AC-DC Transfer Normale für kleine Stromstärken

Torsten Funck

Arbeitsgruppe 2.13 Wechselstrom-Gleichstrom Transfer, Impedanz

303. PTB-Seminar
Aktuelle Fortschritte von Kalibrierverfahren
im Nieder- und Hochfrequenzbereich 2017
Mittwoch, 17. Mai 2017

Inhalt

- Stand der Technik
- Neuer Ansatz
  - Design
  - Übertragungsfunktion
  - Eigenschaften
  - Realisierung
- Messungen
  - Messaufbau
  - Messergebnisse
- Ausblick
- Zusammenfassung

Anforderung:
Kalibratoren und Messgeräte im 220-μA-Bereich bis hinab zu 10 % kalibrieren

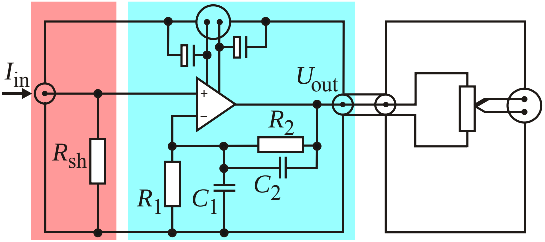
Frequenzbereich:
10 Hz bis 1 MHz (für Messgeräte)

Thermokonverter zunächst ungeeignet:

- Empfindlichkeit $\geq$200 μA
- Eingangswiderstand und -Kapazität $\hookrightarrow$ Tiefpass
- $\hookrightarrow$ Verstärker und Shunt nötig
- $\hookrightarrow$ Frequenzgang i.O., jedoch erhebliche Pegelabhängigkeit

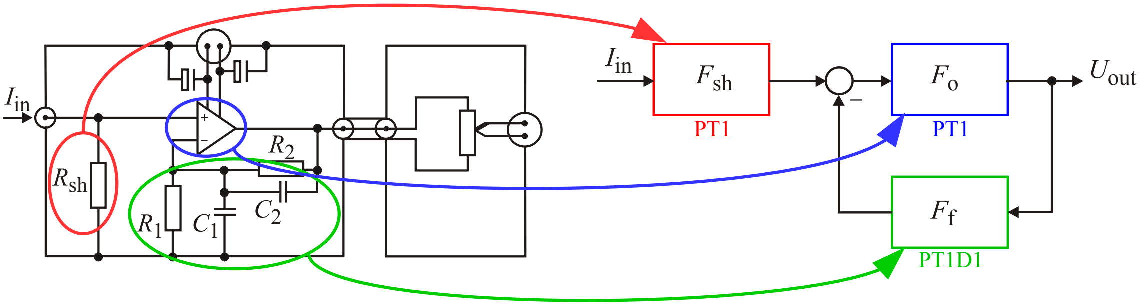
Neues Design

Shunt → Verstärker → Thermokonverter



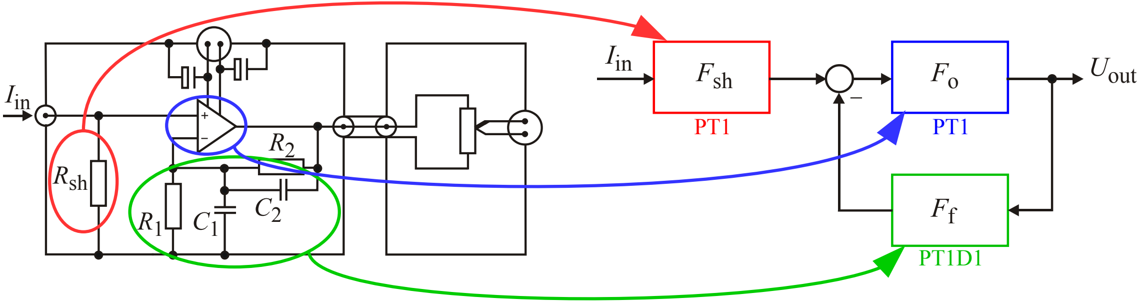
- Wenig Kapazität parallel zum Shunt, da nur ein Konnektor

Shunt → Verstärker → Thermokonverter



- Wenig Kapazität parallel zum Shunt, da nur ein Konnektor
- Frequenzgang analytisch zu bestimmen aus Eigenschaften der Komponenten

