

Ratiometrische Messeinrichtung für Hochspannungskondensatoren

Dr. Johann Meisner

Physikalisch-Technische Bundesanstalt | Braunschweig und Berlin |

06. Mai 2026

333. PTB-Seminar | Aktuelle Fortschritte von Kalibrierverfahren im Nieder- und Hochfrequenzbereich 2026



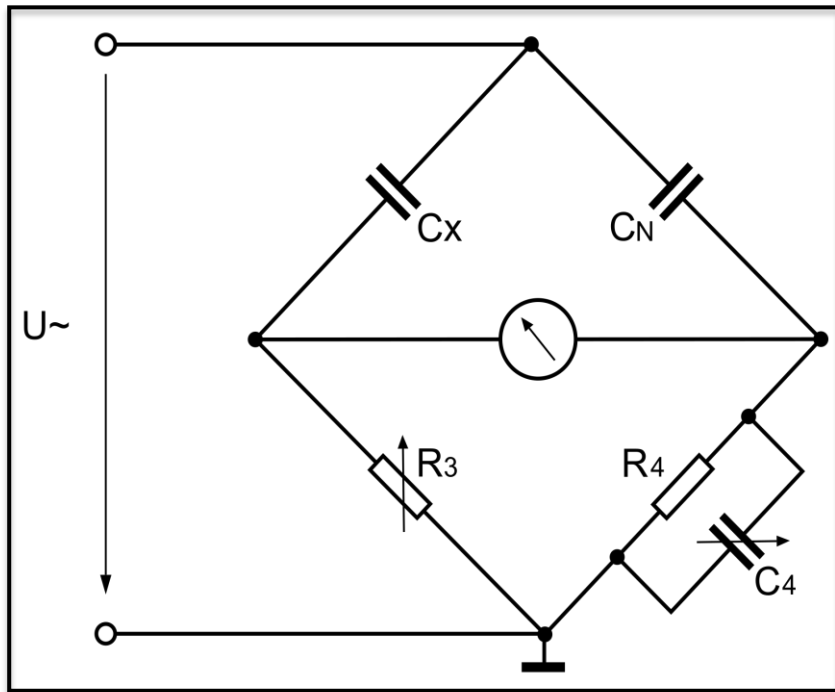
Messwandler und Hochspannungsmesstechnik | Portfolio

■ Kalibrierungen – Prüfungen – Zulassungen

- 16 Messplätze / ca. 220 Dienstleistungen pro Jahr
- mehr als 250 Kunden aus Industrie, PTB, Eichbehörden, staatl. anerck. Prüfstellen, NMIs



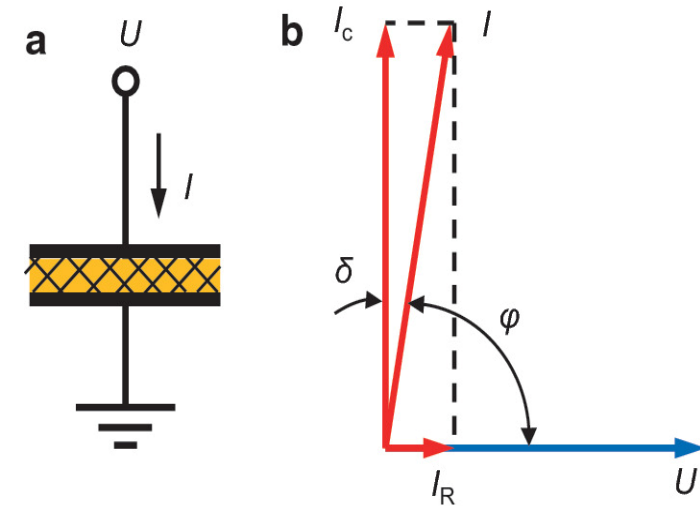
Kapazität und Verlustfaktor bei Hochspannung



Schering Brücke



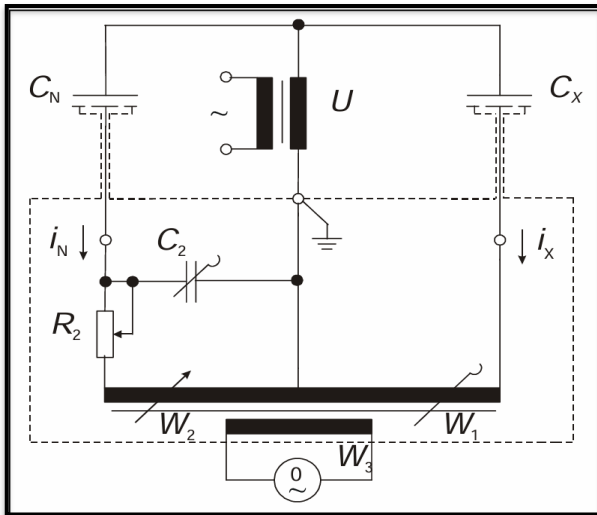
$$\tan \delta = \frac{P_w}{P_b} = \frac{I_R}{I_C} = \frac{U_R}{U_C}$$



