


DC-Kalibrierung von Nullflusswandlern

Kalibrierung und Konformitätsaussage bei
Stromstärken bis 1000 A

Motivation

- Energiewende ⇔ mehr elektrische Energie
 - E-Mobilität und Ladeinfrastruktur
 - Dezentrale Energie-Erzeugung
- Energiespeicher
- Aus hohen Energie- und Leistungswerten folgen hohe Stromstärken

Motivation

Fahrzeuge	Ladetechnologie	Ladeleistung (kW)	Ladestrom (A)	Netzanschluss der Ladeinfrastruktur
	AC 1-phasig	bis 3,7	bis 16	AC, 1-phasig 230 V, 16 A
	AC 3-phasig	bis 22	bis 32	AC, 3-phasig 400 V 3 x 32 A
	DC	bis 150	bis 200	AC, 3-phasig 400 V 3 x 125 A
Elektrofahrzeuge BEV und PHEV	HPC	bis 350	bis 500	AC, 3-phasig 400 V 3 x 125 A

Quelle: Technischer Leitfaden Ladeinfrastruktur Elektromobilität Version 4, DKE VDE FNN bdew ZVEH ZVEI VDA

Motivation

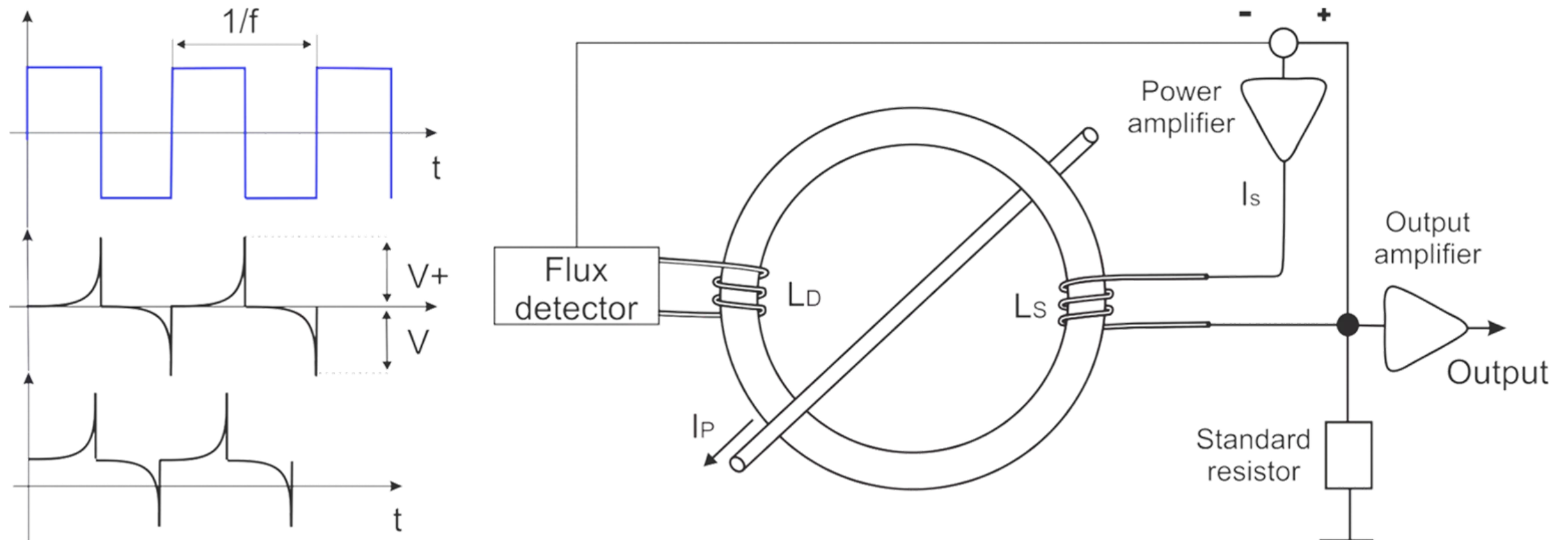
- Energiewende \Leftrightarrow mehr elektrische Energie
 - E-Mobilität und Ladeinfrastruktur
 - Dezentrale Energie-Erzeugung
- Energiespeicher
- Aus hohen Energie- und Leistungswerten folgen hohe Stromstärken
- Stromstärken messen zur Regelung und Abrechnung

