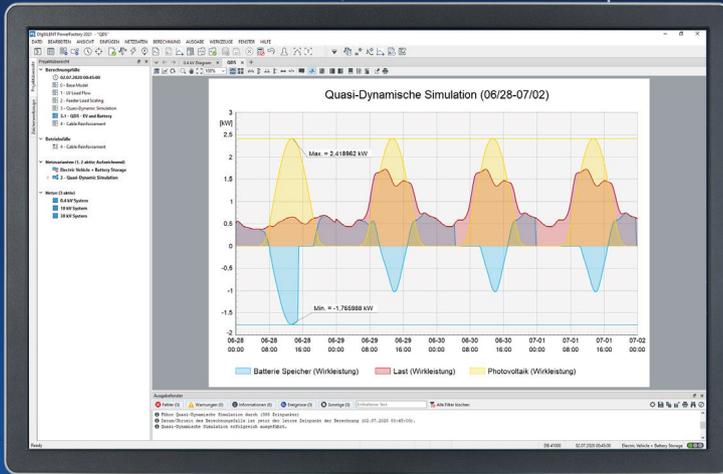


# Hochspannungstechnik 2020

Schlüsselkomponenten für die Energiewende





## POWERFACTORY

# SICHERN SIE SICH IHRE KOSTENLOSE POWERFACTORY 2021 TESTVERSION!

### AUSGEWÄHLTE NEUE FUNKTIONEN

- Fortlaufende Weiterentwicklung der Benutzeroberfläche: Bewegliche, unabhängige Grafik-Fenster mit dynamischer DPI-Skalierung, ermöglichen ein ergonomisches Arbeiten über mehrere Bildschirme hinweg
- Neugestaltung der Diagramme: Nachverfolgungs-Funktion zur Anzeige von Positionen für mehrere Kurven sowie vereinfachter Zugriff auf die Diagramm-Einstellungen
- Werkzeug für Verteilungsnetzbetreiber zur optimalen Positionierung von Betriebsmitteln
- Modul zur Wirtschaftlichkeitsberechnung mit Energie-Analyse-Funktion für Erzeugungsanlagen
- Weiterentwicklung des Kraftwerkseinsatzoptimierungs-Moduls
- Betriebsfall-Manager mit flexiblen Optionen zur Anzeige und Bearbeitung von Betriebsfalldaten
- Varianten-Manager ermöglicht die Anzeige von Netzwerkvarianten und Ausbaustufen als Gantt-Diagramm
- Zahlreiche verbesserte und erweiterte Betriebsmittelmodelle: z.B. Submodellkonzept für kundenspezifische DSL-Modelle, die in EMT-Simulationen eingesetzt werden und vieles mehr ...



Für weitere Informationen besuchen Sie:  
[www.digsilent.de/powerfactory](http://www.digsilent.de/powerfactory)  
In mehr als 150 Ländern tätig.

**POWER SYSTEM SOLUTIONS**  
MADE IN GERMANY

Liebe ETG Mitglieder,



wir freuen uns, Sie mit einer neuen Ausgabe unseres ETG *journals* über aktuelle Themen informieren zu können, und wünschen eine spannende Lektüre.

Zu „aktuellen Themen“ bleibt es leider nicht aus, auch wieder einige Worte über die immer noch andauernde COVID-19-Pandemie zu verlieren – und mit ihren weiterhin umfassenden Auswirkungen, auch auf die Arbeit der ETG. Nach wie vor, und voraussichtlich für weitere Monate auch im neuen Jahr 2021, ist die Durchführung von Präsenzterminen oder gar -veranstaltungen nicht möglich. Es gibt Verzögerungen und wirtschaftliche Herausforderungen an vielfältigen Stellen, aber: es gibt auch positive Entwicklungen!

Wie schon im Editorial des letzten ETG *journals* in Aussicht gestellt, hat sich in der Zwischenzeit in fast allen Gremien der ETG die digitale Zusammenarbeit sehr erfolgreich durchgesetzt. Natürlich hat sich niemand diese „Zwangs-Digitalisierung“ ausgesucht, und sobald möglich werden sicherlich auch wieder viele Präsenz-Sitzungen stattfinden. Bei allen Vorteilen von Online-Meetings ist es nämlich ganz klar, dass die persönliche Interaktion in Präsenz-Meetings, oder fast wichtiger, „neben“ den Meetings (z. B. in Pausen), ein bedeutender Punkt ist, der einfach nicht 1:1 ins Digitale übersetzt werden kann. Trotzdem wird es auch langfristig bei Mischformen bleiben, in Form von wechselnden Präsenz- und Online-Sitzungen und/oder von hybriden Sitzungen. Denn es hat sich eindrucksvoll gezeigt, dass die aktive Beteiligung an der Gremienarbeit über digitale Kommunikation vielfach einfacher für Sie, unsere Expertinnen und Experten, ist, als immer zu Präsenzterminen anzureisen. In vielen Bereichen hat es mehr und dafür zeitlich kürzere Termine gegeben als in „den alten Zeiten“ – und diese Vorteile gilt es zu bewahren.

Inhaltlich möchte ich kurz auf die laufende Task Force „Zukunftsbild Energie“ eingehen, die aus verschiedenen Blickrichtungen ein gemeinsames Bild eines zukünftigen, nachhaltigen und sektorenübergreifenden Energiesystems zeichnen wird. Mit zahlreichen Online-Meetings wurde die Arbeit konsequent vorangetrieben, so dass die Task Force planmäßig auf die Zielgerade zur Dokumentation der Ergebnisse einbiegen konnte. Und in Vorstand und wissenschaftlichem Beirat haben wir uns in den letzten Wochen intensiver mit dem Thema Wasserstoff auseinandergesetzt – aus Anlass der Veröffentlichung der europäischen und der deutschen Wasserstoff-Strategien, und aus der gemeinsamen Überzeugung heraus, dass Wasserstoff eine grundlegende Komponente der zukünftigen Energiesysteme sein wird. Von der Wasserstoffgewinnung z. B. unter Verwendung von erneuerbarem Strom, über den Transport und, wichtig, der Speicherung, bis hin zu den verschiedensten Anwendungsfällen als Rohstoff (Chemie) oder Energieträger in den Sektoren Verkehr, Wärme oder auch wieder Strom – das Spektrum ist enorm breit. Die ETG wird hier

technische und auch zugehörige wirtschaftliche und regulatorische Fragestellungen in der Gremienarbeit adressieren. Und nicht zuletzt zeigt sich, dass ein „Zukunftsbild Energie“ natürlich eine fortlaufende Aufgabe ist, in die wir kontinuierlich neue Erkenntnisse und Sichtweisen einbinden werden.

Die Veröffentlichung der Ergebnisse der Task Force „Zukunftsbild Energie“ ist ja auf dem kommenden ETG Kongress vorgesehen – und wir planen den ETG Kongress weiterhin als hybride Veranstaltung, auf der wir dann im Mai hoffentlich auch vor Ort in Wuppertal in geeignetem Rahmen und Umfang zusammenkommen können. In Verbindung mit einem entsprechenden Online-Angebot. Im Bereich der Veranstaltungen sind die Auswirkungen der COVID-19-Pandemie noch prägnanter als in der Gremienarbeit – auch wir mussten letztlich viele geplante Termine verschieben. Aber auch hier gibt es positive Beispiele, wie digitale Durchführungen die Kommunikation und auch die Diskussion technisch-wissenschaftlicher Ergebnisse ermöglichen – und die wir auch langfristig als zusätzliche Option für Veranstaltungsdurchführungen beibehalten werden.

Es freut uns übrigens sehr, dass der ETG-Kongress 2021 mit fast anderthalbmal so vielen Einreichungen gegenüber 2019 auf ein derart großes Interesse stößt – und das in der aktuellen Pandemie-Situation. Dies stimmt uns hoffnungsvoll, mit Ihnen zusammen eine hervorragende Veranstaltung zu erleben, in welcher Form auch immer!

