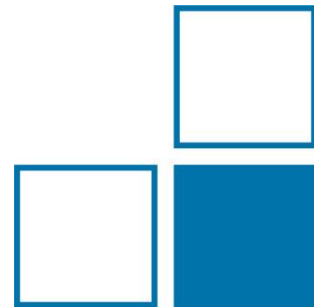


Präzisionswiderstände kalibrieren

Entwicklung einer automatischen, selbstkalibrierenden Messeinrichtung zur Kalibrierung niederohmiger Strommesswiderstände bei Stromstärken bis 100 A

Marcel Schweitzer



- Motivation
- Messaufbau / Systemkomponenten
- Messprinzip / Messsequenzen
- Messauswertung
- Messunsicherheiten
- Validierung / Ergebnisse
- Ausblick

Herkömmliche Messsysteme

- nur dekadische Verhältnisse
oder
- nur Ströme bis 100 mA
- alternativer Messplatz zu ungenau
(Kalibrier Aufwand sehr hoch)



1 Ω



0,1 Ω



0,01 Ω



~~0,8 Ω~~



$\approx 7 \cdot 10^{-6}$

Neues Messsystem

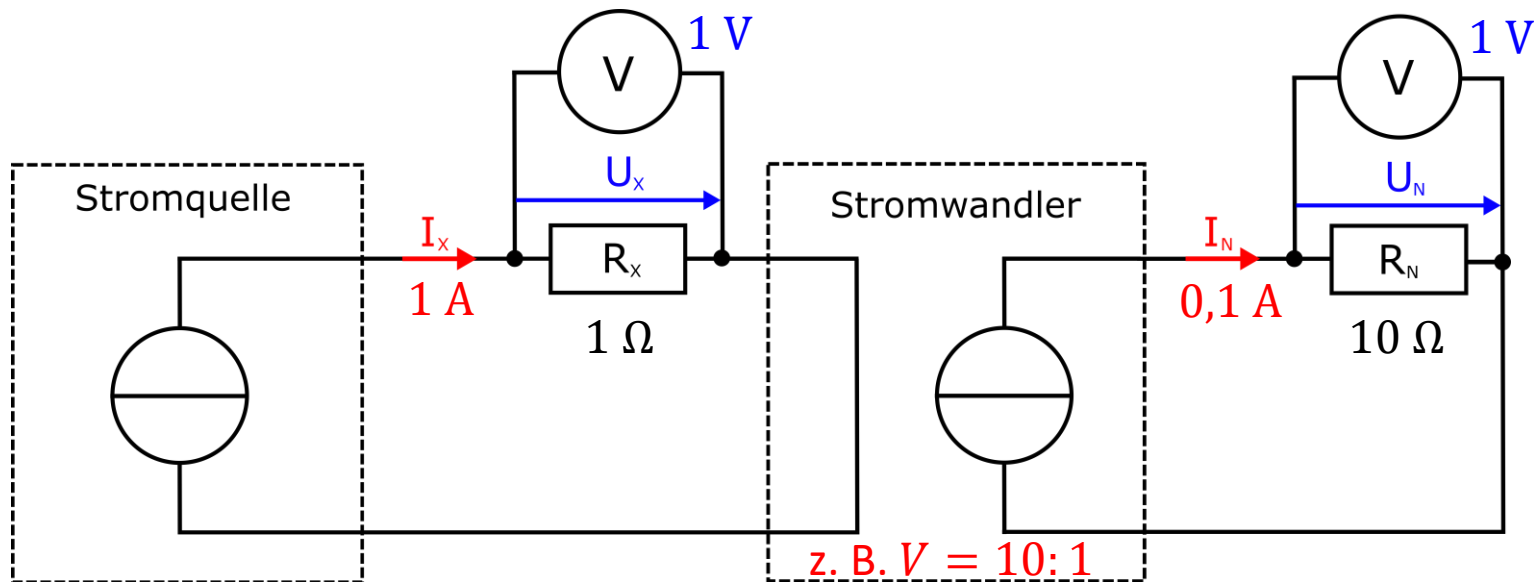


1 Ω ✓
0,1 Ω ✓
0,01 Ω ✓



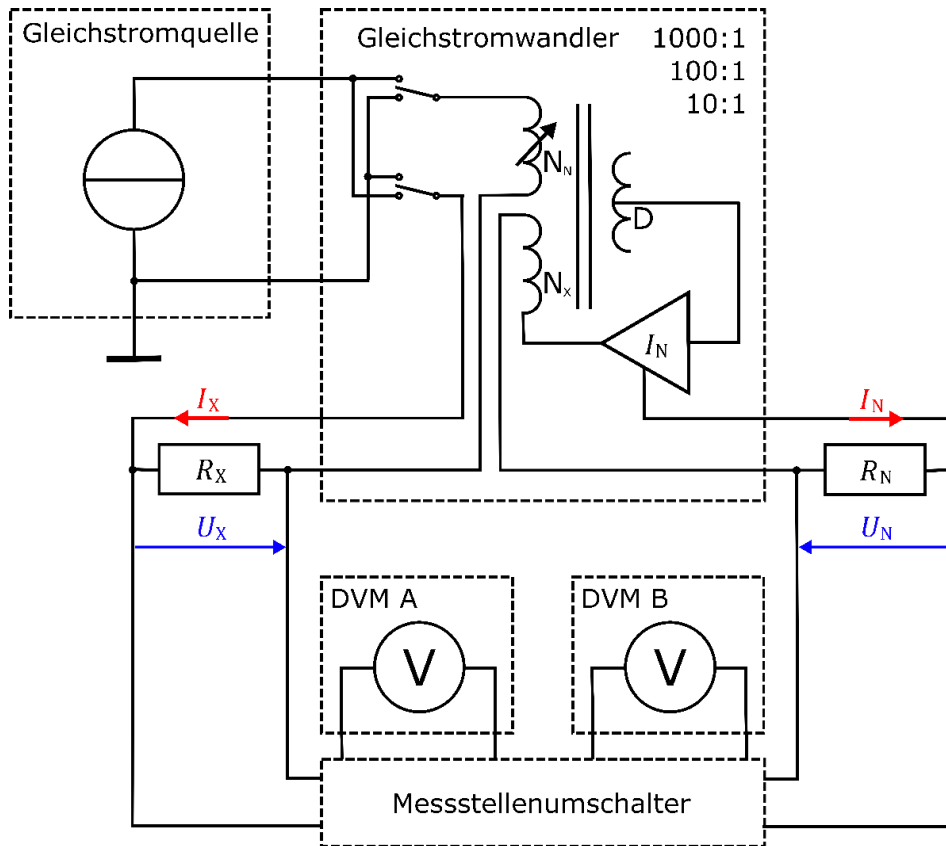
0,4 Ω ✓
0,16 Ω ✓
0,008 Ω ✓

- nicht-dekadische Verhältnisse möglich
- erw. Messunsicherheit $< 1 \cdot 10^{-6}$
- automatisiert



