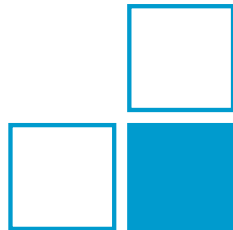


# Vier-Tor- Wechselstrom-Widerstände im Niederfrequenzbereich

**Torsten Funck**

PTB Arbeitsgruppe 2.13 AC-DC Transfer

323. PTB-Seminar 2023-05-10



- Kalibrierung von AC-Widerständen
- Grundlagen
  - Elektromagnetismus
  - Messanordnung
- Koaxiale Messtechnik
  - Innenleiter-Außenleiter
  - Vier-Tor
  - Koaxiale Anschlussweise
  - Koaxiale Widerstands-Messung
  - Current Equalizer
- Messergebnisse
  - Messunsicherheiten
  - Anschlussweise
  - Phasenmessung
- Zusammenfassung

Kalibrierung von **niederohmigen** Wechselstrom-Widerständen.

Normalwiderstände zur Verifizierung bzw. Kalibrierung von LCR-Metern und Batterie-Testern

Vier BNC-Anschlüsse zur direkten Montage auf die Messeingänge eines LCR-Meters



Zwei Anschlüssen zur Stromzufuhr:  $H_{Cur}$  und  $L_{Cur}$

Zwei zur Spannungsmessung:  $H_{Pot}$  und  $L_{Pot}$



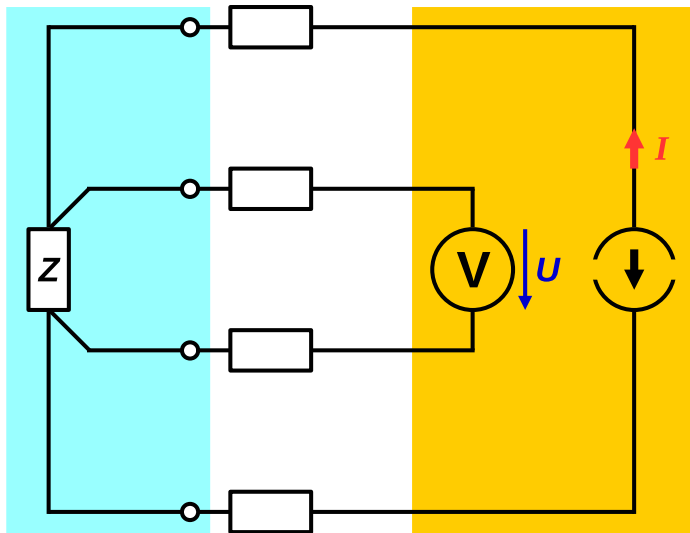


Folgende physikalische Phänomene folgen unmittelbar aus den Maxwell-Gleichungen und sind bei der Messung zu berücksichtigen:

- Elektrische Ströme führen zu einem magnetischen Feld (Durchflutungsgesetz)
- Änderungen des magnetischen Feldes führen zu einem elektrischen Feld (Induktionsgesetz)
- Stromstärke und Spannung sind einander proportional (Ohmsches Gesetz)

Wechselstrom-Widerstände (Impedanzen) sind frequenzabhängig, denn sie berücksichtigen neben dem Ohmschen Widerstand auch

- Kapazitäten  $C$
- Induktivitäten  $L$
- Gegen-Induktivitäten  $M$



Strom  $I$  einprägen,  
Spannung  $U$  messen

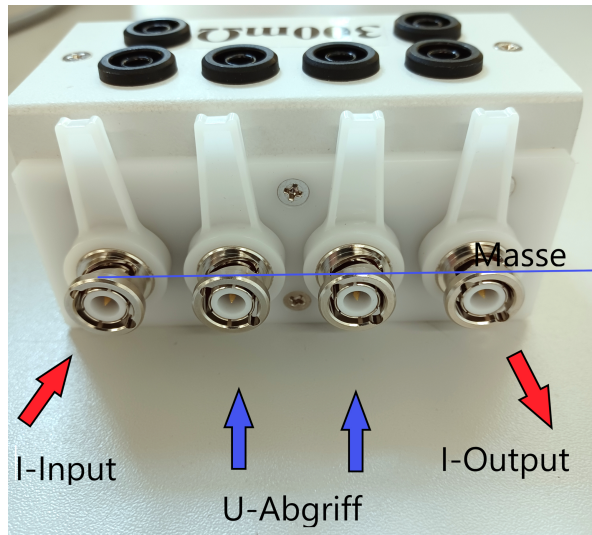
$$Z = \frac{U}{I}$$

Annahme:  
Kleine Impedanzwerte  
( $< 1 \Omega$ )  
 $\Rightarrow$  vierpolig messen.

