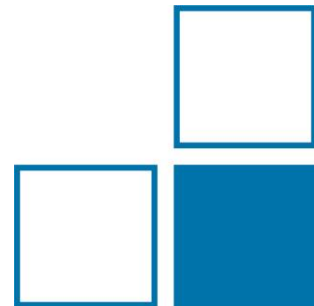


Rückführung von HVDC bis 1600 kV

Johann Meisner, Stephan Passon

AG 2.31 Messwandler und Hochspannungsmesstechnik



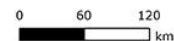
- Einführung
- Methode der Rückführung
- Modernisierung der Hochspannung

Was ist HVDC?



BBP/IG, Vorhaben 3
 Letzte Änderung: 31.03.2022
 — Trassenkorridor (im/vor dem Planfeststellungsverfahren)
 — bestehendes Übertragungsnetz

Herausgeber: Bundesnetzagentur
 Quellennachweis:
 © GeoBasis-DE / BKG 2021
 © Übertragungsnetzbetreiber



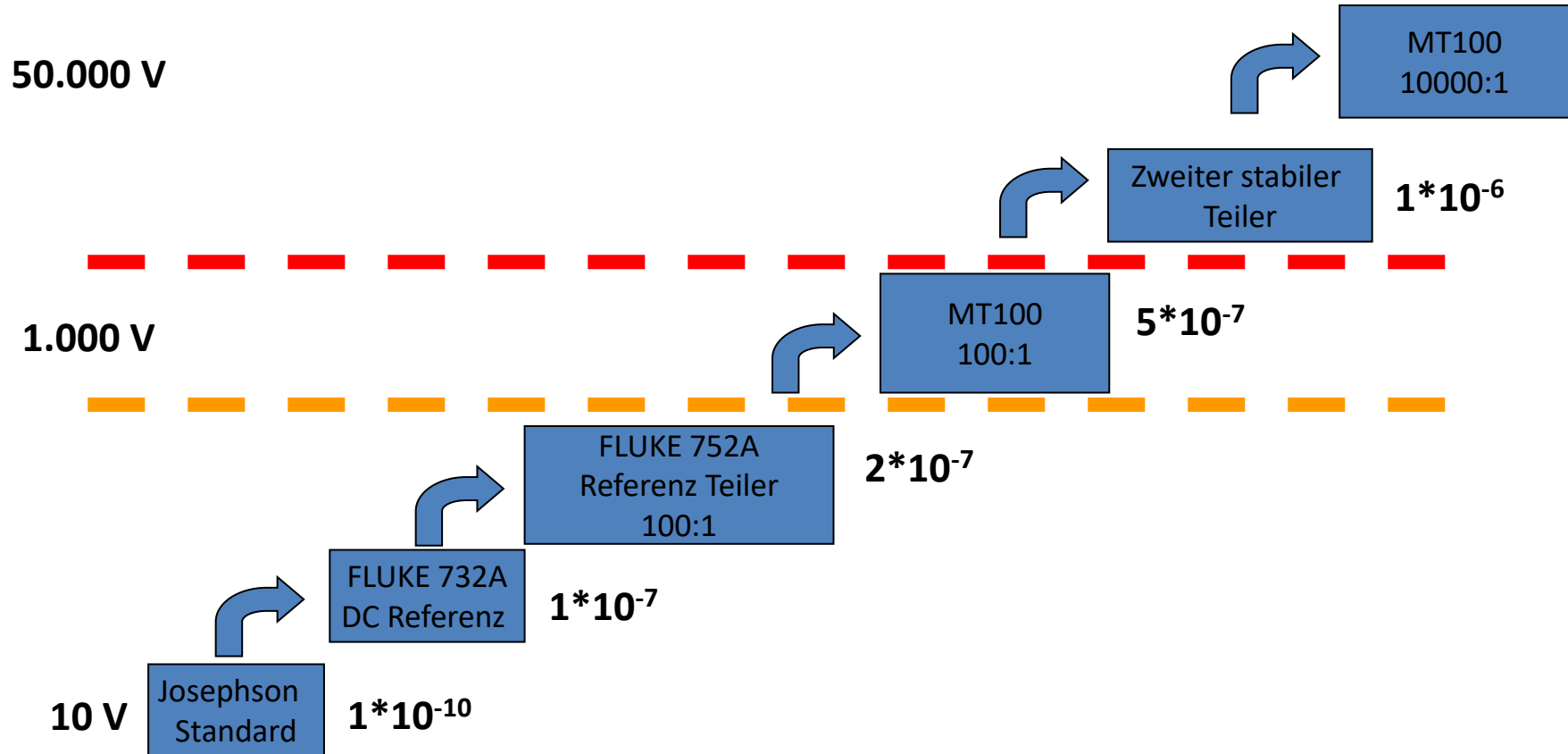
<https://global-sei.com/power-cable-business/products/hvdc/>
<https://www.energate-messenger.de/news/163845/zwei-konverter-fuer-eine-hguc-leitung>
https://www.zfk.de/fileadmin/Bilderdatenbank_NEU/Technik/Energie_gasolierte_Schaltanlage_c_ABB.jpg

