

# ZUSTANDBEWERTUNG ELEKTRISCHER BETRIEBSMITTEL ALS BASIS FÜR EINE SICHERE ENERGIEÜBERTRAGUNG

Alexander PIRKER, Uwe SCHICHLER

Technische Universität Graz, Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement,  
Inffeldgasse 18, A-8010 Graz, Tel: +43 316 873 7415, alexander.pirker@tugraz.at,  
www.hspt.tugraz.at

**Kurzfassung:** Für das Assetmanagement von Betriebsmitteln der elektrischen Energieversorgung ist der aktuelle Zustand bzgl. Alterung, Restlebensdauer und Ausfallwahrscheinlichkeit von hoher Bedeutung, um die erforderlichen Wartungsmaßnahmen und Ersatzinvestitionen unabhängig vom Alter der Geräte und Komponenten zu planen und festzulegen. Der aus wirtschaftlichen Gründen vorteilhafte Wandel von ereignis- bzw. zeitbasierten Wartungsmaßnahmen in Richtung zustandsorientierter Wartung erfordert eine Zustandsbewertung der elektrischen Betriebsmittel. Dabei sind die eingesetzten Mess- und Diagnoseverfahren in Abhängigkeit der in den Betriebsmitteln verwendeten Isoliersysteme bzw. der eingesetzten Komponenten auszuwählen. Eine Aufwand/Nutzen-Bewertung der Zustandsbewertung sollte durch die Analyse des tatsächlichen Störungsgeschehens erfolgen. Für HGÜ-Betriebsmittel kann auf bekannte Verfahren zur Zustandsbewertung zurückgegriffen werden und es ist eine fundierte Basis an Erfahrungen vorhanden.

Die im zukünftigen europäischen Supergrid (Hybrid-Netz bestehend aus HDÜ und HGÜ) eingesetzten HGÜ-Betriebsmittel stellen neue Herausforderungen an die Zustandsbewertung der Betriebsmittel. Die Gleichspannungs- bzw. Mischfeldbeanspruchung der Isoliersysteme führt teilweise zu Phänomenen, die bei einem Einsatz unter Wechselspannung nicht auftreten. Die für HDÜ-Betriebsmittel bekannten und bewährten Diagnoseverfahren der Hochspannungstechnik müssen daher auf ihre Anwendbarkeit und Aussagekraft hin überprüft werden. Insbesondere die Teilentladungsmessung bei Gleichspannungsbeanspruchung ist derzeit Gegenstand der aktuellen Forschung im Hinblick auf den verstärkten Einsatz von HGÜ-Transformatoren, DC-Kabeln und gasisolierten DC-Systemen (HVDC GIS/GIL) im zukünftigen Hybrid-Netz.

**Keywords:** HDÜ- und HGÜ-Betriebsmittel, Zustandsbewertung, Teilentladungsd Diagnose

## 1 Einleitung

Die Energieübertragung in Europa basiert aktuell fast ausschließlich auf dem 220-kV- und 380-kV-Drehstrom-Höchstspannungsnetz. Für die Betriebssicherheit dieser Netze und besonders auch für das Assetmanagement von Betriebsmitteln ist der aktuelle Zustand der im Netz vorhandenen Transformatoren, Freileitungen, Kabel, Schaltanlagen usw. von großer Bedeutung. Kenntnisse über die Alterung, Restlebensdauer und Ausfallwahrscheinlichkeit dieser Betriebsmittel sind unumgänglich, um die geeigneten Instandhaltungsstrategien auszuwählen und anzuwenden. Um das technische Ziel der Instandhaltung bzw. den Austausch eines Betriebsmittels vor dem Eintritt eines folgenschweren Schadens mit dem wirtschaftlichen Ziel, das Betriebsmittel nicht vor dem Ablauf der technisch möglichen

Lebensdauer zu vereinen treten die ereignisbasierte Strategie (Corrective Based Maintenance – CM) und zeitbasierte Strategie (Time Based Maintenance – TBM) zur Instandhaltung bzw. Wartung in den Hintergrund und die zustandsorientierte Strategie (Condition Based Maintenance – CBM) gewinnt immer mehr an Bedeutung (Bild 1). Hierbei ist die Kenntnis über den möglichst genauen aktuellen Zustand der Betriebsmittel notwendig.