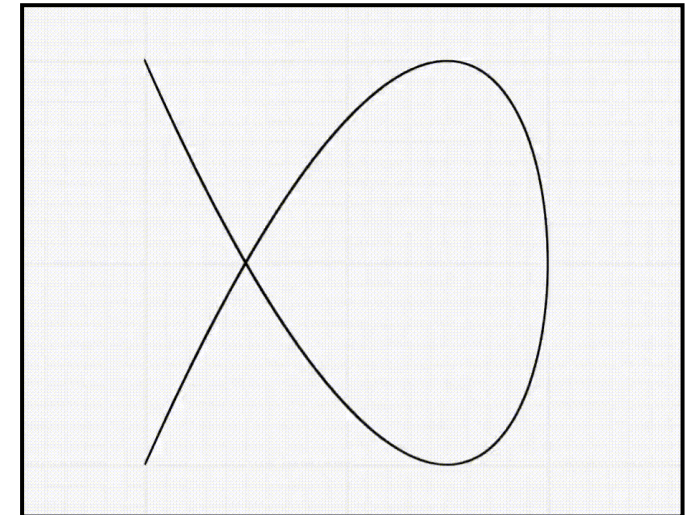
Bisherige Messeinrichtung

■ C-tan δ -Messbrücke mit Stromkomparator

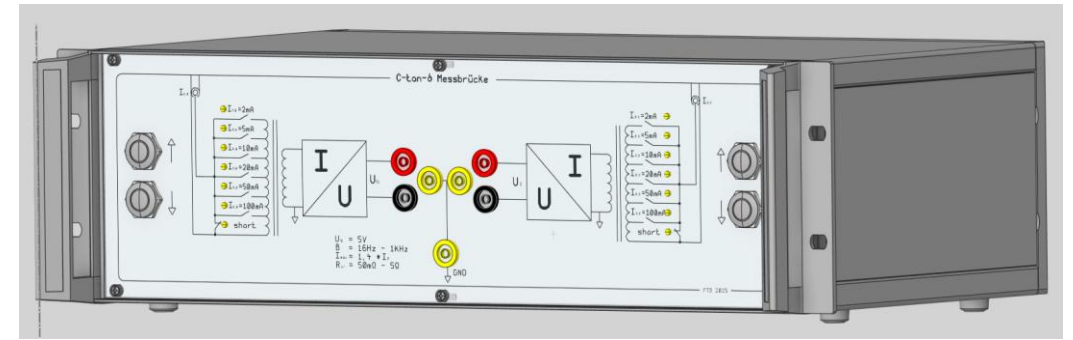
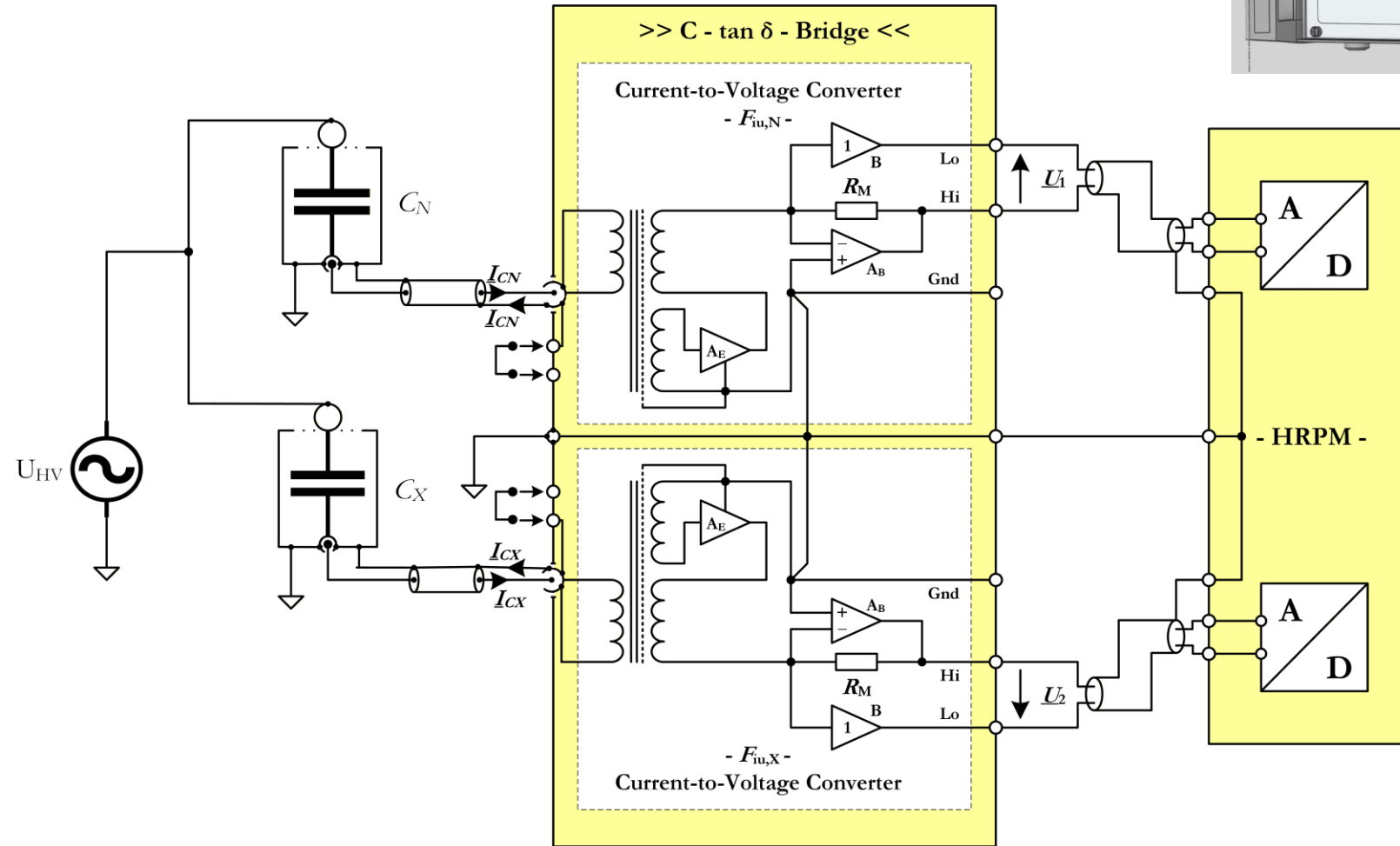
- Der unbekannte Kondensator C_x wird mit einem verlustfreien Referenzkondensator C_N verglichen
- Ringkern mit Wicklungen (W_1, W_2) zur Flusskompensation und W_3 als Nullindikator
- Ströme durch C_x und C_N erzeugen Magnetflüsse im Ringkern
- Abgleich der Wicklungsverhältnisse (W_1/W_2) bis zum Gleichgewicht
- $C_x = C_N \cdot W_1 / W_2$ und $\tan \delta = \omega \cdot R_2 \cdot C_2$