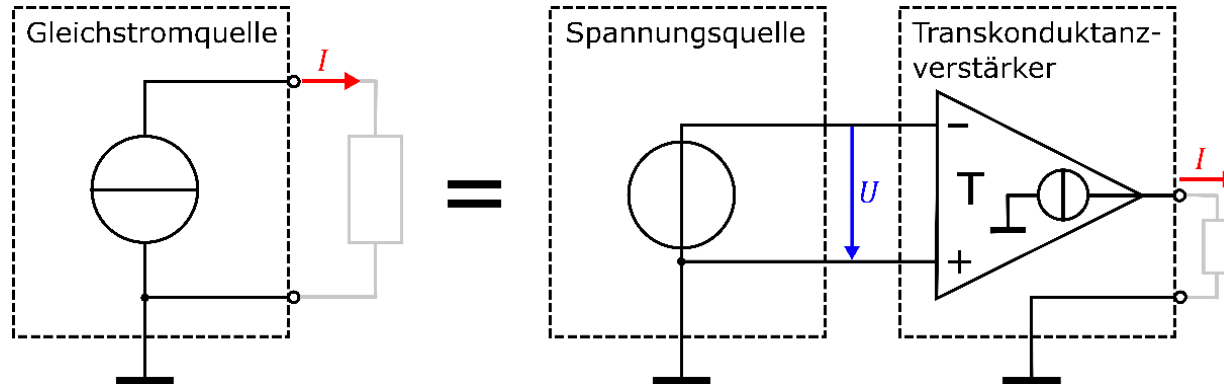
$$I_X = V \cdot I_N$$

$$\frac{U_X}{R_X} = V \cdot \frac{U_N}{R_N} \Rightarrow R_X = \frac{1}{V} \cdot R_N \cdot \frac{U_X}{U_N}$$



$$R_X = \frac{1}{V} \cdot R_N \cdot \frac{U_X}{U_N}$$

Präzisionsstromquelle

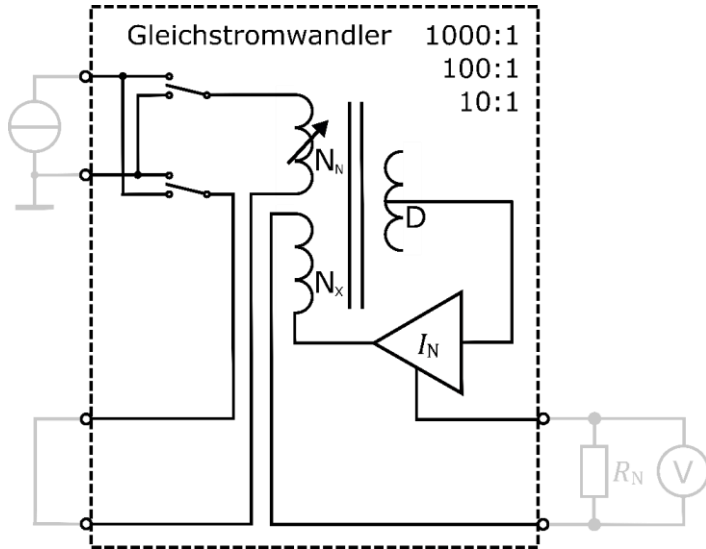


(Datron 4808)

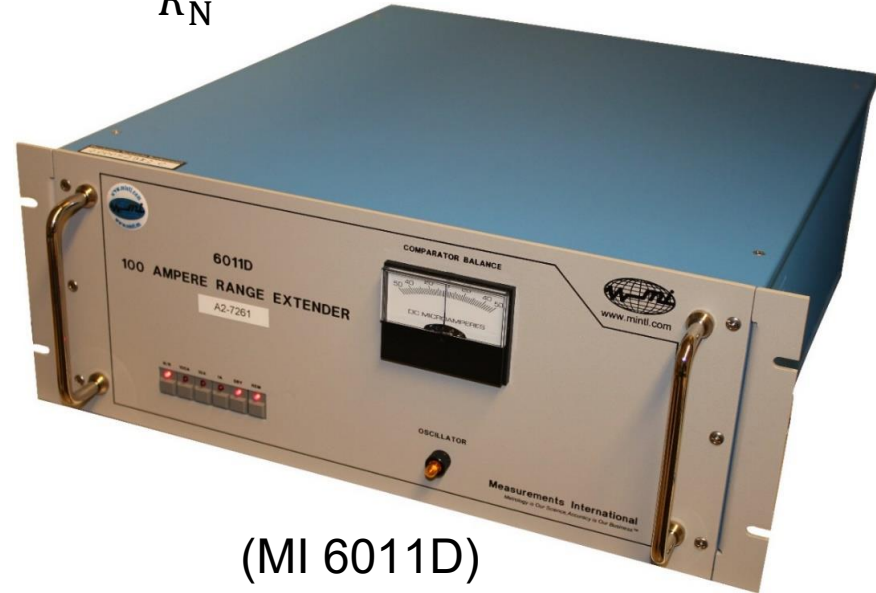


(Fluke 52120A)

Präzisionsstromwandler



$$I_X = V \cdot \frac{U_{R_N}}{R_N}$$



(MI 6011D)



(data proof 160B)

