

**Universität Stuttgart**  
Institut für Energieübertragung und  
Hochspannungstechnik



# Onsite Messung von transienten Überspannungen mittels kapazitiver Feldsensoren

Hochspannungssymposium 2024

Felipe L. Probst | Kai A. Alsdorf

TRÄNSNET BW





## Zielsetzung Kooperation TransnetBW / Universität Stuttgart:



Erklärung für den Ausfall eines Ableiters

Entwicklung eines Messsystems zur Messung transienter Vorgänge

## Agenda:



Störungsereignis: Explosion eines Ableiters



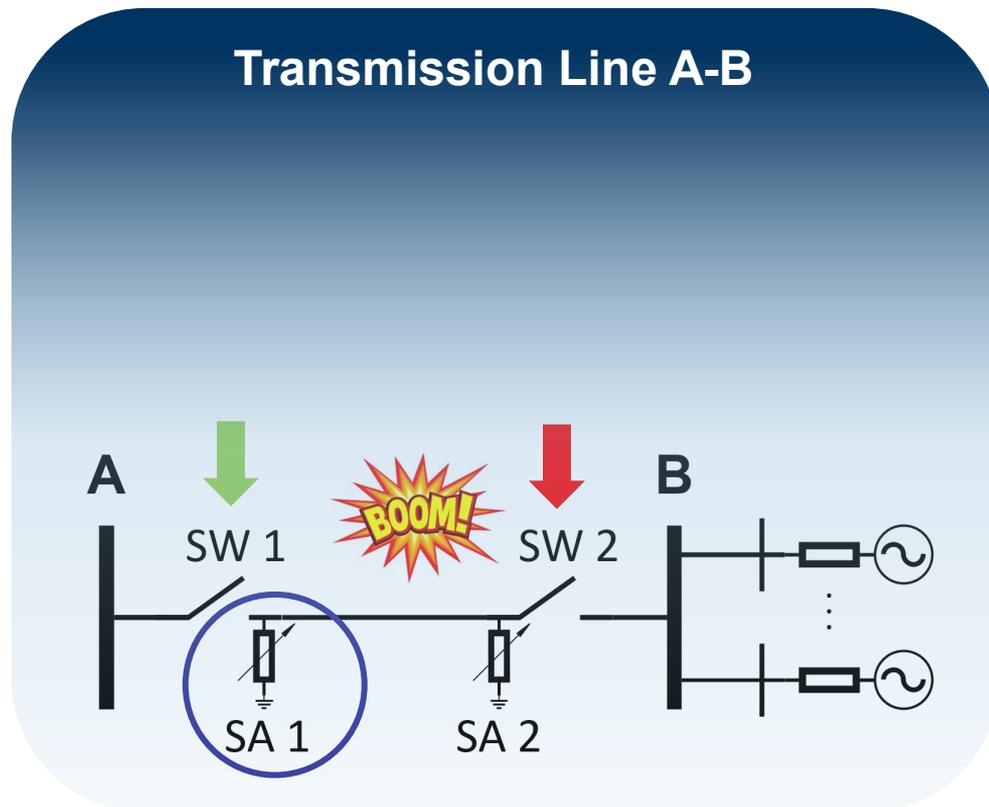
Konzept und Design des Messsystems



Analyse der gemessenen transienten Vorgänge



- Versagen eines Ableiters während einem Schaltvorgang der Leitung A – B (März 2021, Leitungslänge ca. 200 km)
- Vorgang:
  - 1 – SW 1 und SW 2 offen
  - 2 – SW 2 geschlossen
  - 3 – Ableiter SA 1 zerstört
- Fragen:
  - Warum ist der Ableiter explodiert?
  - Wie hoch war die Überspannung beim Schalten?
  - War diese hoch genug um ein Versagen zu verursachen?





# Warum ist der Ableiter explodiert?

- Versagen einer Varistorkeramik:

- Langzeit-Degradation:

- Reduzierung von Doppel-Schottky-Barrieren
- Erhöhung des Leckstromes
- Erhöhung der Temperatur

→ "thermal runaway"



- Impuls-Degradation:

- Impulse führen schlagartig zu einem massiven Abbau von DSBs
- Führt zu einzelnen leitfähigen Pfaden in der Keramik
- „electrical puncturing“ oder „cracking“



- Externe Faktoren:

- Eintritt von Feuchtigkeit oder Verschmutzungen
- Mechanische Beschädigungen während dem Transport
- Beschädigungen der Varistortabletten
- Trockenmittel in Varistorsäule
- ...