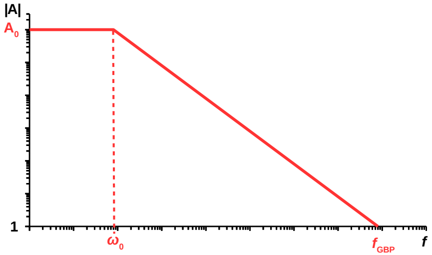
Shunt → Verstärker → Thermokonverter



- Wenig Kapazität parallel zum Shunt, da nur ein Konnektor
- Frequenzgang analytisch zu bestimmen aus Eigenschaften der Komponenten
- Shunt-Widerstand R_{sh} und Verstärkungsfaktor A frei wählbar
  ↪ Möglichkeit zur Optimierung

Operationsverstärker:

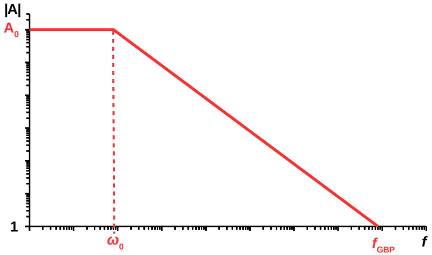
$$F_o(p) = \frac{A_o}{1 + p\,T_o} \quad \text{mit} \quad p = j\omega = j2\pi f$$



Übertragungsfunktionen der Blöcke

Operationsverstärker:

$$F_o(p) = \frac{A_o}{1 + p\,T_o} \quad \text{mit} \quad p = j\omega = j2\pi f$$



Shunt:

$$F_{sh}(p) = R_{sh} \cdot \frac{1}{1 + p\,T_{sh}}$$

Operationsverstärker:

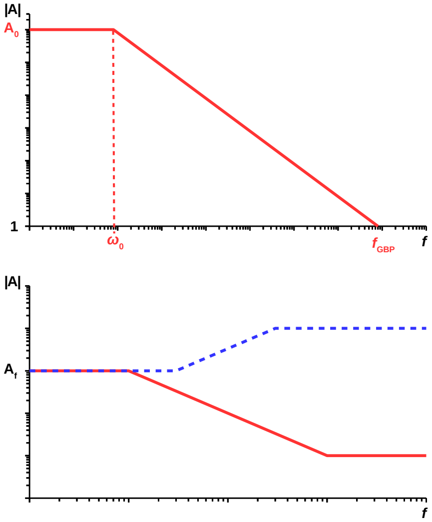
$$F_o(p) = \frac{A_o}{1 + p\ T_o} \quad \text{mit} \quad p = j\omega = j2\pi f$$

Shunt:

$$F_{sh}(p) = R_{sh} \cdot \frac{1}{1 + p\ T_{sh}}$$

Rückkopplungs-Netzwerk:

$$F_f(p) = A_f \cdot \frac{1 + p\ T_2}{1 + p\ T_f}$$



Übertragungsfunktion des gegengekoppelten Verstärkers

$$F_\mathrm{a} = \frac{F_\mathrm{vor}}{1 + F_\mathrm{vor} \cdot F_\mathrm{rück}} = \frac{1}{1/F_\mathrm{o} + F_\mathrm{f}}$$

Übertragungsfunktion des gegengekoppelten Verstärkers

$$F_a = \frac{F_{vor}}{1 + F_{vor} \cdot F_{rück}} = \frac{1}{1/F_o + F_f}$$

$$= \frac{1}{\dfrac{1 + p\,T_o}{A_o} + A_f \cdot \dfrac{1 + p\,T_2}{1 + p\,T_f}}$$

$$F_{\mathrm{a}} = \frac{F_{\mathrm{vor}}}{1 + F_{\mathrm{vor}} \cdot F_{\mathrm{rück}}} = \frac{1}{1/F_{\mathrm{o}} + F_{\mathrm{f}}}$$

$$= \frac{1}{\dfrac{1 + p\,T_{\mathrm{o}}}{A_{\mathrm{o}}} + A_{\mathrm{f}} \cdot \dfrac{1 + p\,T_2}{1 + p\,T_{\mathrm{f}}}} = \frac{A_{\mathrm{o}}}{1 + A_{\mathrm{o}} \cdot A_{\mathrm{f}}} \cdot \frac{1 + p\,T_{\mathrm{f}}}{1 + p\left(\dfrac{T_{\mathrm{o}}}{1 + A_{\mathrm{o}} \cdot A_{\mathrm{f}}} + T_2\right) + p^2 \dfrac{T_{\mathrm{o}}}{1 + A_{\mathrm{o}} \cdot A_{\mathrm{f}}} \cdot T_{\mathrm{f}}}$$