HVDC in der PTB

- Seit den 80er Jahren werden Prüfungen und Kalibrierungen bis 300 kV mit Messunsicherheiten von wenigen 10^{-5} angeboten
- Neue Entwicklungen seit 2010
- Modernisierung und EMPIR



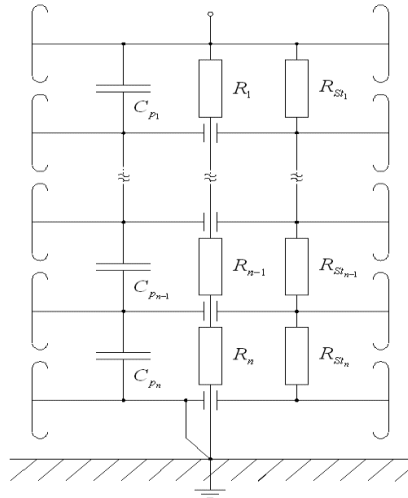
Step-Up Verfahren



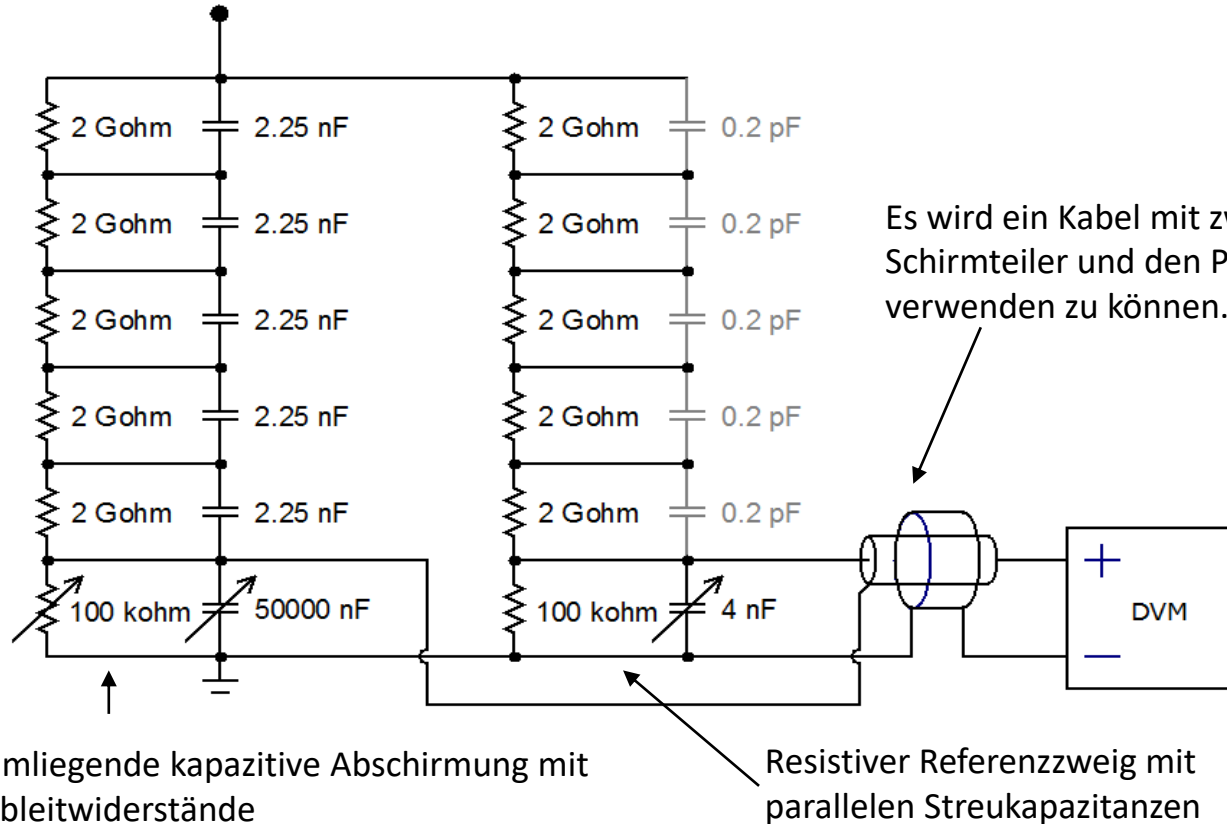


Beiträge zur Messunsicherheit:

Temperatureinfluss:	$1 \cdot 10^{-7}$ ($\pm 0,15\text{K}$)
Corona:	$1 \cdot 10^{-7}$
Leckströme:	$1 \cdot 10^{-7}$
Fremdfeld:	$1 \cdot 10^{-8}$
Druck:	$1 \cdot 10^{-8}$
<u>Spannungsabhängigkeit:</u>	$5 \cdot 10^{-7}$
Unsicherheit ($k=1$):	$1 \cdot 10^{-6}$

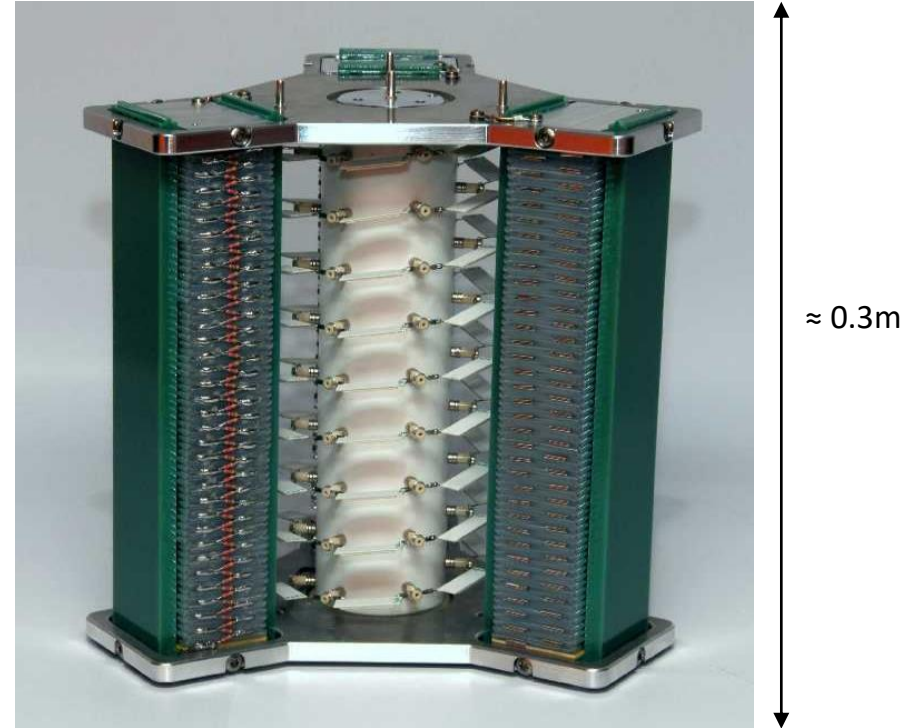
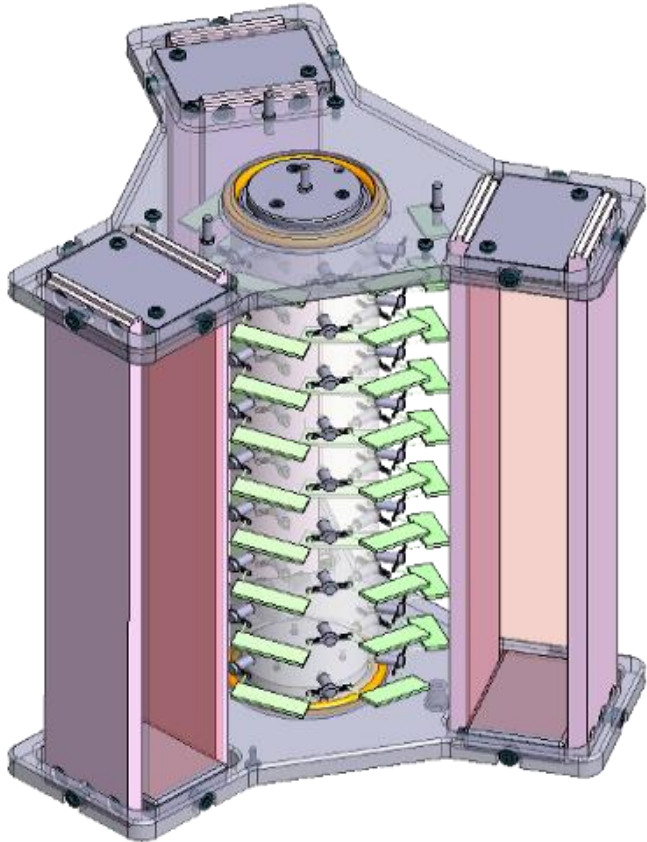


