

# Hochspannungssysteme

**Stephan Pack,**  
*Ao.-Univ.-Prof. Dr.techn. Dipl.-Ing. Dipl. Umwelttechniker*

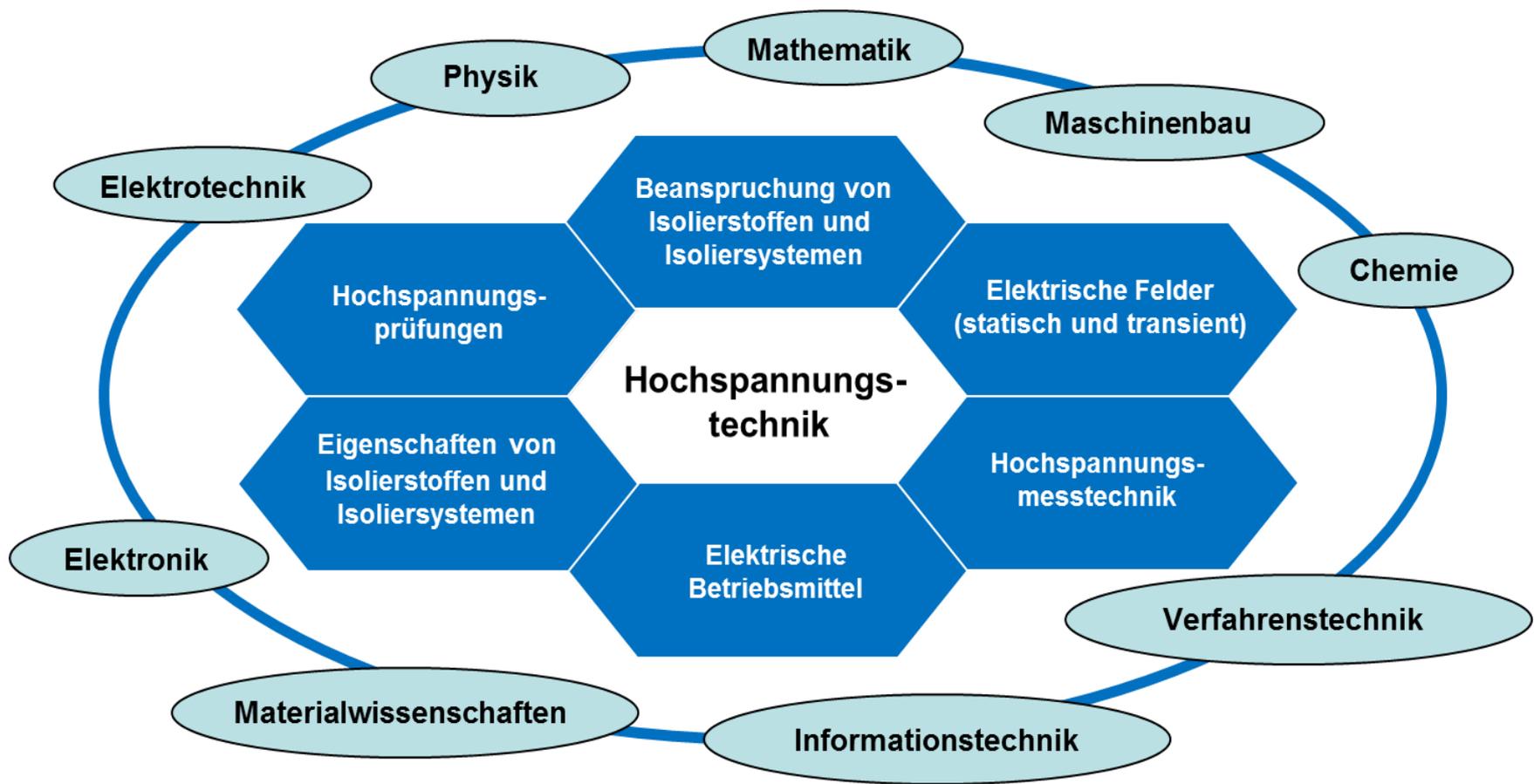
- *Stellvertretender Leiter des Instituts für Hochspannungstechnik und System Management*
- *Leitender Mitarbeiter der Versuchsanstalt für Hochspannungstechnik Graz GmbH*

## Definition Hochspannung

Definition Hochspannung	>	1.000 V
■ Mittelspannung	bis	30.000 V
■ Hochspannung	bis	110.000 V
■ Höchstspannung	bis	700.000 V
■ Ultrahochspannung	>	700.000 V

Die Hochspannungstechnik ist in großen Maßen interdisziplinär, insbesondere in den Bereichen Versuchs- und Messtechnik, Diagnose, Simulation, Datenaufbereitung und -auswertung.

# Hochspannungsanlagen - Hochspannungssysteme

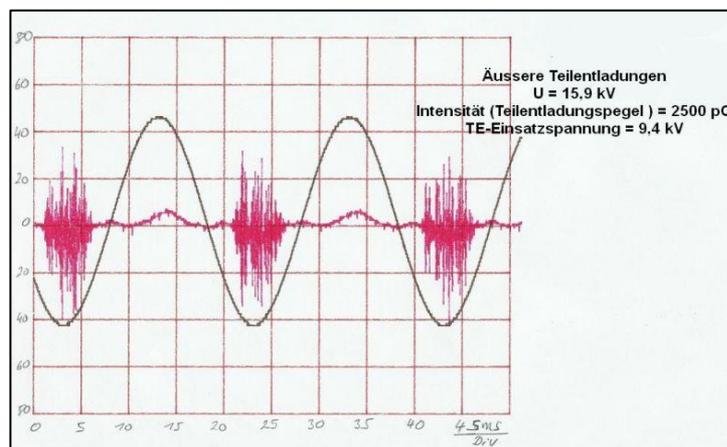
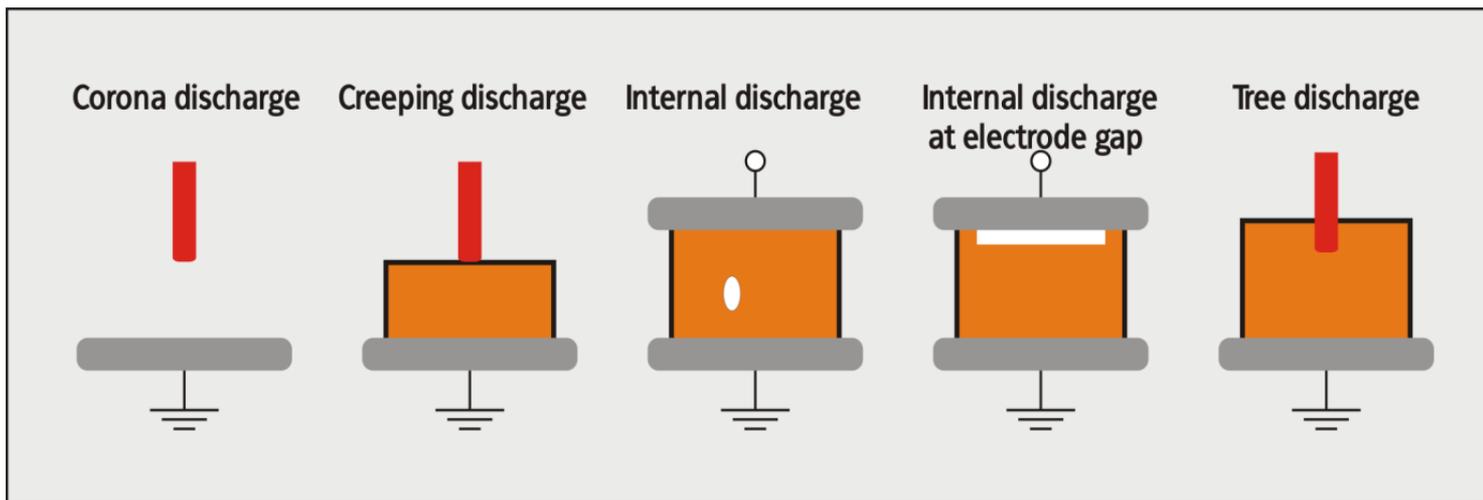


# Hochspannungsmesstechnik

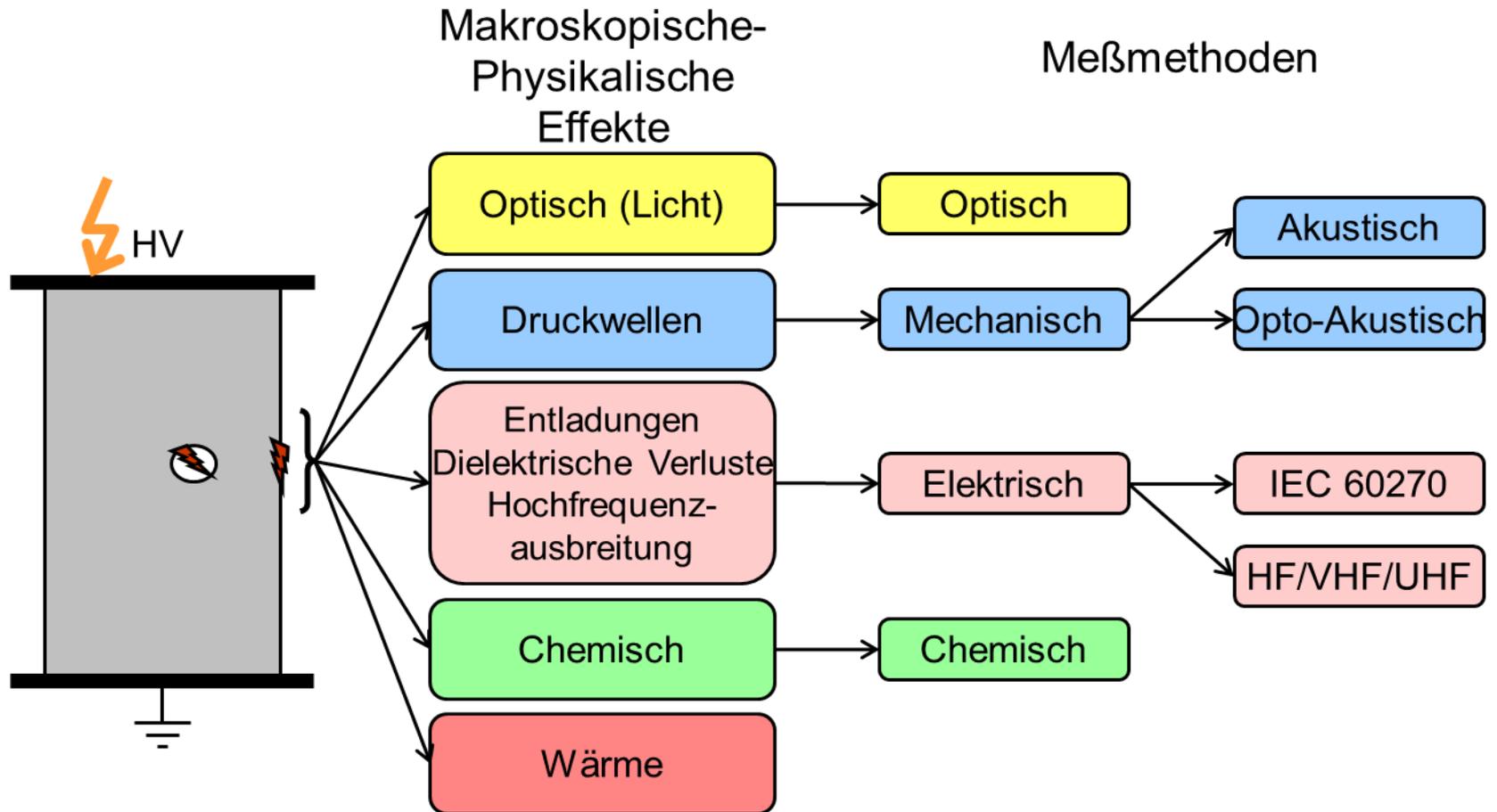
- Spannungen:  $\mu\text{V}$  bis  $\text{MV}$  ( $10^{-6}$  bis  $10^6$  Volt)
- Ströme: nA bis kA (MA) ( $10^{-9}$  bis  $10^3$  Ampere)
- Frequenzen: 0 Hz bis GHz (0 bis  $10^9$  Hertz)
- Kurzzeit- und Langzeitmessungen
- Niederfrequente Beeinflussungen
- Transiente Kopplungen
- Elektromagnetische Verträglichkeit