Hellblau: Widerstand  
Orange: Messeinrichtung



## Übliche Shunts mit Strom-Eingang und Spannungs-Ausgang



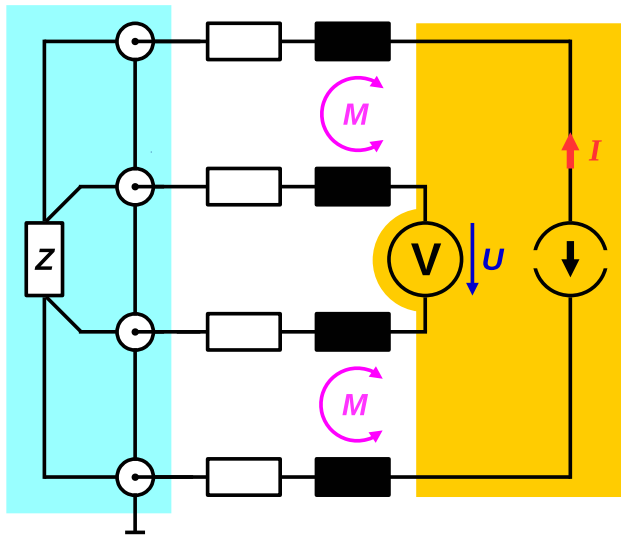
Wie geht das mit BNC-Anschlüssen?

**Mythos:**

Die Außenleiter sind alle mit dem Metall-Gehäuse verbunden und dienen nur zur Abschirmung.

**Folge:**

Gemessen wird an den Innenleitern, Außenleiter auf „Masse“.

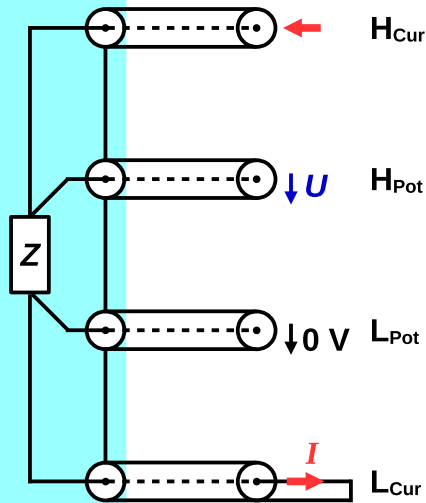


Gegeninduktivitäten der Anschlussleitungen können zu erheblichen Messabweichungen führen!

Wie misst nun ein LCR Meter?  
Genau so muss auch der Kalibrier-Widerstand gemessen werden!



Physikalisch-Technische Bundesanstalt ■ Braunschweig und Berlin

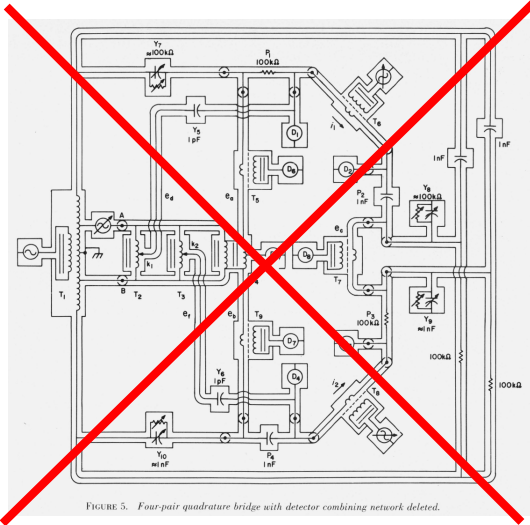


**Definition der Vier-Tor-Impedanz:**  
(„four terminal pair“ oder „four port“)

- Strom  $I$  fließt aus  $L_{Cur}$  heraus
- Spannung  $U$  wird an  $H_{Pot}$  gemessen