PTB MWB-Brücke

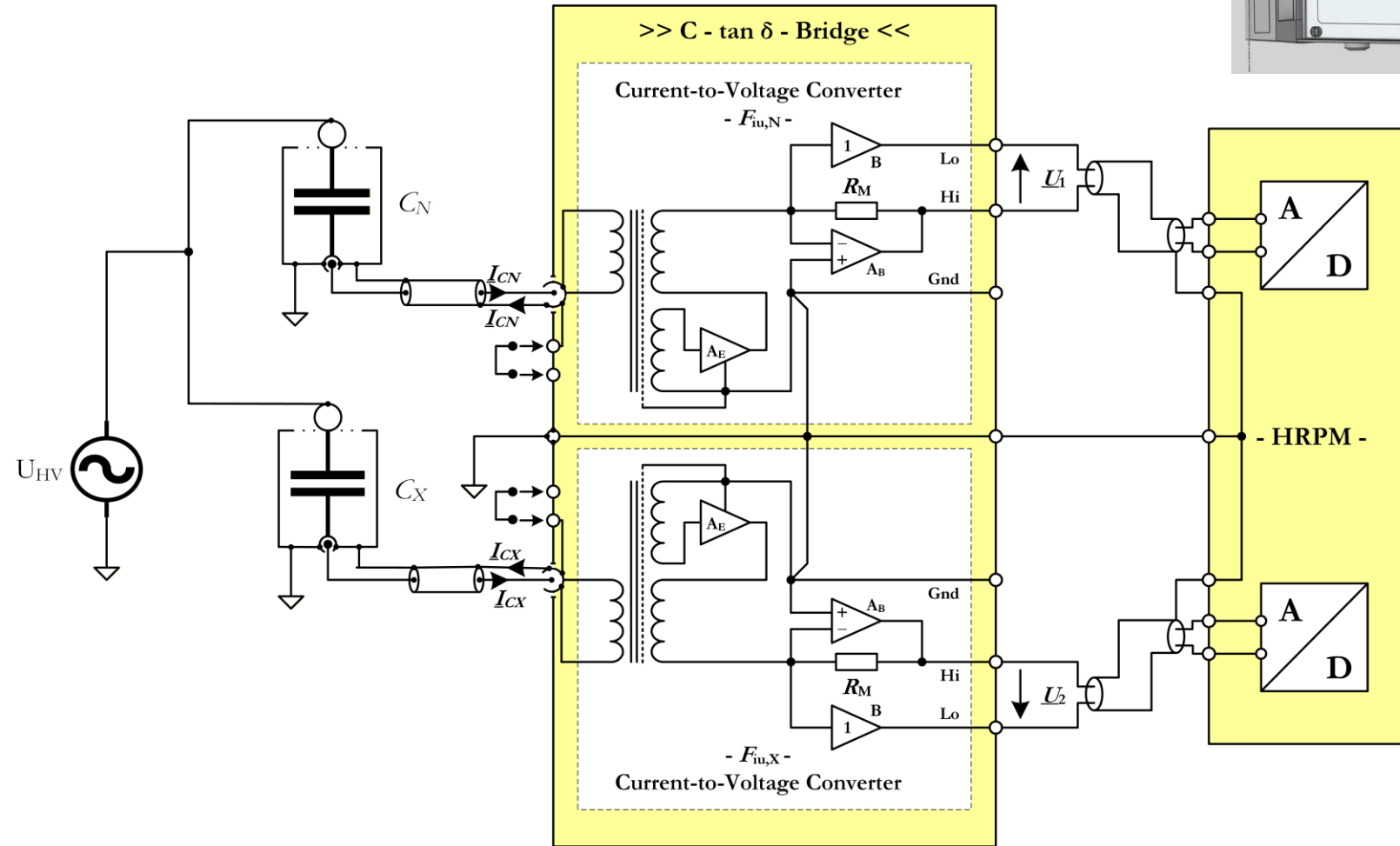
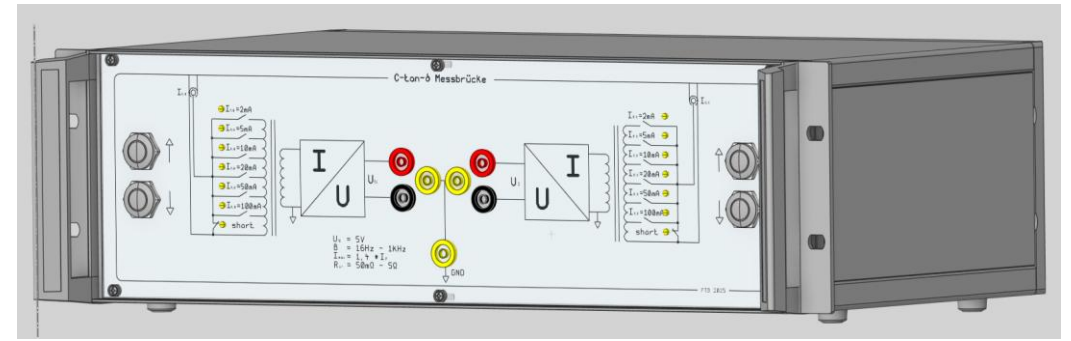


Idee und Planung



- 2-Kanal Messsystem für Sekundärströme von Hochspannungskondensatoren
- Ströme von 2 mA - 100 mA werden mittels Präzisionsstromwandlern und einem i/u-Konverter in Spannungen bis 10 V gewandelt
- Ratiometrisches System (HRPM) als „Messbrücke“
- Automatisierung durch Ansteuer- und Messsoftware
- Angestrebte Messunsicherheit $< 1 \cdot 10^{-5}$