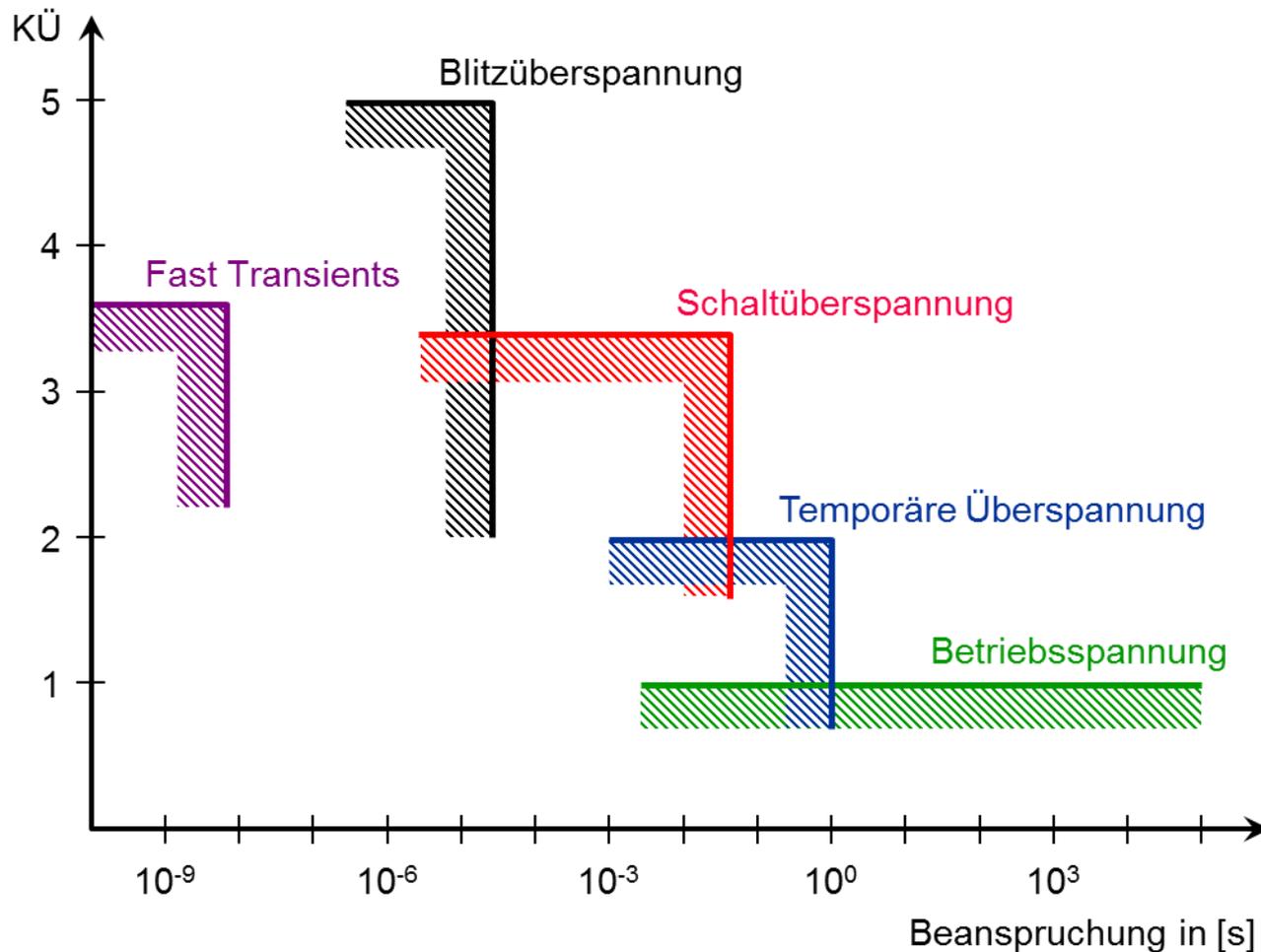
# Hochspannungssysteme – Teilentladungen



# Messung von Teilentladungen



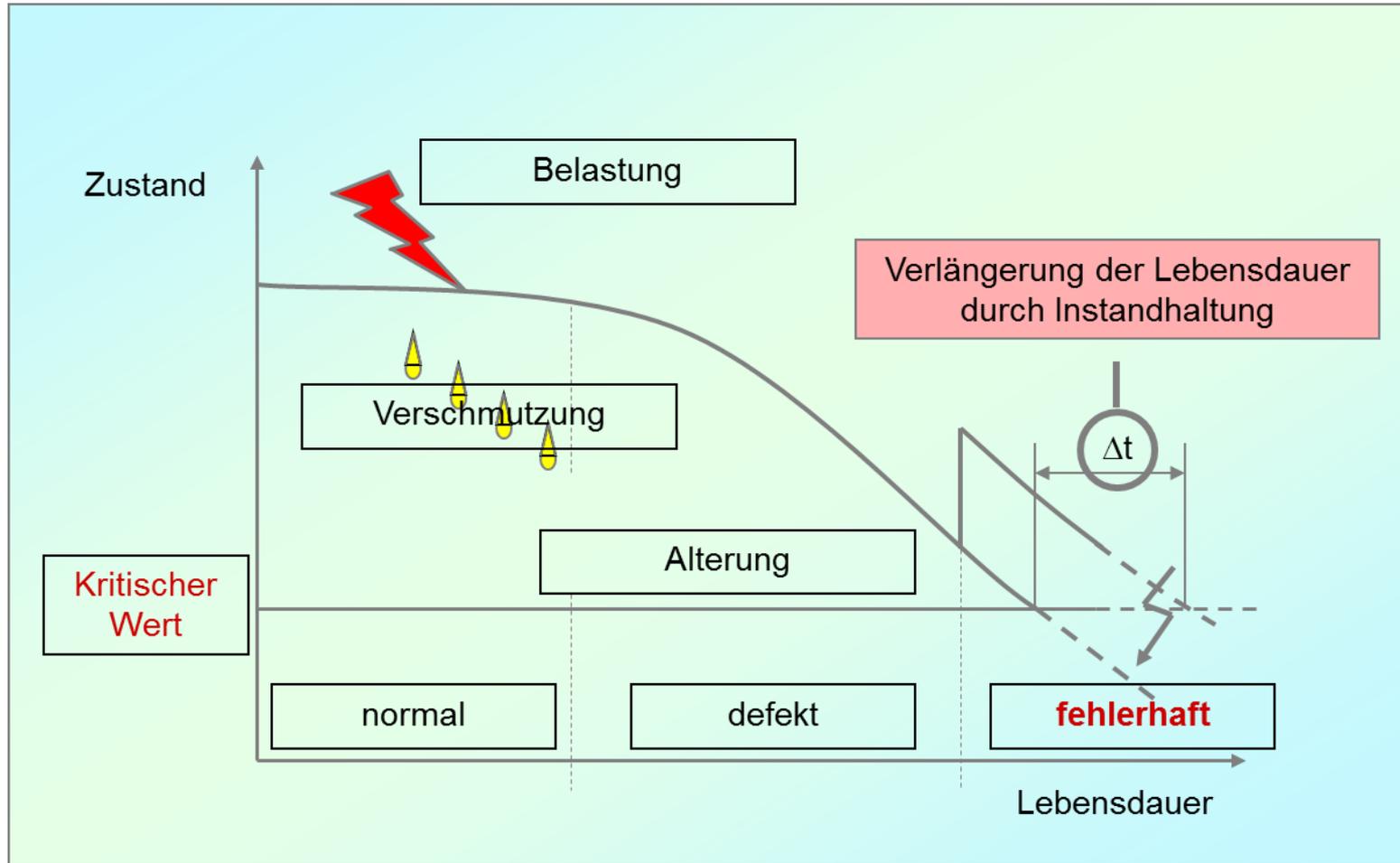
# Hochspannungssysteme - Spannungsbeanspruchungen



# Hochspannungssysteme – Technische Diagnostik

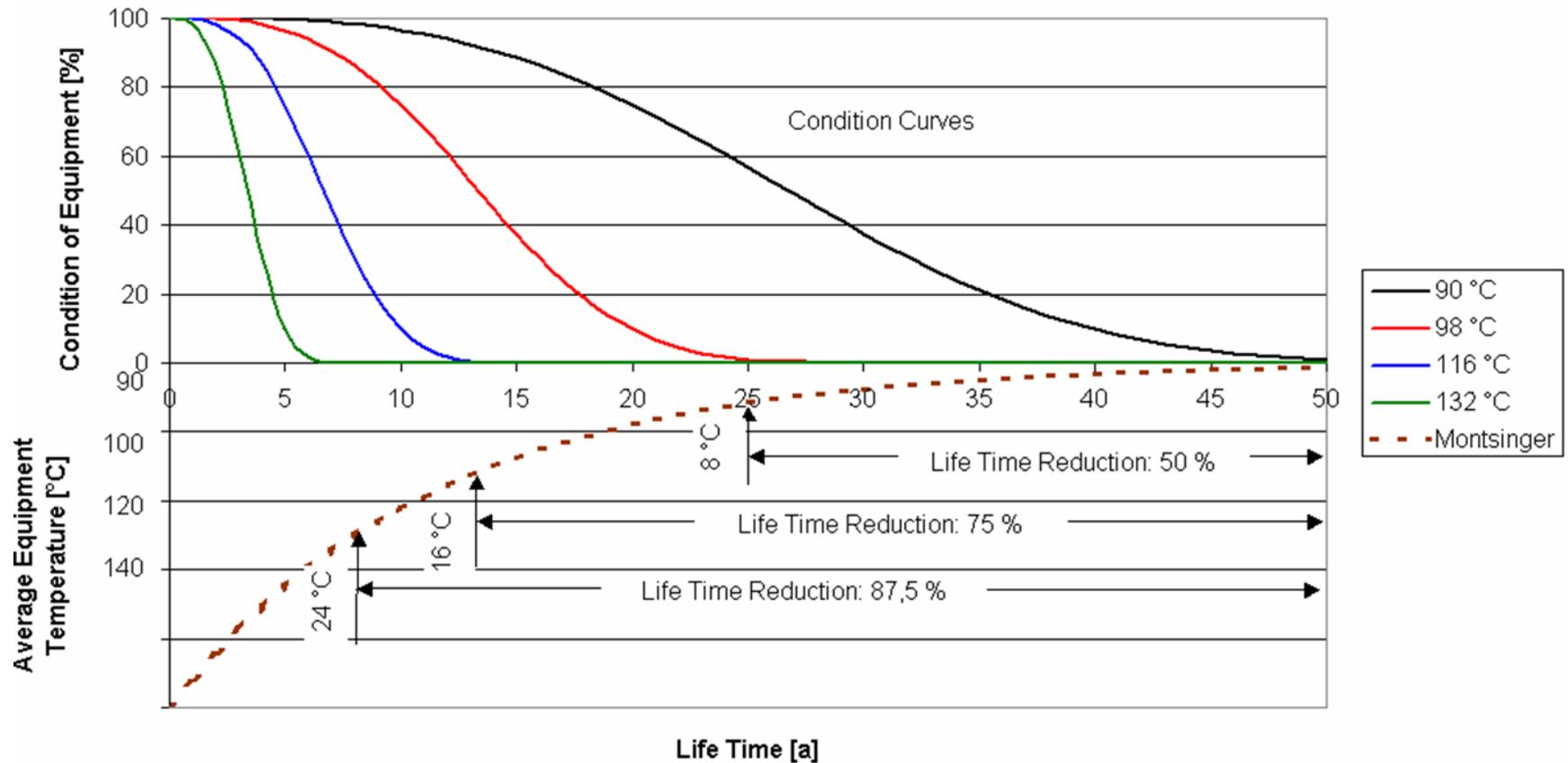
- Zustandsbewertung von technischen Systemen
- Berücksichtigung der Belastungen und Betriebsweise
- Ziel der Technischen Diagnostik (TD) ist:  
Identifizierung, Prüfung und Klassifizierung des Zustandes  
Änderung oder Beeinflussung des Zustandes
- Qualitätssicherung
- Vermeidung von Ausfällen