*Ihr*

*Dr.-Ing. Michael Schwan*  
*ETG Vorsitzender*

	<u>Editorial</u>	3		
<b>T</b>	<b><u>TECHNIK UND TRENDS</u></b>	<b>6</b>	<b>ETG Literaturpreis</b>	<b>44</b>
<b>T1</b>	PD measurements on a DC gas-insulated transmission line (DC GIL) conducted in the frame of the Prototype Installation Test according to recommendation of CIGRE JWG D1/B3.57. . . . .	6	<u>Preisaufruf 2021</u> . . . . .	44
<b>T2</b>	Investigation of the gas-solid insulating system in DC GIS exposed to AC-DC mixed voltage for offshore bipole applications at ± 525 kV DC. . . . .	12	<b>Herbert-Kind-Preis</b>	<b>44</b>
<b>T3</b>	Partial discharges of artificial defects in cable joints under high DC voltage. . . . .	19	<u>Preisaufruf 2021</u> . . . . .	44
<b>T4</b>	Schließen einer großen Sicherheitslücke in der elektrischen Hausinstallation – Leuchtensteckdose für die Sicherheit . (zurückgezogen)		<b>ETG Veranstaltungen</b>	
			<u>Vorschau 2021</u> . . . . .	45
<b>E</b>	<b><u>ETG AKTUELL</u></b>	<b>31</b>	<b>E10</b>	<u>Einladung zur ETG Mitgliederversammlung am 19. Mai 2021 in Wuppertal</u> . . . . .
	<b>ETG FNN DVGW Koordinierungskreis Strom / Gas</b>			47
<b>E1</b>	<u>Resilienz der Strom- und Gasversorgungsnetze im Rahmen einer Gesamtsystembetrachtung</u> . . . . .	31	<b>Rückblick ETG Veranstaltungen</b>	
	<b>Aktuelles aus den Fachbereichen</b>		<b>E11</b>	<u>ETG Fachtagung eSTE 2020 Sternpunktbehandlung in Netzen bis 110 kV (D-A-CH), 22. September 2020, online</u> . . . . .
<b>E2</b>	<u>Bahnen mit elektrischen Antrieben</u> . . . . .	33		48
<b>E3</b>	<u>Wabenstruktur zur Elektromobilität (Teil 2)</u> . . . . .	34	<b>E12</b>	<u>ETG Fachtagung VDE Hochspannungstechnik 2020, 9.– 11. November 2020, online</u> . . . . .
<b>E4</b>	<u>Erzeugung und Speicherung elektrischer Energie</u> . . . . .	39		52
<b>E5</b>	<u>Energieübertragung und -verteilung</u> . . . . .	40	<b>E13</b>	<u>ETG Fachtagung Erzeugung und Speicherung elektrischer Energie, 20. Oktober 2020, online</u> . . . . .
<b>E6</b>	<u>Energiewirtschaft</u> . . . . .	41		55
<b>E7</b>	<u>Leistungselektronik und Systemintegration</u> . . . . .	42	<b>E14</b>	<u>ETG EFZN Fachtagung 6. Dialogplattform Power-to-Heat, 3. Dezember 2020, online</u> . . . . .
<b>E8</b>	<u>Werkstoffe, Isoliersysteme, Diagnostik</u> . . . . .	43		58
<b>E9</b>	<u>Kontaktverhalten und Schalten</u> . . . . .	43	<b>E15</b>	<u>CIPS 2020 – 11. Internationale Konferenz über Integrierte Leistungselektroniksysteme</u> . . . . .
				59

<p><b>I</b> <u>INTERNATIONALES</u> 60</p> <p><b>I1</b> Aktuelle Informationen aus CIGRE . . . . . 60</p> <p><b>I2</b> Aktuelle Informationen aus dem Deutschen Komitee der CIGRE . . . . . 61</p> <p><b>I3</b> 10 Jahre CIGRE/VDE Young EnergyNet . . . . . 62</p> <p><b>F</b> <u>FNN AKTUELL</u> 64</p> <p><b>F1</b> Aktuelles aus dem Forum Netztechnik/Netzbetrieb (VDE FNN) . . . . . 64</p> <p><b>Y</b> <u>VDE YOUNG NET</u> 69</p> <p><b>Y1</b> Neues Leitbild und Umstrukturierung des VDE Young Net . . . . . 69</p> <p><b>S</b> <u>ENERGIEWENDE-SPLITTER</u> 71</p> <p><b>S1</b> Politik und Regulierung . . . . . 71</p> <p><b>S2</b> Industrie und Forschung . . . . . 74</p> <p><b>S3</b> International . . . . . 76</p> <p><b>G</b> <u>GRUNDLAGEN DER ELEKTROTECHNIK</u> 77</p> <p><b>G1</b> Wofür stehen <b>H, D, M</b> und <b>P</b>? . . . . . 77</p>	<p><b>H</b> <u>HISTORIE DER ELEKTROTECHNIK</u> 79</p> <p><b>H1</b> Gleichstromkabel für die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung . . . . . 79</p> <p><b>H2</b> 100 Jahre Elektrische Antriebe und Leistungselektronik an der TU Braunschweig . . . 84</p> <p><b>V</b> <u>NEUE VERÖFFENTLICHUNGEN</u> 88</p> <p><b>V1</b> Handbuch Netzintegration Erneuerbarer Energien – Netzanschluss, Stromerzeugungsanlagen und Regelung . . . . . 88</p> <p><b>V2</b> The Practical Guide To Truncated Probability Distributions . . . . . 88</p> <p><u>Veranstaltungskalender</u> 90</p>
--	---

# T1 PD measurements on a DC gas-insulated transmission line (DC GIL) conducted in the frame of the Prototype Installation Test according to recommendation of CIGRE JWG D1/B3.57

## Abstract

There is a growing demand for DC long distance transmission, as the power generation increasingly takes place far away from the load centres. In many countries the transmission lines in question have to be installed underground, due to environmental concerns and political decisions. Besides DC cables DC gas-insulated lines are an option. To gain long-term experience with this type of technology, CIGRE JWG D1/B3.57 suggests a Prototype Installation Test with a test duration of one year, by which the dielectric DC and overvoltage stress under real service conditions are reproduced and investigated. The gas-insulated line considered in this paper is designed for a rated DC voltage of  $\pm 550$  kV and a current carrying capability of 5000 A. It is installed at a HVDC test facility at the Technical University of Darmstadt. For a long-term test with sufficient significance the insulating conditions of the test arrangement before and during long-term testing have to be monitored to observe the insulation performance. For this purpose an ultra-high-frequency partial discharge (UHF PD) monitoring system is installed, which is adapted for recording of PD under DC voltage stress. This system shall also be proven for condition monitoring of future DC GIL installations.

With this regard, the UHF PD monitoring system installed and the method to detect and identify possible PD defects under DC voltage will be discussed. The measuring sensitivity of the installed UHF monitoring system was tested according to the recommendations given in CIGRE TB 654. As the DC GIL under consideration is a new design, sensitivity verification step 1 had to be performed first on a typical test assembly. The sensitivity verification step 2 was carried out within the frame of the commissioning tests of the test arrangement. The UHF PD signal attenuation and the sensitivity obtained between two adjacent sensors will be given. By means of the attenuation profile the sensor distance for future DC GIL installations can be estimated.

During commissioning of the 100 m DC GIL prototype with DC test voltage a probable PD defect was detected by the monitoring system. Time of flight measurements were carried out in order to localise the defect. As no phase correlation of the PD pulses exists at DC voltage, pulse sequence analysis (PSA) had to be applied for PD defect identification. For this purpose investigations on the 100 m long DC GIL installation were performed using PSA methods at rated voltages. Based on pre-investigations of typical PD defects under DC voltage, briefly given in this report, the PD defect detected onsite could be identified by PSA analysis. The analysis of the measured PD signal showed a good agreement with one reference signal analysis gained in the pre-investigations.

## 1 Introduction

As the power generation increasingly takes place far away from the load centres, DC long distance transmission is of special interest. Due to environmental concerns and political decisions, in many countries the transmission lines in question have to be installed underground. Besides DC cables DC gas-insulated lines are an option. Up to now, only a few gas-insulated HVDC systems are in operation worldwide. In consequence, little service experience and only few information about the long-term capability of this type of technology are currently available.

Before the installation in the grid, customers might desire a proof of a stable long-term performance under real service conditions of the total gas-insulated system to ensure the required technology readiness level. As no standards for (dielectric) testing of HVDC gas-insulated systems are currently in place, CIGRE Joint Working Group JWG D1/B3.57 has established the first testing recommendations [1]. Among others, a Prototype Installation Test is suggested to gain long-term experience with this type of technology. During the test duration of one year the dielectric DC stress and overvoltage stress under real service conditions are reproduced and investigated. To ensure a test with a sufficient significance the insulating conditions of the test arrangement is monitored before and during long-term testing by partial discharge (PD) measurements.

Much experience has been gathered with PD testing of gas-insulated AC systems. Therefore, CIGRE JWG D1/B3.57 recommends to apply AC voltage for PD measurements at routine tests and onsite tests. PD measurements under DC voltage are of interest, e. g. after commissioning before putting into service or during service.