Idee und Planung



$$\underline{I}_X = U_{HV} \cdot \underline{Y}_X = U_{HV} \cdot j \omega C_X \cdot (1 - j \cdot \tan \delta_X)$$

$$\underline{I}_N = U_{HV} \cdot \underline{Y}_N = U_{HV} \cdot j \omega C_N \cdot (1 - j \cdot \tan \delta_N)$$

complex current ratio

$$\frac{\underline{I}_X}{\underline{I}_N} = \frac{C_X}{C_N} \cdot (1 - j \cdot (\tan \delta_X - \tan \delta_N))$$

complex voltage ratio
(of the bridge output)

$$\Gamma_{21} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{\underline{I}_X}{\underline{I}_N} \cdot \left(\frac{F_X}{F_N} \right)$$

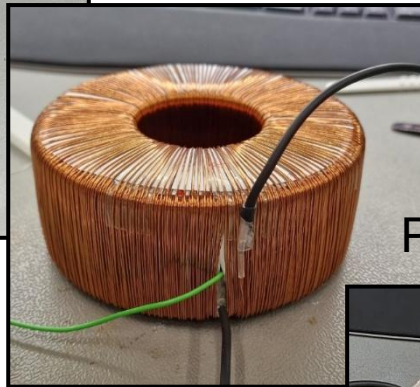
range scale factor(s) of the bridge

Aufbau der neuen C-tan δ -Messbrücke

Detectorwindungen



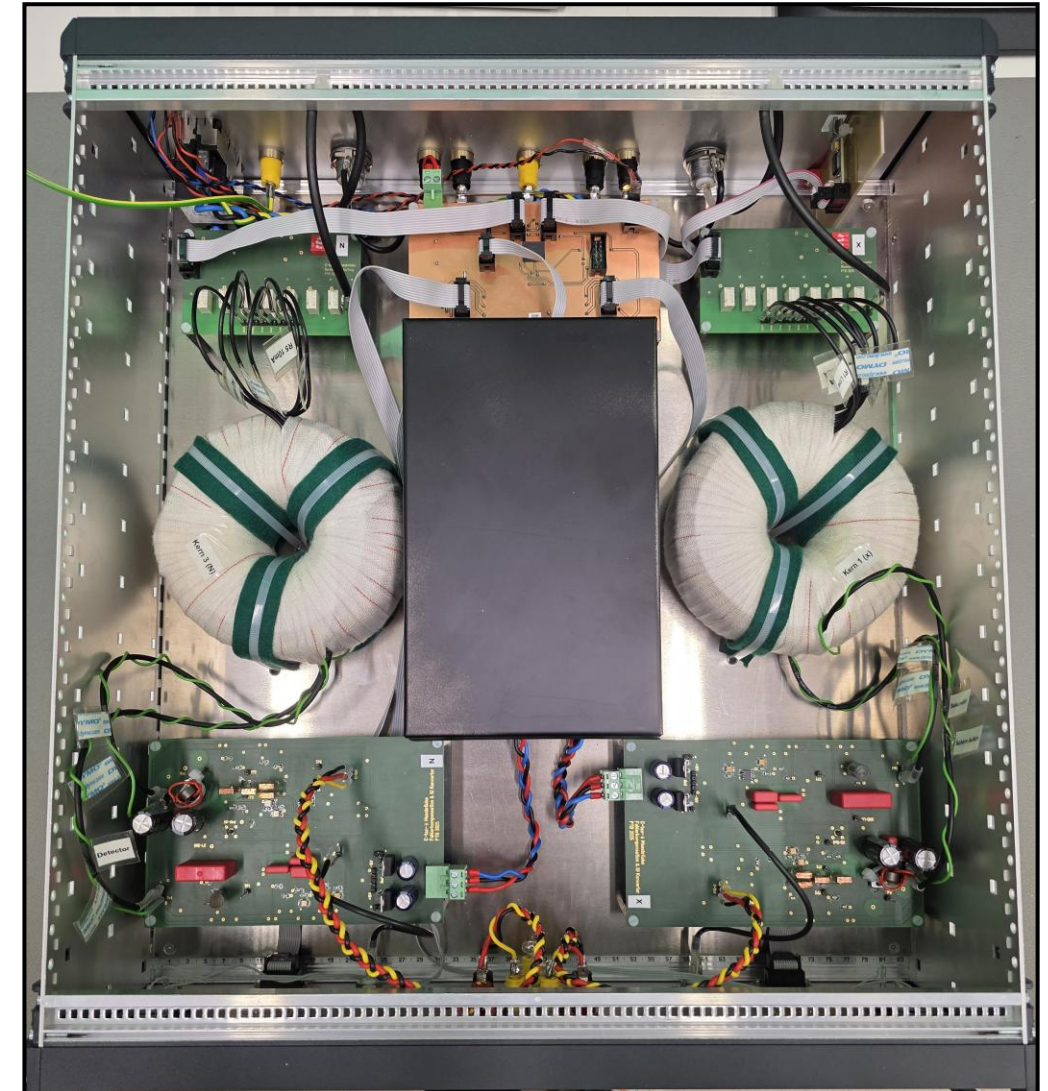
Sekundärwindungen



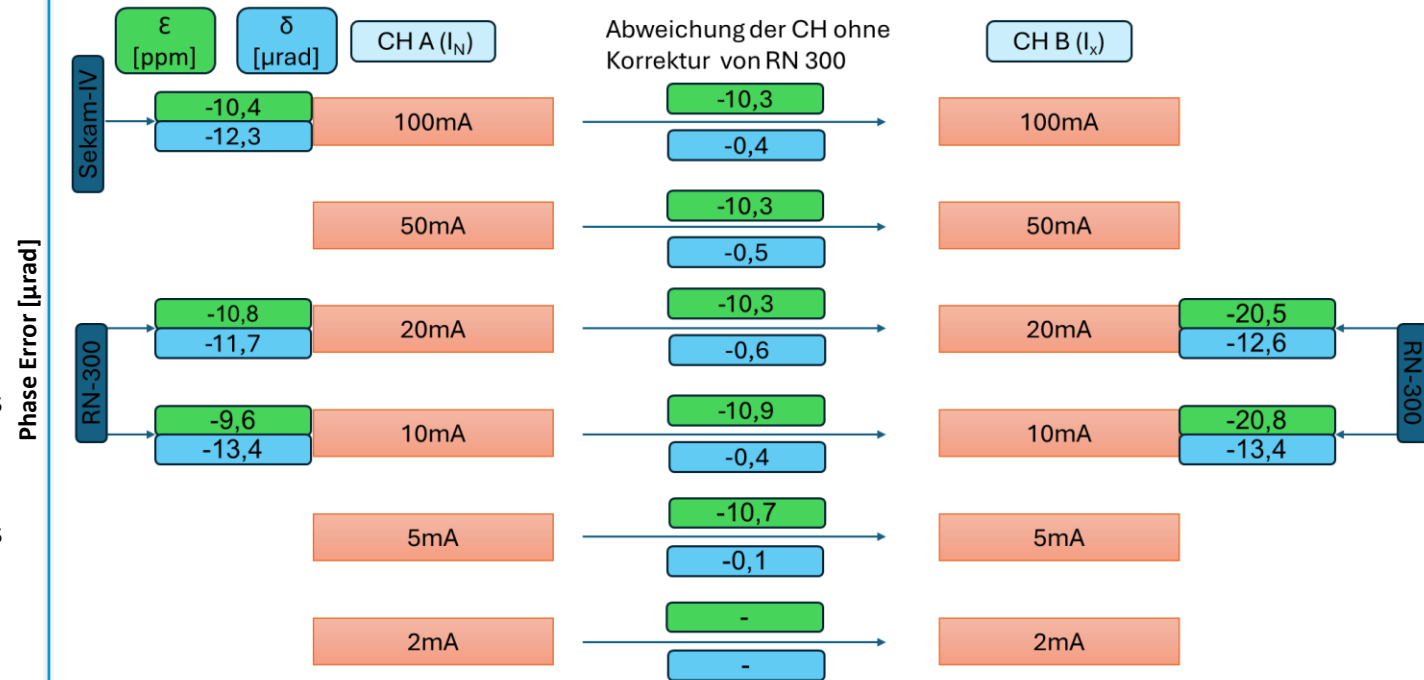
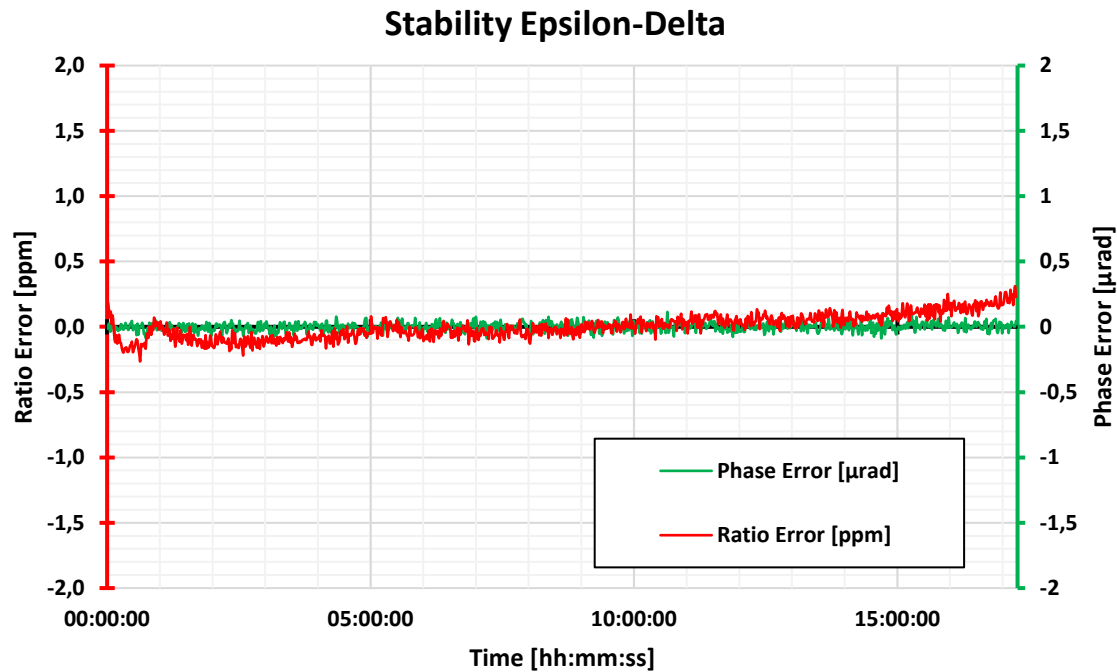
Primärwindungen



I_p in mA	N_p in Wdg.	Neinzel / Wdg	dDraht in mm	Anzahl Wckl. parallel	Reinzel in Ohm	Rges in Ohm	URange in mV
2	400	240	0,6	1	3,168	4,811	9,6
5	160	80	0,45	2	0,939	1,643	8,2
10	80	40	0,45	2	0,469	0,704	7,0
20	40	24	0,45	4	0,141	0,235	4,7
50	16	8	0,45	4	0,047	0,094	4,7
100	8	8	0,45	4	0,047	0,047	4,7