# Hochspannungssysteme - Lebensdauerzyklus

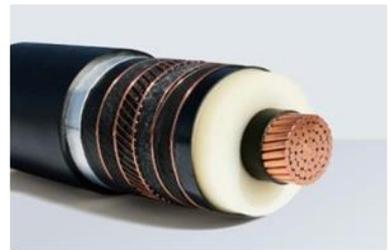
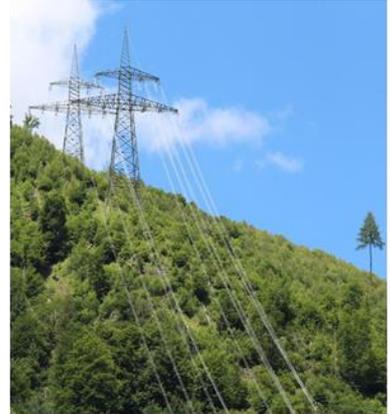
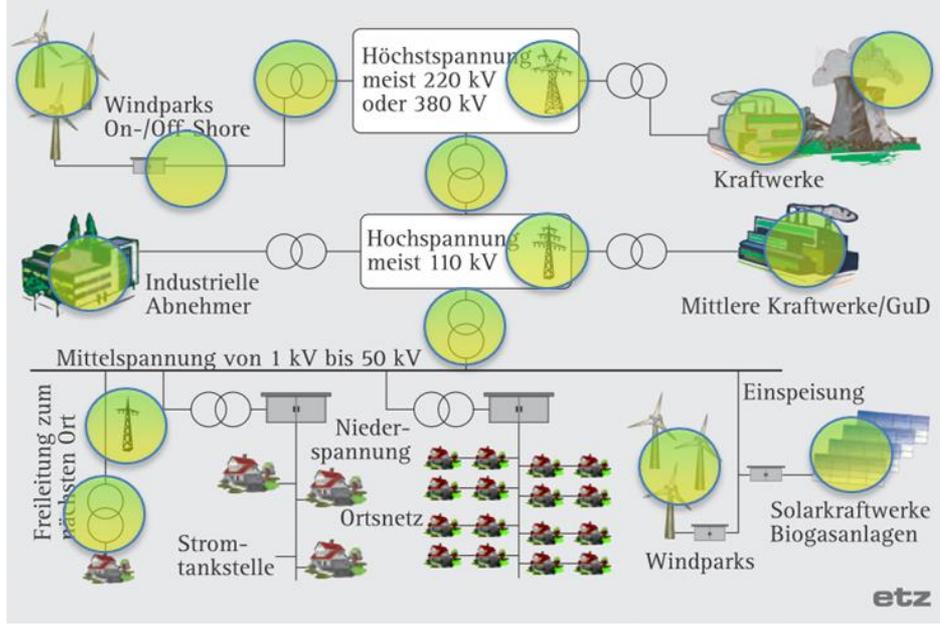


# Lebensdauerbewertung von Transformatoren

Temperature - Life Time: Phase Diagram

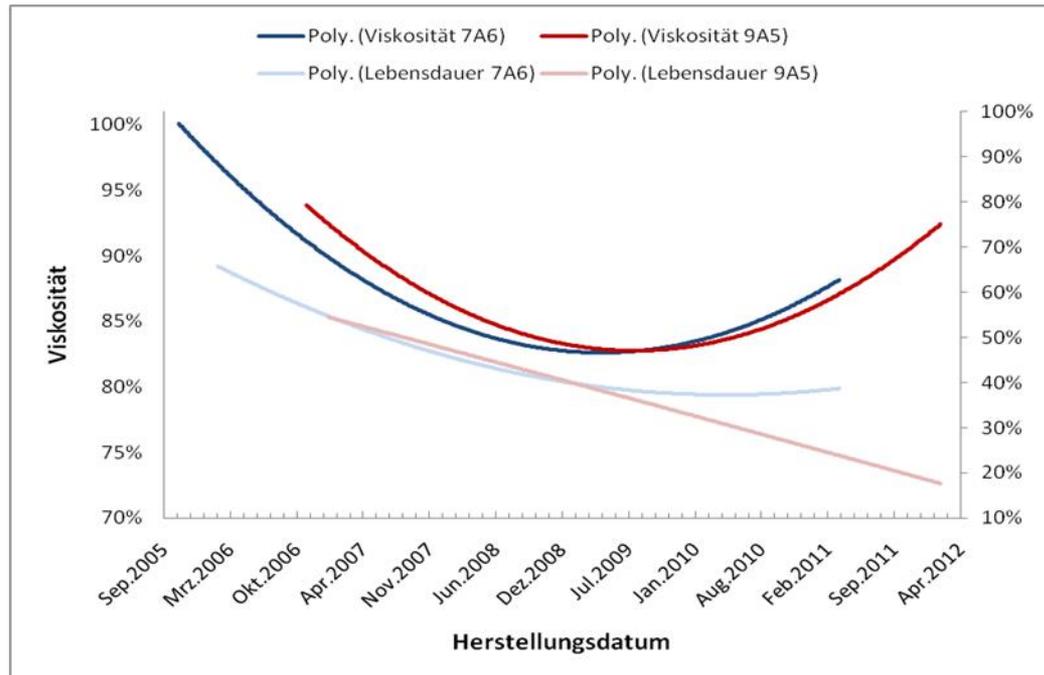


# Hochspannungsanlagen - Hochspannungssysteme



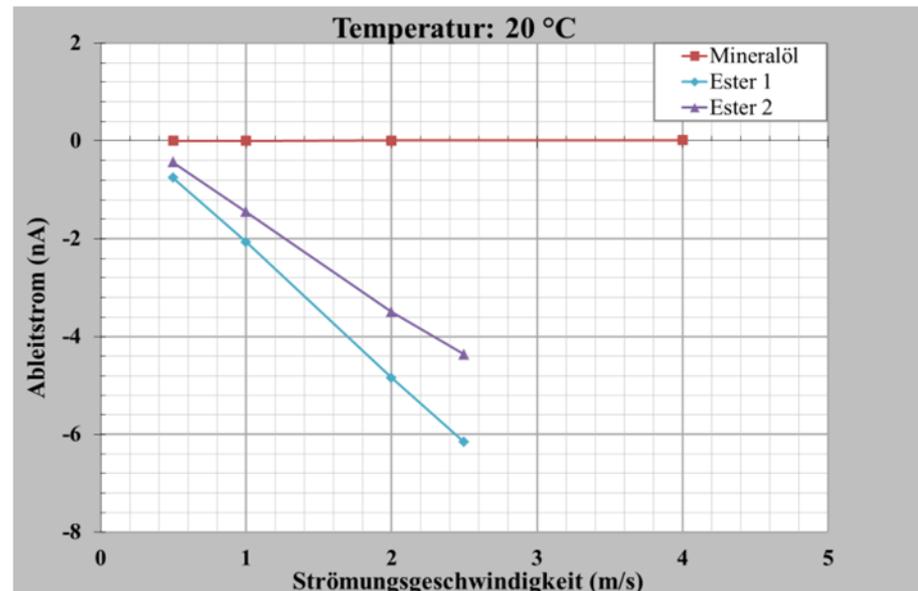
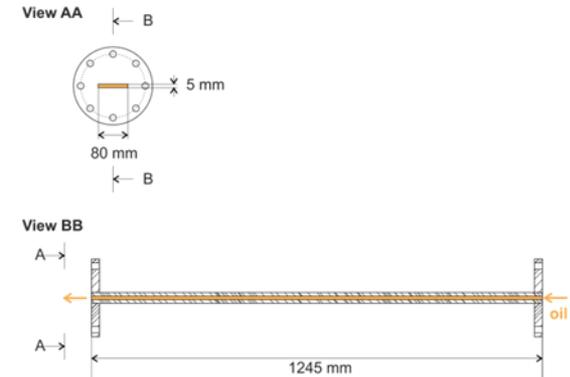
# Lebensdauer von Generatorstäben

- Untersuchungen der Einflussfaktoren
- Elektrische und thermische Faktoren
- Zusammenhang zw. Lebensdauer und Viskosität beim Tränkvorgang



# Elektrostatische Aufladung alternativer Isolierflüssigkeiten

- Hochspannungstransformatoren
- Mineralöl-Zellulose-Isoliersystem
- isolierenden Funktion und Kühlwirkung
- elektrostatische Aufladung
- Teilentladungen, Durchschlag > Fehler



# Teilentladungsmessung an einem Leistungsschalter

- 36kV Vakuum-Leistungsschalter
- 50 Stunden Teilentladungsmessung
- Spannungsprüfung mit 1,5-facher Nennspannung



## Abnahmeprüfung eines Generators

- Visuelle Inspektionen und Beratungsleistungen vor Ort
- Isolationswiderstandsmessung, Verlustfaktor- und Teilentladungsmessung
- Spannungsprüfung gemäß IEC 60034-1 mit erhöhter Spannung bei  $2xU_N+1kV$



# Abnahmeprüfung einer Schaltanlage im Herstellerwerk

- Luftisolierte 20kV-  
Innenraumschaltanlage
- Teilentladungspegel bei erhöhter  
Prüfspannung (Erdschlussfall)
- Basis ist die Norm IEC 62271-200
- TE Messung nach IEC 60270
- 50 Stunden Messung Vorort
- Fernüberwachung via LAN



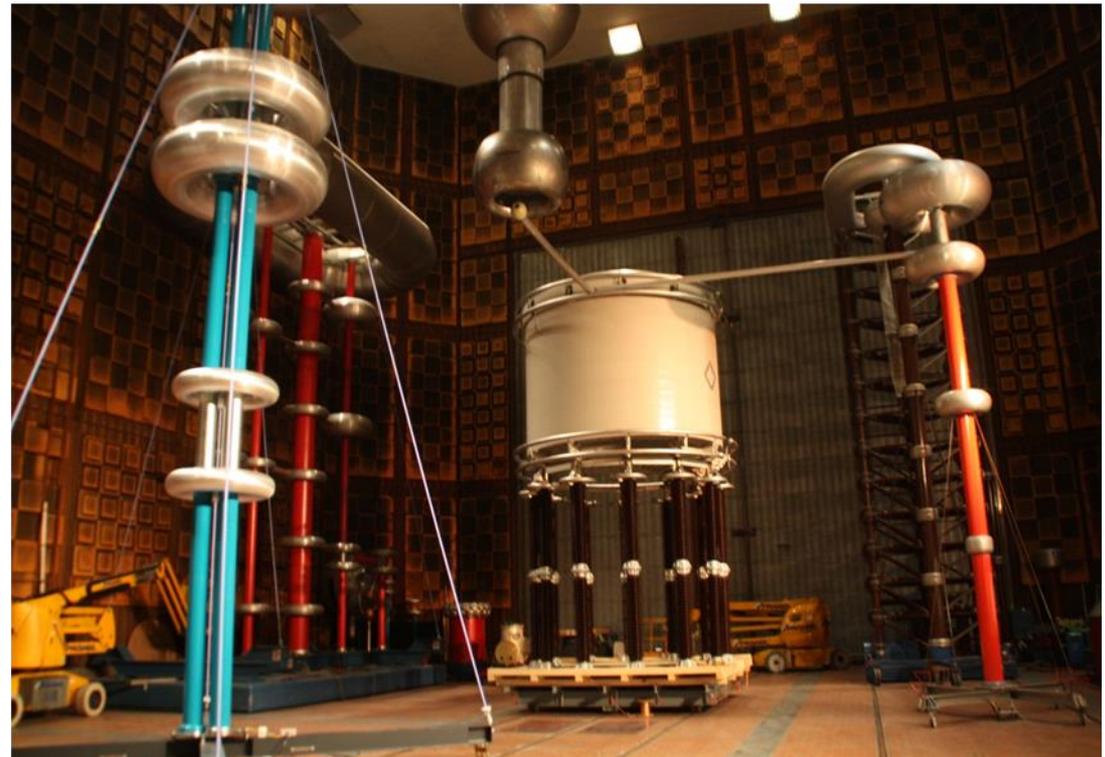
## Thermische Verhalten von 220-kV-Kombiwandlern