The following report describes the test arrangement and the PD monitoring system installed based on the UHF method. Furthermore, various measuring results and their analysis under AC and DC voltage are presented.

## 2 Test arrangement

The DC GIL test arrangement (*Figure 1*) is constructed of eight straight modules (2) and two 45° DC GIL angle modules (3). The total current loop is approximately 100 m long, installed above ground and mostly outdoor. Approximately 35 insulators plus several insulating rods in switching devices are installed in the overall test assembly [2].

The test equipment for feeding the DC GIL with current and voltage is installed in a high voltage hall (1). The current loop of the test setup is connected by  $\pm 550$  kV DC GIS modules

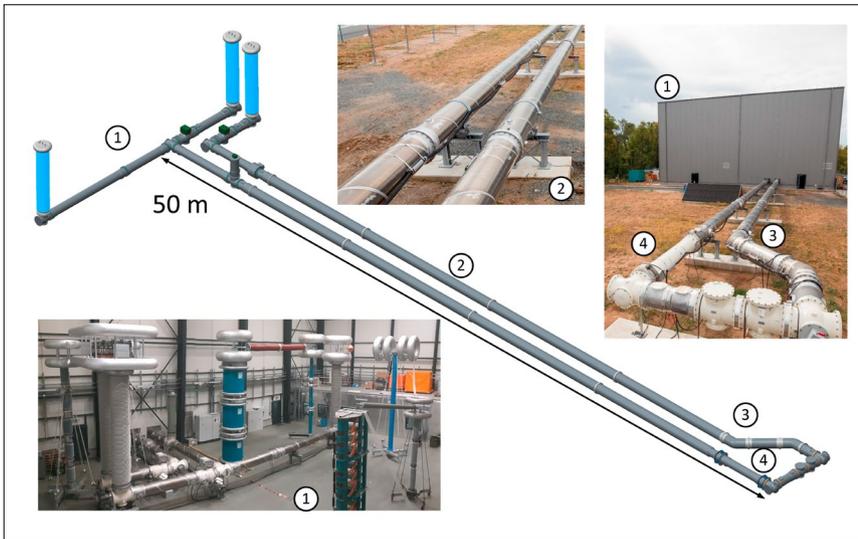


Figure 1: Test arrangement [2]

and a lateral compensation module (4). The test arrangement is equipped with UHF PD sensors, optical light sensors and temperature measurement systems for monitoring of the conductor and the enclosure temperatures (pyrometers and PT100 sensors), besides the mandatory monitoring systems such as gas density meters. More details about the basic test circuit are reported in [2].

The locations of the UHF sensors are given in Figure 2. The GIL section is fitted with the sensors nos. 4 ... 8. Sensors nos. 1 ... 3 are installed in the connecting modules to the current and voltage source.

### 3 PD monitoring on the DC GIL prototype

For PD measurements at routine tests and onsite tests and for PD measurements under DC voltage, e. g. after commissioning before putting into service or during service an UHF PD monitoring system is installed. For recording of PD under DC voltage stress it is correspondingly adapted. This system shall also be proven for condition monitoring of future DC GIL installations.

#### 3.1 Tests for sensitivity verification

As a charge calibration of the UHF method is not possible for gas-insulated systems, a two-step process is recommended to verify that the applied systems properly function at a requested level of sensitivity and are able to detect defects with an apparent charge of e. g. 5 pC [3]

In step 1, mostly carried out in the laboratory, an artificial PD pulse magnitude is determined equivalent to e. g. 5 pC caused by a real defect. The same artificial PD pulse magnitude will be applied later on-site during step 2. The second step is carried out on-site on the installed gas-insulated system (same design and same type of sensors as used in the laboratory test). By injection of the determined artificial impulse magnitude, the test verifies, that the installed sensors, UHF measurement and monitoring system have sufficient sensitivity to detect signals from the real PD defect defined in step 1.

##### 3.1.1 Sensitivity verification, step 1

As the DC GIL under consideration is a new design, sensitivity verification step 1 had to be performed first. It was conducted on a typical GIL structure presented in Figure 3.

Two insulators and 10 m GIL were present between sensor 1 and sensor 2. As PD defect a mobile particle was chosen causing a PD magnitude of 5 pC according to IEC 60270. The UHF signal was acquired in the time domain as well as in the frequency domain.

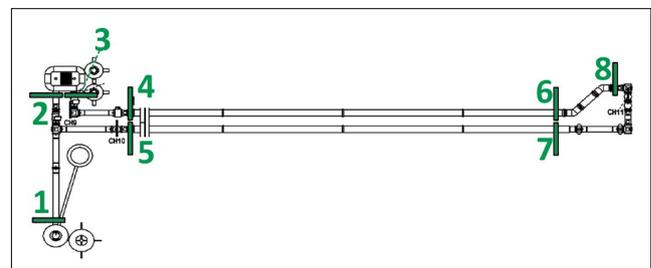


Figure 2: Locations of the UHF sensors

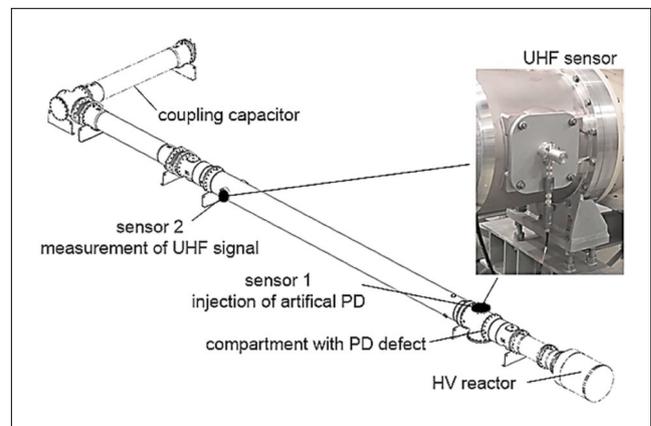


Figure 3: Test arrangement for sensitivity verification step 1

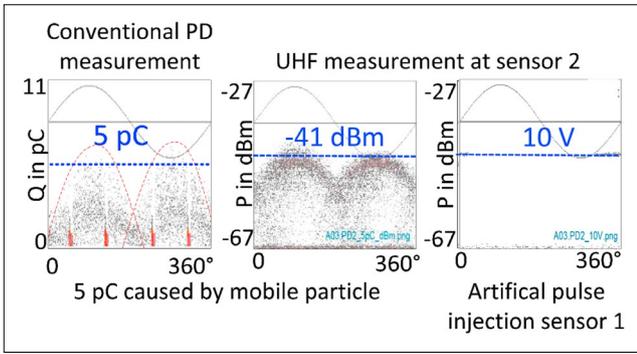


Figure 4: Test results of sensitivity step 1 in the time domain

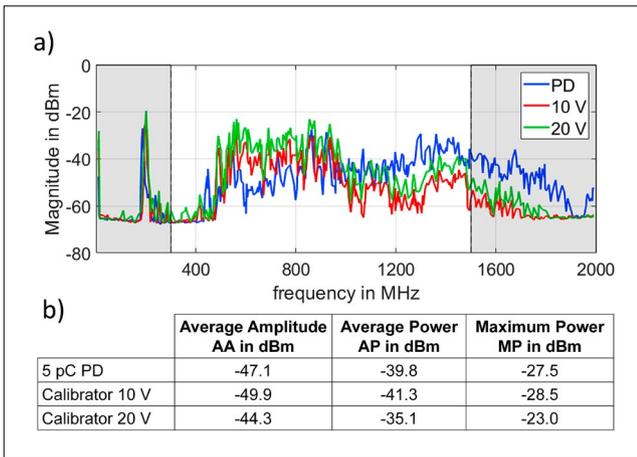


Figure 5: Sensitivity check step 1 (frequency domain)  
 a) UHF spectra caused by a mobile particle generating 5 pC and an artificial pulse of 10 V and 20 V  
 b) Evaluation of the spectra by statistical tools

The results in the time domain are shown in Figure 4. The PD signal of 5 pC measured by the conventional method (Figure 4, left) corresponds to a -41 dBm UHF signal (Figure 4, middle). The equivalent UHF signal generated by an artificial pulse amounts to 10 V (Figure 4; right).

Figure 5 presents the results in the frequency domain. Figure 5a shows the UHF spectrum caused by the mobile parti-

cle generating 5 pC and the spectra generated by an artificial pulse of 10 V and 20 V, respectively. For a better assessment which artificial pulse fits best, the spectra are evaluated with the aid of statistical tools (Figure 5b). The evaluation of the spectrum's average amplitude (AA), average power (AP) and maximum power (MP) is carried out in the frequency range between 300 and 1500 MHz.