**Nebenbedingungen:**

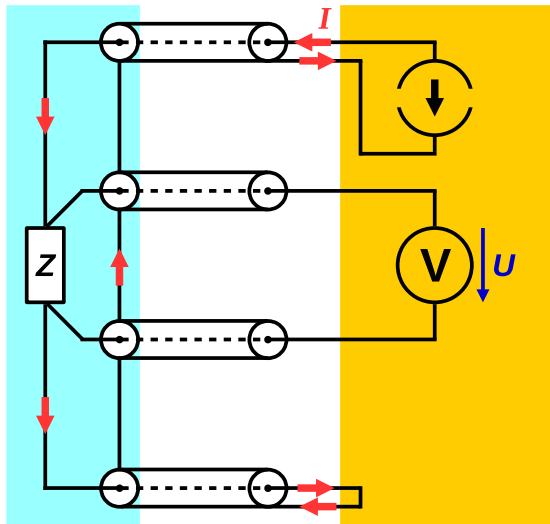
- Kein Stromfluss aus den Potenzial Anschlüssen
- Keine Spannung an  $L_{Pot}$
- $\Sigma I = 0$  an allen Toren



Nur mit Vier-Tor Brücken zu erreichen

Lösung mit Kalibrator und Multimeter gesucht...





Vier-Tor Bedingungen **fast** erfüllt:

- $I_{\text{ein}} + I_{\text{aus}} = 0$  eingehalten
- $I_{\text{aus}} = 0$  für Potenzial Tore
- **Spannung an  $L_{\text{Pot}}$  nicht Null**
- **Strom an  $H_{\text{Cur}}$  definiert**

Verzeihlich bei kleinen Impedanzen,  
 $\omega \cdot C_{\text{Streu}} \ll Y$

$$(10^4 \text{ 1/s} \cdot 10^{-10} \text{ F} = 10^{-6} \text{ S})$$



- Strom an  $H_{Cur}$  eingespeist
- Potenzial Anschlüsse direkt am Multimeter
- Kurzschluss-Stecker an  $L_{Cur}$

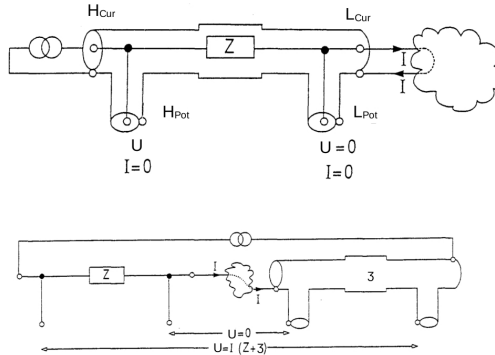
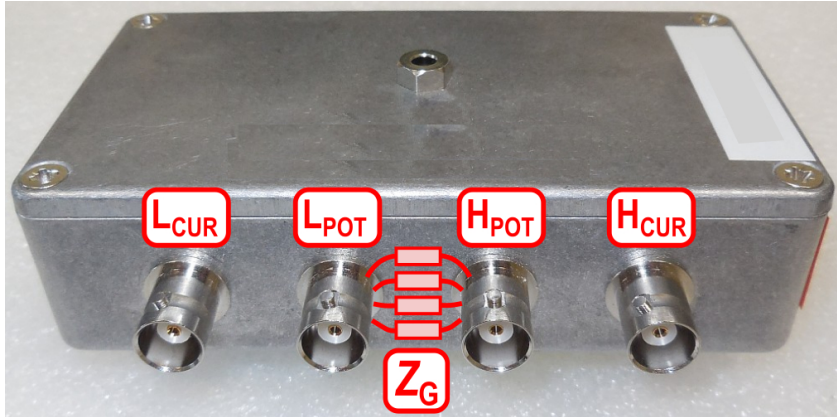


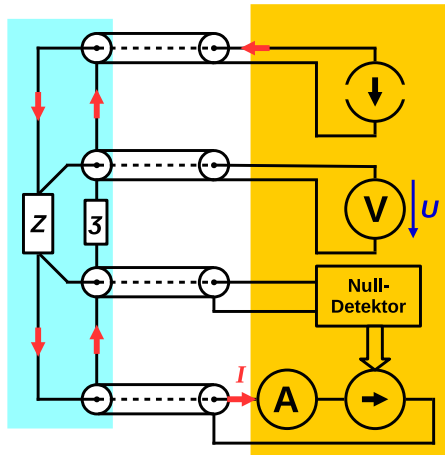
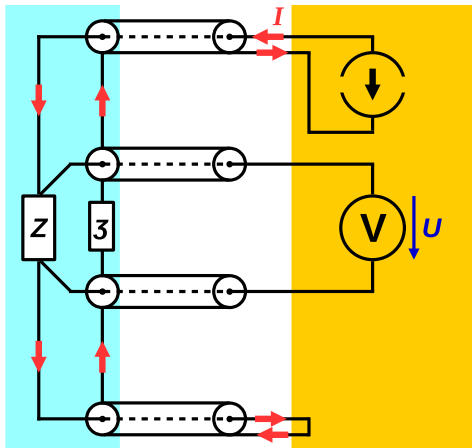
Bild: Brian Kibble