Aufbau eines HVDC-1MV Teilers

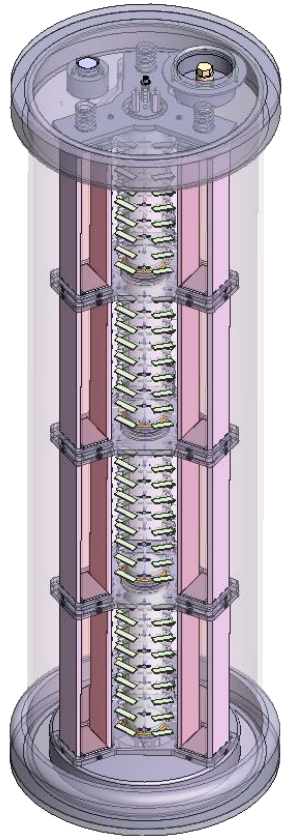


$$\begin{aligned} I_{ref} &= 100 \mu\text{A} \\ I_{shield} &\approx 100 \mu\text{A} \\ P_{tot} &\approx 20 \text{ W (per 200 kV module)} \end{aligned}$$

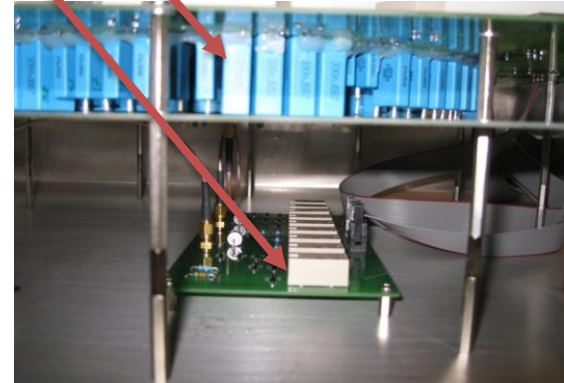
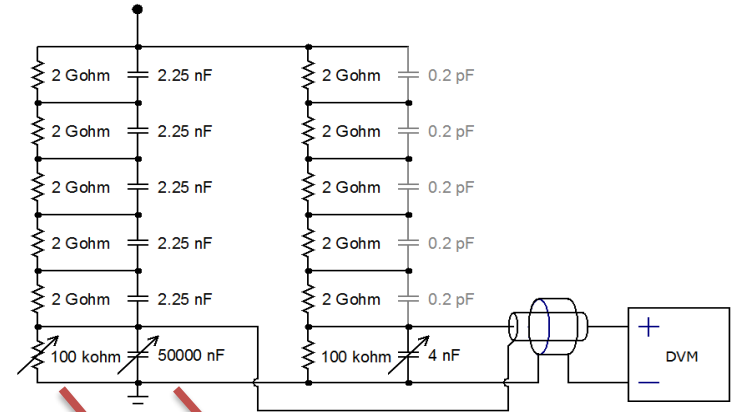
Aufbau eines HVDC-1MV Teilers