## Fakten:

- Baujahr: 2012
- Keine Anzeichen von Feuchtigkeitseintritt
- Ableiter war richtig dimensioniert



## Externe:

- Direkter Blitzeinschlag
- Indirekter Blitzeinschlag

→ Zum Zeitpunkt der Störung gab es keine Gewitteraktivität

## Interne:

### Schaltüberspannungen:

- Ein-/Ausschalt-Überspannungen
- Kurzschlüsse
- ...

→ Keine Kurzschlüsse oder Erdschlüsse

→ Für weitere Untersuchungen ist ein Messsystem zur Erfassung von transiente Vorgängen notwendig

### Netzfrequente Überspannungen:

- Lastabwurf
- Ferranti Effekt
- ...

→ Ferranti Effekt gemessen, aber zu gering

### Nicht-Netzfrequente Überspannungen:

- Resonanzen
- Kippschwingungen
- ...

→ Unbekannt

# Das Messsystem



- $V > 100 \text{ kV}$  → kapazitiver Spannungswandler
- Hohe Genauigkeit bei 50/60 Hz
- Verzerrte Ausgangsspannung bei Hochfrequenzsignalen (**Filterverhalten**)
  - **Nicht geeignet für die Messung schneller Transienten (ohne Kompensation)**

## Lösung

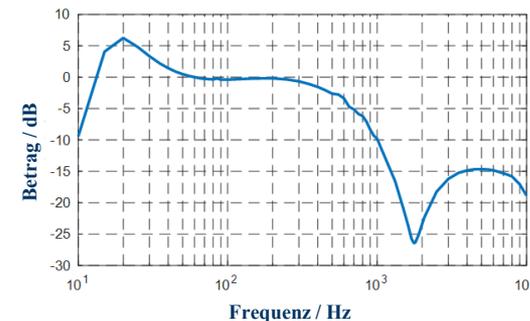
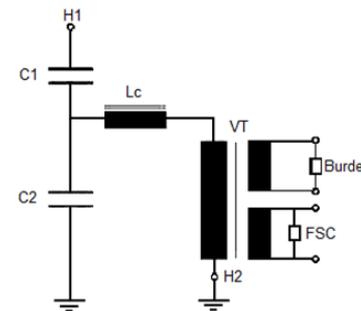