Erfordert Kenntnis über den Zustand der Betriebsmittel  
→ Zustandsbewertung, Monitoring

**Bild 1: Wechsel der ereignis- bzw. zeitbasierten Wartung zur zustandsorientierten Wartung**

Bei der ereignisbasierten Strategie (Bild 2a) werden erst nach dem Auftreten eines Ereignisses Reparaturmaßnahmen gesetzt oder die betroffene Komponente ausgetauscht. Auf Grund der schlecht vorhersehbaren Ausfallzeiten, der sehr langen Instandsetzungszeiträume und den hohen Anforderungen an die Unterbrechungsfreiheit wird diese Strategie im Hochspannungsnetz üblicherweise nicht mehr angewandt.

Die zeitorientierte Instandhaltung (Bild 2b) zeichnet sich durch feste Wartungs- und Instandsetzungsintervalle aus. Hierbei werden die Betriebsmittel auch vorbeugend, unabhängig von deren aktuellen Zustand instand gehalten. Die Kenntnis der optimalen Instandhaltungsintervalle ist hier für den möglichst wirtschaftlichen und technischen Ablauf von großer Bedeutung. Diese Informationen können aus den eigenen Betriebserfahrungen, den Erfahrungen von anderen Netzbetreibern oder dem Hersteller sowie aus Ausfallstatistiken ermittelt werden. Verfügbare weltweite Umfragen und Auswertungen zu Ausfallraten von Betriebsmitteln sind hier grundsätzlich hilfreich für die Entscheidungsprozesse im Assetmanagement, wobei jedoch die Zulässigkeit der Übertragung weltweiter globaler Ergebnisse und Analysen auf die eigenen Betriebsmittel unbedingt zu überprüfen ist [1]. Andernfalls werden eventuell kostenintensive Maßnahmen durchgeführt, die aus technischer Sicht nicht zu begründen sind.

Da die Instandhaltungszyklen aber nicht dem tatsächlichen Zustand der Betriebsmittel angepasst sind und die Betriebsmittel nach vorgegebener Zeit ausgetauscht und nicht bis zum Ende der tatsächlichen Lebensdauer betrieben werden, ist auch diese Strategie wirtschaftlich nicht optimal.

Dieser Widerspruch am Kosten-/Nutzen Aufwand kann durch die zustandsorientierte Instandhaltung gelöst werden (Bild 2c). Hier wird im Rahmen der Inspektion der technische Zustand der Betriebsmittel beurteilt und gegebenenfalls die erforderlichen Instandhaltungsmaßnahmen abgeleitet. Die Betriebserfahrung und das technische Know-how sind für die möglichst genaue Beurteilung ein maßgebender Faktor. Bei der Bestimmung des Anlagenzustands mit der technischen Diagnostik werden anhand signifikanter Diagnosegrößen beim Erreichen eines festgelegten Grenzwertes (IH-Grenze in Bild 2c) Instandhaltungsmaßnahmen durchgeführt. Für die Festlegung des Grenzwertes ist die Kenntnis und die Modellierung der zur Zustandsbewertung erforderlichen physikalischen Alterungsmechanismen der elektrischen Betriebsmittel bzw. deren Isoliersysteme notwendig.

Die zustandsorientierte Instandhaltung ermöglicht unter diesen Voraussetzungen eine optimale Ausnutzung der technischen Lebensdauer mit einer maximalen Verfügbarkeit der Betriebsmittel.