Die Impedanz des Außenleiters wird mit gemessen  
und gehört mit zur definierten Impedanz!

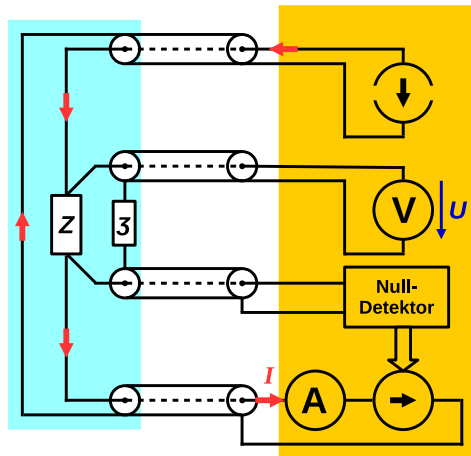
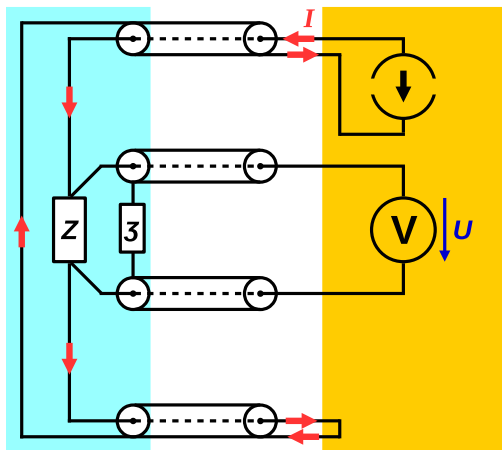
Die Außenleiter-Impedanz  $z$  ist im Gehäuse als  $Z_G$  verortet.



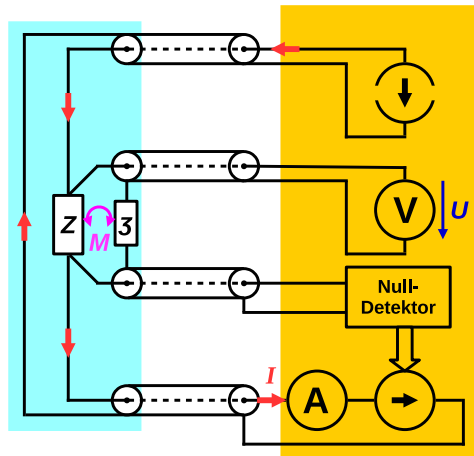
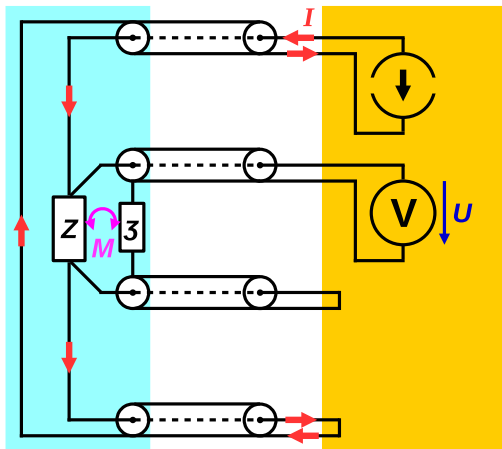
Wollen wir das als Normal? Schlecht definiert, temperaturabhängig, ...