The ranges below 300 MHz and above 1500 MHz are disregarded. Below 300 MHz the spectrum is affected by external noise. Above 1500 MHz the injected artificial pulse is not steep enough to generate signal amplitudes comparable to those of the real PD pulse. In the case under consideration the 10 V pulse magnitude fits quite well.

The injection voltage for sensitivity verification test step 2 is therefore 10 V, to prove that a 5 pC mobile particle PD defect can be detected between two adjacent sensors.

### 3.1.2 Sensitivity verification, step 2

The sensitivity verification step 2 was carried out within the frame of the commissioning tests of the test arrangement. The positions of the UHF sensors are illustrated in Figure 2. The artificial pulse of 10 V was injected into one sensor, and the corresponding PD signal was recorded at the adjacent sensors. The acquired signals are shown in Figure 6.

The sensitivity verification demonstrates that PD defects distinctly lower than 5 pC can be detected in the sections between two adjacent sensors at all GIL parts.

Additionally, the attenuation performance of typical GIL sections were investigated. E.g. by injection of artificial impulses in the range of 30 V at sensor 3 or 4 respectively, the signal attenuation between sensor 4 and 6 and between 6 and 8 was measured. The attenuation of these two sections is mainly determined by the insulators, which are of different types in both sections. In case of a star-shaped tripod insulator the attenuation is mainly caused by changes in the geometry of the inner conductor and the enclosure, respectively. The attenuation of disc-type insulators is determined by the changes in permittivity of the epoxy resin compared to that of the pure gas. Both effects lead to changes in the surge impedance of the transmission line and to a reduced transfer of the UHF signal. The attenuation of the coaxial gas-filled arrangement is comparatively low.

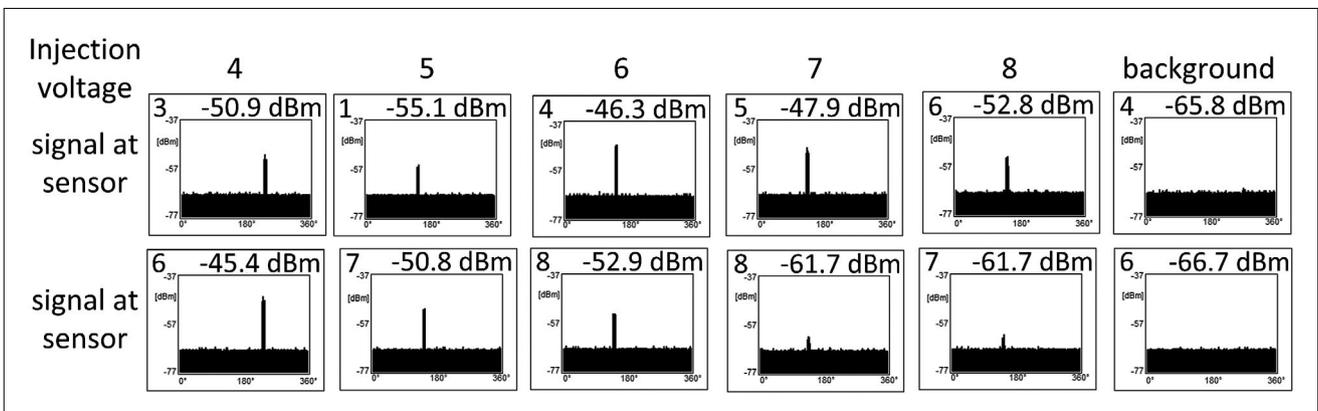


Figure 6: Results of Sensitivity verification, Step 2

The measuring results are shown in *Figure 7*. The section between sensor 4 and 6, 40 m in length, contains four insulators of type 1. The attenuation amounts to about 8 dB, i.e. the attenuation of this type of insulator is about 2 dB. The attenuation of the section between sensor 6 and 8 containing four insulators of type 2 amounts to about 10 dB, i.e. 2.5 dB per insulator. From this, one can conclude that at the DC GIL design under consideration, comprising about eight insulators per 100 m, a sensor distance in the range of 200 m would still be sufficient to detect 5 pC defects caused by a mobile particle, which represents the most common PD defect in gas-insulated systems.

### 3.2 Commissioning test with AC voltage

As recommended by CIGRE JWG D1/B3.57, the commissioning test of the DC GIL prototype installation was carried out with AC voltage. The AC test voltage was generated by a mobile resonant unit. During the first AC voltage stress, the DC-GIL is conditioned by a defined step-by-step AC voltage increase. At the different voltage steps particles of different sizes might be activated. The particle movement can be observed by the UHF monitoring system to ensure that all potential particles are captured by the particle traps. This process is of special importance for gas-insulated DC GIL assemblies, because free moving particles could directly trigger flashovers under DC voltage stress [6].

At the 1 min AC test voltage with  $1.5 \cdot U_{rdc} = 825 \text{ kV}_{peak}$  ( $583 \text{ kV}_{rms}$ ) some PD activity was initiated in a certain section of the prototype installation. The PRPD patterns acquired indicate that some mobile particles were activated in the section between sensor 4 and 6 (*Figure 8*, top).

According to the recommendation of CIGRE JWG D1/B3.57 the PD measurement was performed at  $\dot{U}_{pd \text{ test AC}} = 1.2 \cdot U_{rdc} = 660 \text{ kV}_{peak}$  ( $467 \text{ kV}_{rms}$ ) after a pre-stress with  $1.5 \cdot U_{rdc} = 825 \text{ kV}_{peak}$  ( $583 \text{ kV}_{rms}$ ).

This AC test voltage also corresponds with the test voltage of the DC long-term test. As to be seen from *Figure 8*, bottom, the PD sources are no longer active. The mobile particles seem to be captured by the particle traps.

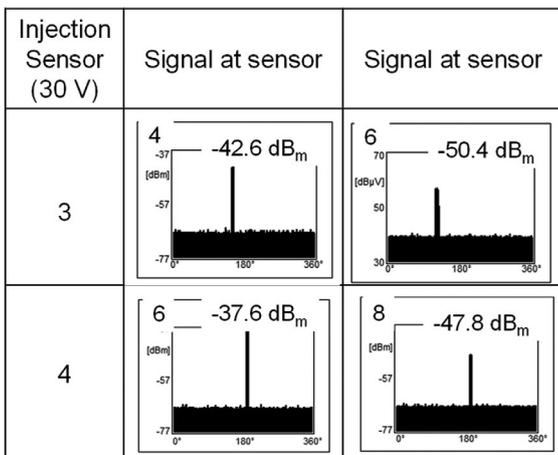


Figure 7: Attenuation between sensor 4 and 6 and between 6 and 8

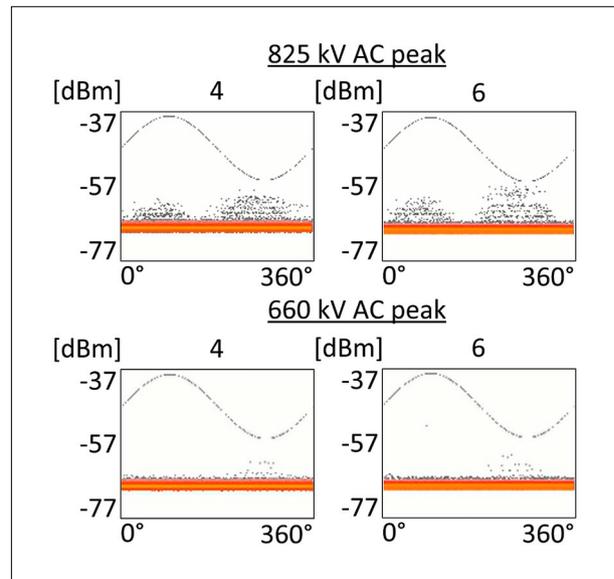


Figure 8: PD activity at 1-min-AC test voltage ( $825 \text{ kV}_{peak} = 583 \text{ kV}_{rms}$ ) and at PD test voltage ( $660 \text{ kV}_{peak} = 467 \text{ kV}_{rms}$ )

### 3.3 Pre-test with DC voltage

After the AC voltage test further pre-tests were conducted, among others a DC voltage test. When increasing the DC test voltage up to  $1.2 U_{rdc}$ , PD activity started at about -660 kV in one GIL section (*Figure 9*). According to the measured PD magnitudes the PD source was assumed to be located in the section between sensor 4 and 6.