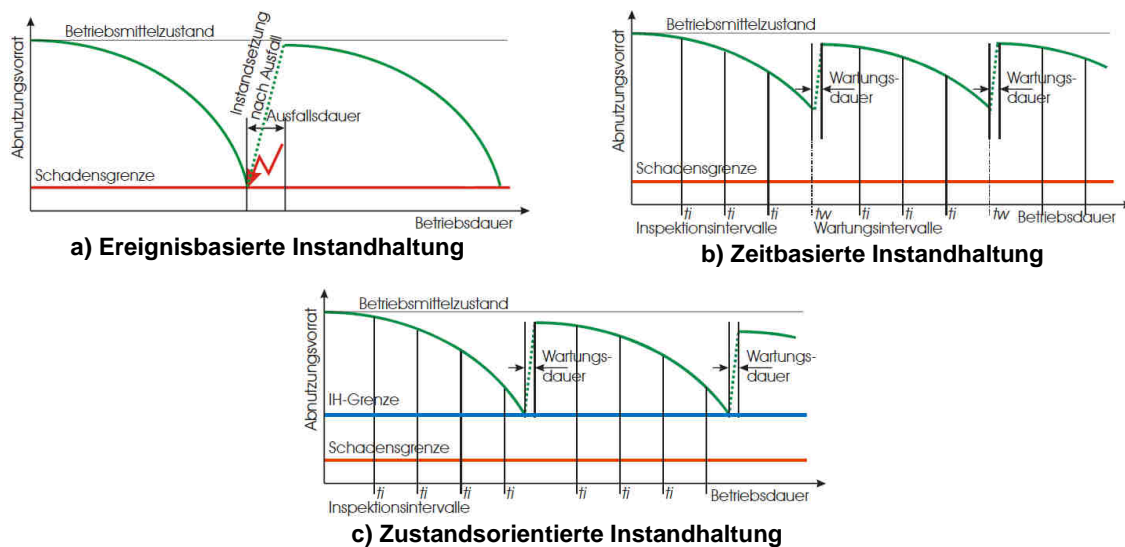


Bild 2: Strategien zur Instandhaltung von Betriebsmitteln [2]

## 2 Aktuelle Verfahren zur Zustandsbewertung von HDÜ-Betriebsmitteln

Die physikalischen Alterungsmechanismen der in den HDÜ-Betriebsmitteln zum Einsatz kommenden Isoliersysteme sind unter Beanspruchung mit Wechselfeldern gut bekannt und einige sehr ausgereifte Verfahren zur Zustandsbewertung, die auf eine fundierte Basis an Erfahrungen zurückgreifen können, stehen zur Verfügung. Die eingesetzten Mess- und Diagnoseverfahren sind hierbei in Abhängigkeit der in den Betriebsmitteln verwendeten Isoliersysteme bzw. der eingesetzten Komponenten auszuwählen. Es stehen hier folgende Verfahren zur Zustandsbewertung zur Verfügung:

- Thermische Diagnostik
- Chemische Diagnostik
- Mechanische Diagnostik
- Dielektrische Diagnostik
- Durchschlagsdiagnostik
- Teilentladungsdiagnostik

Mit den ausgewählten Diagnoseverfahren ist es möglich bei der Produktion, beim Transport oder bei der Montage entstandene Fehler im Zuge der Qualitätssicherung zu erkennen und zu beseitigen. Eventuell im Betrieb entstehende Defekte können mit unterschiedlichen Monitoringsystemen frühzeitig detektiert werden.

Im folgenden Punkt wird anhand eines Beispiels einer gasisolierten Schaltanlage genauer auf die Teilentladungsmessung bzw. ein Teilentladungsmonitoringsystem eingegangen.

### Beispiel: Teilentladungsdiagnose an gasisolierten Schaltanlagen

Die weltweiten Erfahrungen mit gasisolierten Hochspannungsschaltanlagen (GIS) zeigen eine hohe Betriebssicherheit und Verfügbarkeit in Verbindung mit einer geringen Fehlerhäufigkeit. Zahlreiche Anlagen haben bereits eine Lebensdauer von mehr als 45 Jahren ohne Zunahme der Fehlerhäufigkeit erreicht. Für das Assetmanagement von GIS ist insbesondere der aktuelle Zustand des Isoliersystems von Bedeutung. Verschiedene Teilentladungs-Messverfahren können für die erforderlichen Diagnosemessungen eingesetzt werden und die UHF-Methode hat sich für ein kontinuierliches Monitoring im Betrieb bewährt. Das Isolationssystem von GIS besteht aus der gasförmigen Isolierung, dem Feststoff der Gießharzdurchführungen bzw. -stützer und der Grenzfläche Isoliergas/Feststoff. Unzulässige Defekte im Isoliersystem wie Hohlräume in Isolatoren, Spitzen am Innenleiter bzw. Gehäuse und elektrisch nicht korrekt kontaktierte Elektroden oder Verunreinigungen durch metallische Partikel können im Rahmen der herstellerseitigen Qualitätssicherung durch empfindliche Teilentladungsmessungen erkannt und beseitigt werden.

