widerstandsquantisierung

- Graphen-QHR-Proben sind auch kommerziell erhältlich
- Abschirmung vor Umwelteinflüssen durch Einkapselung
- Entwicklungen der letzten Jahre hat die Stabilität der Proben verbessert

BIPM hat Eignung von PTB-Graphen-Proben für die Widerstandsmetrologie nachgewiesen.



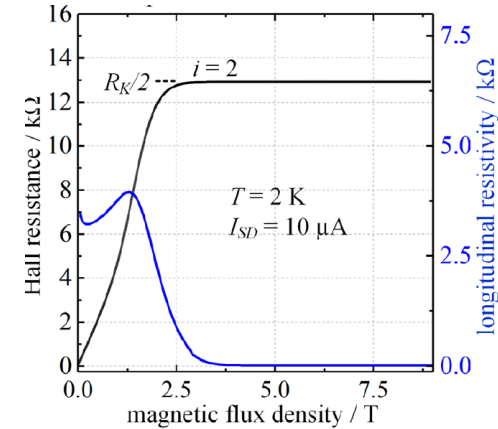
- Sicherstellung der Widerstandsquantisierung



F. Delahaye und B. Jeckelmann (2003) "Revised technical guidelines for reliable dc measurements of the quantized Hall resistance", *Metrologia*.  
DOI: 10.1088/0026-1394/40/5/302

- Widerstands-Plateau verschiebt sich abhängig von den elektrischen Transportparametern

Aktuell Überarbeitung der Guidelines für andere Materialsysteme



- Anforderungen an Messsystem
- Sicherstellung der Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Laboratorien



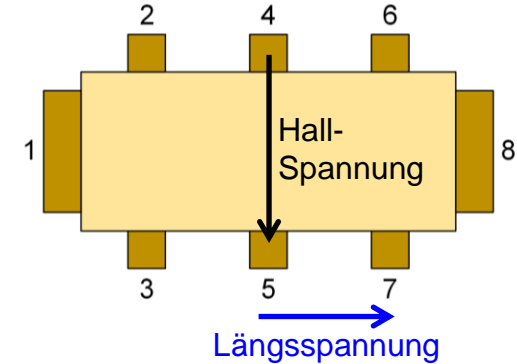
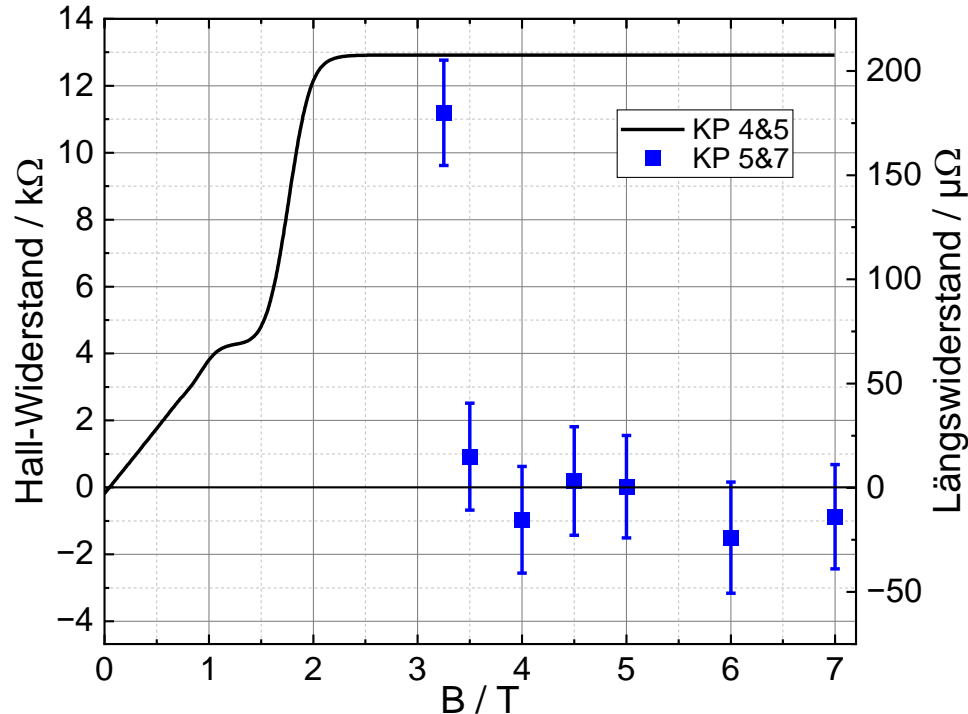
LHe  
basierter  
CCC