Verwendung von  
Breitbandgeräten

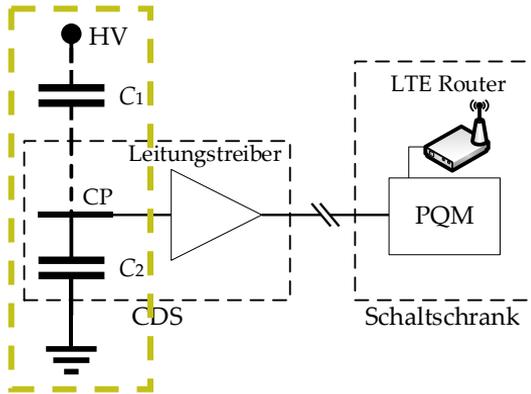
**Elektrische Feldsensoren**



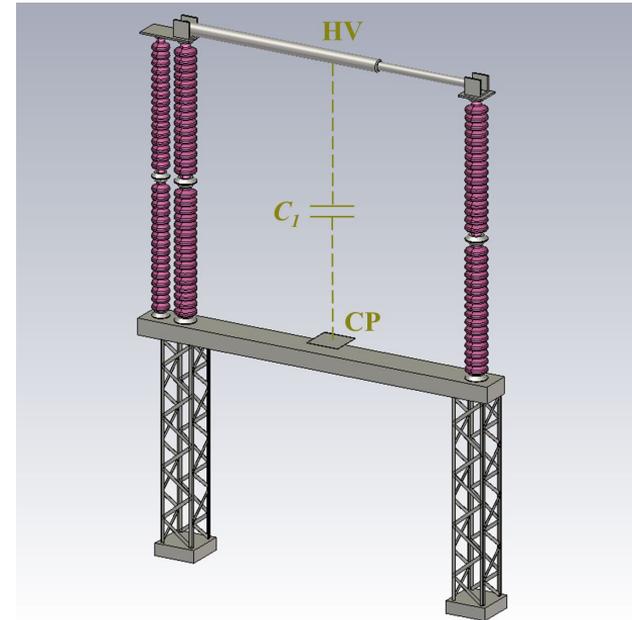
Quelle: Pfiffner



- Kapazitiver Spannungsteiler

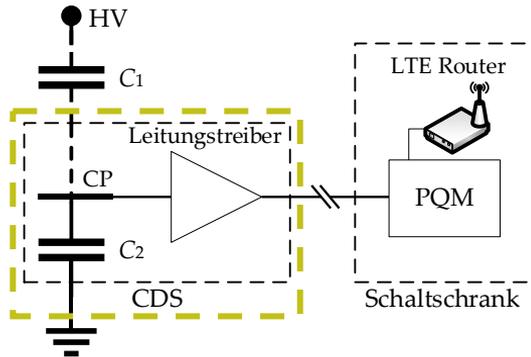


- Spannungsmessung mit einem kapazitiven Teiler
  - $C_1$ : Streukapazität HV–CP (Koppelplatte)
  - $C_2$ : einstellbare Kapazität
- $U_{aus}$  ist definiert als: 
$$U_{aus} = U_{ein} \frac{C_1}{C_1 + C_2}$$

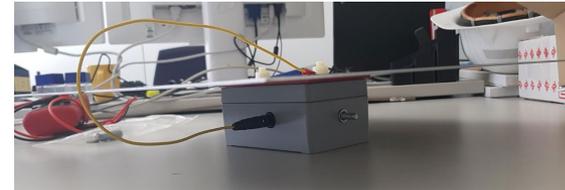
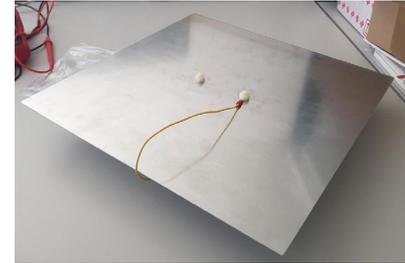




- Kapazitiver Teiler Setup (CDS)

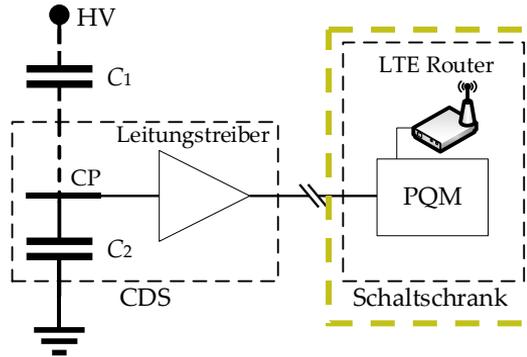


- Koppelplatte: 40 cm x 40 cm Aluminiumplatte
- $C_2$  einstellbar von 8,3 nF bis 50 nF
- Am Ausgang des Teilers ist ein Leitungstreiber angeschlossen, um den Einfluss der Kabelkapazität zu vermeiden