Die Teilentladungen dieser typischen Defekte erzeugen bei Wechselspannung in Bezug auf die Phasenlage zur Spannung charakteristische Muster (PRPD-Pattern), welche eine eindeutige Zuordnung der Messdaten zu den einzelnen Defekttypen erlauben. In Bild 3 sind hierfür Beispiele angeführt. Bei Korona-Entladungen (Spitze an Hochspannung) tritt das Maximum der Teilentladungsintensität beispielsweise im negativen Scheitel der Wechselspannung auf (Bild 3a). Bei höherer Spannung kommen Entladungen im positiven Scheitel der Wechselspannung hinzu. Metallische Teile auf freiem Potential verursachen regelmäßig wiederkehrende Entladungen mit gleichen zeitlichen Abständen die bereits im Nulldurchgang beginnen (Bild 3b). Mit steigender Spannung nimmt hier die Häufigkeit der Entladungen zu, jedoch bleibt die Amplitude konstant. Ein zwischen Hochspannungselektrode und geerdetem Gehäuse springendes Partikel ist durch ein

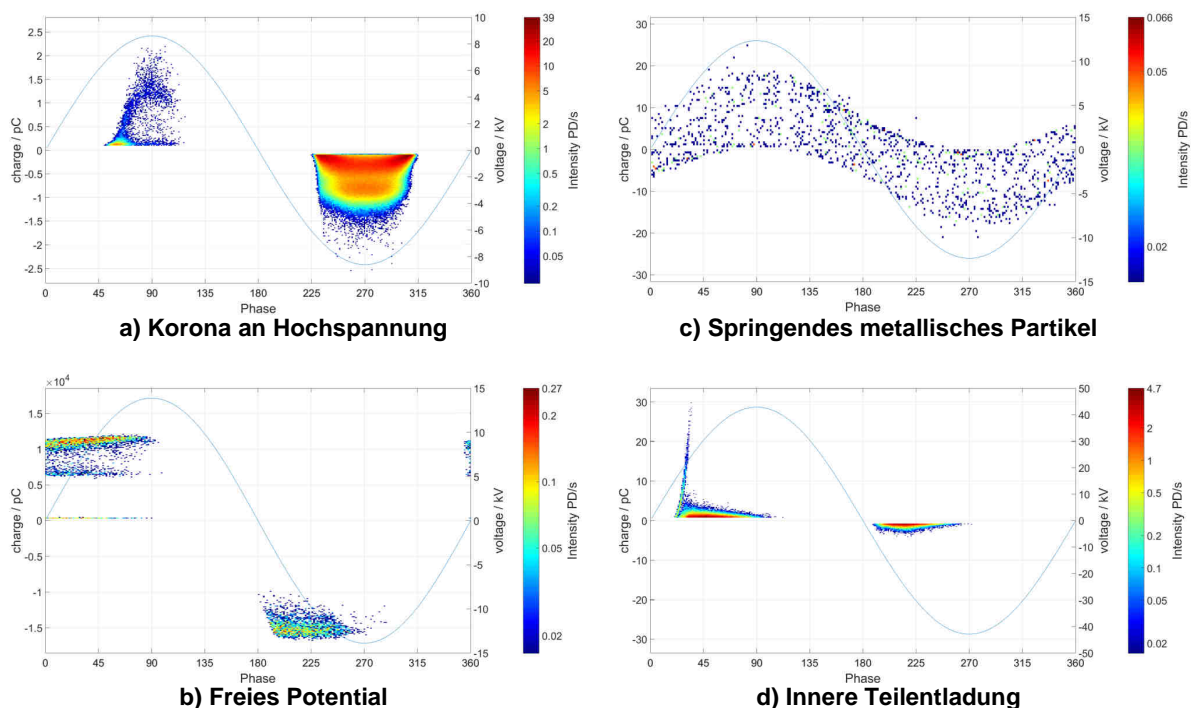


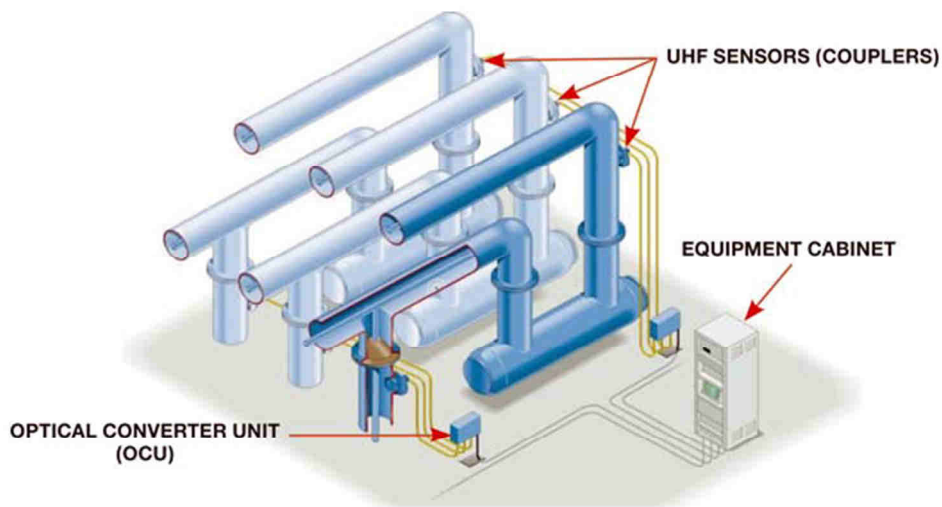
Bild 3: PRPD-Pattern typischer Defekte

Muster gemäß Bild 3c charakterisiert. Innere Teilentladungen (Hohlraum in einem Isolator), sind durch das sogenannte „rabbit like“ PRPD-Pattern gekennzeichnet (Bild 3d).

Mit Hilfe der synchronen Mehrkanal-Teilentladungs-Messung ist eine Separierung und Analyse von unterschiedlichen, sich überlagernden Teilentladungssignalen und Störquellen möglich.