Übertragungsfunktion des gegengekoppelten Verstärkers

$$F_a = \frac{F_{vor}}{1 + F_{vor} \cdot F_{rück}} = \frac{1}{1/F_o + F_f}$$

$$= \frac{1}{\frac{1 + p\,T_o}{A_o} + A_f \cdot \frac{1 + p\,T_2}{1 + p\,T_f}} = \frac{A_o}{1 + A_o \cdot A_f} \cdot \frac{1 + p\,T_f}{1 + p\left(\frac{T_o}{1 + A_o \cdot A_f} + T_2\right) + p^2 \frac{T_o}{1 + A_o \cdot A_f} \cdot T_f}$$

$A_s = 1 + A_o \cdot A_f$	$\approx 2 \cdot 10^5$	(Schleifenverstärkung)
$T_s = \frac{T_o}{A_s}$	$\approx 10\,\mathrm{ns}$	(Zeitkonstante der Schleife)
$A = \frac{A_o}{A_s}$	≈ 5	(Verstärkung)

Übertragungsfunktion des gegengekoppelten Verstärkers

$$F_a = \frac{F_{vor}}{1 + F_{vor} \cdot F_{rück}} = \frac{1}{1/F_o + F_f}$$

$$= \frac{1}{\dfrac{1 + p\,T_o}{A_o} + A_f \cdot \dfrac{1 + p\,T_2}{1 + p\,T_f}} = \frac{A_o}{1 + A_o \cdot A_f} \cdot \frac{1 + p\,T_f}{1 + p\left(\dfrac{T_o}{1 + A_o \cdot A_f} + T_2\right) + p^2 \dfrac{T_o}{1 + A_o \cdot A_f} \cdot T_f}$$

A_s	$= 1 + A_o \cdot A_f$	$\approx 2 \cdot 10^5$	(Schleifenverstärkung)
T_s	$= \dfrac{T_o}{A_s}$	$\approx 10\,\mathrm{ns}$	(Zeitkonstante der Schleife)
A	$= \dfrac{A_o}{A_s}$	≈ 5	(Verstärkung)

$$\boldsymbol{F_a = A \cdot \frac{1 + p T_f}{1 + p\,(T_s + T_2) + p^2\, T_s\, T_f}}$$

Reihenschaltung der Übertragungsfunktionen

- des Shunts F_{sh} und
- des gegengekoppelten Verstärkers F_{a}

ergibt die Übertragungsfunktion des Stromstärke-zu-Spannung-Messumformers

$$\boldsymbol{F = F_{\mathrm{sh}} \cdot F_{\mathrm{a}} = R_{\mathrm{sh}} \cdot A \cdot \frac{(1 + p T_{\mathrm{f}})}{(1 + p\, T_{\mathrm{sh}})\,(1 + p\,(T_{\mathrm{s}} + T_2) + p^2 T_{\mathrm{s}} T_{\mathrm{f}})}} \; .$$

Die Gesamt-Übertragungsfunktion F enthält einen Vorhalt, der zur Kompensation der Verzögerungen sowohl von F_{a} als auch von F_{sh} eingesetzt werden kann. Dazu können die Kapazitäten C_1 und C_2 variiert werden.

Der Gleichstrom-Übertragungsfaktor beträgt $R_{\mathrm{sh}} \cdot A$, der Shuntwiderstand wird somit mit dem Verstärkungsfaktor A vergrößert, ohne die Zeitkonstante T_{sh} zu erhöhen.

$$\delta(f) = \left. \frac{I_{\mathrm{ein}}(f) - I_{\mathrm{ein}}(0)}{I_{\mathrm{ein}}(0)} \right|_{U_{\mathrm{aus}}(f) = U_{\mathrm{aus}}(0)}$$

Wechsel-Gleich-Transferdifferenz

$$\delta(f) = \left. \frac{I_{\mathrm{ein}}(f) - I_{\mathrm{ein}}(0)}{I_{\mathrm{ein}}(0)} \right|_{U_{\mathrm{aus}}(f) = U_{\mathrm{aus}}(0)}$$