- Nennstrombelastung unter Umgebungstemperatur 40 °C
- Thermische Belastung des Isoliersystems
- Anschlussverbindungen (Übergangswiderstände, Wärmeeintrag)
- Isolieröl-Entnahme (Wasser – und Gasgehaltsentwicklung)
- Teilentladungsmessungen, Verlustfaktormessungen
- Ziel der Untersuchungen ist: Beurteilung der dielektrischen Beanspruchung bzw. Alterung des Isoliersystems



# Prüfungen an einer Strombegrenzungsspule

- Funkstörspannungsmessung gemäß ANSI C57.16/9.3.5
- Schaltstoßspannungsprüfung gemäß IEC 60076-6/8.9.16
- Wechselspannungsprüfung gemäß IEC 60076 -6/8.9.8



# Beurteilung von Baueinsatzkabeln 110kV / 220kV

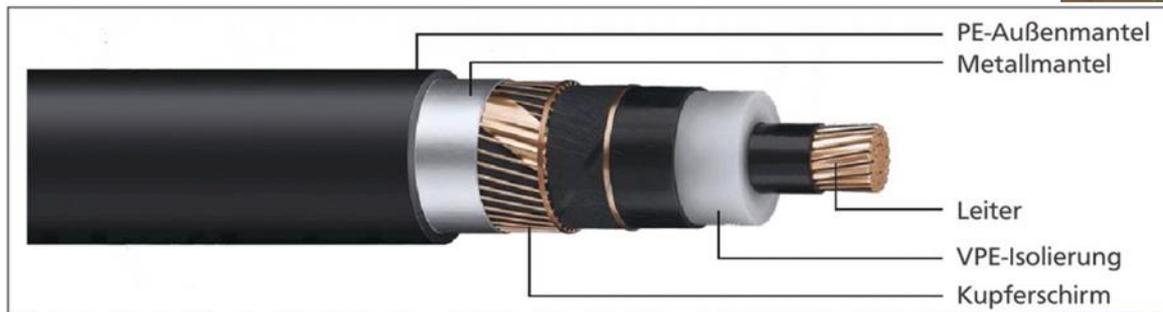
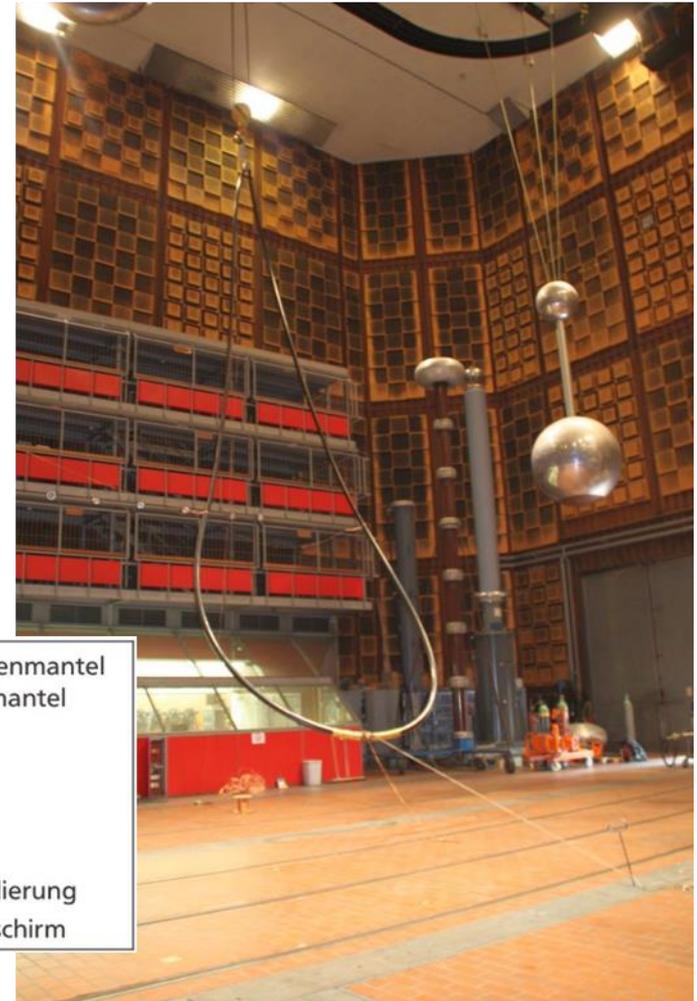
	Zustand „A“	Zustand „B“
<b><u>Kriterien für Prüfung</u></b>	TE < 100 pC (bei 110 kV)	TE 100 – 300 pC (bei 110 kV)
<b>Externe Prüfungen nach Einsatzdauer</b>	> 8000 Stunden (ca. 1 Jahr)	> 4000 Stunden (ca. 6 Monate)
<b>Externe Prüfung nach Manipulationen</b>	Nach 3 Einsätzen	Nach 2 Einsätzen
<b>Externe Prüfungen nach Langzeit</b>	Mindestens nach 5 Jahren	Mindestens nach 5 Jahren
<b>Interne Kontrolle jährlich</b>	ja	ja

# Beurteilung von Baueinsatzkabeln 110kV / 220kV



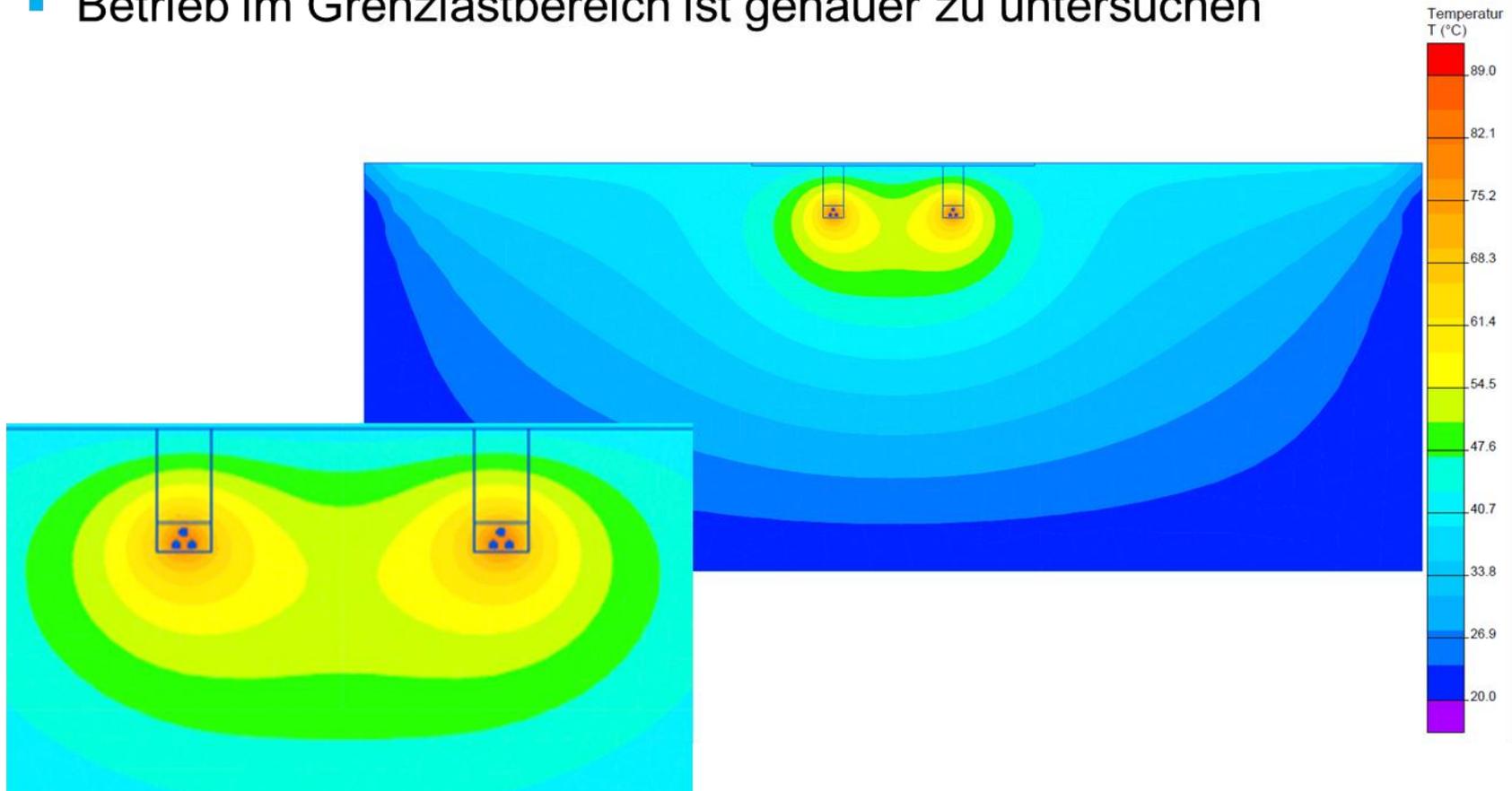
# Stoßspannungsfestigkeit des Mantels 110-kV-VPE-Kabel

- Prüfung im Anschluss an die Stoßspannungsprüfung des Kabels (Hauptisolation)
- Mantelprüfung bei ca. 500 kV
- Spannungsbeanspruchung des Kabelschirms gegen leitenden Kupferwickel in Kabelmitte



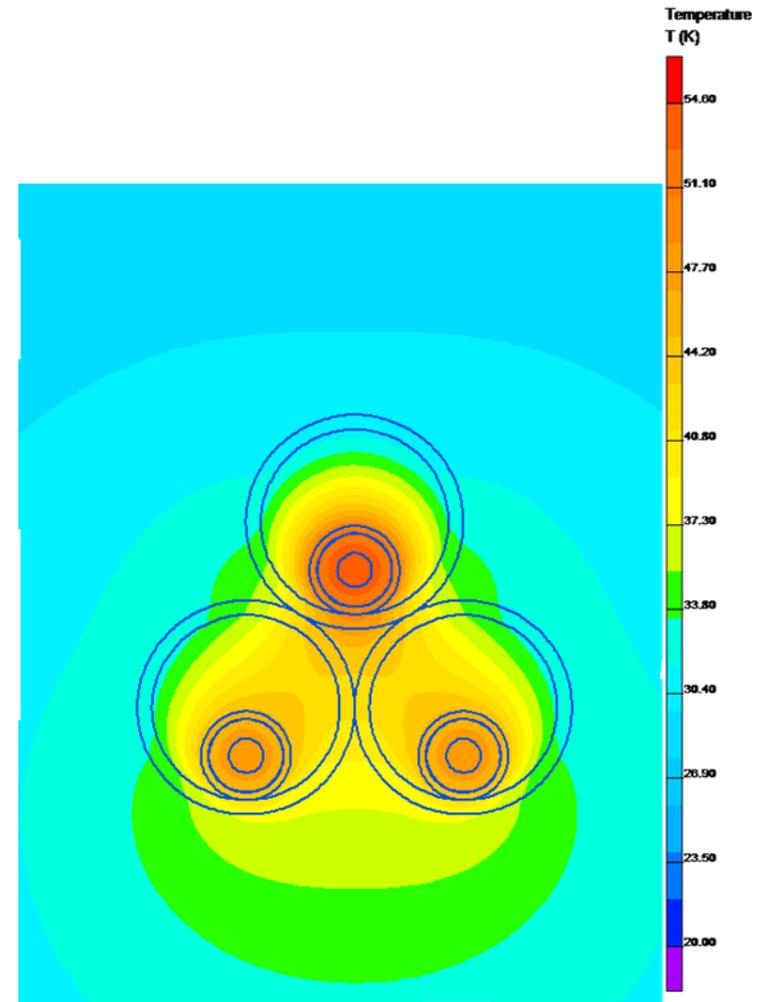
# Thermische Beeinflussung parallel verlegter Kabelsysteme

- Thermische Entkopplung parallel verlegter Kabelsysteme > 5m??
- Betrieb im Grenzlastbereich ist genauer zu untersuchen