Aufbau eines HVDC-1MV Teilers



≈ 1.5m



Aufbau eines HVDC-1MV Teilers

Performance of a modular wideband HVDC reference divider for voltages up to 1000 kV

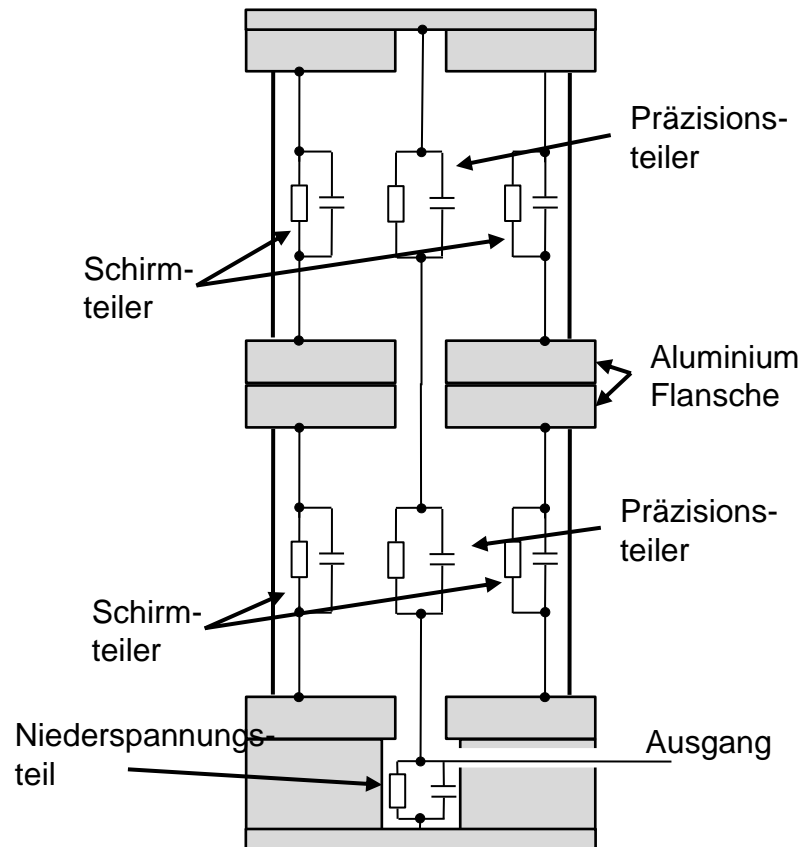
Jari Hällström, Anders Bergman, *Senior Member, IEEE*, Serkan Dedeoğlu, Alf-Peter Elg, Ernest Houtzager, *Senior Member, IEEE*, Joni Klüss, Tapio Lehtonen, Wolfgang Lucas, Johann Meisner, Ahmet Merev, Matthias Schmidt, Esa-Pekka Suomalainen, Tatu Nieminen, and Christian Weber

TABLE III
UNCERTAINTY BUDGET FOR SCALE FACTOR CALIBRATION AT 1000 kV DC

	Type	Uncertainty in 10^{-6}
Statistical spread	A	5
Determination of LV arm resistance	B	1.5
Determination of HV arm resistance	B	3.5
Uncertainty of voltage coefficient correction [14]	B	2
Uncertainty for $(21 \pm 3)^\circ\text{C}$ temperature range [14]	B	2.5
Non-linearity due to leakage currents	B	2.5
Self-heating effect	B	1
Uncertainty of DMM reading	B	1
Uncertainty due to DMM input resistance	B	1
Combined standard uncertainty		8
Combined extended uncertainty ($k=2$)	A and B	16