Eventuell im Betrieb entstehende Defekte können mit Teilentladungsmonitoringsystemen detektiert werden. Bei gasisolierten Schaltanlagen wird hierbei der hochfrequente spektrale Anteil (UHF, Ultra Hochfrequenz) der Teilentladungsimpulse ausgenutzt. Dieser kann je nach Fehlerart bis in den Frequenzbereich von einigen GHz auftreten und wird bei UHF-Teilentladungsmonitoringsystemen mit entsprechenden Sensoren ausgekoppelt. Diese werden entweder direkt in die GIS integriert oder als sogenannte Window-Coupler an den Sichtfenstern der Anlage angebracht (Bild 4).

Die ausgekoppelten Signale werden von einer Empfangs- und Auswerteeinheit analysiert. Die weitgehend ungedämpften Übertragungswege in der GIS und die durch die gekapselte Ausführung mögliche breitbandige Auskopplung der Signale ermöglicht eine genaue Charakterisierung der Defekttypen. Bei der Verwendung von mehreren Sensoren ist durch die Laufzeitunterschiede der Teilentladungsimpulse eine Ortung der Teilentladungsquellen möglich. Geeignete Auswerteverfahren, um eine Risikoabschätzung für die Ausfallwahrscheinlichkeit zu ermöglichen, sind bereits in der Erprobung.



**Bild 4: UHF-Teilentladungsmonitoringsystem für GIS**

### 3 Zustandsbewertung von HGÜ-Betriebsmitteln in der Zukunft

Einige Szenarien für das Übertragungsnetz der Zukunft, beispielsweise das globale Gleichspannungs-Verbundnetz in Bild 5, aber auch die in Planung und Bau befindlichen Gleichspannungs-Übertragungstrassen in Deutschland zeigen den Weg zum Europäischen Super-Grid, einem Hybrid-Netz bestehend aus der konventionellen Hochspannungsdrehstrom- (HDÜ) und der Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ).

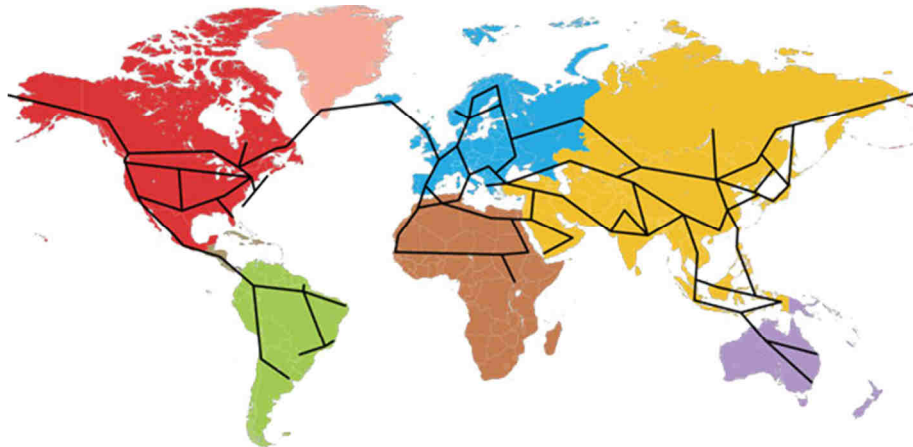


Bild 5: Szenario eines globalen Verbundnetzes [3]