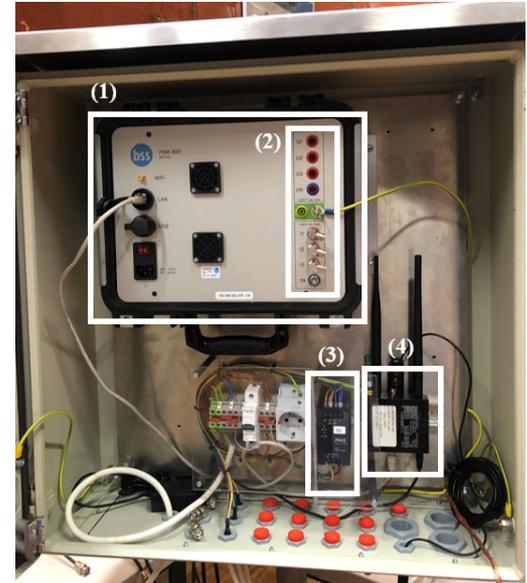




- Schaltschrank



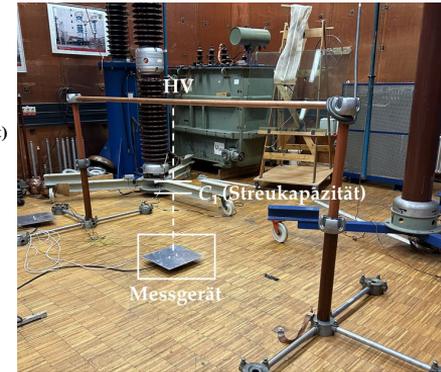
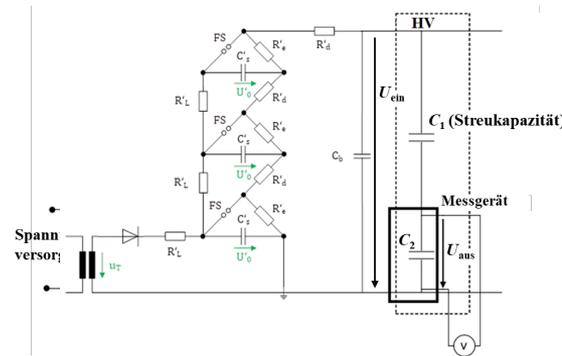
- Ausgangssignal (CDS) → Power Quality Monitor (PQM)
  - BSS PQM-800: Abtastrate von 1 MS/s ( $f_{\max} = 500$  kHz) und 8 Eingangskanäle
- 24 V<sub>DC</sub> Quelle für Leitungstreiber
- LTE-Router zur Übertragung von Transientendaten zum Server



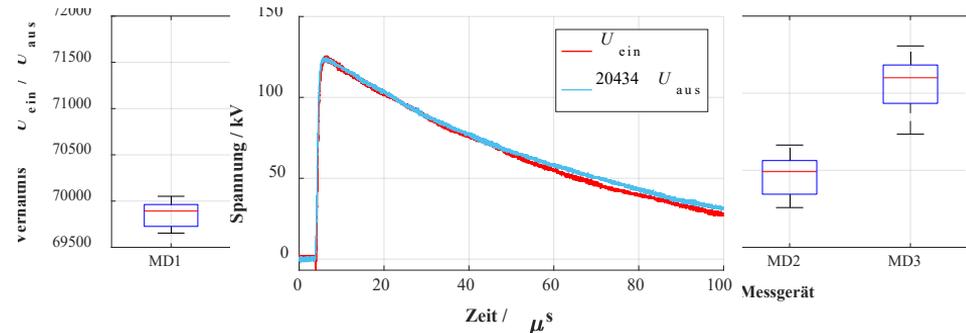
- PQM-800
- Eingangskanäle
- 24 V<sub>DC</sub> Quelle
- LTE-Router



- Genauigkeitsbewertung
  - Spannungsverhältnis bei 50 Hz und Streukapazität  $C_1$
  - Eingangsspannung von 14 kV bis 76 kV
  - Lineare Ergebnisse mit einer maximale Abweichung von 0,46% vom Mittelwert



- Blitzstoßspannungsprüfung
  - Der Ausgang des Geräts wurde mit dem Ausgang eines Standardteilers verglichen
  - Die Ergebnisse waren ausreichend





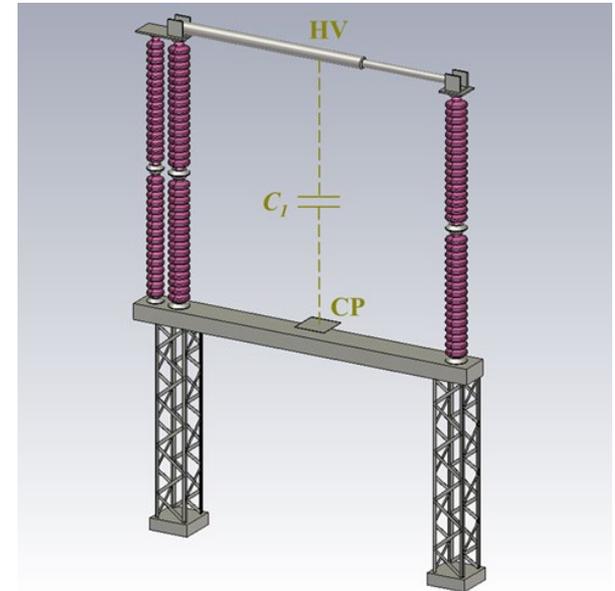
# Einbau in die Schaltanlage

- Das Messsystem wurde in eine Schaltanlage eingebaut
- Drei Geräte wurden auf dem Basisträger eines Trennschalters (420 kV-Leitung) installiert (im laufenden Betrieb)
- Schaltschrank ca. 6 m entfernt (Fundament des Leistungsschalters)