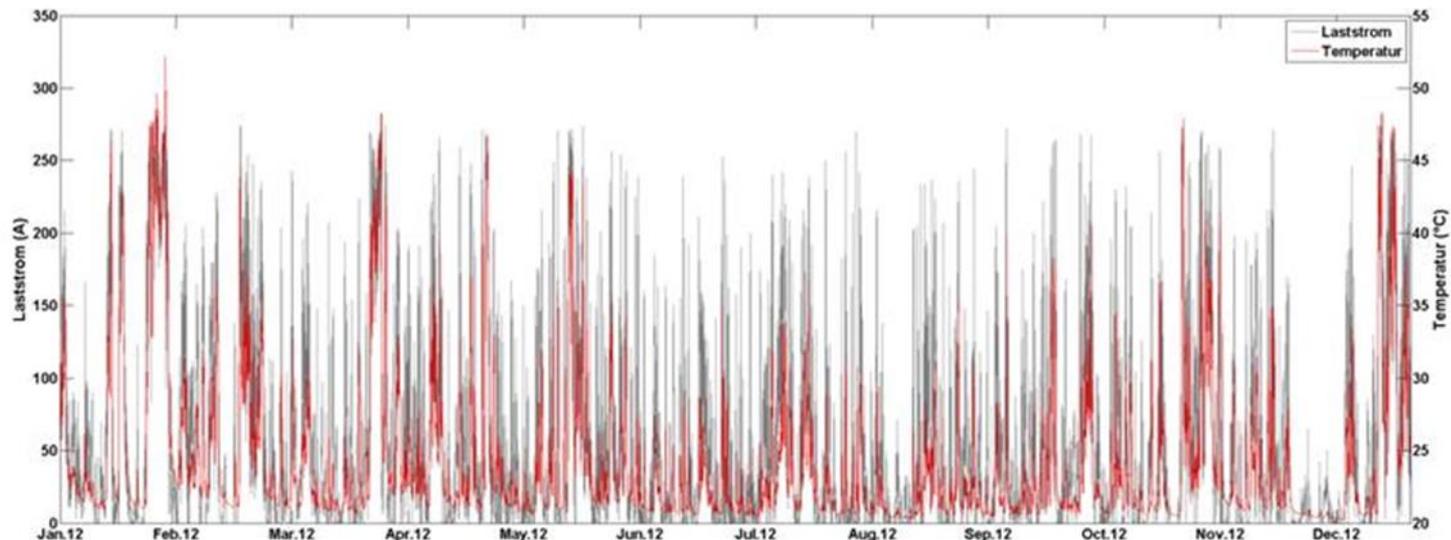
# Simulationen an Kabelanlagen mit FEM und Matlab

- Dynamischere Belastungszustände in Kabelanlagen verursacht durch die Dezentralisierung der Stromnetze
- Kabelgrenzbelastungen werden erreicht
- Finite Elemente Methode (FEM)
- Unterschiedliche Randbedingungen werden berücksichtigt (Bodenaustrocknung, Materialart)



# Simulationen an Kabelanlagen mit FEM und Matlab

- Komplexe Langzeitsimulationen an Kabelanlagen
- Simulationssoftware Matlab zur Variation der Inputparameter in Kombination mit dem FEM Server
- Ermittlung der elektrothermischen Reserven von Kabelanlagen
- Bild: Jahreslast- und Jahrestemperaturverlauf am Kabel einer Windanlage



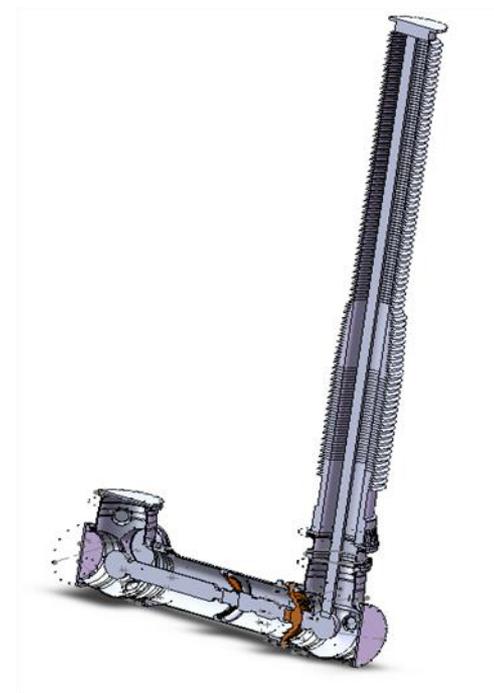
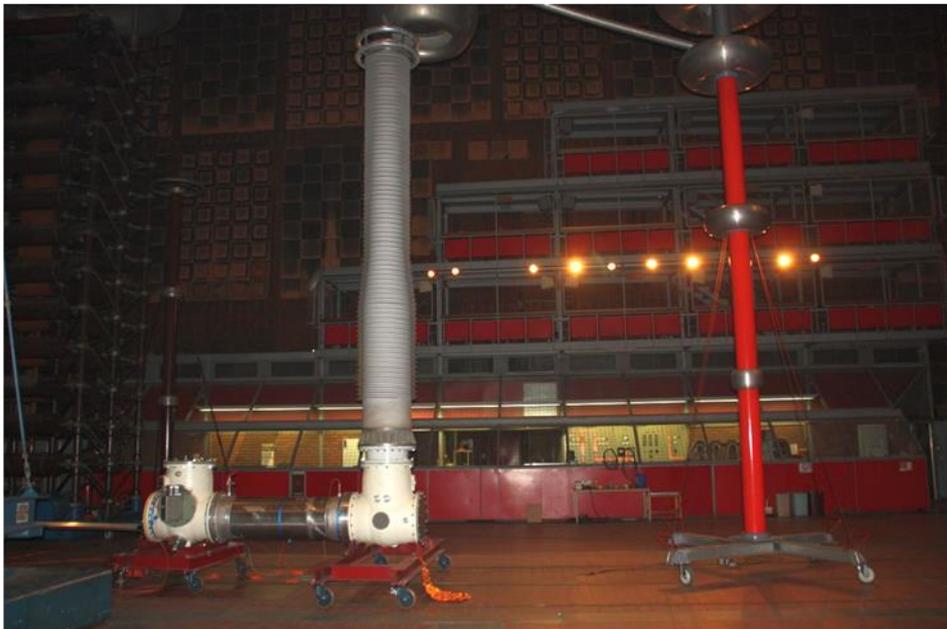
# Qualitätskontrolle an VPE-isolierten Hochspannungskabeln

- Prüfungsvorbereitung für den 110-kV-Stoßspannungstest
- Optische Begutachtung der Schirmdrähte



# Leitfähige Partikeln unter hoher Gleichspannung

- Gasisolierter Raum in einer gasisolierten Durchführung
- Regelbare Gleichspannungsversorgung bis ca. 500 kV
- Beobachtung der Partikelbewegung mittels Kamerasystem
- Teilentladungsmessung nach IEC 60270

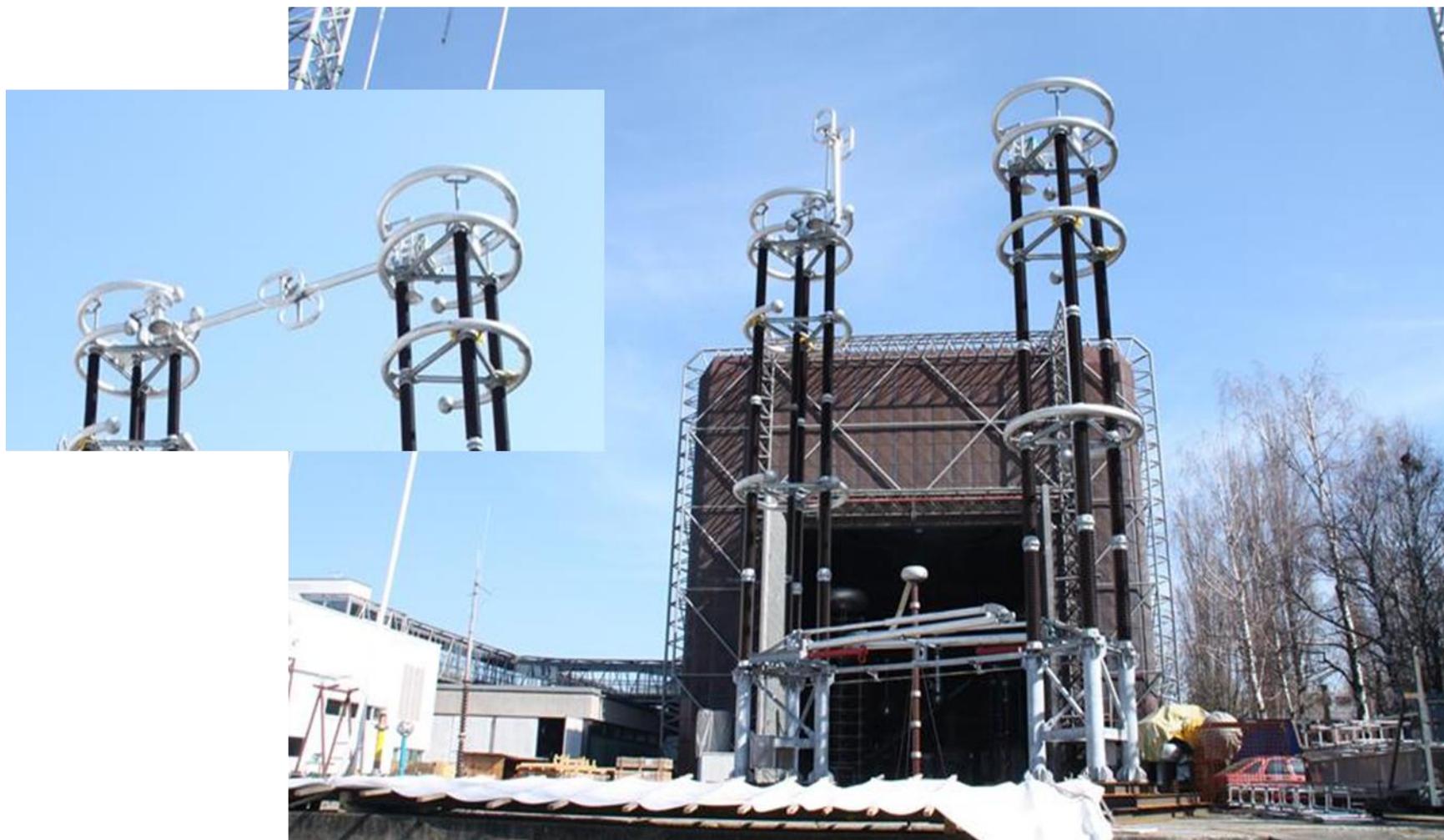


## 800 kV UHVDC Trennschalter für Indien

- Ultra-High-Voltage-DC (Hochspannungsgleichstromübertragungs-) Verbindung, Länge 1400 km
- Übertragungsleistung: 3000 MW
- Abnahmeprüfung Trennschalter (17m / 21m hoch)
- Gleichspannungsprüfung: +/- 1230 kV für 60 Minuten, trocken und beregnet
- Blitzstoßspannung: +/- 2248 kV
- Schaltstoßspannung: +/- 1752 kV, trocken und beregnet



# UHVDC Trennschalter für Indien



# Akustische Emissionen von Freileitungsseilen

- Leiterseile für Höchstspannungsanwendungen
- Vergleichende Untersuchungen von neuen und gealterten Seilen