Die große Anzahl der hier eingesetzten HGÜ-Betriebsmittel wie Stromrichtertransformatoren, Gleichspannungskabel, gasisolierte Übertragungsleitungen usw. stellen neue Herausforderungen an die Zustandsbewertung der Betriebsmittel. Die Gleichspannungs- bzw. Mischfeldbeanspruchung der Isoliersysteme führt teilweise zu Phänomenen, die bei einem Einsatz unter Wechselspannung nicht auftreten. Die für HDÜ-Betriebsmittel bekannten und bewährten Diagnoseverfahren der Hochspannungstechnik müssen daher auf ihre Anwendbarkeit und Aussagekraft überprüft werden. Insbesondere bei der Teilentladungsmessung bei Gleichspannung zeigen sich starke Unterschiede im Vergleich zur Wechselspannung.

#### Teilentladungsmessung und -bewertung bei Gleichspannung

Bei Gleichspannung ist es nicht möglich die unterschiedlichen Defekte wie bei der Wechselspannung gemäß ihrer Phasenlage zur Spannung zu charakterisieren (Bild 6). Die Parameter, die zur Bewertung und Analyse der Teilentladungen verwendet werden können, sind die Amplituden bzw. scheinbare Ladung  $q_i$  der einzelnen Impulse sowie die Zeit zwischen den Impulsen ( $\Delta t_i$ ).

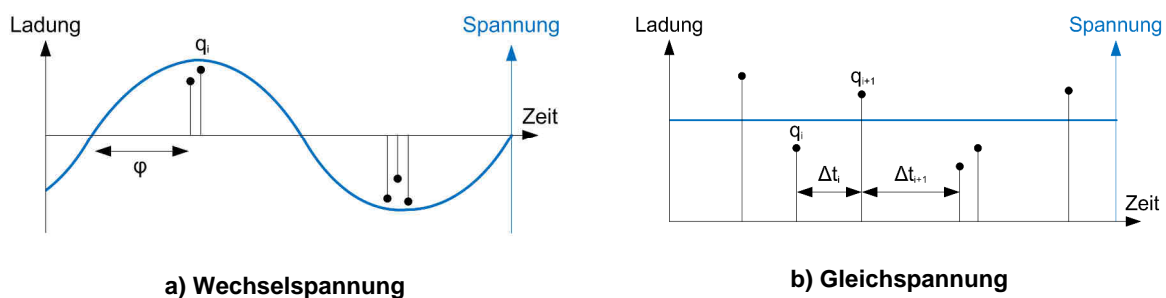


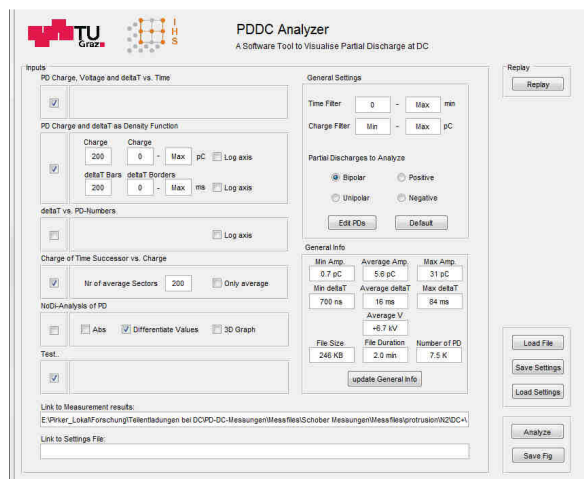
Bild 6: Parameter zur Charakterisierung der Teilentladungsimpulse

Am Institut für Hochspannungstechnik und Systemmanagement der Technischen Universität Graz werden verschiedene Testzellen (Bild 7) mit typischen Defekten wie z. B. einer Nadel-Platte-Anordnung, einem freiem Potential und einem springenden metallischen Partikel bei unterschiedlichen Umgebungsbedingungen wie Isolierstoff und Druck bezüglich ihres Teilentladungsverhaltens bei verschiedenen Gleichspannungsbeanspruchungen untersucht.