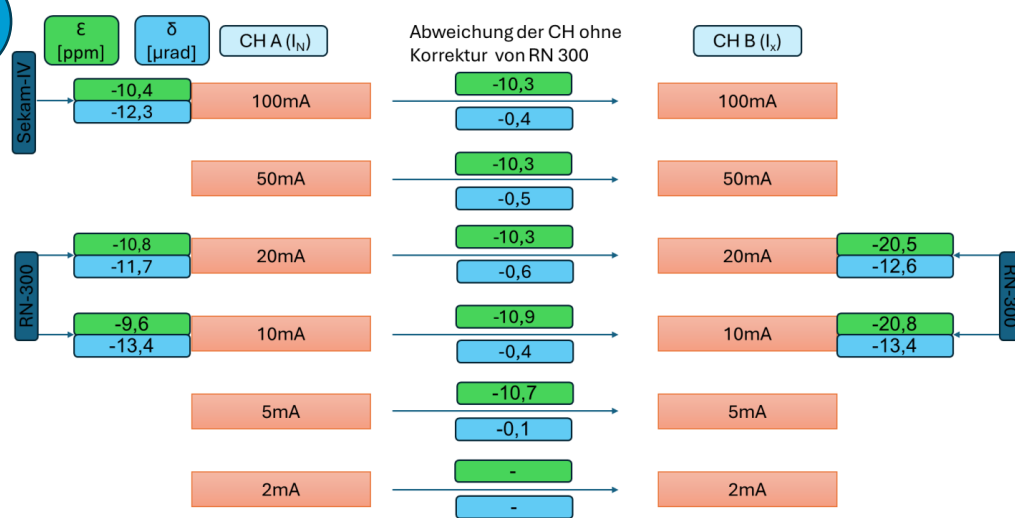
Messergebnisse der neuen C-tan δ -Messbrücke



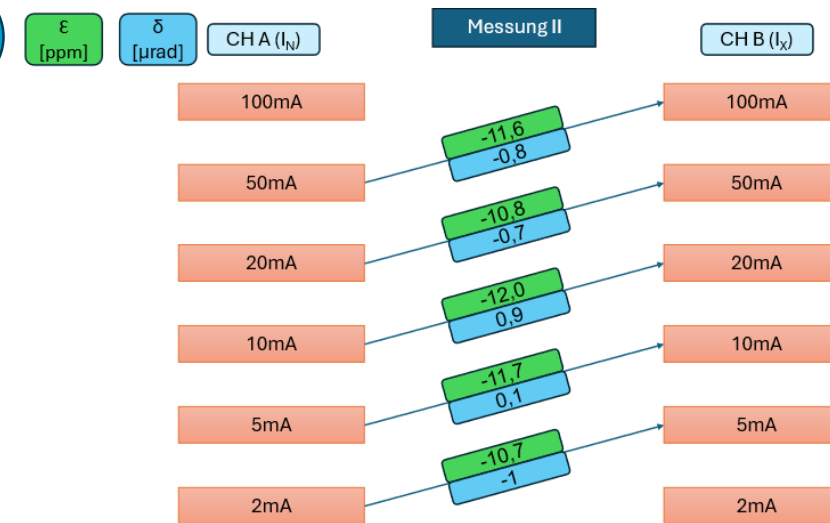
Linearity within $\pm 0,3$ ppm and $\pm 0,1$ μrad