„klassische“ Stromzangen



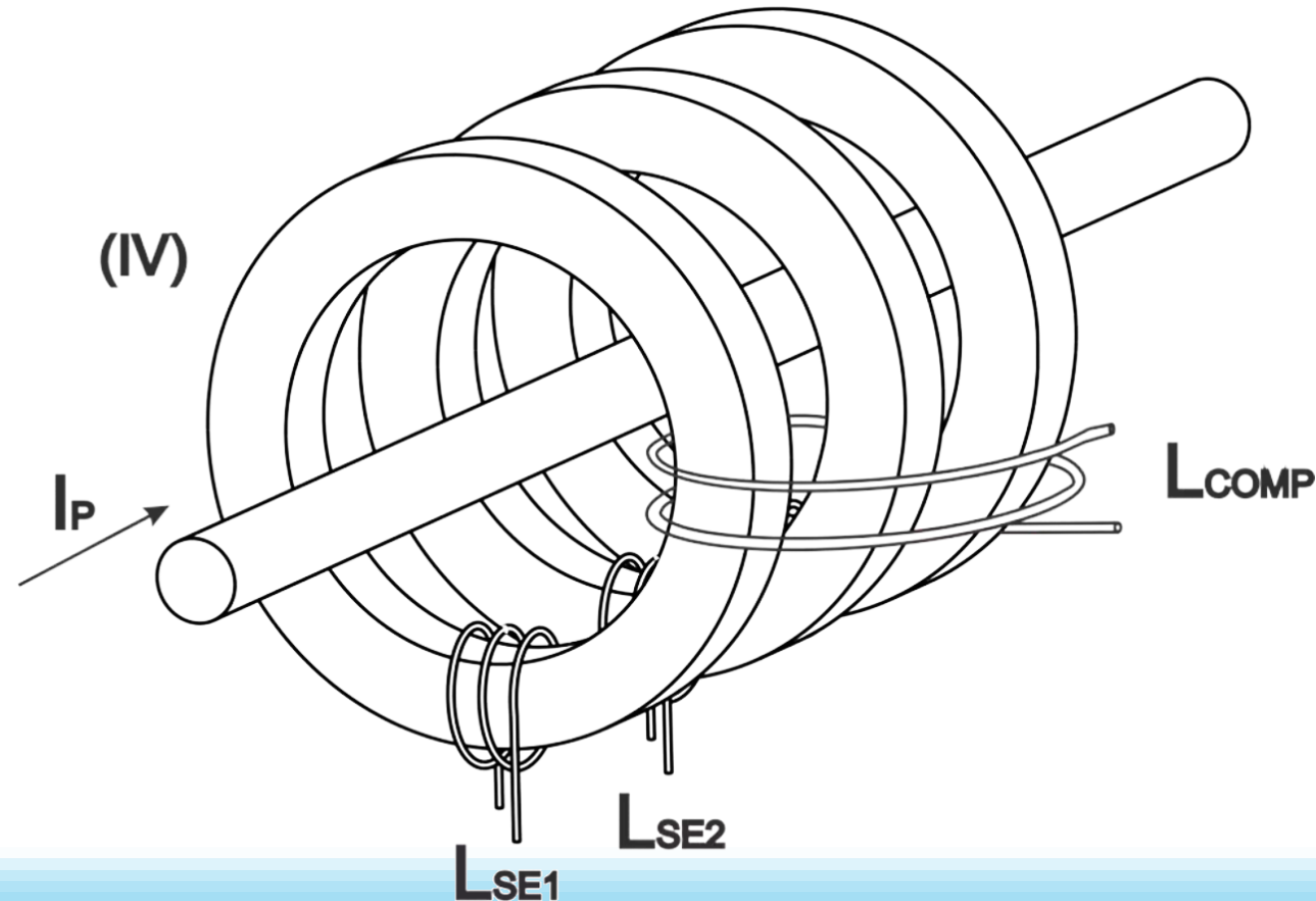
Spezifikationen typ. > 2 %

Nullflusswandler – Prinzip



Quelle: <https://dewesoft.com/de/blog/sirius-xhs-power-leistungsmessung-mit-dc-ct-stromwandler#einleitung>

Nullflusswandler – Prinzip



Quelle: <https://dewesoft.com/de/blog/sirius-xhs-power-leistungsmessung-mit-dc-ct-stromwandler#einleitung>

Modelle

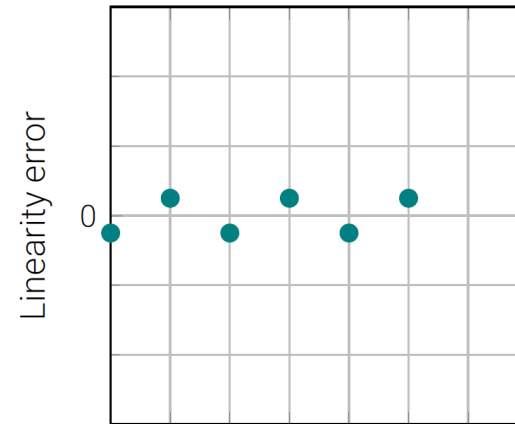
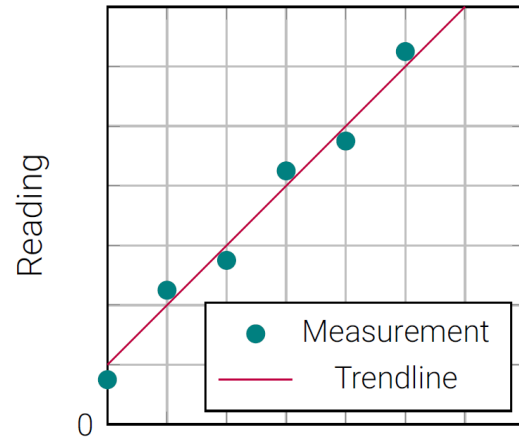
- typ. 60 A bis 2000 A, z. T. auch darüber



Spezifikationen/Eigenschaften

	Signaltec/LEM	Danisense
I_P , Nominalstromstärke	1000 A	1000 A
k_{Wandler}	1500	1500
Linearität	2 ppm	1 ppm
Offset	10 ppm	5 ppm

Spezifikationen/Eigenschaften



$$\epsilon_L = I_{\text{reading}} - I_{\text{fitted}}$$

Parameter	Symbol	Unit	Min	Typ.	Max	Comment
Nominal primary AC current	$I_{PN\ AC}$	Arms			1000	See Fig. 3 & Fig. 4 for details
Nominal primary DC current	$I_{PN\ DC}$	A	-1000		1000	For other values see Fig. 2
Measuring range	\hat{I}_{PM}	A	-1500		1500	See Fig. 2 & Fig. 4 for details
Overload capacity	\hat{I}_{OL}	A			5000	Non-measured 100ms
Short term overrange		Arms			1200	$U_c = \pm 15V$, $R_M = 1\ \Omega$, $T_a = 35^\circ C$
Nominal secondary current	I_{SN}	mA	-666.67		666.67	At nominal primary DC current
Primary / secondary ratio				1500		$I_{\text{primary}}/I_{\text{secondary}}$
Measuring resistance	R_M	Ω	0	1.5		See Fig. 2 and Fig. 3 for details
Linearity error	ϵ_L	ppm	-1	± 0.3	1	ppm refers to $I_{PN\ DC}$
Offset current (including earth field)	I_{OE}	ppm	-5	1	5	ppm refers to $I_{PN\ DC}$

Spezifikationen/Eigenschaften

	Signaltec/LEM	Danisense
I_P , Nominalstromstärke	1000 A	1000 A
k_{Wandler}	1500	1500
Linearität	2 mA	1 mA
Offset	10 mA	5 mA
Gesamt	12 mA	7 mA *

*) Total accuracy: 1 ppm/Reading + 1 ppm/Full scale „ohne Offset“

Vergleich Shunt vs. Wandler

Shunt

- einfaches Design
- „Verhalten by Design“
- potentialgebunden
- evtl. Effekte durch Kontaktierung
- Leistungskoeffizient (Erwärmung)

Nullflusswandler

- komplexe elektr. Schaltung
- begrenzte Vorhersagbarkeit
- potentialfrei
- mögl. Effekte durch Leiterführung
- „keine“ Verlustleistung im Messkreis

Erwärmung des Wandlers



- Kurve bei Nominalstromstärke 1000 A
 - $< 0,4 \mu\text{A}/\text{A}$ nach 10 min
 - $< 0,6 \mu\text{A}/\text{A}$ nach 20 min
- Auch nach Langer Messzeit immer noch $< 10 \mu\text{A}/\text{A}$