CCC im  
Kleinkühler

Entwicklung in  
Zusammenarbeit mit  
Industriepartnern



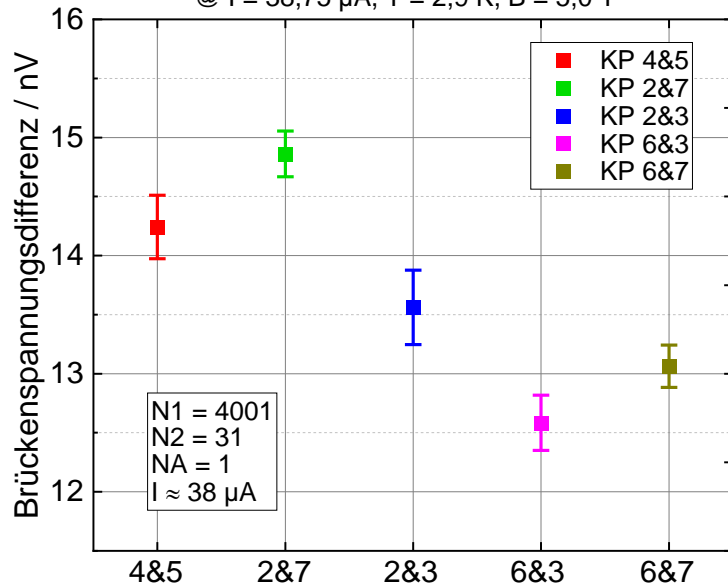
## Betrachtung der Widerstandsquantisierung mit dem CCC



- Bedingung für Quantisierung:  
Längswiderstand Null
- Widerstandsquantisierung  
zwischen 3,5 T und 7 T

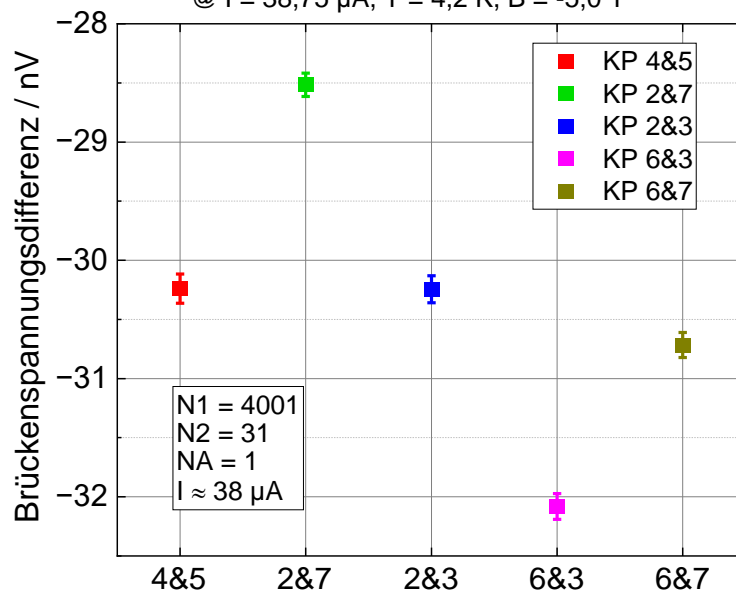
## Betrachtung der Proben-Homogenität

CCC Messungen G1534\_F13#6-5 (QHR) vs. IET (100  $\Omega$ )  
@  $I = 38,75 \mu\text{A}$ ,  $T = 2,9 \text{ K}$ ,  $B = 5,0 \text{ T}$

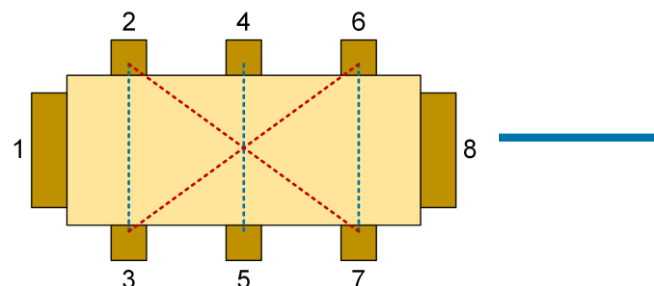


Kleinkühler

CCC Messungen G1534\_F13#6-4 (QHR) vs. IET (100  $\Omega$ )  
@  $I = 38,75 \mu\text{A}$ ,  $T = 4,2 \text{ K}$ ,  $B = -5,0 \text{ T}$



LHe-Kryostat







- Graphen-QHR-Proben lassen sich in kommerziellen Kleinkühlern als Quanten-Widerstandsnormal einsetzen
  - Kostengünstigere und anwenderfreundlichere Darstellung der Einheit Ohm
- Quanten-Widerstandsnormal außerhalb von nationalen Metrologie-Instituten

## Ausblick:

- Einsatz vom Kryostromkomperator im Kleinkühler



**Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
Braunschweig**

Bundesallee 100  
38116 Braunschweig

Johanna Lengsfeld

Telefon: 0531 592-2422

E-Mail: [johanna.lengsfeld@ptb.de](mailto:johanna.lengsfeld@ptb.de)