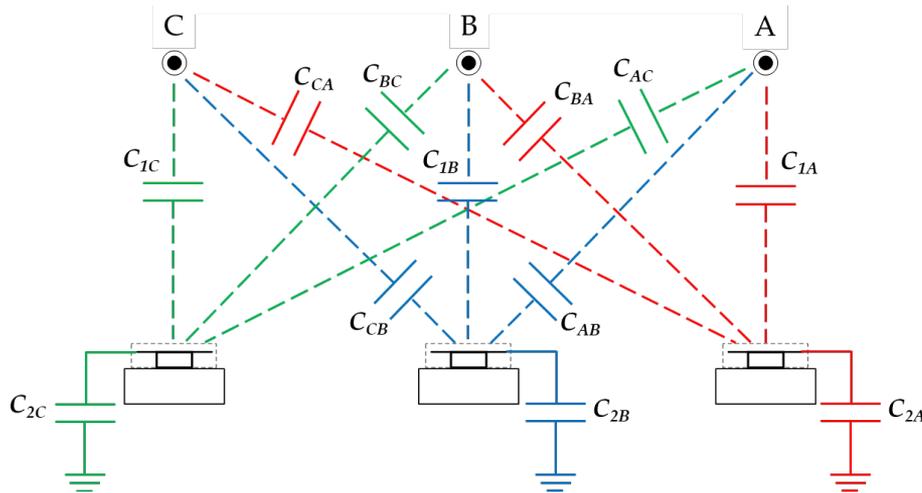




- Das Spannungsverhältnis ist abhängig von der Anordnung, in der die Geräte installiert sind
  - $C_1$  ändert sich mit dem Abstand HV–CP
- Die benachbarten Phasen beeinflussen ebenfalls das Spannungsverhältnis der Geräte
  - Es gibt Streukapazitäten zwischen benachbarten Phasen und der Koppelplatte des Geräts
- Für jede Konfiguration ist eine Kalibrierung erforderlich



- Es wurde eine post-processing Kalibrierungsmethode entwickelt



$$\begin{bmatrix} U_{2A} \\ U_{2B} \\ U_{2C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{C_{1A}}{C_{2A}} & \frac{C_{BA}}{C_{2A}} & \frac{C_{CA}}{C_{2A}} \\ \frac{C_{AB}}{C_{2B}} & \frac{C_{1B}}{C_{2B}} & \frac{C_{CB}}{C_{2B}} \\ \frac{C_{AC}}{C_{2C}} & \frac{C_{BC}}{C_{2C}} & \frac{C_{1C}}{C_{2C}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{1A} \\ U_{1B} \\ U_{1C} \end{bmatrix}$$

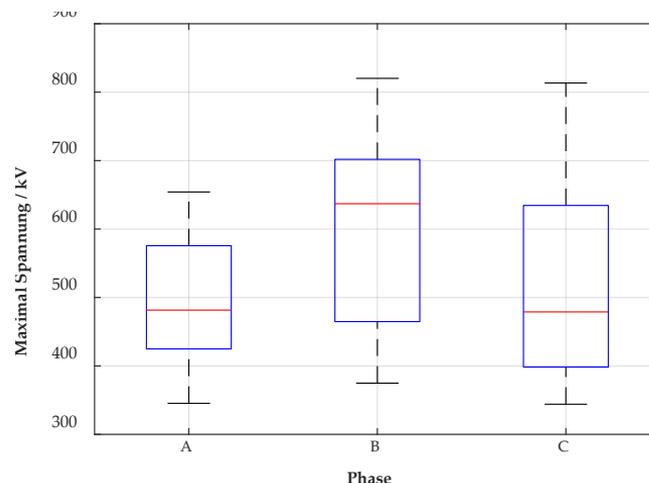
$U_1$  wird unter Berücksichtigung der gemessenen Spannungen ( $U_2$ ) und aller Streukapazitäten berechnet

Probst, F.L.; Beltle, M.; Tenbohlen, S. *Measurement of Transient Overvoltages by Capacitive Electric Field Sensors*. Sensors 2024, 24, 1357. <https://doi.org/10.3390/s24051357>.