- 16 Eingangskanäle
- 2 Ausgänge A und B
- Thermokraftarme Relais

Digitalvoltmeter

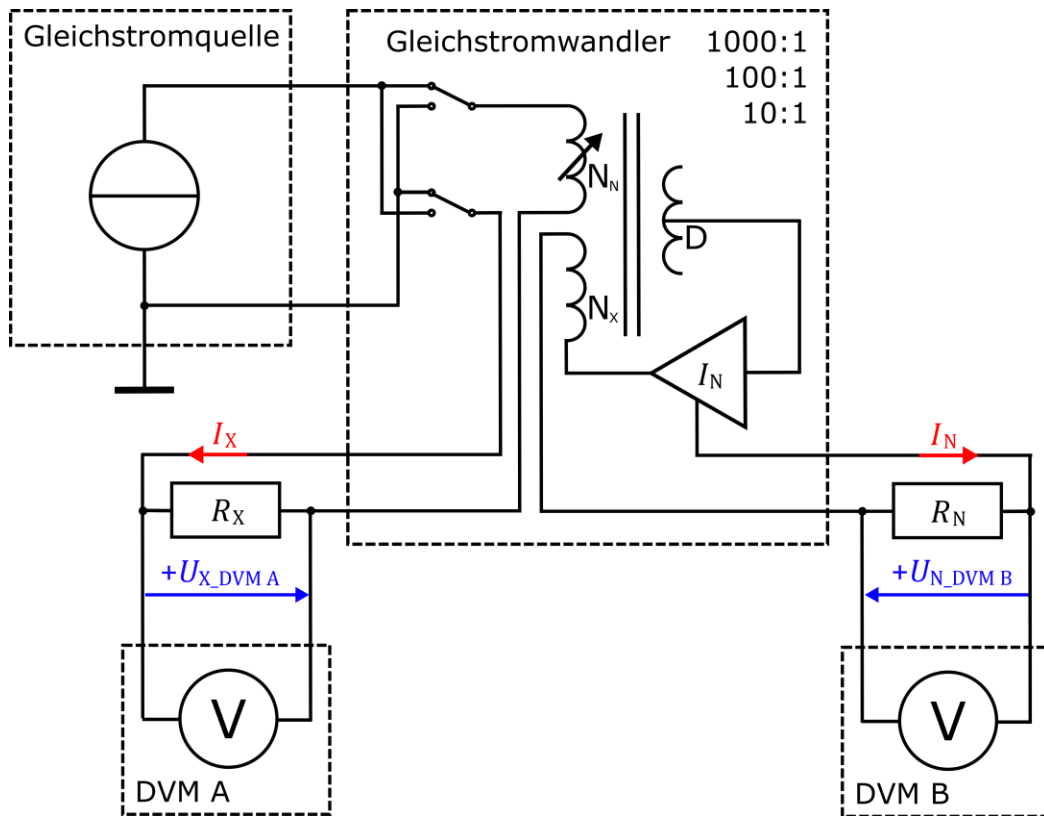


(Fluke 8508)

- 2 x im Messaufbau
- DC 2 V Messbereich

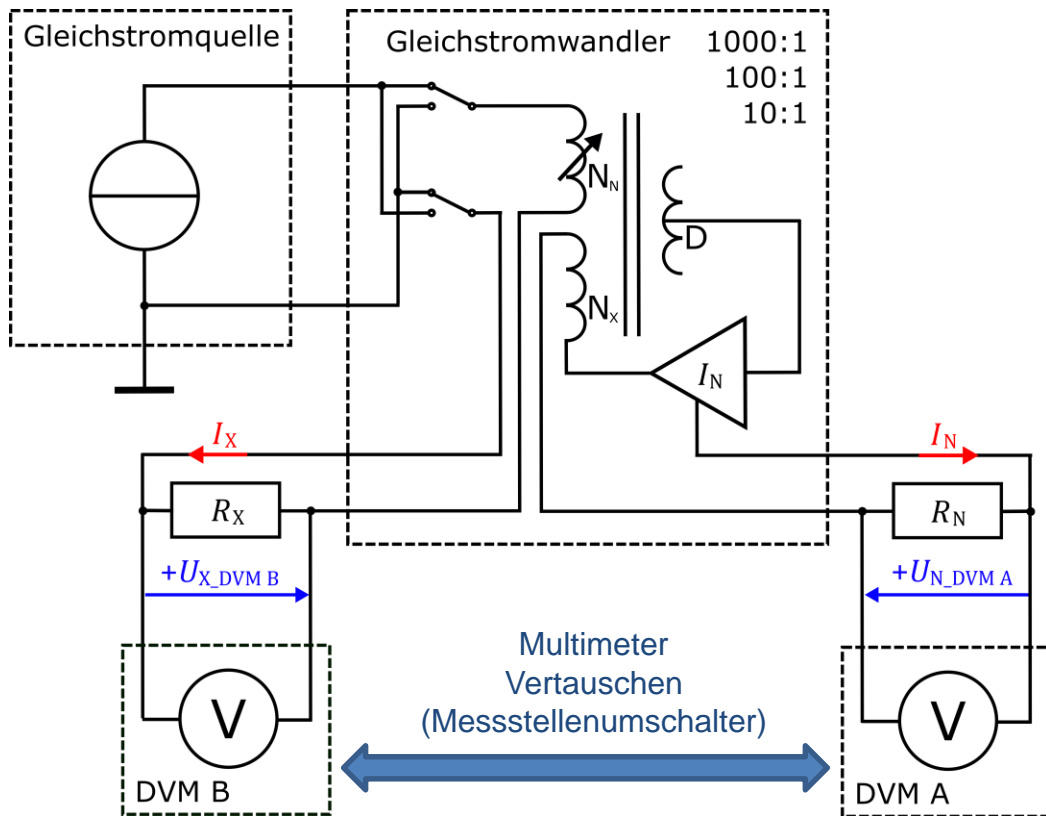
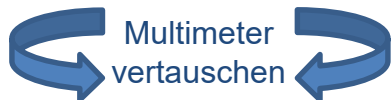
Messsequenz (Abschnitt 1)

Abschnitt 1	Abschnitt 2	Abschnitt 3	Abschnitt 4
$+U_{X_DVM\ A}$	$+U_{X_DVM\ B}$	$-U_{X_DVM\ B}$	$-U_{X_DVM\ A}$
$+U_{N_DVM\ B}$	$+U_{N_DVM\ A}$	$-U_{N_DVM\ A}$	$-U_{N_DVM\ B}$



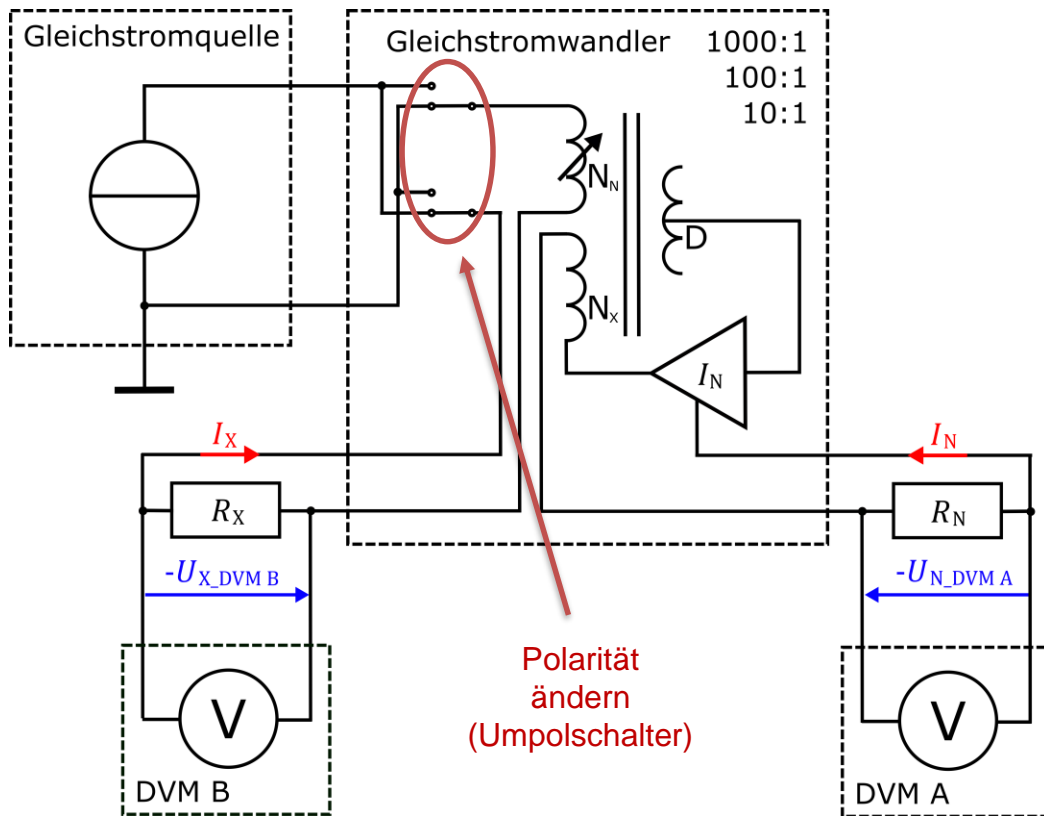
Messsequenz (Abschnitt 2)