Vergleich Shunt vs. Wandler

Shunt

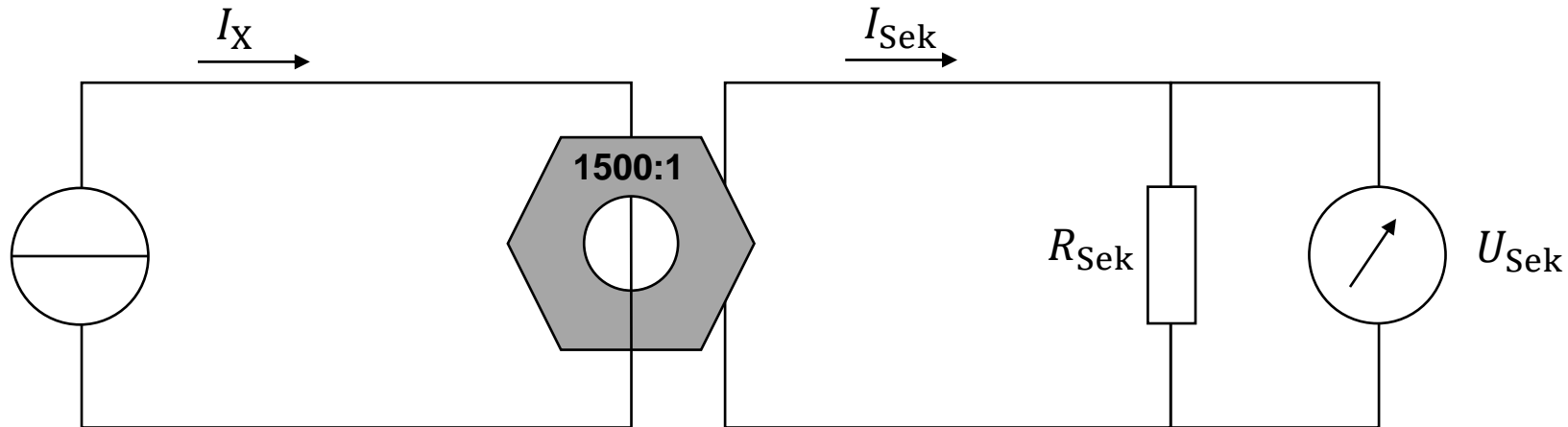
- einfaches Design
- „Verhalten by Design“
- potentialgebunden
- evtl. Effekte durch Kontaktierung
- Leistungskoeffizient (Erwärmung)
- Strom → Spannung

Nullflusswandler

- komplexe elektr. Schaltung
- begrenzte Vorhersagbarkeit
- potentialfrei
- mögl. Effekte durch Leiterführung
- „keine“ Verlustleistung im Messkreis
- Strom → Strom