Messergebnisse der neuen C-tan δ -Messbrücke

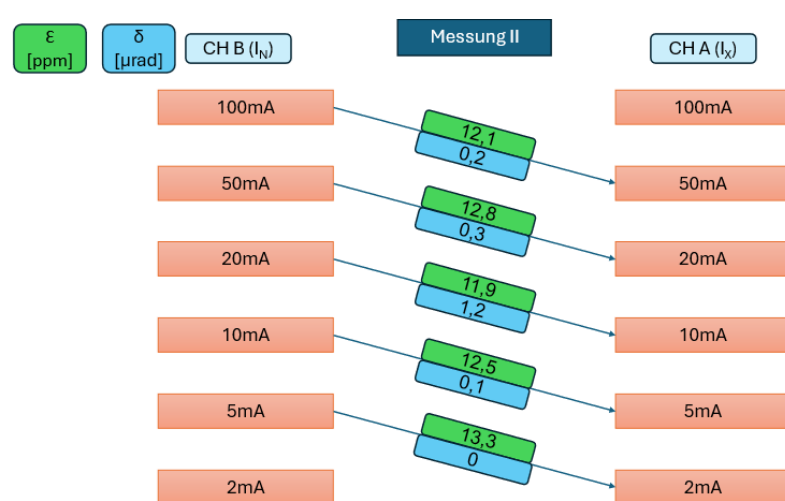
1



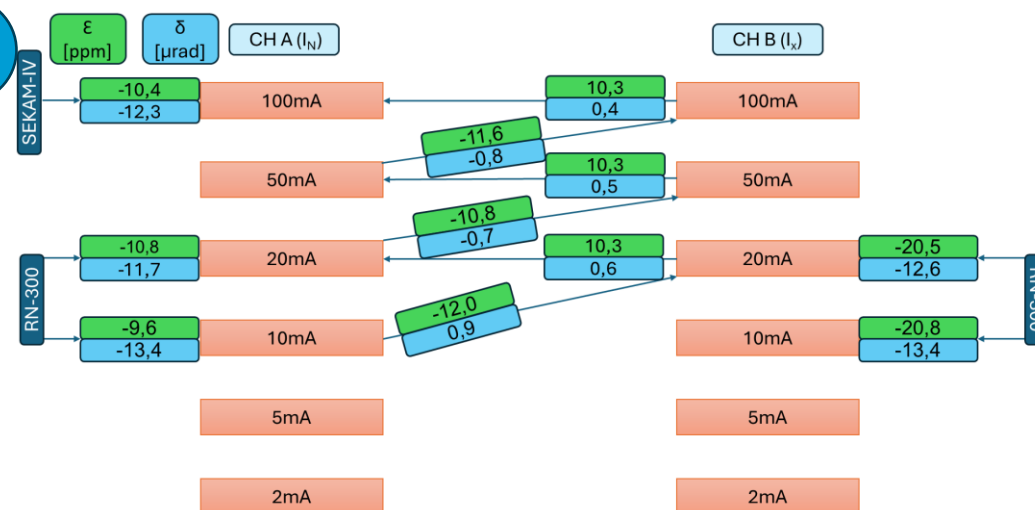
2



3

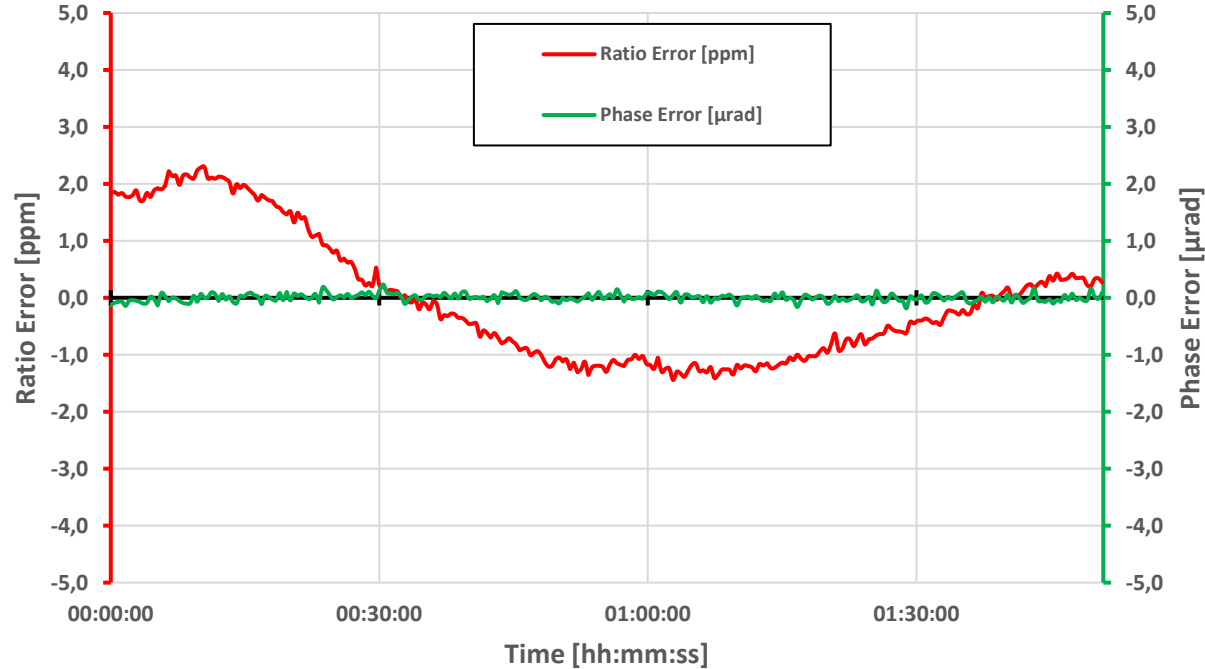


4

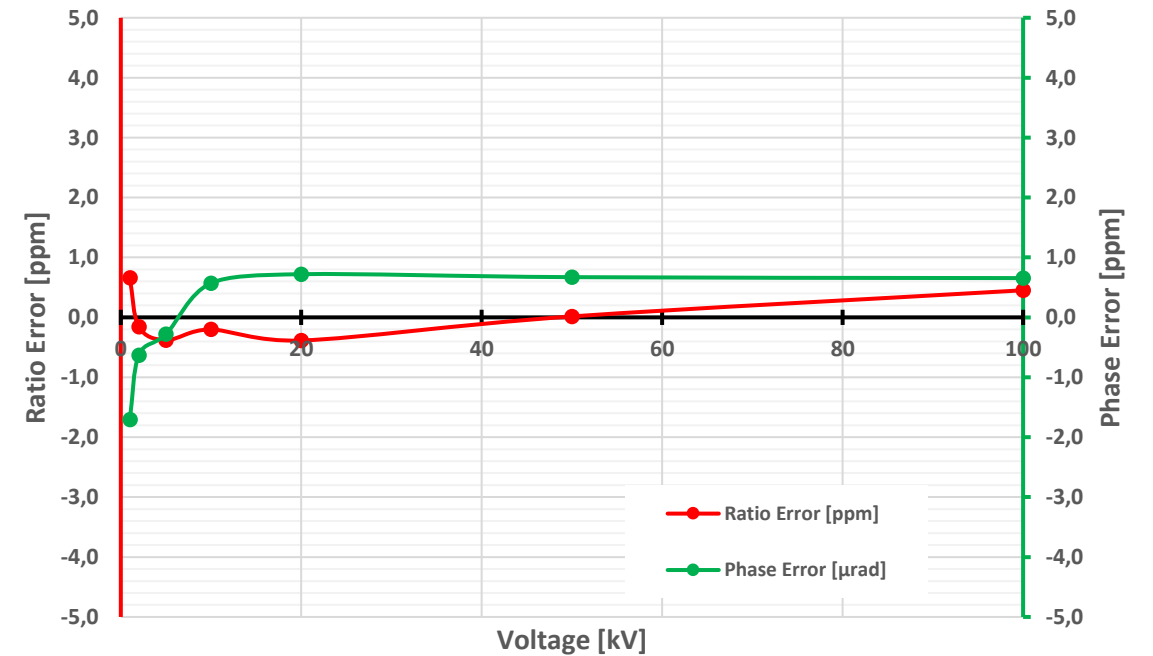


Messergebnisse bei Hochspannung

Stability 100 kV (52 Hz)