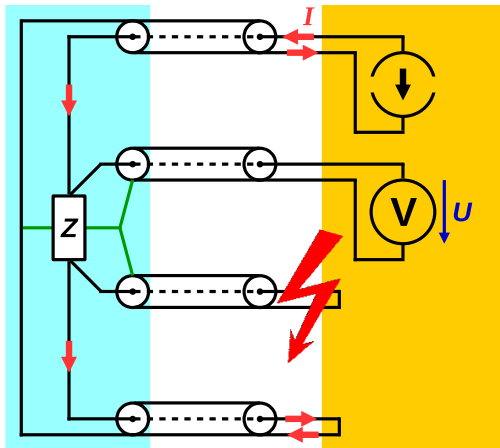
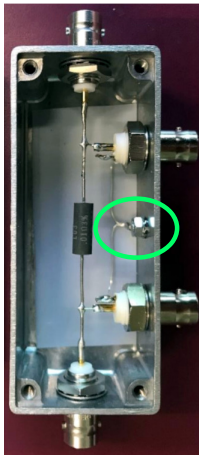
I-U-Methode ignoriert Außenleiter-Spannung, LCR-Meter erfasst sie mit.



Null Spannung zwischen Außenleitern der Potenzial-Tore. (?)



Induzierte Spannung wird jeweils mit erfasst.



Verbindung überprüfen!



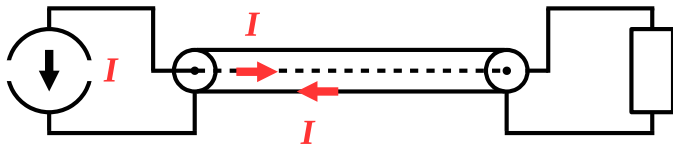
Koaxiale Leitung ist **interferenzfrei**:

Erzeugt kein externes Magnetfeld  $\Leftrightarrow$  Empfängt keine „Einstreuungen“

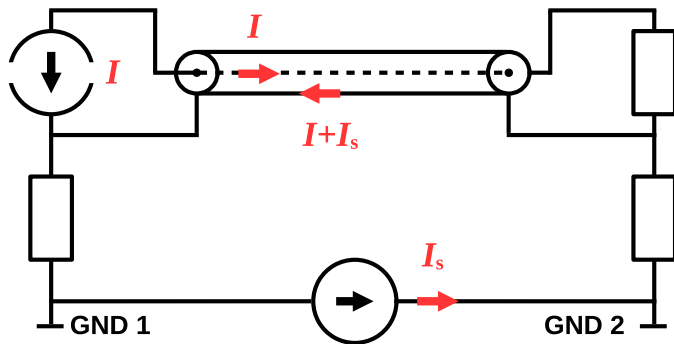
$$\text{Nur, wenn } I_{\text{innen}} + I_{\text{außen}} = 0$$

Bei HF (oft) „von selbst“, bei NF muss man meist „nachhelfen“

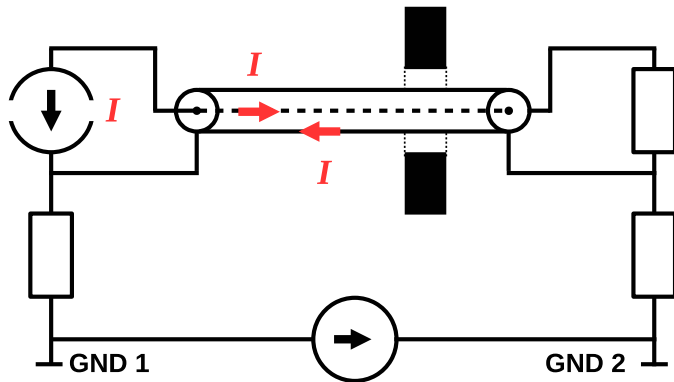
„Gleichtaktdrossel“, „Mantelwellensperre“ oder „Current Equalizer“



Quelle  $\Rightarrow$  Koaxialleitung  $\Rightarrow$  Verbraucher



Geerdete Quelle  $\Rightarrow$  Koaxialleitung  $\Rightarrow$  Geerdeter Verbraucher



Current Equalizer auf Koaxialleitung

Idee: Impedanz für unerwünschten Stromfluss stark vergrößern

- Induktivität durch Aufwickeln erhöhen
- Magnetkern intensiviert die Wirkung
- Prinzip „Stromwandler“ zwischen Innen- und Außenleiter
- Keine Induktivität für Nutzsignal!