Aufbau des PT400

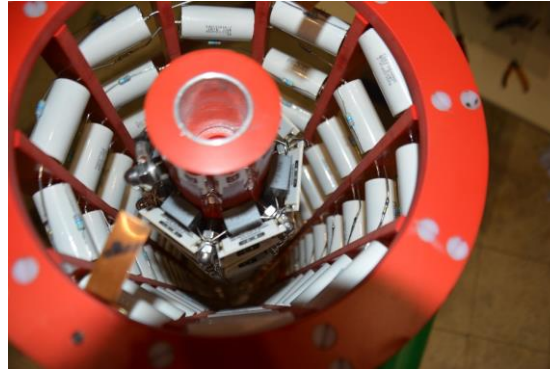
- **Hochspannungsteil**
 - Widerstände
 - 800 Stück (10 M Ω) \rightarrow 8 G Ω
 - Kondensatoren:
 - 800 Stück (100 nF) \rightarrow 125 pF
- **Feldsteuerung**
 - Widerstände
 - 600 Stück (33 M Ω) \rightarrow 4950 M Ω
 - Kondensatoren:
 - 600 Stück (100 nF) \rightarrow 666 pF
- **Niederspannungsteil**
 - Widerstand
 - 100 k Ω
 - Kondensatoren
 - 11 (1 μ F) \rightarrow 11 nF



Aufbau des PT400 → 4 PT400 = 1600 kV

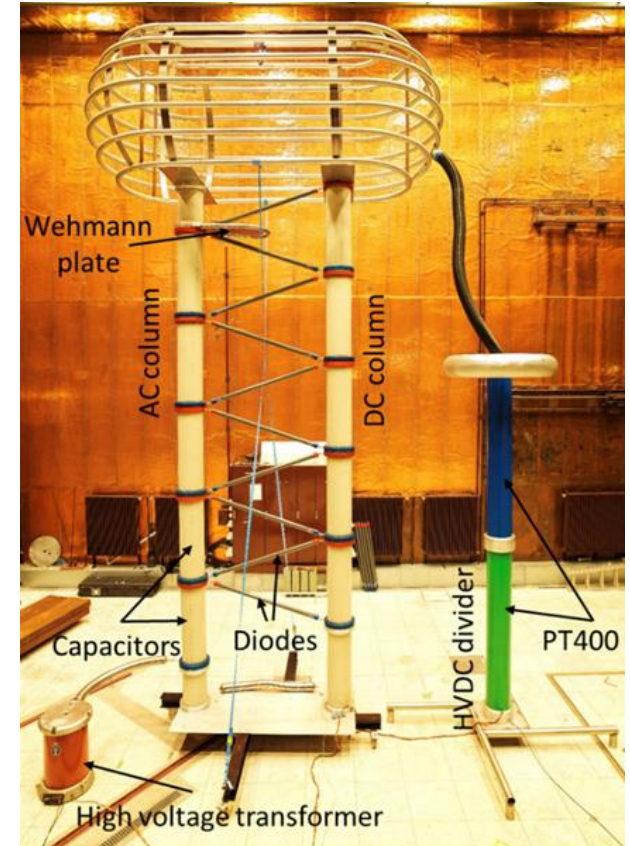
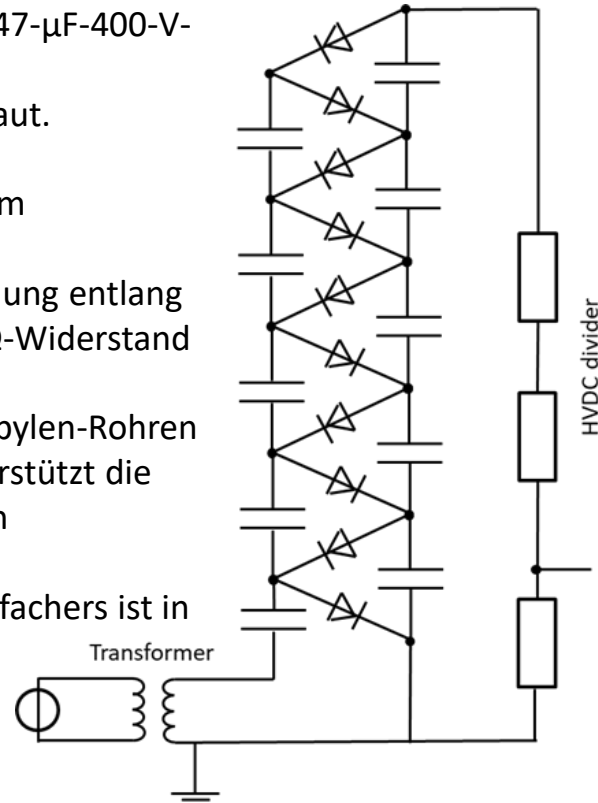