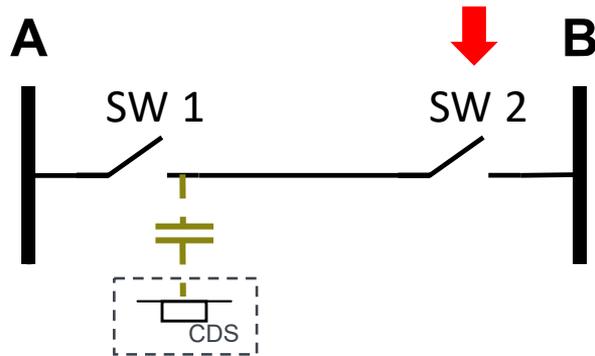


- 142 aufgezeichnete Transienten
  - 61% aufgrund externer Störungen
    - Transienten, die innerhalb weniger Millisekunden in den vorherigen stationären Zustand zurückkehren
  - 27 Ein- und 28 Ausschaltungen der Freileitung
    - Einbau: Leitung eingeschaltet
    - Abbau: Leitung ausgeschaltet
  - **Die kritischsten Fälle sind während der Einschaltung der Freileitung passiert**
    - **Max. Spannung: 820 kV (2,4 p.u.)**

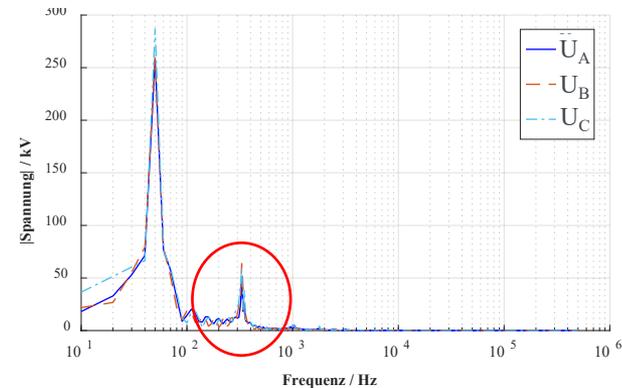
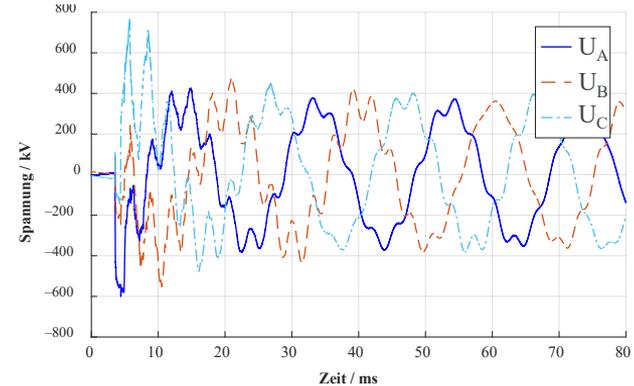
Statistische Auswertung - einjährige Messkampagne			
Einschaltung der Freileitung (Nr. der Events)	Ausschaltung der Freileitung (Nr. der Events)	Externe Störung (Nr. der Events)	Total
27	28	87	142



- Einschaltung der Freileitung

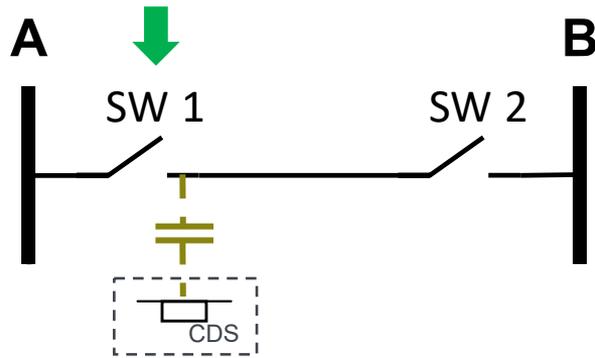


- Max. Spannung: 761 kV (2,2 p.u.) in Phase C
- 330 Hz Sonderkomponente
  - Unbekannter Ursprung
  - Weitere Untersuchung notwendig