Abschnitt 1	Abschnitt 2	Abschnitt 3	Abschnitt 4
$+U_{X_DVM\ A}$	$+U_{X_DVM\ B}$	$-U_{X_DVM\ B}$	$-U_{X_DVM\ A}$
$+U_{N_DVM\ B}$	$+U_{N_DVM\ A}$	$-U_{N_DVM\ A}$	$-U_{N_DVM\ B}$



Messsequenz (Abschnitt 3)

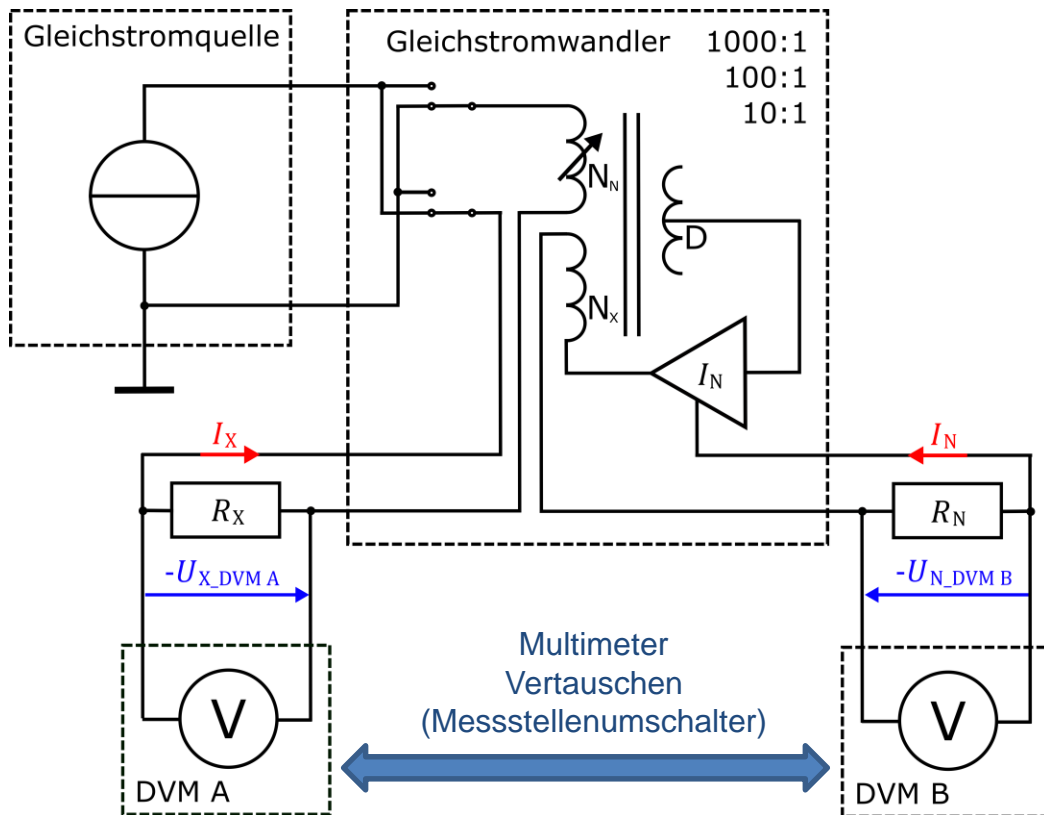
Abschnitt 1	Abschnitt 2	Abschnitt 3	Abschnitt 4
$+U_{X_DVM\ A}$	$+U_{X_DVM\ B}$	$-U_{X_DVM\ B}$	$-U_{X_DVM\ A}$
$+U_{N_DVM\ B}$	$+U_{N_DVM\ A}$	$-U_{N_DVM\ A}$	$-U_{N_DVM\ B}$



Messsequenz (Abschnitt 4)

Abschnitt 1	Abschnitt 2	Abschnitt 3	Abschnitt 4
$+U_{X_DVM\ A}$	$+U_{X_DVM\ B}$	$-U_{X_DVM\ B}$	$-U_{X_DVM\ A}$
$+U_{N_DVM\ B}$	$+U_{N_DVM\ A}$	$-U_{N_DVM\ A}$	$-U_{N_DVM\ B}$

Multimeter
vertauschen



Auswertung der Messsequenz

Abschnitt 1	Abschnitt 2	Abschnitt 3	Abschnitt 4
$+U_{X_DVM\ A}$	$+U_{X_DVM\ B}$	$-U_{X_DVM\ B}$	$-U_{X_DVM\ A}$
$+U_{N_DVM\ B}$	$+U_{N_DVM\ A}$	$-U_{N_DVM\ A}$	$-U_{N_DVM\ B}$

$$U_{X_DVM\ A} = \frac{|+U_{X_DVM\ A}| + |-U_{X_DVM\ A}|}{2}$$

$$U_{N_DVM\ B} = \frac{|+U_{N_DVM\ B}| + |-U_{N_DVM\ B}|}{2}$$

Thermospannungen U_{th} und Spannungsoffsets U_{Offset} der Geräte werden eliminiert

$$U = \frac{(+U + U_{th} + U_{Offset}) - (-U + U_{th} + U_{Offset})}{2}$$

$$U = \frac{(+U) - (-U)}{2} = \frac{|+U| + |-U|}{2}$$

Auswertung der Messsequenz

Abschnitt 1	Abschnitt 2	Abschnitt 3	Abschnitt 4
$+U_{X_DVM\ A}$	$+U_{X_DVM\ B}$	$-U_{X_DVM\ B}$	$-U_{X_DVM\ A}$
$+U_{N_DVM\ B}$	$+U_{N_DVM\ A}$	$-U_{N_DVM\ A}$	$-U_{N_DVM\ B}$