Ausführung:

- BNC-Leitung auf Ringkern wickeln
- 10 bis 20 Windungen, einfach alles aufwickeln
- Nachteil: Höherer Längswiderstand, Laufzeit, ...
- 2 m RG58 haben  $\approx 110 \text{ m}\Omega \Rightarrow 11 \text{ W}$  bei 10 A



Beispiel: **1 mΩ** bei **10 A** und **1 kHz**  $\Rightarrow U = 10 \text{ mV}$

Messunsicherheiten für **Stromstärke**:

- 10 A aus Kalibrator: MU rund 0,5 mA/A
- DMM mit Shunt: MU etwa 0,1 mA/A
- AC-Voltmeter mit Koaxial-Shunt: MU etwa 30  $\mu\text{A/A}$

Messunsicherheiten für **Spannung**:

- DMM: MU  $\approx 0,3 \text{ mV/V}$
- AC-Voltmeter: MU  $\approx 0,2 \text{ mV/V}$

AC-DC-Transfer CMC der PTB für 10 mV, 10 A, 1 kHz:  $25 \mu\Omega/\Omega$



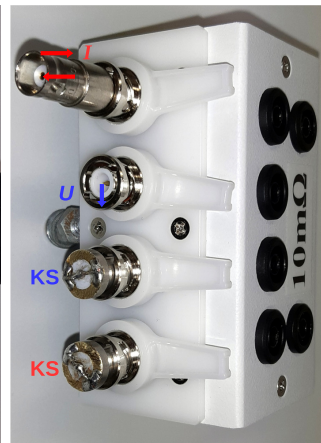
Strom nebenher



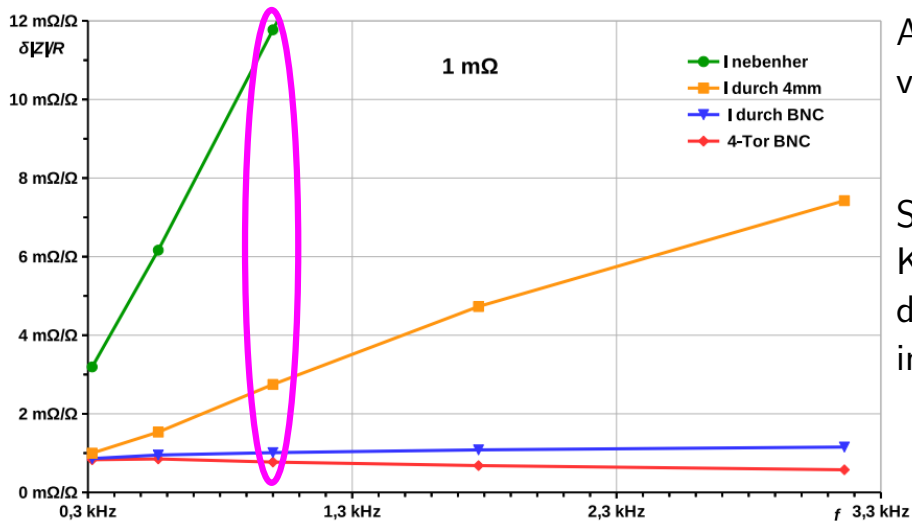
Strom über 4 mm



Strom über BNC



Viertor-Anschluss



Abweichungen  
vom Nennwert

Starke **interne**  
Kopplungen  
durch Gegen-  
induktivitäten



Und was ist mit der Phase?



„Battery Impedance Meter“ oder „Precision Power Analyzer“ liefern Real- und Imaginärteil der Impedanz mit MUen von einigen  $10^{-3}$

Verhältnis ( $\varphi = \arctan \frac{\text{Im}(Z)}{\text{Re}(Z)}$ ) besser möglich? Substitution wie  $L$  und  $C$ ?

- Anschlussweise klar definieren bzw. absprechen.
- Möglichst **koaxial** messen (Strombelastbarkeit?).
- **Torbedingungen** einhalten (Current Equalizer!).
- Interne Verschaltung der **Außenleiter** berücksichtigen.
- **Außenleiter-Impedanz** (nicht) mit messen.

# Niederohmige Vier-Tor-AC-Widerstände kalibrieren?

*Kein Problem mit der richtigen Anschlussweise!*



**Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
Braunschweig und Berlin**

Bundesallee 100  
38116 Braunschweig

Dr. Torsten Funck

Telefon: +49 (0)531 592-2130

E-Mail: [torsten.funck@ptb.de](mailto:torsten.funck@ptb.de)

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

**Diese Präsentation  
wurde ausschließlich  
mit freier und  
quelloffener Software  
erstellt.**