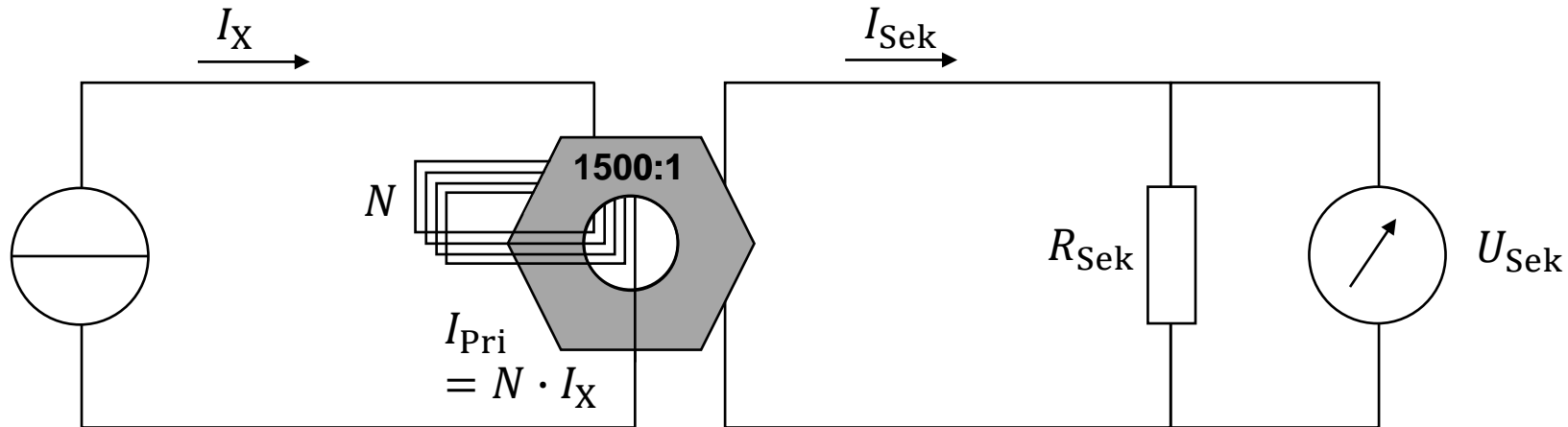
Kalibrierung

- „klassische Zangenkalibrierung“



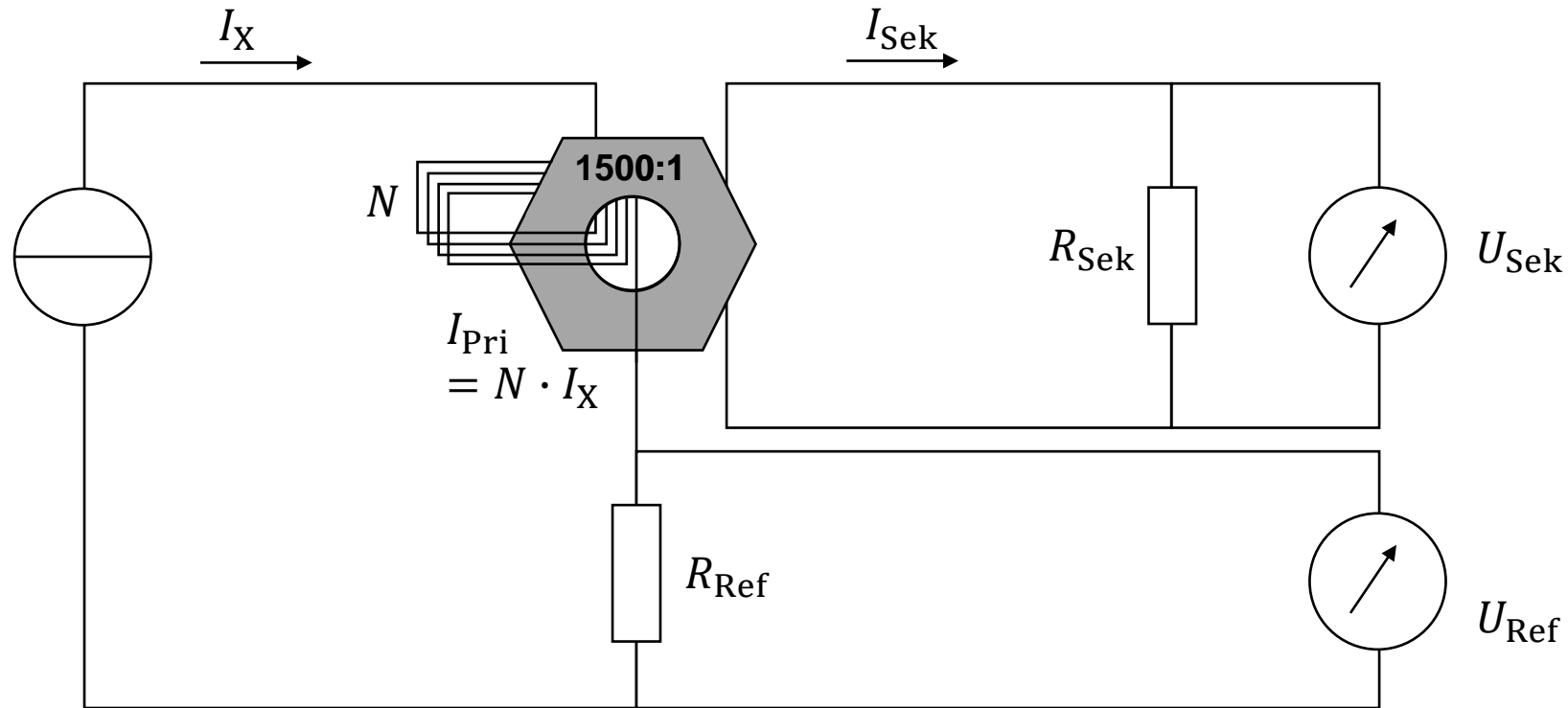
Kalibrierung

- „klassische Zangenkalibrierung“



Kalibrierung

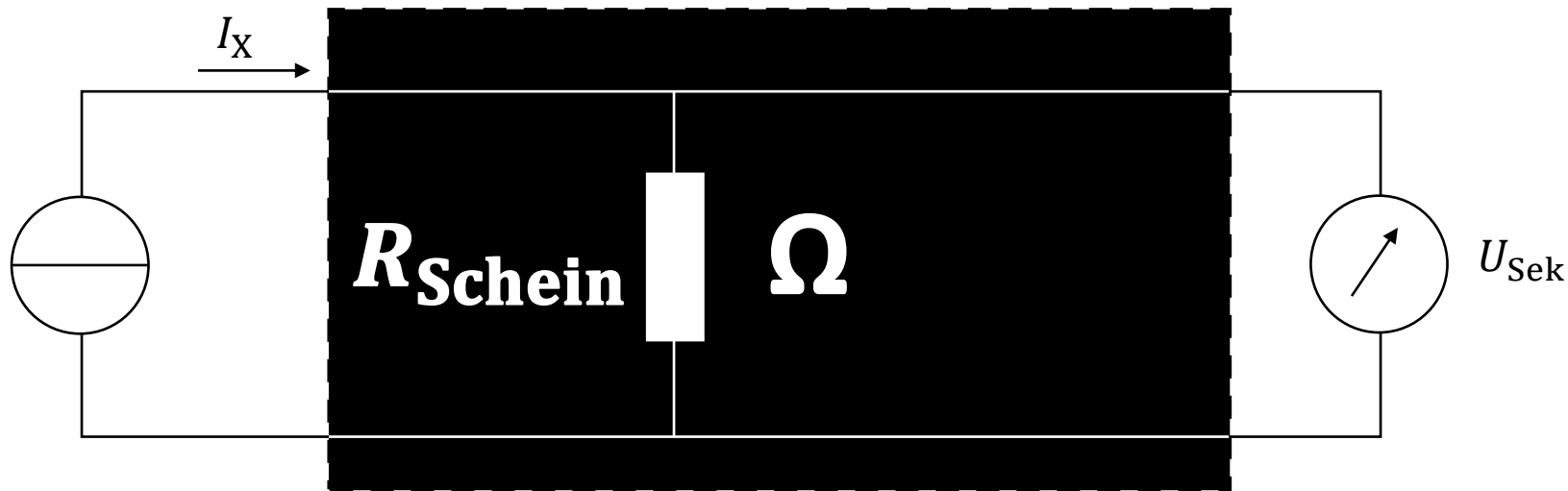
- „klassische Zangenkalibrierung“



„klassische Zangenkalibrierung“

- Akkreditierung: 80 $\mu\text{A/A}$ (bis 3000 A)
 - Verstärker/Kalibrator & Mehrfachwindung:
 - Verstärker/Kalibrator (M151, CH 8100 oder 52120A)
 - Spezifikation $\geq 0,016 \%$
 - Rückwirkungseffekte möglich
 - Gegenmessen
 - Erwärmungseffekte - z.B. A40B-100A (Spezifikation): 105 $\mu\Omega/\Omega$
 - Drift (Spezifikation): 18 $\mu\Omega/\Omega$
 - Netzteil & Einfachwindung
 - Stabilität des verwendeten Netzteils
 - Gegenmessen mit 1000 A Shunt
- Wie Stromstärken von ca. 10 A bis 1000 A mit erforderlicher Messunsicherheit erzeugen?**

Kalibrierung



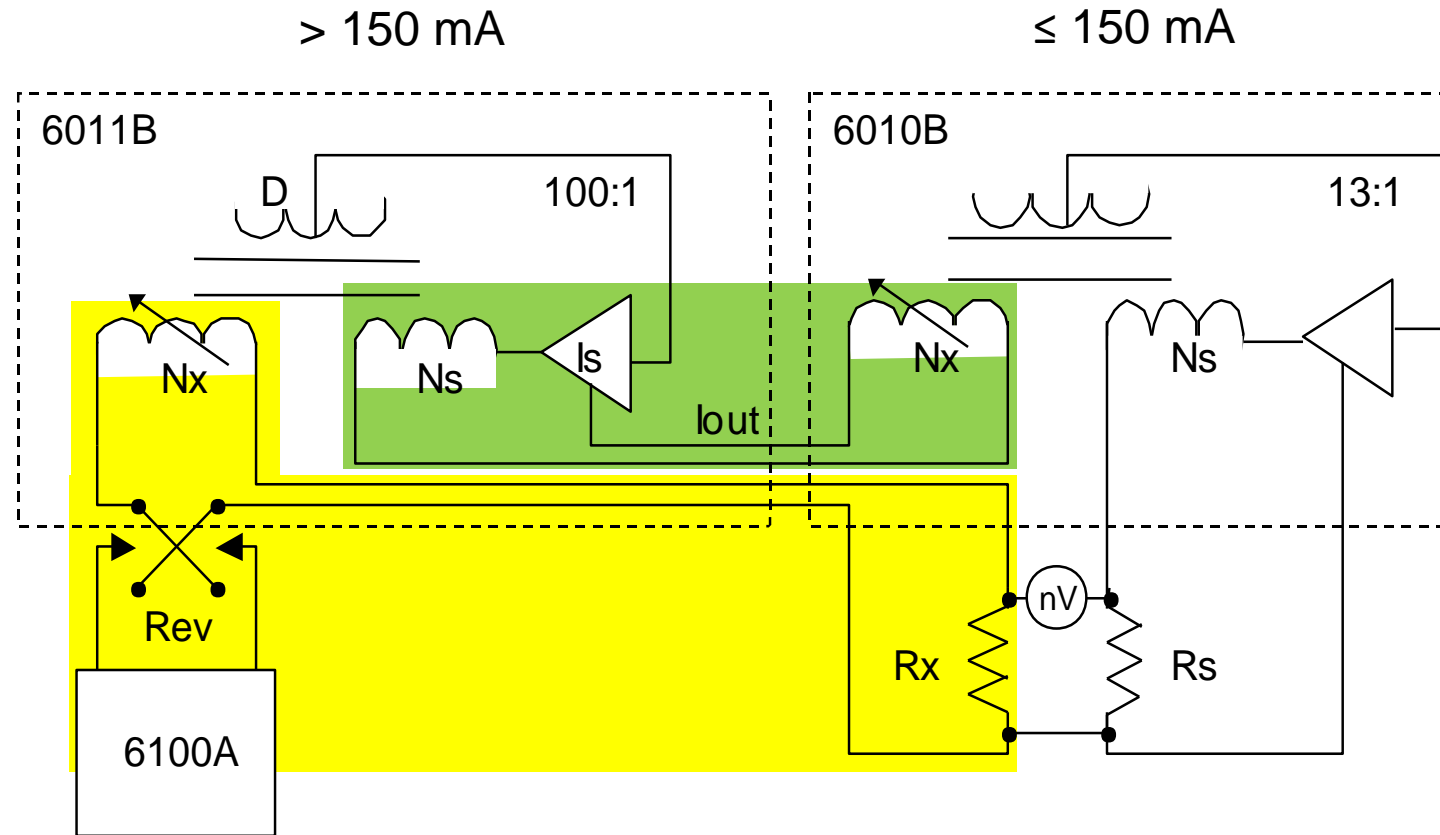
- Strom \rightarrow Spannung
- DCC Widerstandsmesssystem