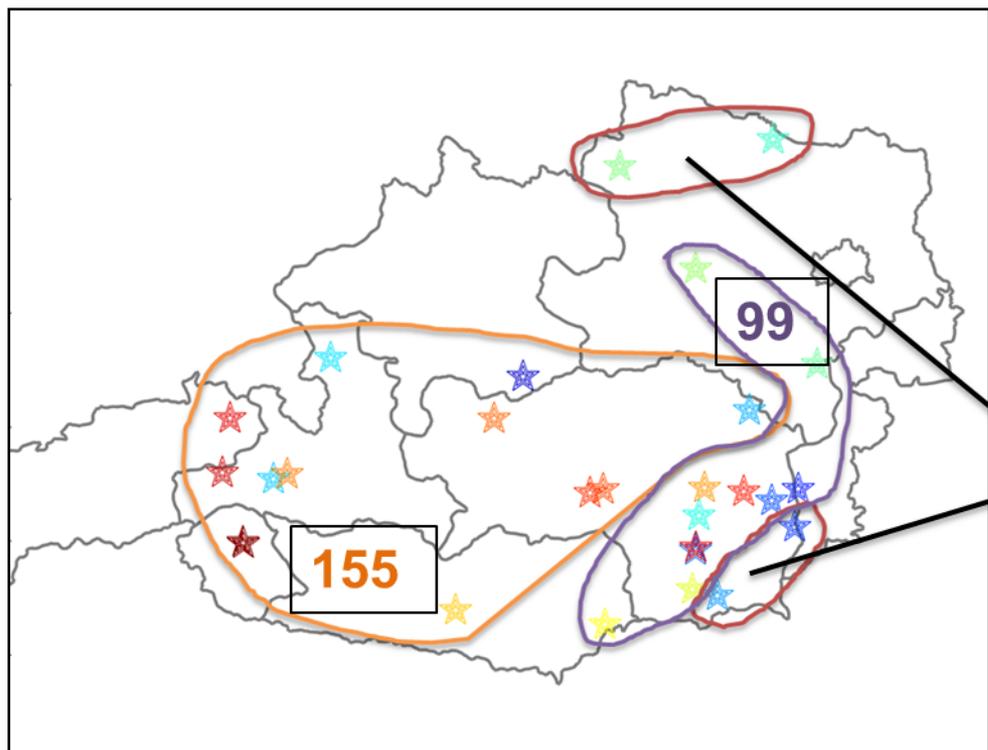
# Lightning Observation Project (LiOn) am Institut

- Cloud to Ground – Lightning (CG)
- Blitzforschung in alpinen Bereichen
- High Speed Video Kamera
- E-Feld Messung
- GPS Zeitsynchronisierung
- Mobile Energieversorgung



# Lightning Observation Project (LiOn) am Institut

- Beobachtungsorte in alpinen Bereichen
- Stand der Forschung



Messregion	Anzahl Videos
Inneralpin	155
Alpenvorland	99
Alpenrand	74
<b>Summe</b>	<b>328</b>

74

# Lightning Observation Project (LiOn) am Institut



- Loosdorf: 180°



- Gerlitzten: 180°



Dobratsch

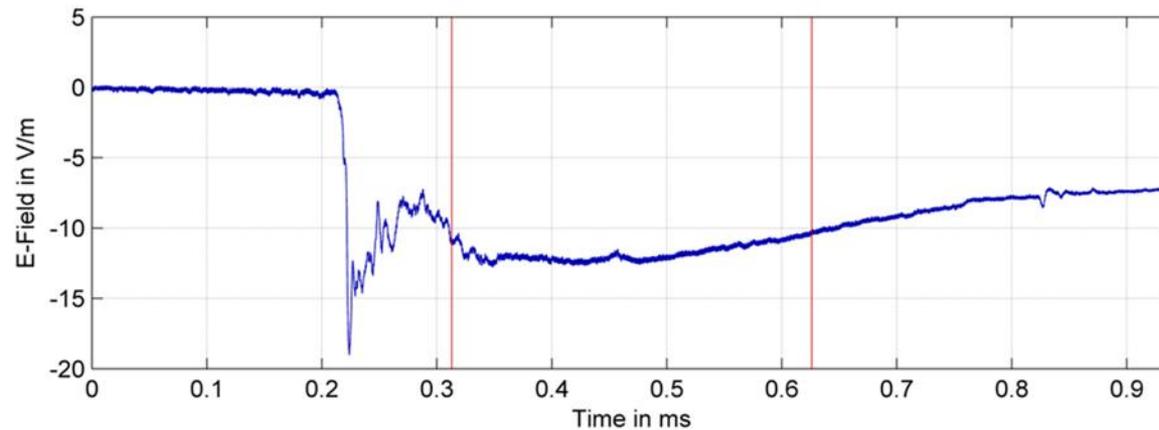
Spittal/Drau

Nockberge

Hohe Tauern

# Lightning Observation Project (LiOn) am Institut

- Erste Ergebnisse mit hoher Qualität



0 - 0.313 ms



0.313 - 0.626 ms

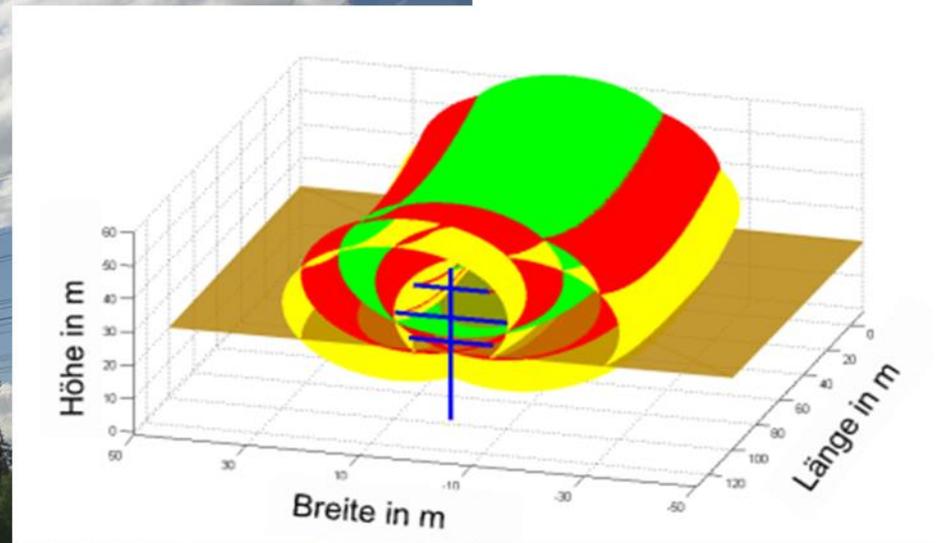
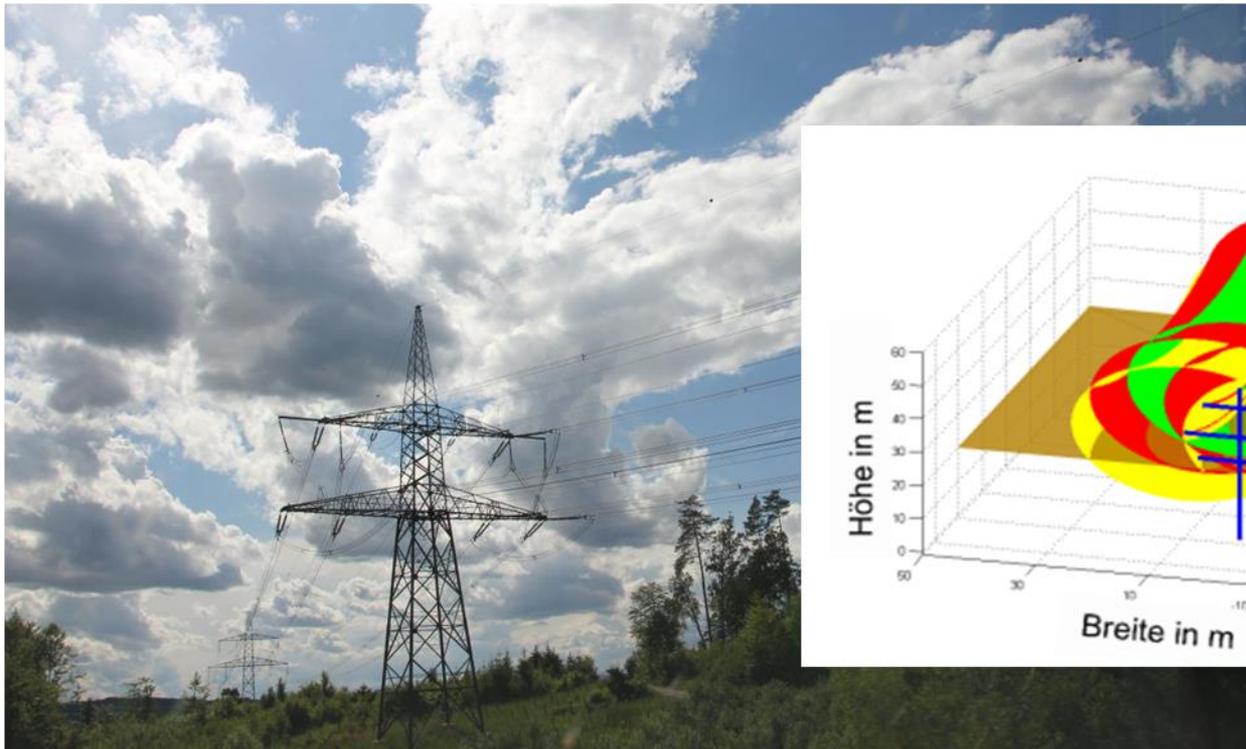


0.626 - 0.939 ms



# Hochspannungsfreileitungen - Blitzeinschläge

- Ausfallwahrscheinlichkeiten von Freileitungen
- Berechnungsmodelle mit dem elektro-geometrischen Modell
- 3D Wahrscheinlichkeitsbereiche im Leitungszug



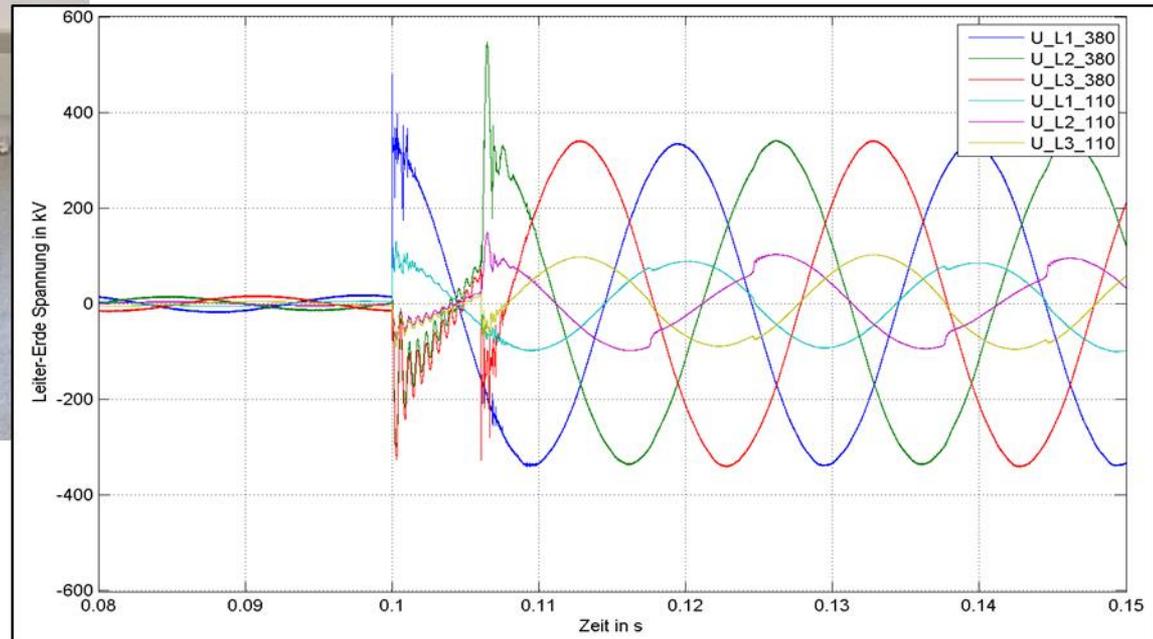
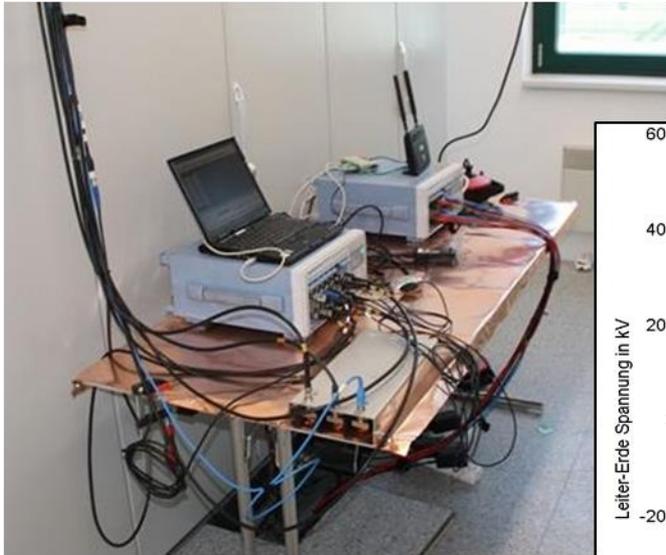
# Transiente Spannungen in Hochspannungssystemen