Die AC-DC-Transferdifferenz $\delta(f)$ ist definiert als die Differenz zwischen dem Eingangs-Signal, hier der Eingangs-Stromstärke I_{ein},

$$\delta(f) = \left. \frac{I_{\mathrm{ein}}(f) - I_{\mathrm{ein}}(0)}{I_{\mathrm{ein}}(0)} \right|_{U_{\mathrm{aus}}(f)=U_{\mathrm{aus}}(0)}$$

Die AC-DC-Transferdifferenz $\delta(f)$ ist definiert als die Differenz zwischen dem Eingangs-Signal, hier der Eingangs-Stromstärke I_{ein}, das bei der Frequenz f das dasselbe Ausgangs-Signal, hier dieselbe Ausgangs-Spannung U_{aus}, bewirkt,

$$\delta(f) = \left.\frac{I_{\text{ein}}(f) - I_{\text{ein}}(0)}{I_{\text{ein}}(0)}\right|_{U_{\text{aus}}(f)=U_{\text{aus}}(0)}$$

Die AC-DC-Transferdifferenz $\delta(f)$ ist definiert als die Differenz zwischen dem Eingangs-Signal, hier der Eingangs-Stromstärke I_{ein}, das bei der Frequenz f das dasselbe Ausgangs-Signal, hier dieselbe Ausgangs-Spannung U_{aus}, bewirkt, wie es bei $f = 0$, d.h. bei Gleichstrom, auftritt,

Wechsel-Gleich-Transferdifferenz

$$\delta(f) = \left. \frac{I_{\mathrm{ein}}(f) - I_{\mathrm{ein}}(0)}{I_{\mathrm{ein}}(0)} \right|_{U_{\mathrm{aus}}(f) = U_{\mathrm{aus}}(0)}$$

Die AC-DC-Transferdifferenz $\delta(f)$ ist definiert als die Differenz zwischen dem Eingangs-Signal, hier der Eingangs-Stromstärke I_{ein}, das bei der Frequenz f das dasselbe Ausgangs-Signal, hier dieselbe Ausgangs-Spannung U_{aus}, bewirkt, wie es bei $f = 0$, d.h. bei Gleichstrom, auftritt, und dem Gleichstrom-Eingangs-Signal,

$$\delta(f) = \left.\frac{I_{\mathrm{ein}}(f) - I_{\mathrm{ein}}(0)}{I_{\mathrm{ein}}(0)}\right|_{U_{\mathrm{aus}}(f) = U_{\mathrm{aus}}(0)}$$

Die AC-DC-Transferdifferenz $\delta(f)$ ist definiert als die Differenz zwischen dem Eingangs-Signal, hier der Eingangs-Stromstärke I_{ein}, das bei der Frequenz f das dasselbe Ausgangs-Signal, hier dieselbe Ausgangs-Spannung U_{aus}, bewirkt, wie es bei $f = 0$, d.h. bei Gleichstrom, auftritt, und dem Gleichstrom-Eingangs-Signal, bezogen auf das Gleichstrom-Eingangs-Signal.

Wechsel-Gleich-Transferdifferenz

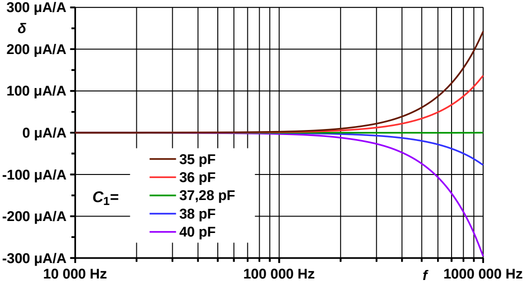
$$\delta(f) = \left. \frac{I_{\text{ein}}(f) - I_{\text{ein}}(0)}{I_{\text{ein}}(0)} \right|_{U_{\text{aus}}(f) = U_{\text{aus}}(0)}$$

Die AC-DC-Transferdifferenz $\delta(f)$ ist definiert als die Differenz zwischen dem Eingangs-Signal, hier der Eingangs-Stromstärke I_{ein}, das bei der Frequenz f das dasselbe Ausgangs-Signal, hier dieselbe Ausgangs-Spannung U_{aus}, bewirkt, wie es bei $f = 0$, d.h. bei Gleichstrom, auftritt, und dem Gleichstrom-Eingangs-Signal, bezogen auf das Gleichstrom-Eingangs-Signal.