DCC- Gleichstromkomparator



- Eigenes System bis 100 A
- Bis 3000 A erhältlich
- Autom. Umpolung der Stromrichtung
- ✓ Mehrfachwindung
- ✓ Modifikation für getrennte positiv/negativ Messungen

DCC - Gleichstromkomparator



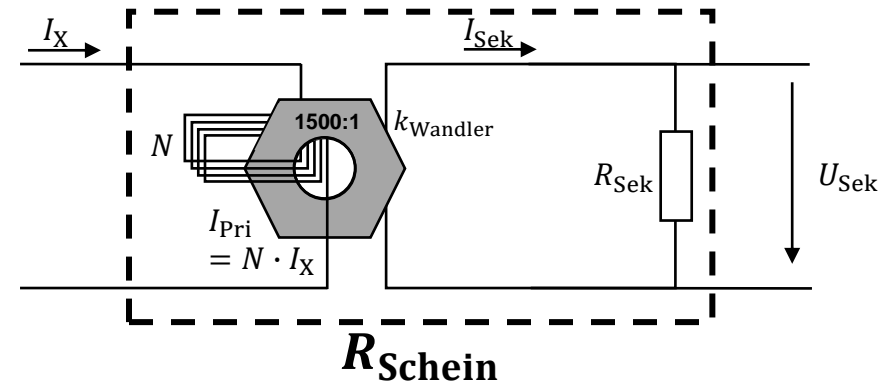
Funktionsgleichung – Kalibrierung mit DCC Komparatorbrücke

$$I_{\text{Sek}} = \frac{I_X \cdot N}{k_{\text{Wandler}}}$$

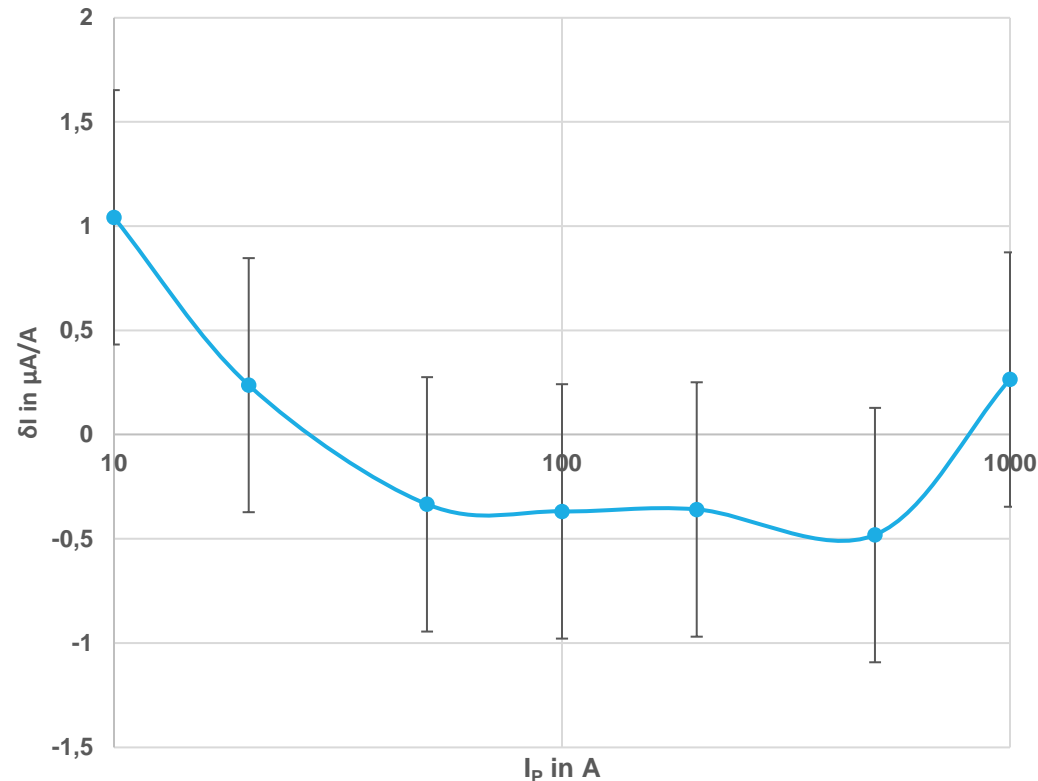
$$U_{\text{Sek}} = \frac{I_X \cdot N}{k_{\text{Wandler}}} \cdot R_{\text{Sek}}$$

$$R_{\text{Schein}} = \frac{\cancel{I_X} \cdot N}{k_{\text{Wandler}}} \cdot R_{\text{Sek}} \cdot \frac{1}{\cancel{I_X}} = \frac{N \cdot R_{\text{Sek}}}{k_{\text{Wandler}}}$$

$$k_{\text{Wandler}} = \frac{N \cdot R_{\text{Sek}}}{R_{\text{Schein}}} = \frac{N \cdot I_X}{I_{\text{Sek}}} = \frac{I_{\text{Pri}}}{I_{\text{Sek}}}$$