$$U_{X_DVM\ A} = \frac{|+U_{X_DVM\ A}| + |-U_{X_DVM\ A}|}{2}$$

$$U_{N_DVM\ B} = \frac{|+U_{N_DVM\ B}| + |-U_{N_DVM\ B}|}{2}$$

$$U_{X_DVM\ B} = \frac{|+U_{X_DVM\ B}| + |-U_{X_DVM\ B}|}{2}$$

$$U_{N_DVM\ A} = \frac{|+U_{N_DVM\ A}| + |-U_{N_DVM\ A}|}{2}$$

Auswertung der Messsequenz

Abschnitt 1	Abschnitt 2	Abschnitt 3	Abschnitt 4
$+U_{X_DVM\ A}$	$+U_{X_DVM\ B}$	$-U_{X_DVM\ B}$	$-U_{X_DVM\ A}$
$+U_{N_DVM\ B}$	$+U_{N_DVM\ A}$	$-U_{N_DVM\ A}$	$-U_{N_DVM\ B}$

$$U_{X_DVM\ A} = \frac{|+U_{X_DVM\ A}| + |-U_{X_DVM\ A}|}{2}$$

$$U_{N_DVM\ B} = \frac{|+U_{N_DVM\ B}| + |-U_{N_DVM\ B}|}{2}$$

$$U_{X_DVM\ B} = \frac{|+U_{X_DVM\ B}| + |-U_{X_DVM\ B}|}{2}$$

$$U_{N_DVM\ A} = \frac{|+U_{N_DVM\ A}| + |-U_{N_DVM\ A}|}{2}$$

$$U_X = \frac{U_{X_DVM\ A} + U_{X_DVM\ B}}{2}$$

$$U_N = \frac{U_{N_DVM\ A} + U_{N_DVM\ B}}{2}$$

Auswertung der Messsequenz

Abschnitt 1	Abschnitt 2	Abschnitt 3	Abschnitt 4
$+U_{X_DVM\ A}$	$+U_{X_DVM\ B}$	$-U_{X_DVM\ B}$	$-U_{X_DVM\ A}$
$+U_{N_DVM\ B}$	$+U_{N_DVM\ A}$	$-U_{N_DVM\ A}$	$-U_{N_DVM\ B}$

$$U_{X_DVM\ A} = \frac{|+U_{X_DVM\ A}| + |-U_{X_DVM\ A}|}{2}$$

$$U_{N_DVM\ B} = \frac{|+U_{N_DVM\ B}| + |-U_{N_DVM\ B}|}{2}$$

$$U_{X_DVM\ B} = \frac{|+U_{X_DVM\ B}| + |-U_{X_DVM\ B}|}{2}$$

$$U_{N_DVM\ A} = \frac{|+U_{N_DVM\ A}| + |-U_{N_DVM\ A}|}{2}$$

$$U_X = \frac{U_{X_DVM\ A} + U_{X_DVM\ B}}{2}$$

$$U_N = \frac{U_{N_DVM\ A} + U_{N_DVM\ B}}{2}$$

Spannungsverhältnis: $\frac{U_X}{U_N}$

$$\frac{U_X}{U_N} = \frac{\frac{|+U_{X_DVM\ A}| + |-U_{X_DVM\ A}|}{2} + \frac{|+U_{X_DVM\ B}| + |-U_{X_DVM\ B}|}{2}}{\frac{|+U_{N_DVM\ A}| + |-U_{N_DVM\ A}|}{2} + \frac{|+U_{N_DVM\ B}| + |-U_{N_DVM\ B}|}{2}}$$

Auswertung der Messsequenz

Abschnitt 1	Abschnitt 2	Abschnitt 3	Abschnitt 4
$+U_{X_DVM\ A}$	$+U_{X_DVM\ B}$	$-U_{X_DVM\ B}$	$-U_{X_DVM\ A}$
$+U_{N_DVM\ B}$	$+U_{N_DVM\ A}$	$-U_{N_DVM\ A}$	$-U_{N_DVM\ B}$

$$U_{X_DVM\ A} = \frac{|+U_{X_DVM\ A}| + |-U_{X_DVM\ A}|}{2}$$

$$U_{N_DVM\ B} = \frac{|+U_{N_DVM\ B}| + |-U_{N_DVM\ B}|}{2}$$

$$U_{X_DVM\ B} = \frac{|+U_{X_DVM\ B}| + |-U_{X_DVM\ B}|}{2}$$

$$U_{N_DVM\ A} = \frac{|+U_{N_DVM\ A}| + |-U_{N_DVM\ A}|}{2}$$

$$U_X = \frac{U_{X_DVM\ A} + U_{X_DVM\ B}}{2}$$

$$U_N = \frac{U_{N_DVM\ A} + U_{N_DVM\ B}}{2}$$

Spannungsverhältnis: $\frac{U_X}{U_N}$

$$\frac{U_X}{U_N} = \frac{|+U_{X_DVM\ A}| + |-U_{X_DVM\ A}| + |+U_{X_DVM\ B}| + |-U_{X_DVM\ B}|}{|+U_{N_DVM\ A}| + |-U_{N_DVM\ A}| + |+U_{N_DVM\ B}| + |-U_{N_DVM\ B}|}$$

Durch Bildung des Spannungsverhältnisses können die Multimeterspezifikationen vernachlässigt werden!

$$R_X = \frac{1}{V} \cdot R_N \cdot \frac{U_X}{U_N}$$

- Unsicherheitsbeiträge des Gleichstromwandlers (V)
- Unsicherheitsbeiträge des Normalwiderstands (R_N)
- Unsicherheitsbeiträge der Multimeter $\left(\frac{U_X}{U_N}\right)$

- Beispiel 1 Ω bei 1 A

Unsicherheitsbeiträge des Gleichstromwandlers (V)

$$V = V_{\text{Konst}} + \delta V_{\text{Spez}} + \delta V_{\text{Kal}}$$

$$\delta V = \sqrt{\delta V_{\text{Spez}}^2 + \delta V_{\text{Kal}}^2} = 1,83 \cdot 10^{-7}$$

$$u(V) = \delta V \cdot C_V = 1,83 \cdot 10^{-7} \cdot 0,1 \Omega = \mathbf{1,83 \cdot 10^{-8} \Omega}$$

- Beispiel 1 Ω bei 1 A

Unsicherheitsbeiträge des Normalwiderstands (R_N)

$$R_N = R_{\text{NKal}} + \delta R_{\text{NKal}} + \delta R_{\text{NDrift}} + \delta R_{\text{NTK}} + \delta R_{\text{NLK}}$$

$$\delta R_N = \sqrt{\delta R_{\text{NKal}}^2 + \delta R_{\text{NDrift}}^2 + \delta R_{\text{NTK}}^2 + \delta R_{\text{NLK}}^2} = 1,39 \cdot 10^{-7} \Omega$$

$$u(R_N) = \delta R_N \cdot C_{R_N} = 1,39 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot 0,1 = \mathbf{1,39 \cdot 10^{-8} \Omega}$$