**Bild 7: Testzellen mit typischen Defekten (Nadel-Platte, freies Potential, springendes Partikel)**

Um eine Analyse und Bewertung dieser Ergebnisse zu ermöglichen und die in der Literatur vorhandenen Auswerteverfahren anzuwenden und weiterzuentwickeln wurde das Software-Tool „PDDC Analyzer“ an der TU Graz entwickelt (Bild 8). Dieses Tool ermöglicht eine grundlegende Verarbeitung und Darstellung der Messergebnisse von unterschiedlichsten TE-Messsystemen.

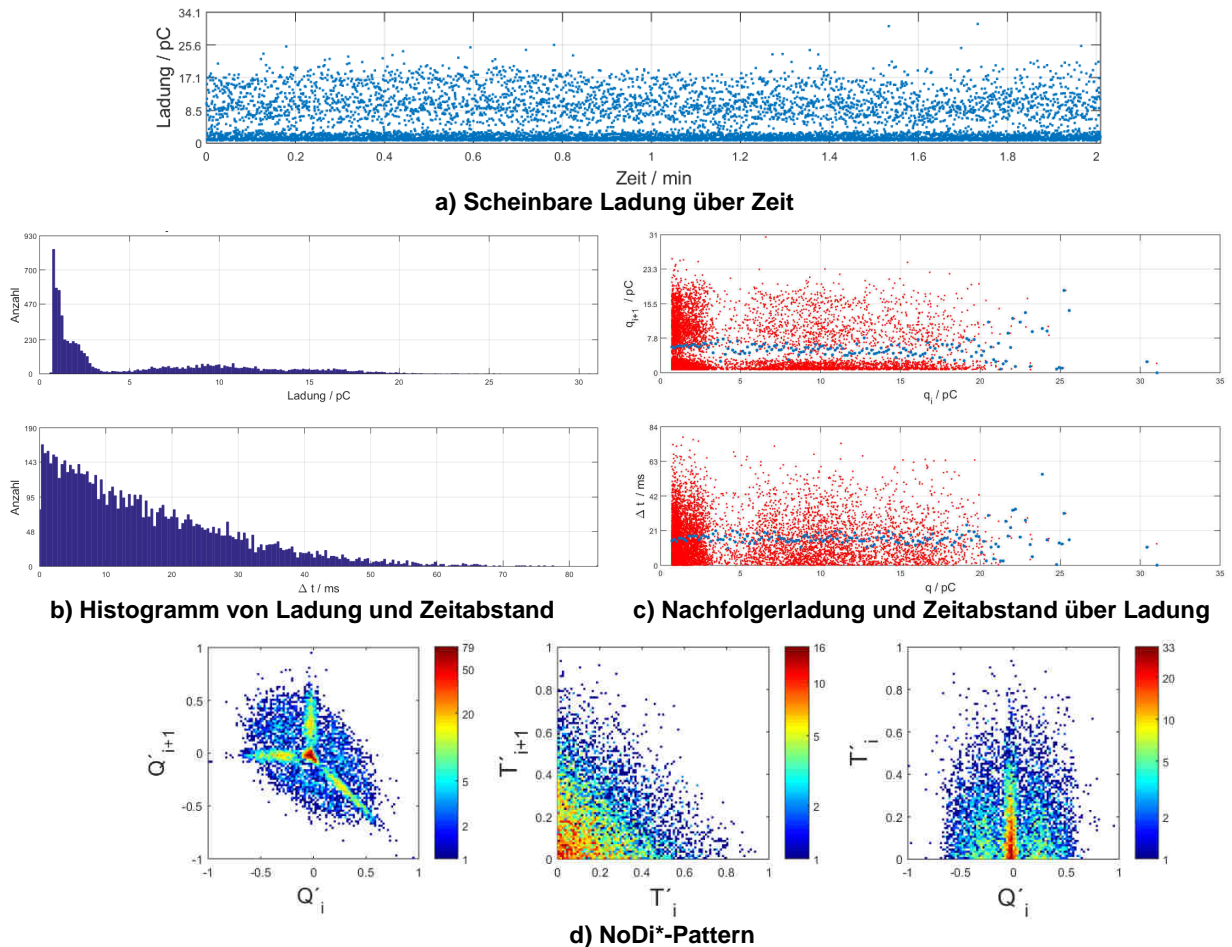


**Bild 8: User Interface des „PDDC Analyzer“**

Neben der klassischen Art der Darstellung der Impulse über der Zeit (Bild 9a) kann für die Auswertung eine Darstellung der Daten in einem Histogramm (Bild 9b) oder auch der Versuch, die Ladungsimpulse mit ihren Nachfolgerimpulsen gegenüberzustellen (Bild 9c), hilfreich sein [4]. In einem weiteren sehr aussichtsreichen Ansatz aus der wird versucht, die normierten und differenzierten Werte der Ladungshöhe  $Q'$  und dem Zeitabstand  $T'$  der aufeinanderfolgenden Impulse, in unterschiedlichen Varianten zu korrelieren [5 - 7]. Dieser Ansatz wurde zum NoDi\*-Pattern mit einer logarithmischen Darstellung und farblichen Skalierung der TE-Anzahl erweitert (Bild 9d).

Die Suche nach der optimalen Darstellungsart bzw. einem Verfahren zur Auswertung und Analyse sowie der große Einfluss der unterschiedlichen Umgebungsbedingungen wie Isolierstoff, Gasdruck, Polarität, Vorbelastung und auch die Geometrie auf die Teilentladungscharakteristik und die Raumladungerscheinungen der verschiedenen Defekte ist ein Thema der aktuellen Forschung im Hinblick auf den verstärkten Einsatz von HGÜ-Transformatoren, DC-Kabeln und gasisolierten DC-Systemen im zukünftigen europäischen Hybrid-Netz.





**Bild 9: Beispiele der Darstellungsarten der Teilentladungen bei Gleichspannung (Korona-Entladung bei Stickstoff:  $p = 5$  bar,  $U_{DC} = 1,2 \cdot U_{DC,EIN}$ )**

## 4 Zusammenfassung

Die hohen Anforderungen bezüglich der Ausfallsicherheit an das Übertragungsnetz verbunden mit der möglichst wirtschaftlichen Instandhaltung und Wartung der Netze erfordern den Wandel der ereignis- bzw. zeitbasierten Instandhaltungsstrategie zur zustandsorientierten Instandhaltungsstrategie. Diese Strategie macht jedoch eine möglichst genaue Kenntnis über den aktuellen Zustand der Betriebsmittel notwendig. Für HDÜ-Betriebsmittel sind einige Verfahren vorhanden, die sich für die Zustandsbewertung und frühzeitigen Erkennung von Fehlern bereits etabliert haben.