- Umspannwerke, Hochspannungsschaltanlagen
- Regelhauptumspanner (Transformator 400kV /110kV /30 kV)
- 400 kV ohmsch-kapazitive Spannungsteiler
- 110 kV ohmsch-kapazitive Spannungsteiler
- 30 kV kapazitive Spannungsteiler
- Digitale Messtechnik (Transientenrecorder, bis zu 24 Kanäle)
- Remote Control via LAN/GSM



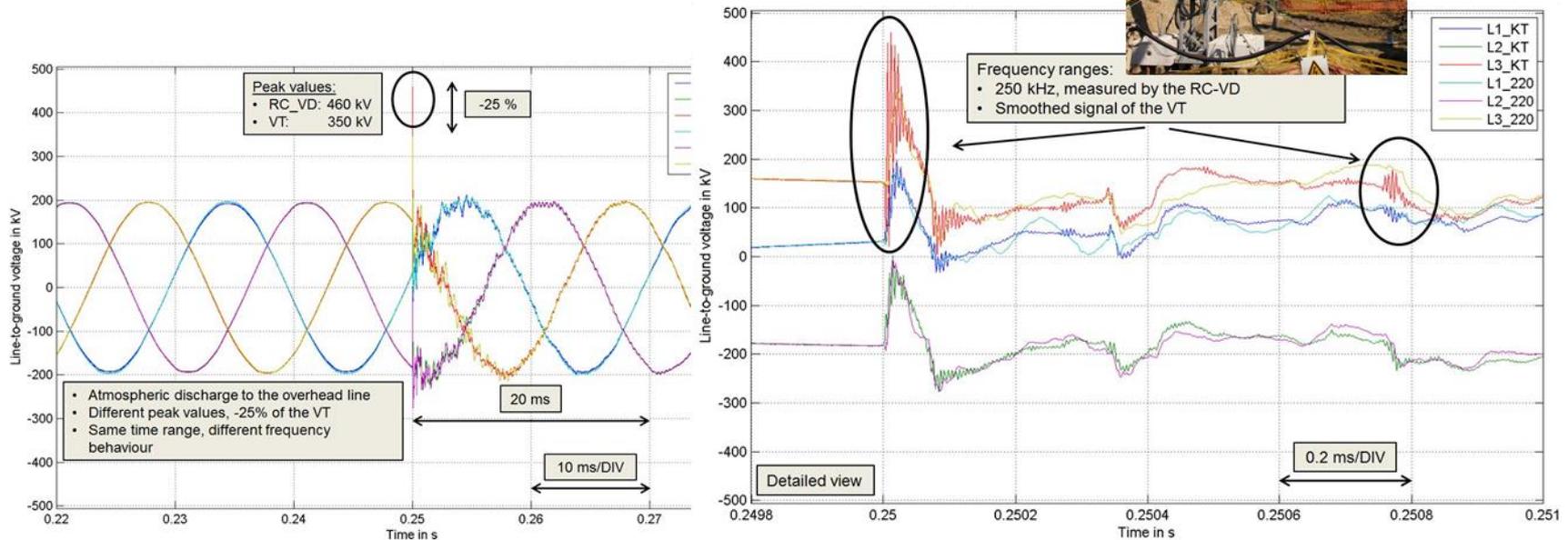
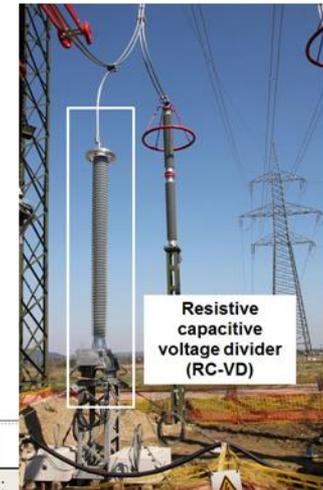
# Transiente Spannungen in Hochspannungssystemen

- Isolationskoordination in Hochspannungssystemen
- Untersuchung des transienten Verhaltens im Gesamtsystem
- Übertragungsnetz, Verteilnetz, Windparksanlagen, Photovoltaik



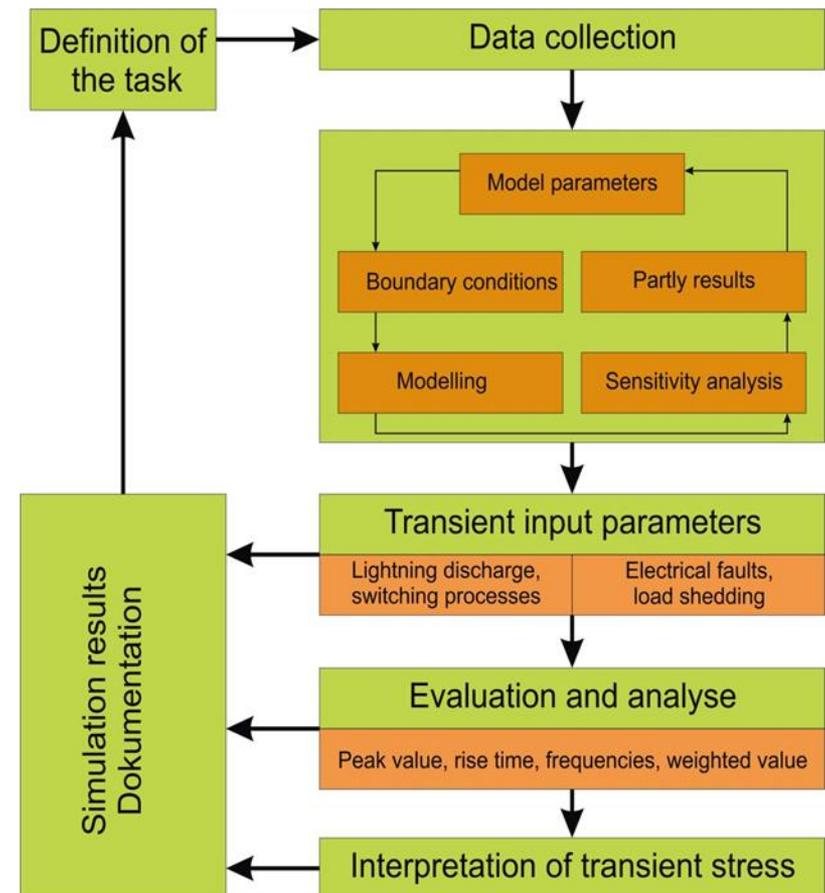
# Transiente Spannungen im 380 kV Ring Österreichs

- Bedeutung der Isolationskoordination
- Vergleich zw. Spannungswandlern und ohmsch-kapazitiven Teilern (Referenzteiler)
- Übertragungsnetz 380 kV / 220 kV
- 380 kV Ring im UW St. Peter



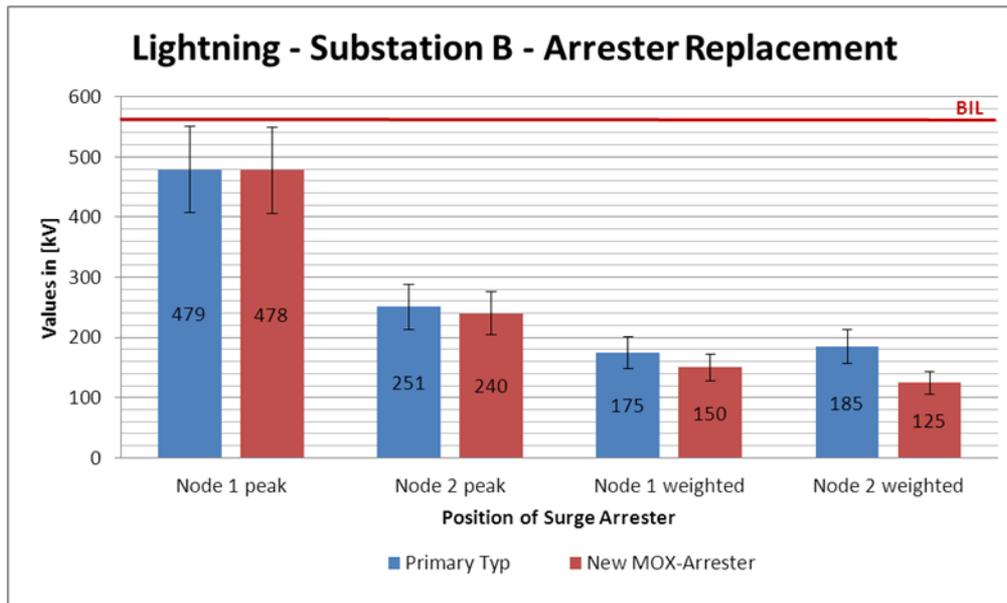
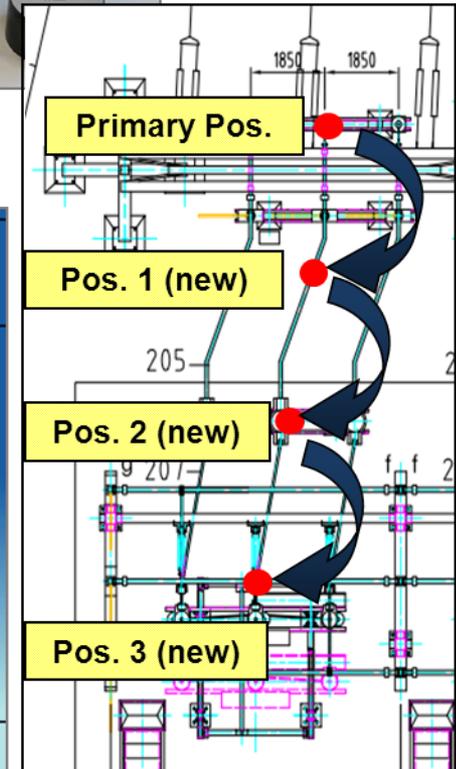
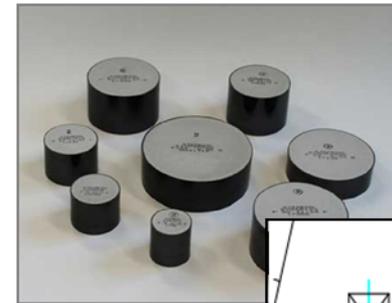
# Das Software Programm EMTP-RV

- Werkzeug zur numerischen Berechnung von Hochspannungssystemen, Hochspannungsanlagen, Freileitungs- Kabel- und GIL-Netzen
- Niederfrequente und transiente Vorgänge
- Nachbildung sämtlicher Systemkomponenten
- Bedeutung in der Isolationskoordination
- Studien und Untersuchungen