- Beispiel $1\ \Omega$ bei 1 A

Unsicherheitsbeiträge des Spannungsverhältnisses (U_X/U_N)

- Umpolfehler
- Gerätespezifikationen
- Linearität

ca. $1,2 \cdot 10^{-14}\ \Omega$
bis $5,0 \cdot 10^{-11}\ \Omega$

- Beispiel 1 Ω bei 1 A

Unsicherheitsbeiträge der Spannung (U_X)

$$U_X = \frac{(|+U_{X_DVM A}| + |-U_{X_DVM A}| + |+U_{X_DVM B}| + |-U_{X_DVM B}|)}{4}$$

$$\delta U_X = \sqrt{\delta(+U_{X_DVM A})^2 + \delta(-U_{X_DVM A})^2 + \delta(+U_{X_DVM B})^2 + \delta(-U_{X_DVM B})^2} \cdot 0,25$$

$$u(U_X) = \delta U_X \cdot C_{U_X} = 2,07 \cdot 10^{-7} \text{ V} \cdot 1 \frac{\Omega}{\text{V}} = \mathbf{2,07 \cdot 10^{-7} \Omega}$$

- Beispiel 1 Ω bei 1 A

Unsicherheitsbeiträge der Spannung (U_N)

$$U_N = \frac{(|+U_{N_DVM\ A}| + |-U_{N_DVM\ A}| + |+U_{N_DVM\ B}| + |-U_{N_DVM\ B}|)}{4}$$

$$\delta U_N = \sqrt{\delta(+U_{N_DVM\ A})^2 + \delta(-U_{N_DVM\ A})^2 + \delta(+U_{N_DVM\ B})^2 + \delta(-U_{N_DVM\ B})^2} \cdot 0,25$$

$$u(U_N) = \delta U_N \cdot C_{U_N} = 1,92 \cdot 10^{-7} \text{ V} \cdot 1 \frac{\Omega}{\text{V}} = \mathbf{1,92 \cdot 10^{-7} \Omega}$$

- Beispiel 1 Ω bei 1 A

Standardmessunsicherheit (u)

$$u = \sqrt{u(V)^2 + u(R_N)^2 + u(U_X)^2 + u(U_N)^2} = \mathbf{2,82 \cdot 10^{-7} \Omega}$$

erweiterte Messunsicherheit (U)

$$U = u \cdot k = 2,82 \cdot 10^{-7} \cdot 2 = \mathbf{5,6 \cdot 10^{-7} \Omega}$$

$$U \approx 0,6 \mu\Omega \text{ oder } 0,00006 \%$$

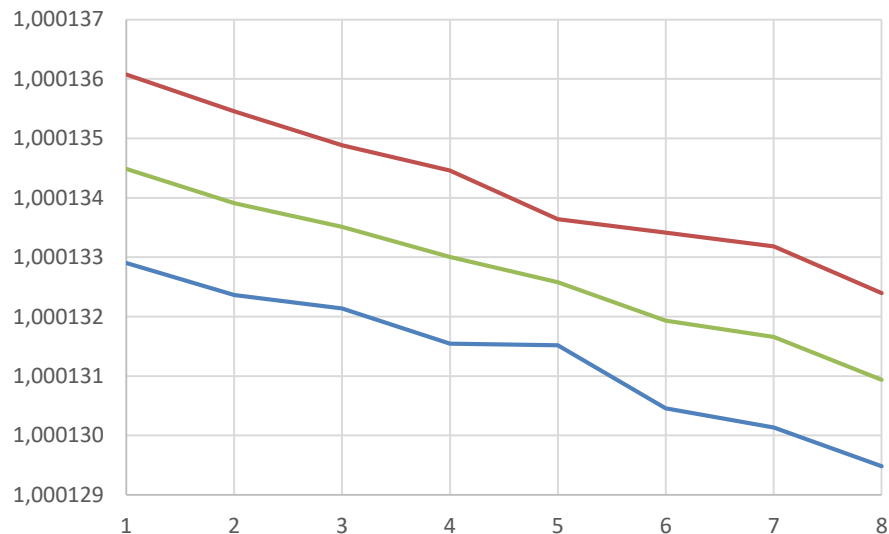
- Beispiel 1 Ω bei 1A

Erw. MU von $U = 5,6 \cdot 10^{-7}$ enthält:

$u(U_x)$	$2,07 \cdot 10^{-7} \Omega$	53,5%
$u(U_N)$	$1,92 \cdot 10^{-7} \Omega$	45,7%
$u(V)$	$1,83 \cdot 10^{-8} \Omega$	0,4%
$u(R_N)$	$1,39 \cdot 10^{-8} \Omega$	0,2%

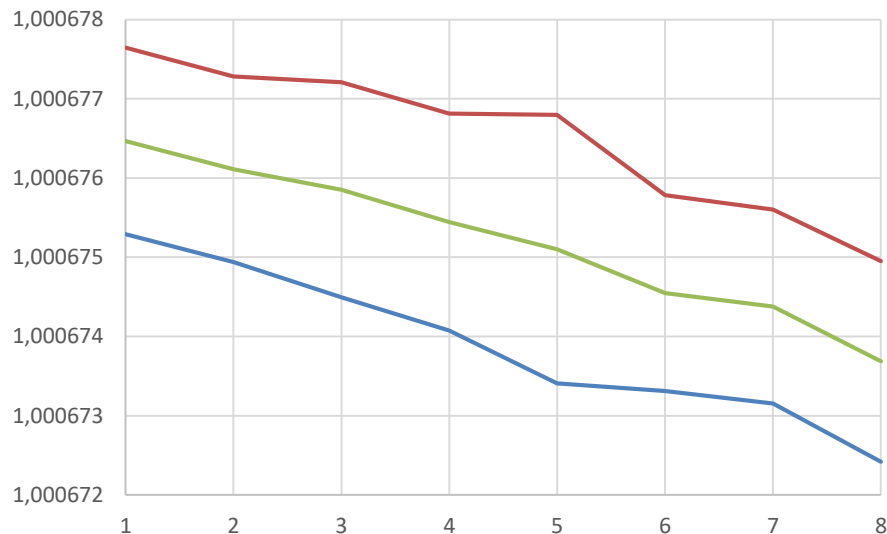
Validierung (Spannungsverläufe)