Das Übertragungsnetz der Zukunft stellt wegen der großen Anzahl an HGÜ-Betriebsmitteln neue Herausforderungen an die Zustandsbewertung der Betriebsmittel. Die bereits bekannten Verfahren müssen in Bezug auf ihrer Anwendbarkeit und Aussagekraft bei Gleichspannung überprüft und weiterentwickelt werden.

Im Besonderen bei der Teilentladungsmessung sind die herkömmlichen Diagnoseverfahren, welche eine Charakterisierung und Bewertung der Defekte bei Weichselspannung zulassen, auf Grund der fehlenden Information der Phasenlage der Teilentladungen nicht mehr möglich. Für Gleichspannung müssen hier neue Verfahren zur Bewertung und Analyse und neue Messmethoden entwickelt werden.



## 5 Literaturverzeichnis

- [1] Schichler, Neumann: Lifetime of GIS based on Analysis of Service Experience and Cigre Surveys, CIGRE SC A3/B3 Joint Colloquium, Bericht Nr. 1056, Nagoya, Japan, 2015
- [2] Sumereder: Analyse und Bewertung von Betriebsmitteln in der Hochspannungstechnik, Habilitations-Schrift, Technische Universität Graz, 2010
- [3] Gellings: Let's Build a Global Power Grid, IEEE Spectrum, Juli 2015
- [4] Fromm: Partial Discharge and Breakdown Testing at High DC Voltage, Dissertation, Delft University of Technology, 1995
- [5] Seo, Koo, Lee, Lee, Kim, Lee: Identification of Insulation Defects by modified Chaotic Analysis of Partial Discharge under DC Stress, CIGRE Session, Paris, Report D1-310, 2012
- [6] Schichler, Pirker: PD Measurement at DC Voltage on Typical Defects of GIS/GIL, CIGRE SC D1 Colloquium „Trends in Technology, Materials, Testing and Diagnostics applied to Electric Power Systems“, Bericht Nr. 20, Rio de Janeiro, Brasilien, 2015.
- [7] Schichler, Pirker: Partial Discharges at DC Voltage - Measurement and Pattern Recognition, International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Xi'an, China, Bericht Nr. 228, 2016.