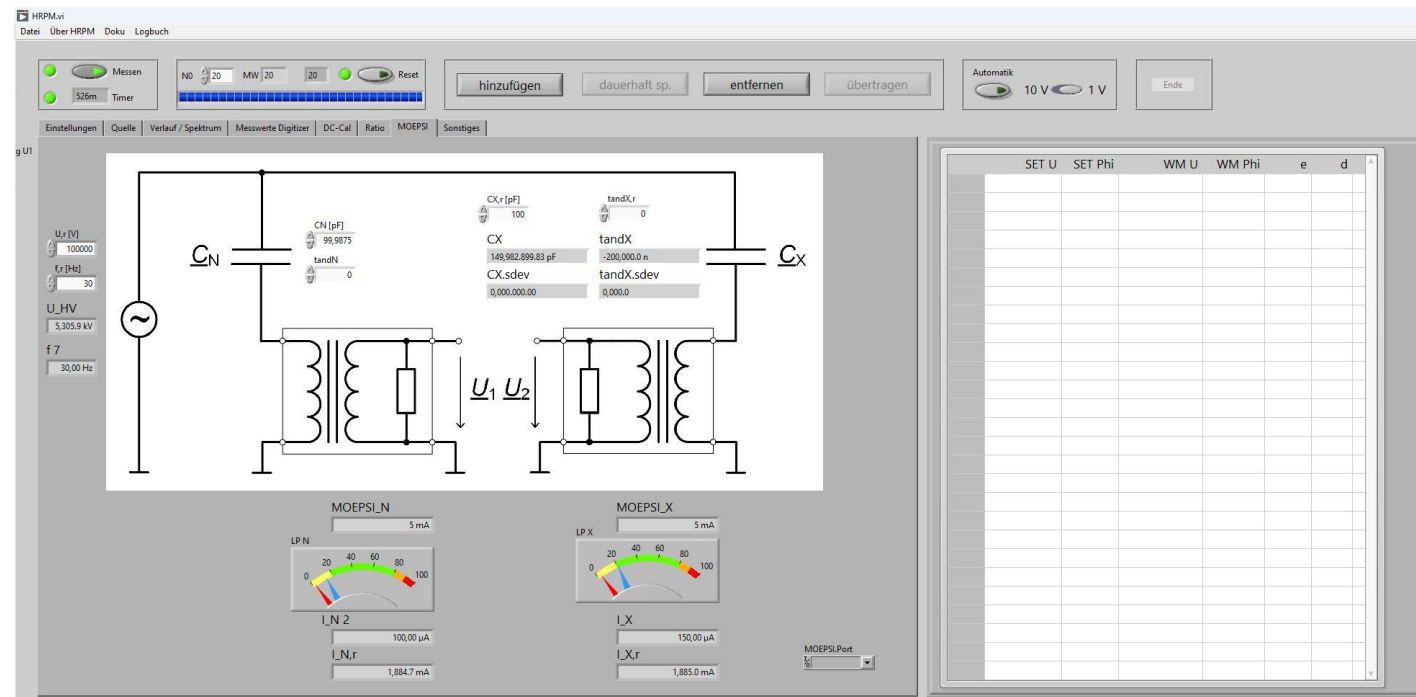
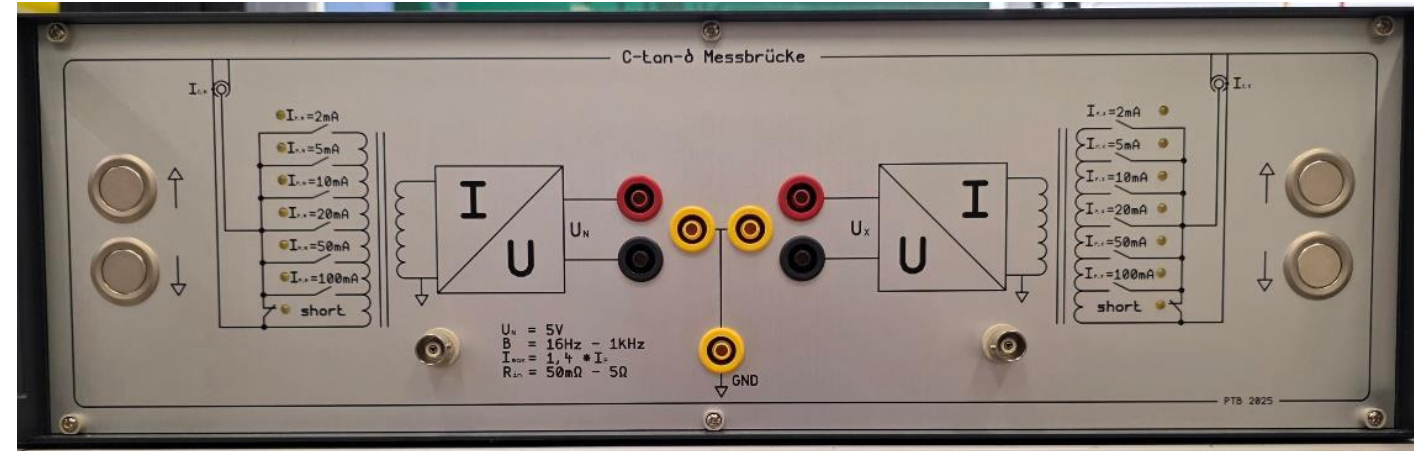


Linearity 1 kV - 100 kV



Fazit

- Es wurde eine neue zweikanalige, ratio basierte Messbrücke für Hochspannungskondensatoren entwickelt
- Strombereiche von (2 mA - 100 mA) / 5 V ermöglichen den Anschluss von typischen HV-Kondensatoren von 50pF bis zu einigen nF im interessanten Spannungsbereich (1 kV bis 800 kV)
- die Genauigkeit der Brücke inkl. Abtastsystem liegt in der Größenordnung von 2... 5 ppm (oder μrad)
- Automatisierung und LabView-Software
- Wird bei der CPEM 2026 veröffentlicht



Wie sieht die Zukunft aus? | Leuchtturm Elektrizitätsnetze

- Ausbau der Hochspannungsmesstechnik für Wechsel-, Gleich- und Impulsspannungen sowie Impulsströme bis 2030
- Mobile Kalibrierdienstleistungen etablieren
 - Wechsel-, Gleich- und Impulsspannungen für
 - ▶ Prüfinstitute
 - ▶ Hersteller
 - ▶ Netzbetreiber





Genauigkeit

Objektivität

Leidenschaft

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Das nationale Metrologieinstitut

Dr. Johann Meisner