U_N in V



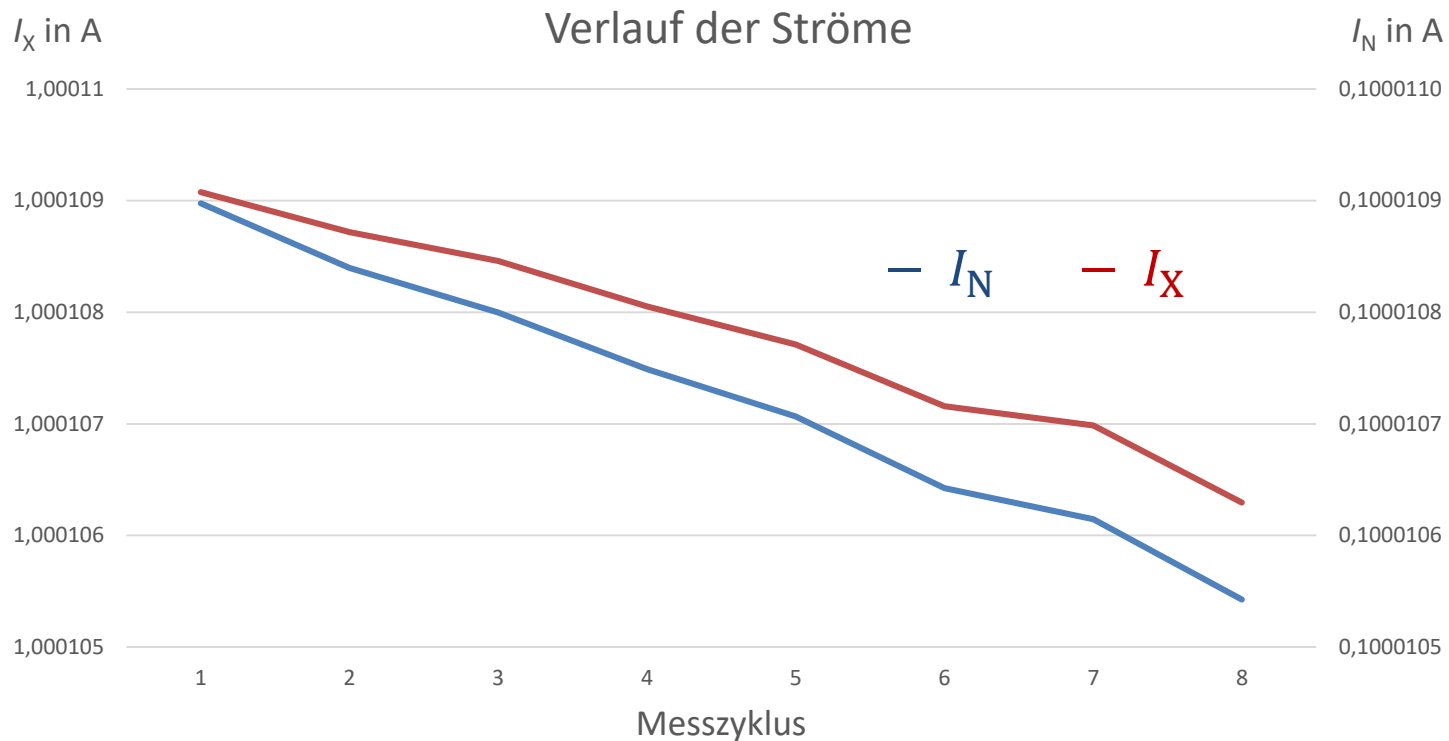
$U_{N_DVM\ A}$ $U_{N_DVM\ B}$ $U_{N_DVM\ AB}$

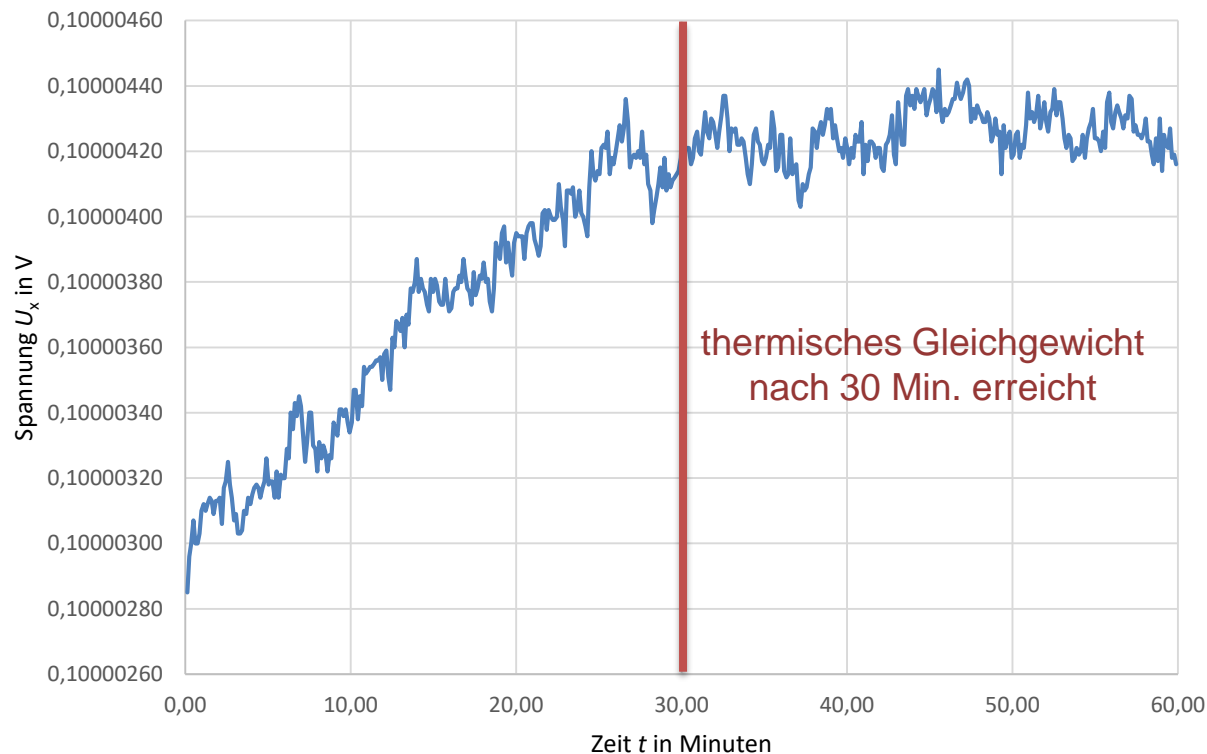
U_X in V



$U_{X_DVM\ A}$ $U_{X_DVM\ B}$ $U_{X_DVM\ AB}$

Validierung (Ströme)