For localisation and identification further measurements were initiated. The localisation was carried out by time of flight measurements. According to the measuring result presented in *Figure 10* the probable PD source could be localized to be 7 m away from sensor 4.

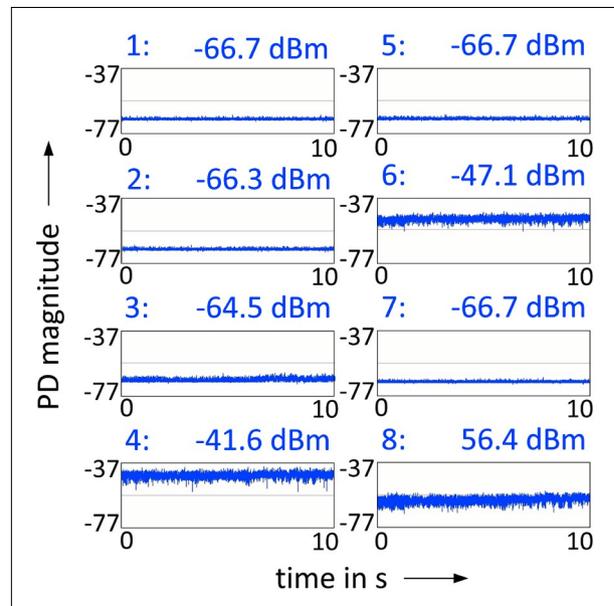


Figure 9: PD activity at -660 kV DC

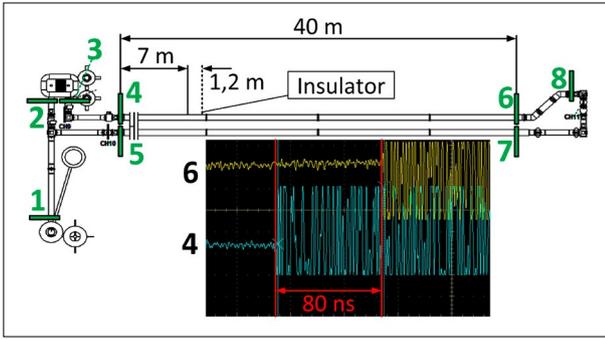


Figure 10: Time of flight measurement for localisation of a probable PD defect

Identification of the type of defect by PRPD pattern analysis, well known from PD measurements at AC voltage, is not possible, since a phase correlation does not exist at DC voltage. Therefore, pulse amplitude and pulse sequence have to be applied for characterization of typical PD defects.

### 3.4 Identification of PD defects by pulse sequence analysis (PSA)

#### 3.4.1 General description and pre-investigations

One method of representation of PD data apply statistical distributions of basic quantities for defect classification, such as PD magnitude  $A_i$  and  $A_{i+1}$  of PD pulse  $i$  and subsequent pulse  $i+1$  or differences of PD magnitude  $\Delta A_i$  and  $\Delta A_{i+1}$  between subsequent pulses respectively, and time difference  $\Delta t_i$  and  $\Delta t_{i+1}$  between subsequent pulses  $i$  and  $i+1$  (Figure 11) [4, 5, 6]. The objective is to develop characteristic PD sequence patterns under DC stress for various defects by pulse sequence analysis (PSA). The PSA data can be recorded by the conventional or UHF measuring method [6, 7].

Different kinds of PSA analyses are published in literature, in which the defect identification is based on the PD quantities according to equation (1a) to (1c) [4, 5] or (2a) and (2b) [6]:

$$\Delta A_{i+1} = f(\Delta A_i) \quad (1a) \quad \Delta t_{i+1} = f(\Delta t_i) \quad (1b)$$

$$\Delta A_i = f(\Delta t_i) \quad (1c)$$

$$A_{i+1} = f(A_i) \quad (2a) \quad \Delta t_i = f(\Delta A_i) \quad (2b)$$

In further pre-investigations of typical PD defects in a gas-insulated DC arrangement by means of the UHF method the before mentioned approaches were modified [8]. Using further PD quantities and a logarithmic scaling for normalizing the PD quantities a better characterisation of the defect in question was achieved. The modified approach makes use of the PD quantities according to equation (3a) to (3f) [8]:

$$A_{i+1} = f(A_i) \quad (3a) \quad \Delta t_{i+1} = f(\Delta t_i) \quad (3b)$$

$$\Delta A_i = f(\Delta t_i) \quad (3c) \quad \Delta A_i = f(A_i) \quad (3d)$$

$$\Delta A_{i+1} = f(\Delta A_i) \quad (3e) \quad \Delta t_i = f(A_i) \quad (3f)$$

Examples of PSA patterns gained in the pre-investigations based on the PD quantities in (3a) to (3f) are shown in Figure 12, bottom.

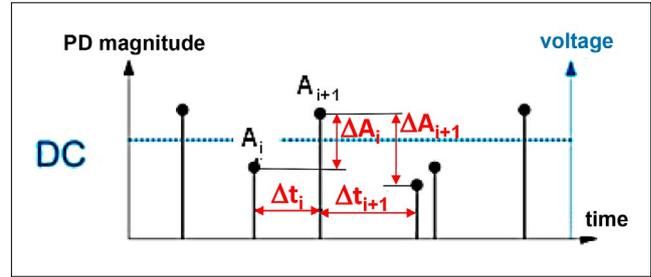


Figure 11: Defect identification by pulse sequence analysis (PSA) [4, 6]

#### 3.4.2 PD defect detected at pre-test with DC voltage

As described in section 3.3, PD inception was observed at negative DC polarity at about -660 kV. The PD extinction voltage was below about -550 kV. For defect identification the method developed in the pre-investigations and the knowledge gained with some typical PD defects were applied. The PSA pattern acquired at -660 kV and -550 kV for 1 min are presented in Figure 12, top.

The Figure shows that the PSA pattern slightly changes with the voltage. Therefore, a comparison with reference signals recorded at similar test voltages and testing time is recommended for an efficient identification.

However, at the time of the commissioning tests a limited number of reference signals was available, e.g. some signals recorded at lower test voltages. A comparison with the reference signals available shows a good correspondence of the pattern acquired on-site with reference patterns caused by mobile particles at the inner conductor. In any case, it distinctly differs from a reference pattern caused by a 5 mm protrusion (Figure 12, bottom).

Thus it can be assumed that the PD defect recorded onsite is most probably caused by a mobile particle adhering to the inner conductor, and which was not yet captured by the particle trap. As the defect location was not in the vicinity of an insulator and a flashover across the insulator surface reducing the dielectric strength permanently was unlikely, further pre-test were conducted to capture the particle.

## 4 Conclusion

To gain long-term experience with DC GIL technology CIGRE JWG D1/B3.57 suggests a Prototype Installation Test with a test duration of one year, by which the dielectric DC and over-voltage stress under real service conditions are reproduced and investigated. For a test with sufficient significance the insulating conditions of the test arrangement before and during long-term testing have to be monitored. For this purpose, an UHF PD monitoring system is installed, which is adapted for recording of PD under DC voltage stress.

A sufficient sensitivity can be proven by the two-step sensitivity verification test according to CIGRE TB 654, which can also be used to determine the HF signal attenuation of the GIL system. The knowledge gained during the commission test with AC voltage and pre-test with DC voltage demonstrate that PD monitoring is suited for detecting imperfections in the test arrangement and to locate and identify probable