High voltage divider module PT400	
Nominal scale factor	40.001:1
Nominal voltage	400 kV
Expanded uncertainty ($k=2$)	$1 \cdot 10^{-5}$ V/V
Resistance of precision arm	4 G Ω
Resistance of shield arm	2475 G Ω
Low voltage arm	100 k Ω



2000 kV UHVDC Erzeuger der PTB

- Die Kondensatoren wurden durch die Reihenschaltung von 600 einzelnen 47- μF -400-V-Elektrolytkondensatoren für jeden Hochspannungskondensator aufgebaut.
- Die Kapazität beträgt 73 nF bei einer Nennspannung von 200 kV und einem Sicherheitsabstand von 40 kV.
- Eine symmetrische Spannungsverteilung entlang jedes Elkos wird durch einen 4,7-M Ω -Widerstand gewährleistet.
- Der Einbau in dickwandigen Polypropylen-Rohren schützt die Kondensatoren und unterstützt die mechanische Stabilität des gesamten Spannungsvervielfachers.
- Der Aufbau dieses Spannungsvervielfachers ist in der rechten Abbildung dargestellt



HGÜ – Kalibriermöglichkeiten

Metrologie für die Energiewende



1200 kV divider (RISE)

2000 kV divider (PTB)

2000 kV DC generator (PTB)

1200 kV divider (PTB)

Spannung	Erw. Messunsicherheit
1 kV - 100 kV	$2 \cdot 10^{-6}$
100 kV - 200 kV	$10 \cdot 10^{-6}$
200 kV - 400 kV	$15 \cdot 10^{-6}$
400 kV - 1000 kV	$20 \cdot 10^{-6}$
1000 kV - 1200 kV	$40 \cdot 10^{-6}$
1200 kV - 1600 kV	$200 \cdot 10^{-6}$

Start der PTB Hochspannungsmodernisierung und Promotion Passon

EMPIR 19ENG02 FutureEnergy

Abschluss der Hochspannungsmodernisierung für HVDC

Abschluss Promotion Passon

Verifizierung der Messmöglichkeiten bis 1600 kV

CMC Einträge für 1000kV – 1600kV (Bewahrung Messgröße HVDC über 1000 kV)

Erste Kalibrierung für einen Lieferanten einer HGÜ-Trasse (Weitergabe Messgröße HVDC über 1000kV)

Beschaffung eines LKW mit Kran für vor-Ort Kalibrierungen

2020

2021

2022

2023

- HVDC seit 2010 stetig ausgebaut
- Durch den Vergleich zwischen dem modularen PTB-HVDC-1200-kV-Teiler und dem PT1600 wurde gezeigt, dass zwischen den Systemen ein extrem geringer Maßstabsfaktorunterschied innerhalb von $10 \mu\text{V/V}$ und eine erweiterte Messunsicherheit von unter $30 \mu\text{V/V}$ bei 1200 kV vorliegt.
- Einträge für die nächste CMC-Runde wurden für beide PTB-Teiler (1200kV und 1600kV) beantragt.
- https://www.ptb.de/empir2020/fileadmin/documents/empir-2020/FutureEnergy/documents/DJI_0416.MP4