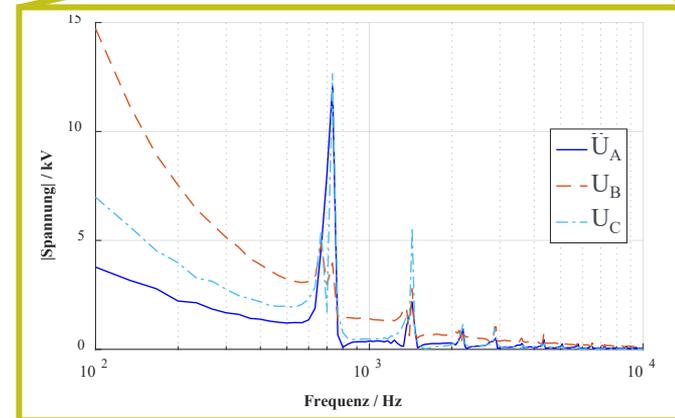
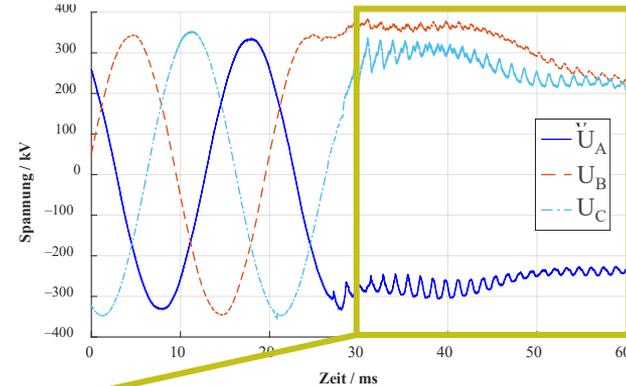




- Ausschaltung der Freileitung



- Niederfrequenz-Komponenten
- Höhere Frequenzanteile durch Wanderwelleneffekt
  - $f \approx 730 \text{ Hz}$
  - $T \approx 1,4 \text{ ms}$  (2 x Laufzeit der 200 km Freileitung)





- Transiente Überspannungen, die durch die Einschaltung der Freileitung verursacht werden, **sollten nicht** zum Ausfall des Ableiters **führen**
- Das Messsystem ist in der Lage, schnelle Transienten zu messen
  - **Nachgewiesene Wirksamkeit in der Praxis**
- Die Installation ist **einfach** und erfordert keine Unterbrechung der Stromversorgung
- **Vielfältige Anwendungen:**
  - Auswirkungen von **Schaltvorgängen und Blitzeinschlägen** auf Betriebsmittel in Schaltanlagen
  - Untersuchung von Resonanzen in **gemischten Übertragungssystemen** (Freileitungen und Erdkabel)
  - Untersuchung von Oberschwingungen und Resonanzen bei der **Integration erneuerbarer Energien** in das Stromnetz



**Universität Stuttgart**  
Institut für Energieübertragung und  
Hochspannungstechnik

**TRÄNSNET BW**



**Vielen Dank!**



**Felipe Luis Probst**

Email: [felipe-luis.probst@ieh.uni-stuttgart.de](mailto:felipe-luis.probst@ieh.uni-stuttgart.de)

Telefon: +49 (0) 711 685-67885

[www.ieh.uni-stuttgart.de/institut/team/Probst-00002/](http://www.ieh.uni-stuttgart.de/institut/team/Probst-00002/)

Universität Stuttgart  
Institut für Energieübertragung und Hochspannungstechnik  
Pfaffenwaldring 47  
70569 Stuttgart  
Deutschland

**Kai Alexander Alsdorf**

Email: [k.alsdorf@transnetbw.de](mailto:k.alsdorf@transnetbw.de)

Telefon: +49 (0) 711 21858-2275

[www.transnetbw.de](http://www.transnetbw.de)

TransnetBW GmbH  
Ohmstraße 4  
73240 Wendlingen  
Deutschland