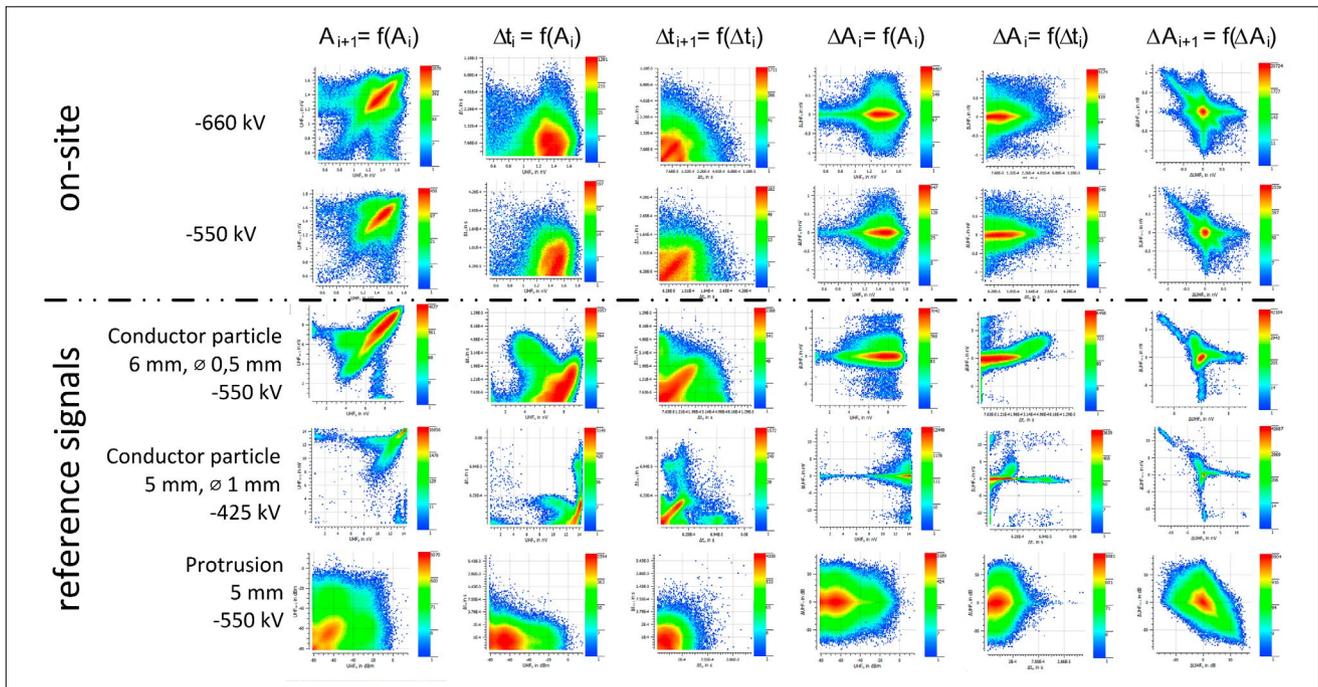


Figure 12: PSA patterns recorded on-site and reference patterns obtained in the laboratory

PD defects. Probable PD defects are localised rather precisely by time of flight measurements. For identification of the type of PD defects PSA provides good results at the 100 m GIL arrangement. In total, PD monitoring helps to ensure long-term testing with a reliable validity with regard to the insulation performance. PD monitoring at gas-insulated DC systems is thereby also of interest for future DC installations.

**Acknowledgments**

The authors gratefully acknowledge the substantial support of this work by the IWB-EFRE-Program by the State of Hessen (Funding Code 20002558) and the German Federal Ministry of Economics and Technology (Funding Code 03ET7546).

**References**

[1] JWG D1/B3.57: Dielectric testing of HVDC gas-insulated systems.  
 [2] M. Hallas, V. Hinrichsen, C. Neumann, M. Tenzer, B. Hausmann, D. Gross, T. Neidhart, M. Lerch, D. Wiesinger: Cigré Prototype Installation Test for Gas-Insulated DC Systems – Testing a Gas-Insulated DC Transmission Line (DC-GIL) for ± 550 kV and 5000 A under Real Service Conditions. CIGRE D1-107, 2020  
 [3] CIGRE D1.25: UHF partial discharge detection system for GIS: Application guide for sensitivity verification. CIGRE TB 654, April 2016  
 [4] A. Pirker, U. Schichler, “Partial Discharge Measurement at DC Voltage – Evaluation and Characterization by NoDi\* Pattern”, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 25, No. 3, pp. 883 891, 2018.

[5] A. Pirker: Measurement and representation of partial discharges at DC voltage for identification of defects of gas-insulated systems (in German). PhD Thesis, Technical University of Graz, 2019.  
 [6] P. Wenger, M. Beltle, S. Tenbohlen, U. Riechert, G. Behrmann: Combined characterization of free-moving particles in HVDC-GIS using UHF PD, high-speed imaging, and pulse sequence analysis. IEEE Transactions on Power Delivery, Vo. 34, No. 4, August 2019.  
 [7] A. Pirker, U. Schichler: Application of NoDi\* Pattern for UHF PD Measurement on HVDC GIS/GIL. International Conference on Condition Monitoring, Diagnosis and Maintenance CMDM 2019 (5th edition), September 9th – 11th, 2019, Radisson Blue Hotel Bucharest, Romania.  
 [8] M. Geske, C. Neumann, T. Berg, R. Plath: Assessment of typical defects in gas-insulated DC-Systems by means of Pulse Sequence Analysis and based on UHF-partial discharge measurements. VDE Conference High Voltage Technique 2020, Berlin. Paper 124.



Prof. Dr.-Ing. Claus Neumann,  
 Technical University of Darmstadt

**Weitere Autoren:**

- Dipl.-Ing. Martin Hallas, Technical University of Darmstadt
- Prof. Dr.-Ing. Volker Hinrichsen, Technical University of Darmstadt
- Dr. techn. Detlev Gross, PowerDiagnostix, Aachen
- Moritz Geske, M.Sc., Technische Universität Berlin
- Dr.-Ing. Michael Tenzer, Siemens Gas & Power, Erlangen

## T2 Investigation of the gas-solid insulating system in DC GIS exposed to AC-DC mixed voltage for offshore bipole applications at $\pm 525$ kV DC

### Abstract

In order to develop offshore converter stations in the most space-saving way possible, high-voltage components should be gas-insulated, where feasible. This not only holds for the DC and the AC switchyard, but also the space between the main transformers and the converters. At this point in bipolar HVDC systems, the equipment is subjected to a mixed voltage stress consisting of AC and DC components. In this paper, the electric field stresses of typical AC-DC mixed voltages to the gas-solid insulation system of a DC GIS are determined by calculations using the finite element method. They are compared with the stresses in the case of pure direct voltage and different test voltages. It is found that the field stresses occurring in the gas-solid insulation system under AC-DC mixed voltage are always lower than the stresses under pure DC voltage, when considering the same maximal voltage value. Finally, the dielectric test requirements of the standards for converter transformers and bushings under AC-DC mixed voltage are compared with the recommendations for dielectric testing of gas-insulated DC systems under DC voltage.

### 1 Introduction

Present trends, such as digitalization, artificial intelligence, connectivity, globalization and electrification, as well as a growing population in general, lead to expect a growing demand for energy. In the context of the globally necessary reduction of greenhouse gas emissions, this primarily means the use of electricity generated by renewable sources. Making the necessary energy systems safe for the future requires that they are not only sustainable and reliable, but also economically and socially accepted. High-voltage direct current (HVDC) transmission technology has a special role to play here, as it enables the integration of wind energy generated at a great distance from the shore and ensures the exchange of large amounts of energy over long distances in a very efficient manner.

The converter and transition stations required for HVDC can reach considerable dimensions. If there is a need for a compact design to minimize land consumption and allow for aesthetic station planning, a gas-insulated design of HVDC components can have advantages over air-insulated systems [1]. Decades of operating experience in the AC sector have shown gas-insulated switchgear (GIS) to be highly reliable with low maintenance requirements and almost completely independent of external conditions [2].

The  $\pm 320$  kV DC voltage level has been established for grid connection in the North Sea up to 900 MW and is also establishing in the UK for up to 1320 MW [3], [4]. For the first time, DoWin6 uses an HVDC GIS on the offshore platform in the

DC switchyard between the converter reactors and the DC cable to reduce size and weight of the off-shore converter station [5].

To develop more distant areas worldwide with wind farms (e. g. in the Netherlands, the German North Sea), the DC voltage level of  $\pm 525$  kV and a transmission capacity of 2000 MW have been proposed by local authorities [6]. With these increased parameters, HVDC systems might be implemented as bipoles in order to improve availability of link capacity. Bipolar systems will typically use two HVDC cables and a dedicated metallic return. In order to develop the offshore converter stations in the most space-saving way, the necessary high-voltage components should be gas-insulated. This not only holds for the DC and the AC switchyard, but also the space between the main transformers and the converters. At this point in bipolar HVDC systems, the equipment is subjected to a mixed voltage stress consisting of AC and DC components.

Currently, DC GIS up to  $\pm 550$  kV are entering the market [7]. They are type-tested according the recommendations of CIGRE JWG D1/B3.57 [8]. This contribution is investigating, if the insulating system of DC GIS can also withstand the stress of the AC-DC mixed voltage. The investigations are performed by calculations. The applied calculation model has been satisfactorily verified by experiments [14]. Experimental investigations with AC-DC mixed voltages are hardly possible with a sensible effort, since the generation of AC-DC mixed voltages with a significant share of the AC voltage is challenging [15].