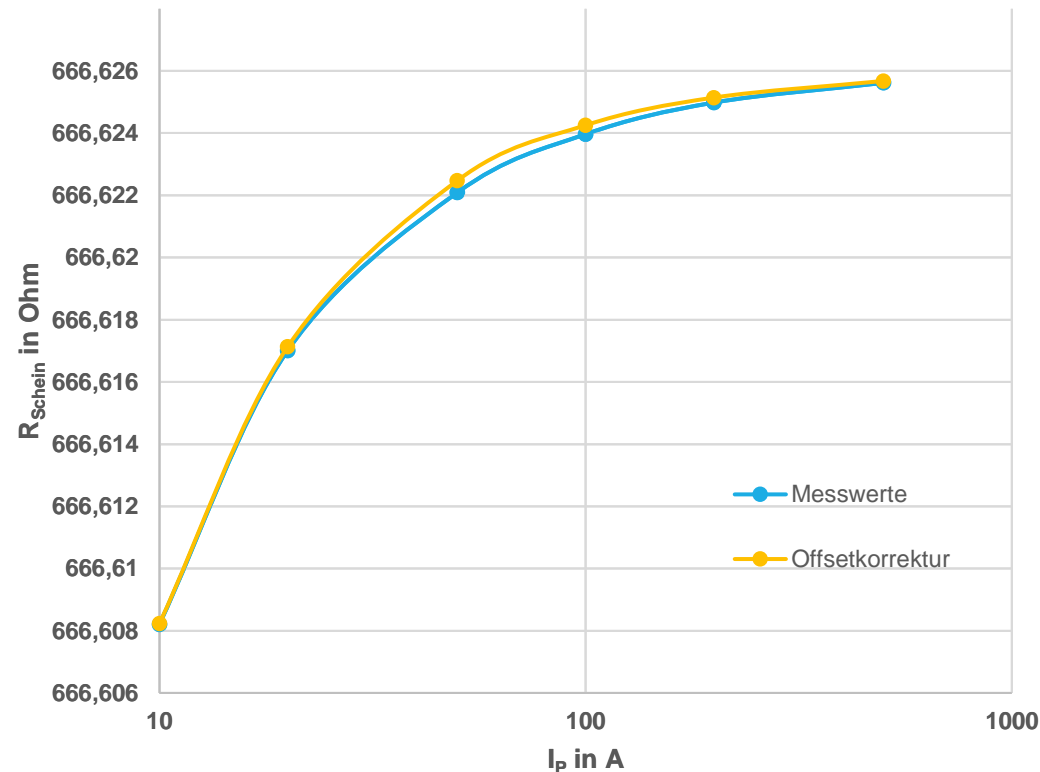


Messwerte Linearität inkl. Umpolung



- Mittelwert aus Messung mit positiver/negativer Stromrichtung
- Linearitätsabweichung $\leq 1 \mu A/A$ (vom Messwert!) von nahezu 10 A bis 1000 A
- Defekte am Messsystem verhindern weitere Messungen

Messwerte Linearität ohne Umpolung



- Messwert positive Stromrichtung
- Kurve sehr gut durch Offsetstrom erklärbar
- Verbleibende Abweichungen $< 1 \mu\Omega/\Omega$
- Defekte am Messsystem verhindern weitere Messungen

Weitere Messungen

- Auswertung beider Stromrichtungen
- Stromstärke $< 10\text{ A}$
- Einfluss der Leiterführung
- Einfluss des Widerstands der Bürde R_{Sek}
- Einfluss der Höhe der Versorgungsspannung
- Einfluss nicht-optimaler Umgebungsbedingungen (insbes. magnetische Felder, parallele Leiter)

Messunsicherheit

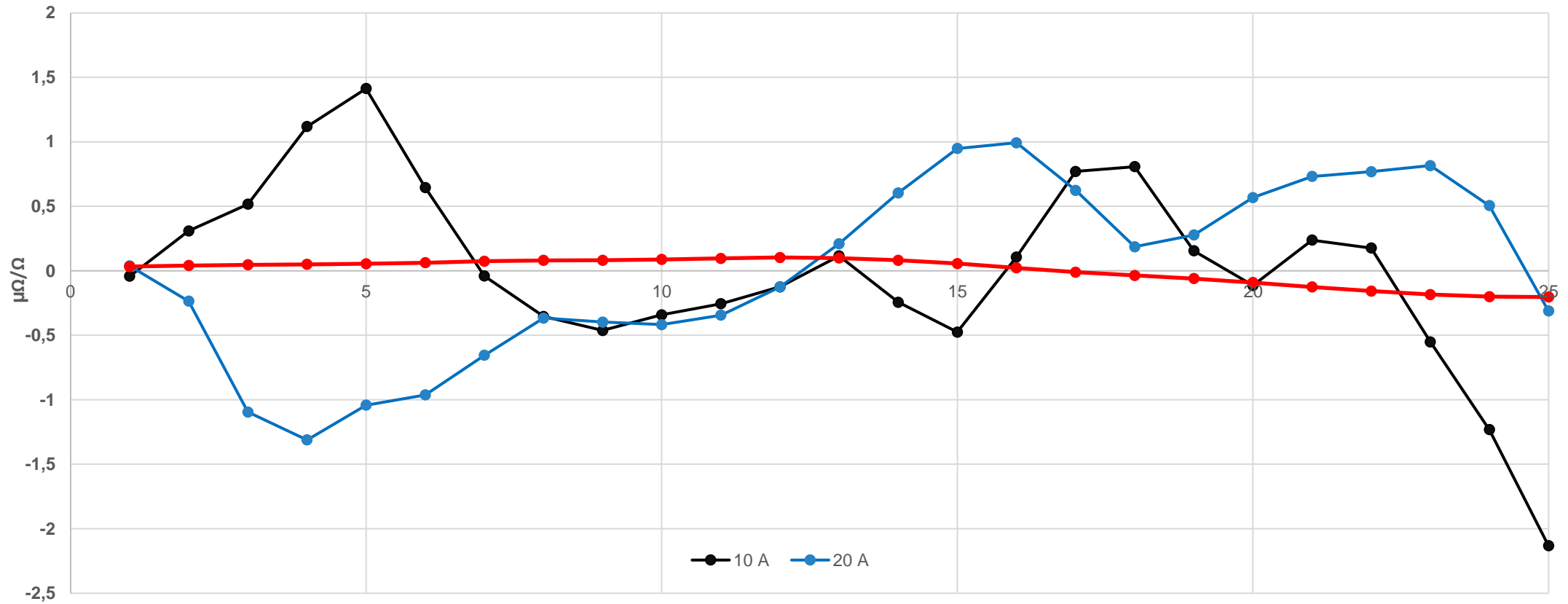
Berechnung in drei Schritten:

1. Kalibrierung „Black Box“ als Widerstand R_{Schein}
2. Kalibrierung des Sekundärwiderstands R_{Sek}
3. Berechnung des Übertragungsverhältnisses k_{Wandler}

Budget „Black Box“

- δR_{Akkred} : Akkreditierung: $50 \frac{\text{n}\Omega}{\Omega}$
- δR_{Schein} : Standardabweichung der Messreihe

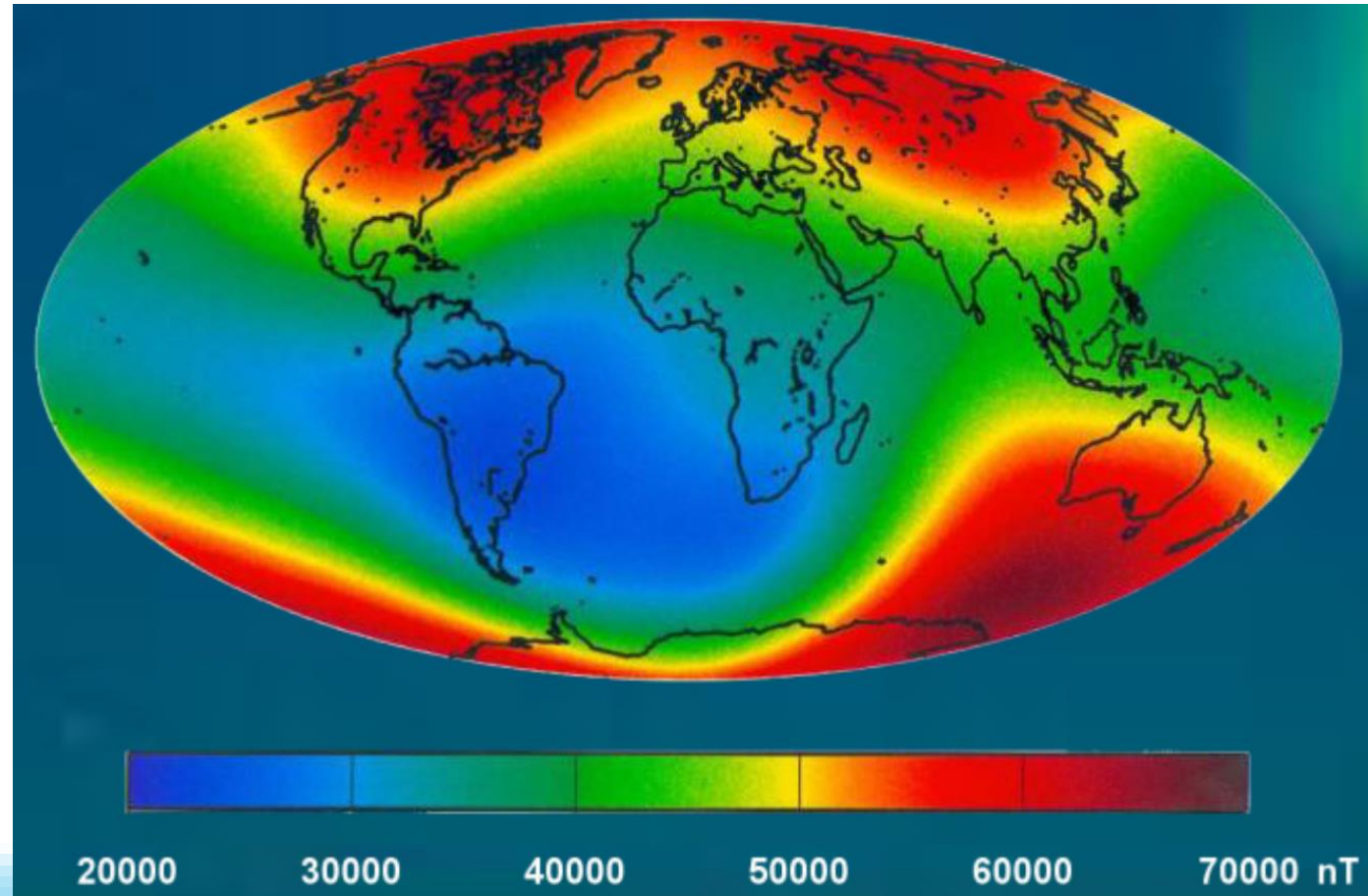
δR_{schein} : Standardabweichung



Budget „Black Box“

- δR_{Akkred} : Akkreditierung: $50 \frac{\text{n}\Omega}{\Omega}$
- δR_{Schein} : Standardabweichung der Messreihe: $150 \frac{\text{n}\Omega}{\Omega}$ bei 10 A
- $\delta R_{\text{Extender}}$: Spezifikation Strom-Teilverhältnis: 0,1 ppm
- δT_{DUT} : Temperatureinfluss Kalibriergegenstand: $0,2 \frac{\text{ppm}}{\text{V}}$
- δB : Einfluss externes Magnetfeld

δB : Magnetfeld der Erde



Quelle: https://ethz.ch/content/dam/ethz/special-interest/dual/focus-terra-dam/documents/ausstellungen/focusterra_esa_swarm_mission.pdf

Budget „Black Box“

- δR_{Akkred} : Akkreditierung: $50 \frac{\text{n}\Omega}{\Omega}$
- δR_{Schein} : Standardabweichung der Messreihe: $150 \frac{\text{n}\Omega}{\Omega}$
- $\delta R_{\text{Extender}}$: Spezifikation Strom-Teilterverhältnis: 0,1 ppm
- δT_{DUT} : Temperatureinfluss Kalibriergegenstand: $0,2 \frac{\text{ppm}}{\text{V}}$
- δB : Einfluss externes Magnetfeld: 100 μT , $c = 4 \frac{\text{ppm}}{\text{mT}}$
- δV_{Supp} : Einfluss Versorgungsspannung: 100 mV, $c = 0,2 \frac{\text{ppm}}{\text{V}}$

Modellgleichung „Black Box“:

$$\Delta R_{\text{Schein}} = R_{\text{Schein}} - \frac{N \cdot R_{\text{Sek}}}{k_{\text{Nominal}}}$$

$$\Delta R_{\text{Schein}} =$$

$$R_{\text{Schein}} + C_{R_{\text{Schein}}} \cdot \delta R_{\text{Schein}} + C_{R_{\text{Akkred}}} \cdot \delta R_{\text{Akkred}} +$$

$$C_{\text{Extender}} \cdot \delta R_{\text{Extender}} + C_{T_{\text{UUT}}} \cdot \delta T_{\text{DUT}} + C_B \cdot \delta B +$$

$$C_{V_{\text{Supp}}} \cdot \delta V_{\text{Supp}} - \frac{N \cdot R_{\text{Sek}}}{k_{\text{Nominal}}}$$