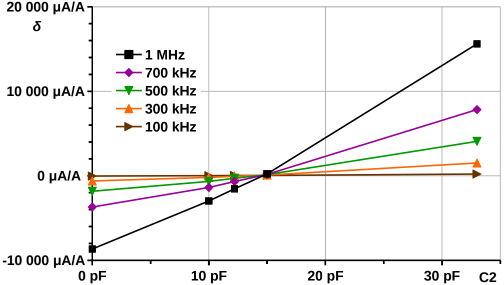
Alle Größen bedeuten Effektivwerte, somit kann der Betrag der Übertragungsfunktion F zur Berechnung von $\delta(f)$ heran gezogen werden:

$$\boxed{\delta(f) = 1 - \frac{|F(j2\pi f)|}{F(0)}}$$

Einfluss der Kompensations-Kapazitäten:

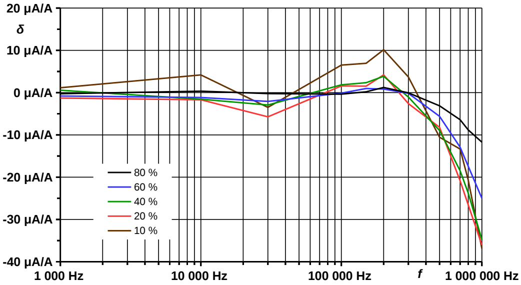


Frequenzgang inklusive Shunt "abgleichbar" (berechnet)

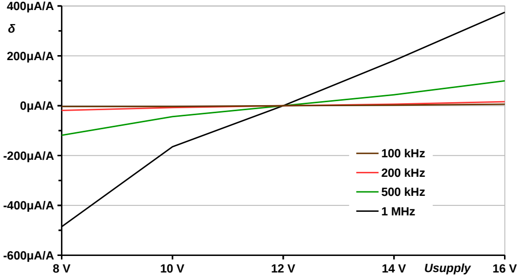


Abhängigkeit von der Kapazität C_2 (gemessen)

Erzielte Ergebnisse:



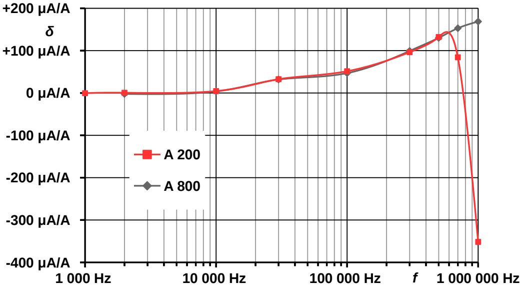
Abhängigkeit vom Eingangspegel
(Abweichungen von 100 % Signal)



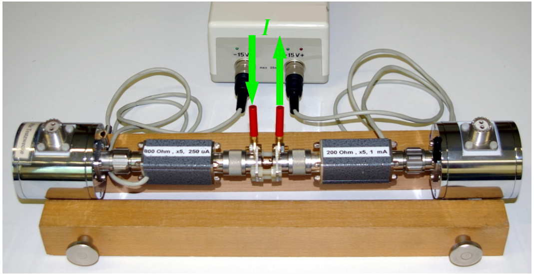
Abhängigkeit von der Betriebsspannung
(Abweichungen normiert auf ±12 V)

Zwei Normale aufgebaut:

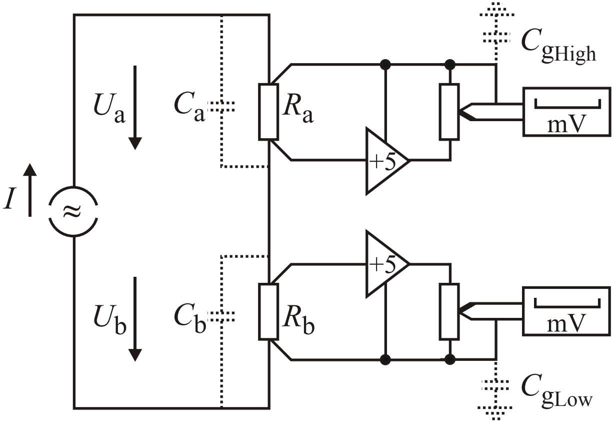
- **A200** mit $R_{sh} = 200\,\Omega$ für $I_{max} = 1\,\text{mA}$
- **A800** mit $R_{sh} = 800\,\Omega$ für $I_{max} = 300\,\mu\text{A}$