### 2 Theoretical Background

#### 2.1 HVDC VSC Bipole Topology

For several years, HVDC technology with voltage-sourced converters (VSC) is known for efficient and reliable power transmission [22]. When it comes to high power, HVDC VSC bipolar systems have the advantage of utilising a high voltage, i. e.  $\pm 525$  kV, and can therefore transmit  $> 2$  GW.

##### 2.1.1 General structure

The HVDC VSC technology comprises two HVDC converter poles per station, which are connected in series. The neutral area between the two converters at one station is normally connected to earth and gives the grounding reference for the bipolar system. Only two HVDC cables (HV+ and HV-) are required to form a bipolar system. An optional added dedicated metallic return (DMR) conductor contributes positively to the high HVDC link availability. The HVDC VSC bipolar configuration is shown exemplarily in *Figure 1*.

Similar to (symmetrical) monopolar systems, the converters are configured in a six-pulse bridge topology. Each converter consists of three identical phase units with two converter modules per phase.

HVDC VSC systems are built up as modular multilevel converters (MMC) [23]. Each converter module consists of multiple levels. Each level equals a sub-module, that comprises a switchable DC capacitor and can be controlled independently. Consequently, the voltage at the midpoint of a converter pole (converter side of main transformer, Figure 1) can be set in small voltage steps to obtain a sinusoidal shape with fundamental frequency.

2.1.2 Voltage between main transformer and converter

Each converter pole sets the DC voltage. Hence, the HVDC cables are on HV potential of  $\pm 525$  kV. In the converter pole midpoint, a DC voltage of  $525/2$  kV is present. Due to the design specifics for VSC half-bridge converters, there is a superimposed AC voltage component at network fundamental frequency, which is in its peak value maintained as close as possible to the maximum DC voltage. The magnitude of the AC voltage component is basically driven by the converter transformer transformation ratio, the aim to utilize a modulation index close to 1 for half-bridge converters and the overlay of a third harmonic content.

Overlaying, a third harmonic content (zero sequence) allows for higher fundamental frequency AC voltage and therefore an optimised design due to lower currents and losses. Figure 2 shows exemplarily the mixed AC-DC phase-to-ground voltage at the converter side of the main transformers. The DC offset is  $525/2$  kV. It is superimposed to the AC voltage with a frequency of 50 Hz and a corresponding third harmonic. For further FEM calculation of the insulating system, the 3<sup>rd</sup> harmonic is neglected, and a simplified voltage form is utilized, reaching  $\hat{U} = 525$  kV. All relevant equipment at this point between the main transformers and the converters are subjected to this mixed voltage. It comprises, e.g. disconnectors and earthing switches, measurement devices for current and voltage, possible surge arresters and interface modules, when considering a gas-insulated design, such as gas-air bushings.

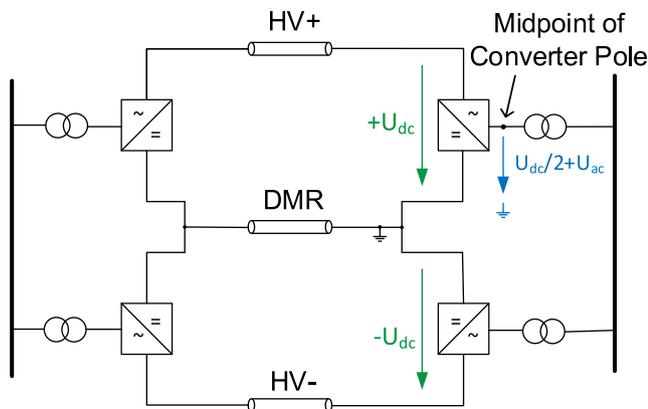


Figure 1: Simplified HVDC VSC bipolar configuration

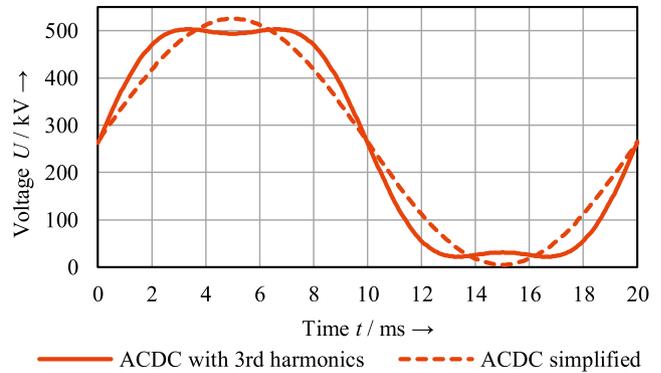


Figure 2: Mixed AC-DC phase-to ground voltage at midpoint of converter pole incl. 3<sup>rd</sup> harmonic content and simplified voltage curve for further electric field calculation

2.2 Gas-Insulated DC Systems

Gas-insulated DC systems for DC application are available up to  $U_r = \pm 550$  kV and provide a compact technical solution with a high functional density, optimized for the application in projects with limited space as in offshore HVDC converter platforms, onshore HVDC converter stations and transition stations between different transmission technologies [1], [7].

Dimensioning of HVDC GIS requires the knowledge of electric field distributions occurring in the case of DC application. Starting from a capacitive field distribution at the moment of energization with DC voltage, electric field distribution is continuously evolving with time. This field transition depends on the surface and bulk currents in the solid insulation defined by the strongly temperature-dependent volume conductivity as well as on the ionic currents in the gas. It results in interface charging, particularly of the solid-gas interface of the insulator's surface and space charge accumulation in the solid insulation until the steady state under DC voltage stress is reached [9], [10], [11], [12].

In comparison to gas-insulated AC systems, the development of equivalent DC systems requires the consideration of further basic physical phenomena, significantly influencing the electric field distribution at DC voltage. While in gas-insulated AC systems the electric field distribution remains unchanged after energization, in DC systems it changes from electrostatic field to electric flow field, i.e. from capacitive to resistive. This field transition and the steady-state DC field distribution are determined by the conductivities of the insulating materials and are accompanied by the accumulation of surface and space charges. The physical processes are influenced by several parameters, such as non-linear material properties dependent on temperature, humidity and additional charges. [13]

3 Calculation of the Electric Field

The calculation of the electric field stress is realized with a calculation model adapted to gas-solid insulating systems. This allows calculating the time-dependent electric field distribution from the voltage switch-on (electrostatic field) to the long-term stress (quasi-stationary electric flow field) including

the field transition. The calculation model has been verified by measurements [14].

### 3.1 Calculation Model

In the calculation, a two-dimensional rotational symmetric geometry is used, depicting a solid insulator surrounded by insulating gas (Figure 3 left). The electric field is evaluated along the gas-solid interface at the gas side as its absolute value. A multi-physics calculation with finite element method (FEM) has been performed, considering thermal and electrical dependencies.

### 3.2 Input Parameter

#### 3.2.1 Material Parameter

The implemented parameters of the solid insulating material are based on temperature- and electric-field dependent measurements. The relative permittivity of the solid insulator is  $\epsilon_{r,solid} = 5$ . The conductivity of the solid is implemented as a function of the local electric field strength and the local temperature. Polarisation mechanisms are considered by Curie-von Schweidler approach [18].

Since  $\kappa_{gas} \ll \kappa_{solid}$ , the conductivity of the gas is chosen constant [16] and the relative permittivity  $\epsilon_{r,gas} = 1$ .

#### 3.2.2 Temperature Distribution

Considering an operating AC current of  $I_n = 2000$  A, a certain temperature distribution is arising between conductor and enclosure, comprising the whole insulator surface. Figure 3 (right) shows a temperature distribution above the horizontal conductor, derived from measurements during temperature-rise tests [7]. It reflects the worst-case consideration, when taking into account that the natural convection in the gas leads to a different temperature distribution for every angular position.