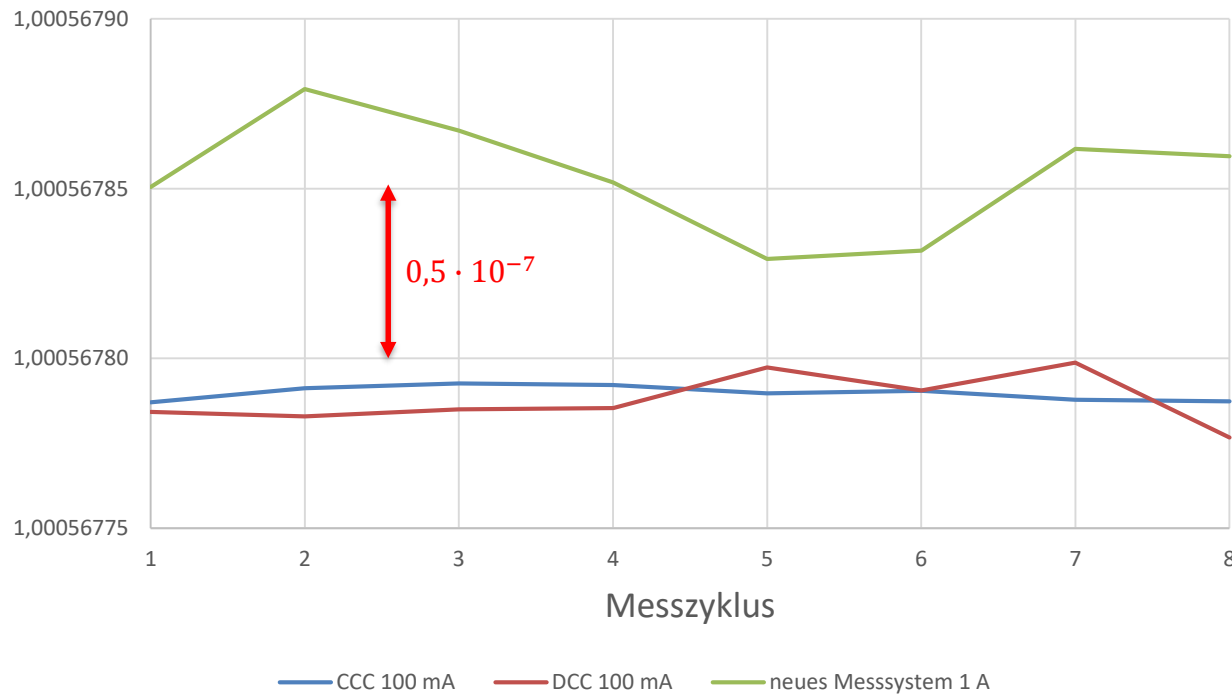
Beispiel:
Wekomm 1 m Ω / 10 A

Einlaufverhalten bei
höheren Strömen?

Zeitkonstante sollte
Bestimmt werden!

Validierung (Messplatz)

Verlauf R_x in Ω



Reproduzierbarkeit
 $\approx 0,5 \cdot 10^{-7}$

Übereinstimmung
 $< 1 \cdot 10^{-7}$

Bei einer erweiterten
Messunsicherheit von
 $\approx 6 \cdot 10^{-7}$



Quelle (<https://www.palverlag.de/erfolg-haben.html>)

- Messverfahren vereinfacht
- Messunsicherheit um Faktor 10 verbessert
(von $7 \cdot 10^{-6}$ auf $6 \cdot 10^{-7}$)
- Automatisiert
- Selbstkalibrierung möglich
- nichtdekadische Widerstandsverhältnisse möglich

Abschnitt 1	Abschnitt 2	Abschnitt 3	Abschnitt 4	Abschnitt 5	Abschnitt 6	Abschnitt 7	Abschnitt 8
$+U_{X_DVM\ A}$	$+U_{X_DVM\ B}$	$-U_{X_DVM\ B}$	$-U_{X_DVM\ A}$	Messequenz um einen Zyklus erweitern			
$+U_{N_DVM\ B}$	$+U_{N_DVM\ A}$	$-U_{N_DVM\ A}$	$-U_{N_DVM\ B}$				

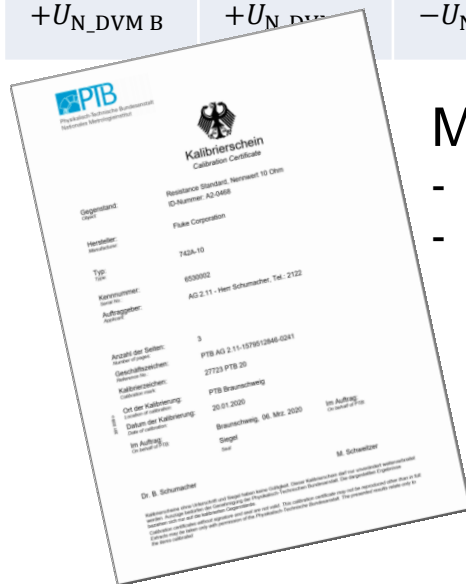
Abschnitt 1	Abschnitt 2	Abschnitt 3	Abschnitt 4	Abschnitt 5	Abschnitt 6	Abschnitt 7	Abschnitt 8
$+U_{X_DVM\ A}$	$+U_{X_DVM\ B}$	$-U_{X_DVM\ B}$	$-U_{X_DVM\ A}$	Messsequenz um einen Zyklus erweitern			
$+U_{N_DVM\ B}$	$+U_{N_DVM\ A}$	$-U_{N_DVM\ A}$	$-U_{N_DVM\ B}$				



Messplatzsoftware anpassen

- Messunsicherheiten beordnen
- Ergebnisbericht / Kalibrierschein

Abschnitt 1	Abschnitt 2	Abschnitt 3	Abschnitt 4	Abschnitt 5	Abschnitt 6	Abschnitt 7	Abschnitt 8
$+U_{X_DVM\ A}$	$+U_{X_DVM\ B}$	$-U_{X_DVM\ B}$	$-U_{X_DVM\ A}$	Messsequenz um einen Zyklus erweitern			
$+U_{N_DVM\ B}$	$+U_{N_DVM\ A}$	$-U_{N_DVM\ A}$	$-U_{N_DVM\ B}$				



Messplatzsoftware anpassen

- Messunsicherheiten beordnen
- Ergebnisbericht / Kalibrierschein

Vergleichsmessungen mit neuem Messsystem



Quelle (<https://www.prisma-informatik.de/erp-blog/2015/11/microsoft-dynamics-nav-und-ax-im-vergleich/>)

Vielen Dank für Ihr Interesse!

Besonderer Dank an AG 2.11

Dr. Bernhard Hermann Schumacher,
Christian Rohrig und Mattias Brennecke



Quelle (<https://www.welt.de/vermishtes/article163847057/Das-sind-die-Fragen-die-Deutschland-wirklich-interessieren.html>)



**Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin**

Bundesallee 100

38116 Braunschweig

Marcel Schweitzer

Telefon: 0531 592 2125

E-Mail: marcel.schweitzer@ptb.de

www.ptb.de