Budget „Black Box“

Größe x_i	Schätzwert x_i	Standard- Messunsicherheit δx_i	Verteilung		Sensitivitäts- koeffizient c_i	Unsicherheits- beitrag $u(x_i)$	%/Budget
R_{schein}	666,6667 $\mu\Omega$	150 n Ω/Ω	Normal	1,00	667 $\mu\Omega$	100 p Ω	24%
k_{Nominal}	1500						
N	10						
R_{Sek}	100 m Ω						
δR_{Akkred}	0						
$\delta R_{\text{Extender}}$	0	57,7 n Ω/Ω	Rechteck	1,73	667 $\mu\Omega$	38,5 p Ω	4%
δT_{DUT}	0	115 n Ω/Ω	Rechteck	1,73	667 $\mu\Omega$	77 p Ω	14%
δB	0	57,7 μT	Rechteck	1,73	2,67 $\mu\Omega/\text{T}$	154 p Ω	57%
δV_{Supp}	0	57,7 mV	Rechteck	1,73	133 p Ω/V	7,7 p Ω	0%
ΔR_{schein}	0 Ω					204 p Ω	100%

$$U = k \cdot u(R_{\text{Schein}}) = 2 \cdot 204 \text{ p}\Omega \approx 410 \text{ p}\Omega \hat{=} 610 \text{ n}\Omega/\Omega$$

Budget $R_{\text{Sek}(0,1\Omega)}$:

- $\delta R_{\text{Sek}(0,1\Omega)}$: Standardabweichung der Messreihe: $100 \frac{\text{n}\Omega}{\Omega}$
 - δR_{Akkred} : Akkreditierung: $50 \frac{\text{n}\Omega}{\Omega}$
 - $\delta R_{\text{Extender}}$: Spezifikation Strom-Teilverhältnis: 0,1 ppm
- Einfluss Extender nicht korreliert (unterschiedliche Messbereiche)
- Einfluss Akkreditierung (Messbrücke MI 6010C) ist korreliert, wird vernachlässigt
- Erwärmungseffekte für $R_{\text{Sek}(0,1\Omega)}$ können vernachlässigt werden – bei beiden Messungen identischer Einfluss

Modellgleichung $R_{\text{Sek}(0,1\Omega)}$:

$$\Delta R_{\text{Sek}(0,1\Omega)} = R_{\text{Sek}(0,1\Omega)} - R_{\text{Nominal}}$$

$$\Delta R_{\text{Sek}(0,1\Omega)} =$$

$$R_{\text{Sek}(0,1\Omega)} + C_{R_{\text{Sek}(0,1\Omega)}} \cdot \delta R_{\text{Sek}(0,1\Omega)} + C_{R_{\text{Akkred}}} \cdot \delta R_{\text{Akkred}} +$$

$$C_{\text{Extender}} \cdot \delta R_{\text{Extender}} - R_{\text{Nominal}}$$

Budget $R_{\text{Sek}(0,1\Omega)}$:

Größe X_i	Schätzwert X_i	Standard- Messunsicherheit δX_i	Verteilung		Sensitivitäts- koeffizient c_i	Unsicherheits- beitrag $u(x_i)$	%/Budget
$R_{\text{Sek}(0,1\Omega)}$	100 mΩ	10 nΩ/Ω	Normal	1,00	100 mΩ	1 nΩ	2%
R_{Nominal}	100 mΩ						
δR_{akkred}	0	25 nΩ/Ω	Normal	2,00	100 mΩ	2,5 nΩ	15%
$\delta R_{\text{Extender}}$	0	57,7 nΩ/Ω	Rechteck	1,73	100 mΩ	5,77 nΩ	82%
$\Delta R_{\text{Sek}(0,1\Omega)}$	100 mΩ					6,37 nΩ	100%

$$U = k \cdot u(R_{\text{Sek}(0,1\Omega)}) = 2 \cdot 6,37 \text{ p}\Omega \approx 13 \text{ n}\Omega \hat{=} 130 \text{ n}\Omega/\Omega$$

Budget k_{wandler} :

- δR_{Schein} : Unsicherheit aus „Black Box“ Kalibrierung
- δP_{os} : Beitrag der Positionsabhängigkeit der Leiterführung
- $\delta R_{\text{Sek}(0,1\Omega)}$: Beitrag aus Kalibrierung $R_{\text{Sek}(0,1\Omega)}$

Modellgleichung k_{Wandler} :

$$k_{\text{Wandler}} = \frac{N \cdot R_{\text{Sek}}}{R_{\text{Schein}}}$$

$$k_{\text{Wandler}} = \frac{N \cdot \left(R_{\text{Sek}(0,1\Omega)} + C_{R_{\text{Sek}(0,1\Omega)}} \cdot \delta R_{\text{Sek}(0,1\Omega)} \right)}{R_{\text{Schein}} + C_{R_{\text{Schein}}} \cdot \delta R_{\text{Schein}}} + C_{\text{Pos}} \cdot \delta P_{\text{os}}$$

Budget k_{Wandler} :

Größe X_i	Schätzwert X_i	Standard- Messunsicherheit δX_i	Verteilung		Sensitivitäts- koeffizient c_i	Unsicherheits- beitrag $u(x_i)$	%/Budget
R_{schein}	666,6667 $\mu\Omega$	102 p Ω	Normal	2,00	$-2,25 \cdot 10^6 \Omega^{-1}$	-229 $\mu\text{A/A}$	76%
I_X	100 A						
I_{Sek}	667 mA						
N	10						
δPos	0	57,7 nA/A	Rechteck	1,73	1500	86,6 $\mu\text{A/A}$	11%
$R_{\text{Sek}(0,1 \Omega)}$	100 m Ω	63,7 n Ω/Ω	Normal	2,00	1500	95,6 $\mu\text{A/A}$	13%
k_{Wandler}	1500					263 $\mu\text{A/A}$	100%

$$U = k \cdot u(k_{\text{Wandler}}) = 2 \cdot 476 \mu\text{A/A} \approx 950 \mu\text{A/A}$$

$$\Rightarrow k_{\text{Wandler}} = \frac{I_{\text{Pri}}}{I_{\text{Sek}}} = (1500 \pm 950 \cdot 10^{-6}) \text{ A/A}$$

Fazit

- Sehr stabile und wiederholbare Messergebnisse erzielbar.
- Messunsicherheiten unterhalb 1 $\mu\text{A/A}$ möglich.
 - Hinreichende Unsicherheit für Konformitätsaussagen bei Spezifikationen von 7 $\mu\text{A/A}$
- Linearität scheint deutlich besser als Spezifikation.
 - (Weitere Messungen notwendig)
- Einzelne Messung von positiver und negativer Stromrichtung durch Modifikation der Brücke möglich.
- Defekte am Messsystem haben Absicherung der Ergebnisse und weitergehende Untersuchungen verhindert.