# Einsatzoptimierung - Überspannungsableiter

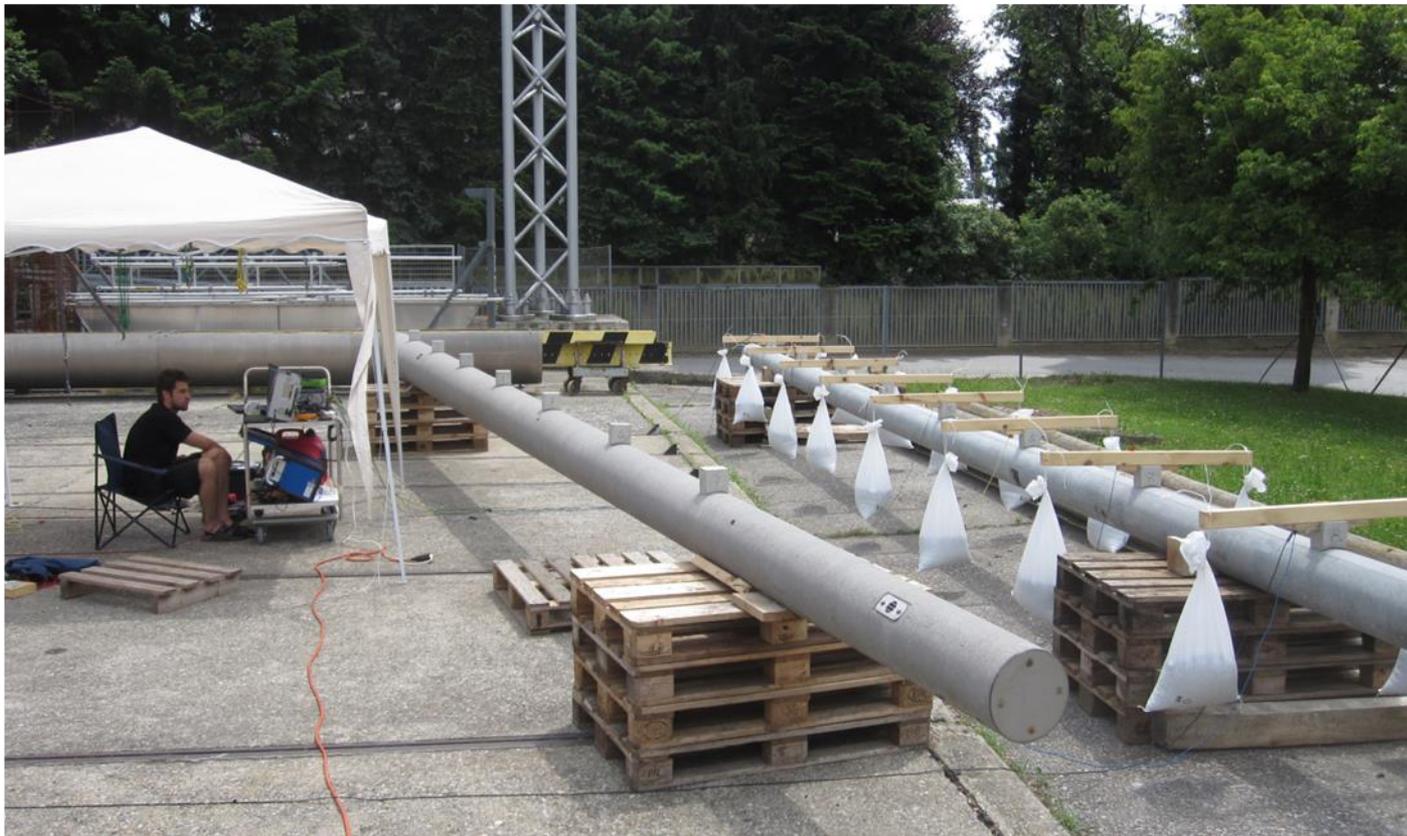
- Numerische Berechnungen im Rahmen der Isolationskoordination
- Standort- und Anzahloptimierung
- Transiente Beanspruchungen in Netzknoten



# Hochspannungsmaste – elektrischer Widerstand

in Zusammenarbeit mit IFEA (TU Graz)

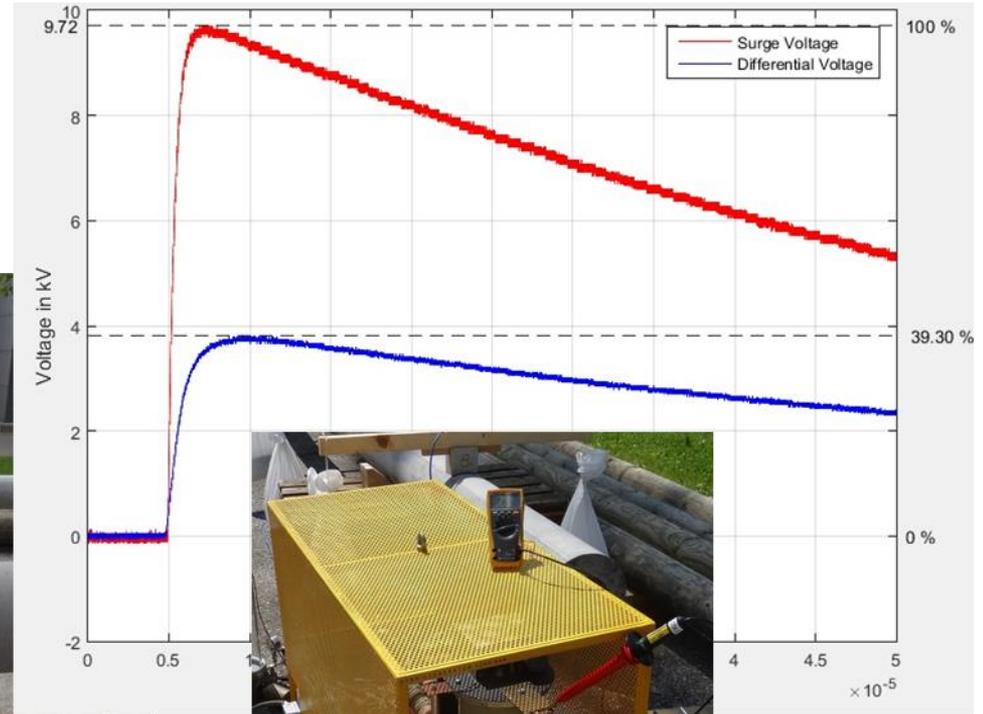
- Spannungsverteilung an der Mastoberfläche
- Berührungsspannungsthematik, Schrittspannungssituation



# Hochspannungsmaste – elektrischer Widerstand

in Zusammenarbeit mit IFEA (TU Graz)

- Oberflächenpotenziale
- 50 Hz Quelle
- Blitzstromquelle 8/20 us



# Hochspannungsanlagen – Gesamtkonzepte Erdung, Potenzialausgleich, Blitzschutz, EMV

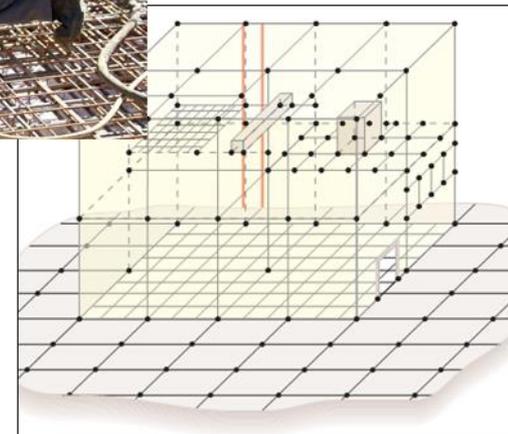
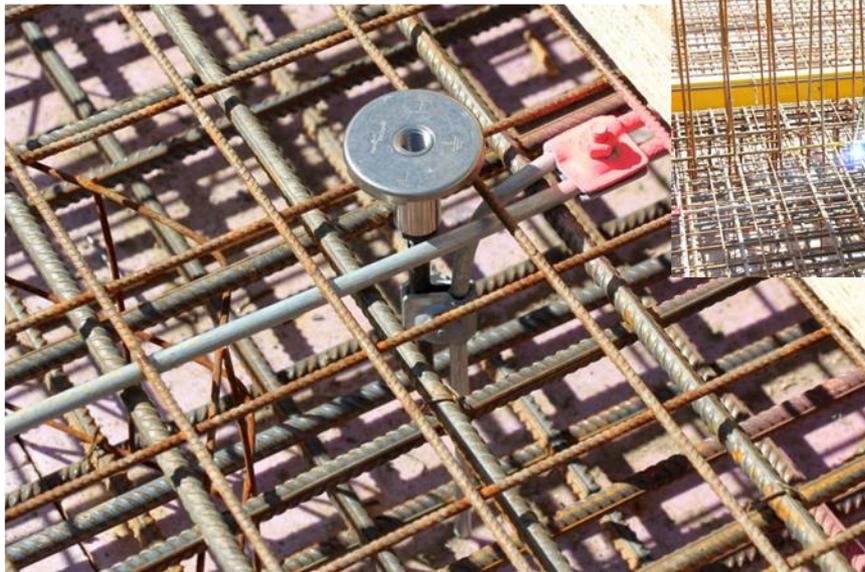
- Beispiel Kaprun 380 kV



- Anlagen der Zukunft
- Netzknoten Österreichs
- Steigende Leistungen

# Hochspannungsanlagen – Potenzialausgleichssystem

- Bedeutung für Sicherheit, Funktionalität, Schutz etc.
- Bedeutung Erdung, Blitzschutz
- Beherrschung von Fehlerströmen in Energiesystemen



# Hochspannungsanlagen – Erdung, Potenzialausgleich

- Bedeutung des Erdungssystems
- Hohe Vermaschung (5-10 m)
- Große richtig dimensionierte Querschnitte (2x / 4x 120 Cu)
- Beherrschung von Fehlerströmen in Energiesystemen (bis 65 kA)



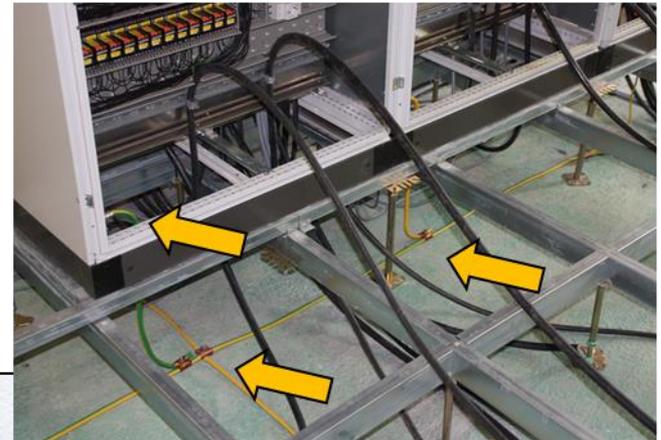
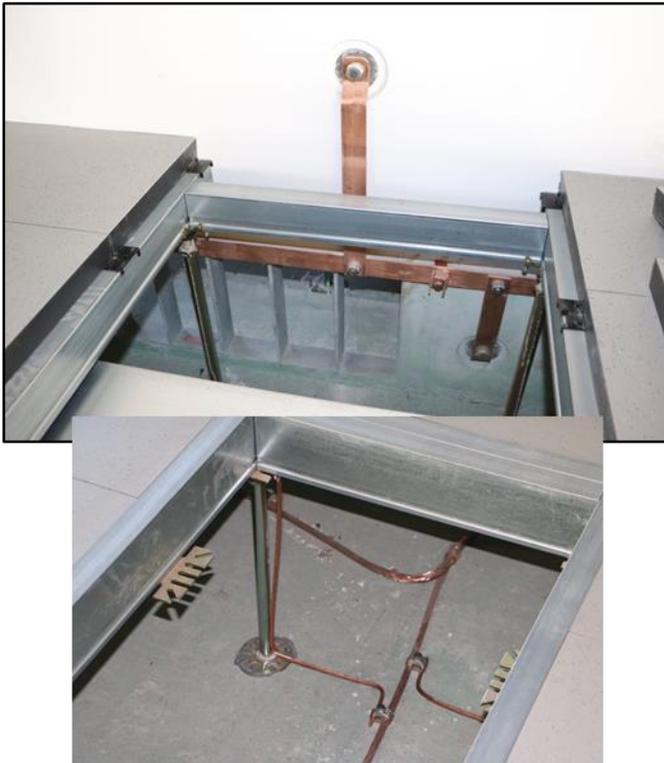
# Hochspannungsanlagen – Potenzialausgleich, EMV

- Bedeutung des Potenzialausgleichsystems
- Bedeutung eines Zonenkonzeptes und des Blitzschutzes
- Beherrschung von elektromagnetischen Feldern (50 Hz, kHz) durch Fehlerströme und durch Blitzströme in Leittechnikzentren



# Hochspannungsanlagen – Potenzialausgleich, EMV

- Potenzialausgleichssystem in Innenbereichen (Relaisraum, Warte, Leittechnik etc.)
- Bedeutung symmetrischer Strukturen



# Hochspannungsanlagen – Berühr- und Schrittspannungen

in Zusammenarbeit mit IFEA (TU Graz)

- Bedeutung des Personenschutzes (Mitarbeiter, Allgemeinbevölkerung)
- Bedeutung der Anlagensicherheit
- Beherrschung von Fehlerströmen und Blitzströmen



# Hochspannungssysteme

**Stephan Pack,**  
**Ao.-Univ.-Prof. Dr.techn. Dipl.-Ing. Dipl. Umwelttechniker**

*Technische Universität Graz / Graz University of Technology  
Institut für Hochspannungstechnik und System Management / Institute of High Voltage Engineering  
and System Performance  
Inffeldgasse 18  
A-8010 Graz  
[pack@tugraz.at](mailto:pack@tugraz.at)*