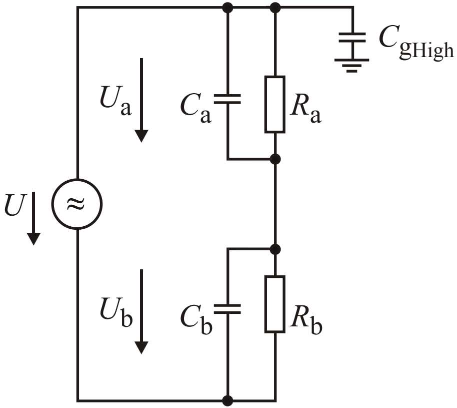


Frequenzgang der Transferdifferenzen



Zwei Verstärker mit PMJTCs über ein spezielles T-Stück in Reihe geschaltet





Zwei Stromstärketransfer-Normale in Reihenschaltung

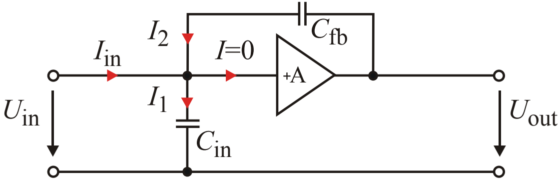
Links: Speisung mit eingeprägter Stromstärke. Rechts: Speisung mit eingeprägter Spannung.

Zwei neue Normale und PMJTC bei 300 µA

Frequenz	A800-A200	A800-PMJTC	A200-PMJTC	Dreieck
1 kHz	-1 µA/A	-6 µA/A	-7 µA/A	+2 µA/A
10 kHz	-5 µA/A	-14 µA/A	-13 µA/A	+4 µA/A
100 kHz	-11 µA/A	-48 µA/A	-44 µA/A	+7 µA/A
300 kHz	-43 µA/A	-426 µA/A	-429 µA/A	+46 µA/A
500 kHz	-47 µA/A	-1 226 µA/A	-1 224 µA/A	+45 µA/A
700 kHz	+12 µA/A	-2 444 µA/A	-2 513 µA/A	+57 µA/A
1 MHz	+425 µA/A	-5 010 µA/A	-5 531 µA/A	+96 µA/A

↪ **Dreieck-Differenzen $<$ 100 µA/A**

Die gewählte nicht-invertierende Verstärkerschaltung erlaubt mit einfachen Mitteln die Reduzierung der Eingangs-Kapazität auf vernachlässigbar geringe Werte:



$$
\begin{aligned}
I_1 &= p\, C_{in} \cdot U_{in} \\
I_2 &= p\, C_{fb} \cdot (U_{out} - U_{in}) \\
&= p\, C_{fb} \cdot (A \cdot U_{in} - U_{in})
\end{aligned}
$$

$$\boldsymbol{I_1 \overset{!}{=} I_2 \Rightarrow C_{fb} = \frac{C_{in}}{A - 1}}$$

Mittels der Kapazität C_{fb} kann der kapazitive Eingangsstrom I_1 nahezu neutralisiert werden. Ein vollständiger Abgleich ist wegen unvermeidlicher Parametervariationen nicht sinnvoll.

Neue AC-DC Transfer Normale für kleine Stromstärken

Design:

- Einstufiger Verstärker in kompaktem Gehäuse
  zur direkten Montage am Eingangs-Konnektor eines PTB-PMJTC
- Eingebauter Shunt für minimale Eingangs-Kapazität
- Potenzialfreie Stromversorgung aus speziellem Doppel-Netzteil oder
  USB-Powerbank und geregeltem DC-DC Wandler

Kenndaten:

∗ Frequenzbereich: $f \leq 1\,\mathrm{MHz}$

∗ Stromstärke: $20\,\mu\mathrm{A} \leq I \leq 1\,\mathrm{mA}$

∗ Transferdifferenz: $\delta < 400\,\mu\mathrm{A/A}$

Vielen Dank! - Fragen?

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
www.ptb.de