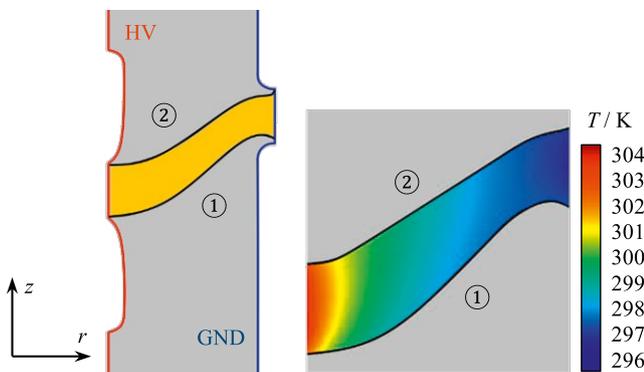


Figure 3: Geometry with ① convex and ② concave gas-solid insulating interface (left) and temperature distribution at a nominal current of  $I_n = 2000$  A (right)

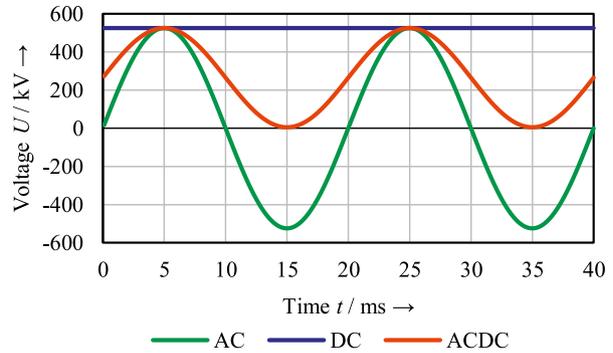


Figure 4: Voltage curves used in FEM calculation for AC-DC mixed voltage, pure DC and pure AC voltage with  $U_{ACDC}(t) = 265$  kV +  $260$  kV · sin( $\omega t$ ),  $U_{DC} = 525$  kV and  $U_{AC}(t) = 525$  kV · sin( $\omega t$ )

#### 3.2.3 Applied Voltage Curves

Considering the midpoint of converter pole, the voltage curve was derived in Figure 2. In terms of simplification, the small harmonic content is neglected for the electric field calculations (Figure 4). The electric field stress under AC-DC mixed voltage is compared with pure AC and DC voltage with the same maximum value of 525 kV.

### 3.3 Calculation Method

Firstly, a transient calculation method was used for calculating the time-dependent electric field distribution including field transition after voltage switch-on with DC components. The duration of the field transition depends on the electric material parameters of the insulating materials as well as on the temperature distribution and can last up to several weeks [8]. Considering AC-DC mixed voltage, the time steps of the transient solver must be chosen quite small in order to map the mixed voltage correctly, leading to a huge number of calculation steps. To avoid long calculation times of a transient calculation under AC-DC mixed voltage, an alternative calculation method is suitable. It is based on the fact that the resistive field component can be added to the capacitive field component, resulting in the total mixed field [17]. This method reduces the computing time from several hours to a few minutes, but only for gaining the stationary state after field transition, since time-dependent processes cannot be depicted anymore.

## 4 Calculation Results

### 4.1 Electric field stress under AC voltage and under DC voltage

Under AC voltage stress, a capacitive field distribution is formed (Figure 5). The maximum electric field strength occurs close to the conductor. The field strength decreases towards the enclosure. Under DC voltage stress, the same capacitive field distribution as under AC is formed immediately after voltage switch-on. With continuously applied DC voltage, the

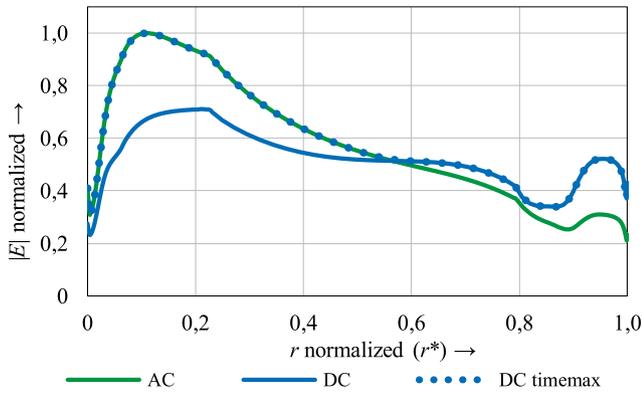


Figure 5: Normalized electric field at the concave gas-solid interface for AC and DC voltage; Δθ acc. to Figure 3

electrostatic field transits to a conductivity-determined electric flow field. During this field transition, the highest field strength is shifted into regions with lower conductivities. Hence, under DC voltage the highest fields strength occurs close to the enclosure.

Depicting the different locations and values of the highest field strength along the gas-solid interface during the whole field transition leads to the distribution called *DC timemax* (Figure 5). Therefore, the electric field of *DC timemax* close to the conductor is identical to under AC voltage and close to the enclosure identical to under DC voltage. *DC timemax* covers the maximum stress of the gas-solid insulating system under rated DC voltage and current.

#### 4.2 Electric field stress under AC-DC mixed voltage

Under AC-DC mixed voltage, a mixed electric field distribution is formed due to the superposition of capacitive and resistive field components. The DC voltage component leads to a field transition. Considering the steady state, the field distribution can be calculated as the sum of the capacitive field for the AC voltage component and the resistive field for the DC voltage component.

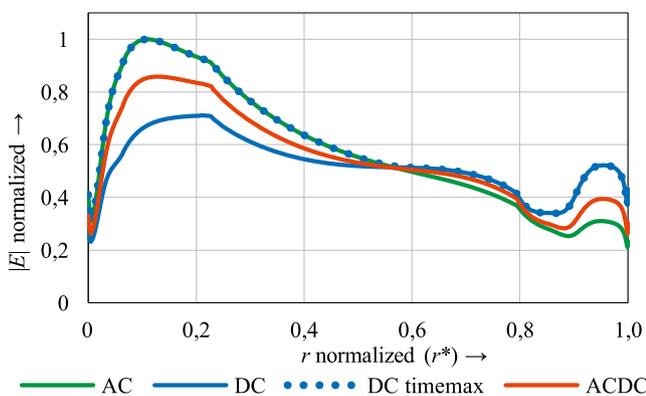


Figure 6: Normalized electric field at the concave gas-solid interface for AC-DC mixed voltage compared to the electric field under pure AC & DC voltage; Δθ acc. to Figure 3

The electric field under AC-DC mixed voltage along the concave and convex gas-solid interfaces is presented in Figure 6 and Figure 7. It is compared with the electric field under pure AC and DC voltage with the same maximum value and the respective *DC timemax* as a reference.

It can be seen that the electric field under AC-DC mixed voltage is along the entire gas-solid interface lower than the reference of the *DC timemax*, i.e. lower than during field transition after DC switch-on. The field strength at the concave interface is lower by (1.3 ... 30) % and at the convex interface lower by (4 ... 32) %.

### 5 Test Requirements

Testing of gas-insulated HVDC systems currently follows the recommendations of CIGRE JWG D1/B3.57, since no IEC standard has been established yet [7]. No recommendations exist for gas-insulated systems subjected to AC-DC mixed voltages. With respect to the same AC-DC mixed voltage stress, basically converter transformer and wall bushings might be a reference with the relevant standards available, referring to the technology of line-commutated converters (LCC):

- IEC 60076-57-129:2017 Power transformers – Part 57-129: Transformers for HVDC applications [19] and
- IEC 65700-19-03:2014: Bushings for DC application [20].

In both standards, the following AC and DC withstand voltages tests are proposed:

$$U_{AC} = \frac{1.5}{\sqrt{2}} \cdot \left[ (N - 0.5) \cdot U_{dm} + \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot U_{vm} \right] \quad \text{for 1 h} \quad (1)$$

$$U_{DC} = 1.5 \cdot \left[ (N - 0.5) \cdot U_{dm} + \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot U_{vm} \right] \quad \text{for 2 h} \quad (2)$$

with  $N$  as the number of 6-pulse bridges in series from the neutral of the DC line to the rectifier bridge,  $U_{dm}$  as the highest DC voltage per valve bridge and  $U_{vm}$  as the maximum phase-to-phase AC operating voltage of the valve windings of the converter transformer (LCC systems). For further details and

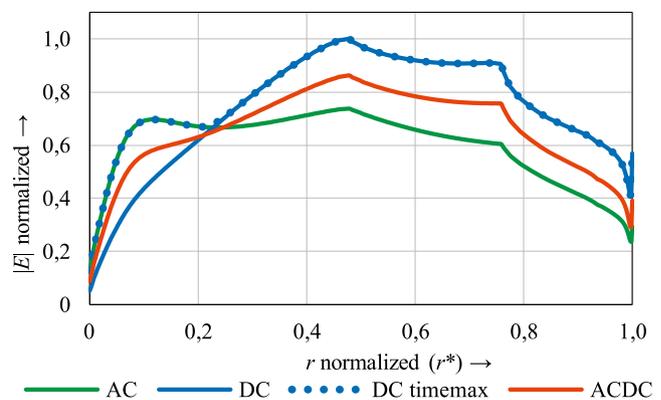


Figure 7: Normalized electric field at the convex gas-solid interface for AC-DC mixed voltage compared to the electric field under pure AC & DC voltage; Δθ acc. to Figure 3

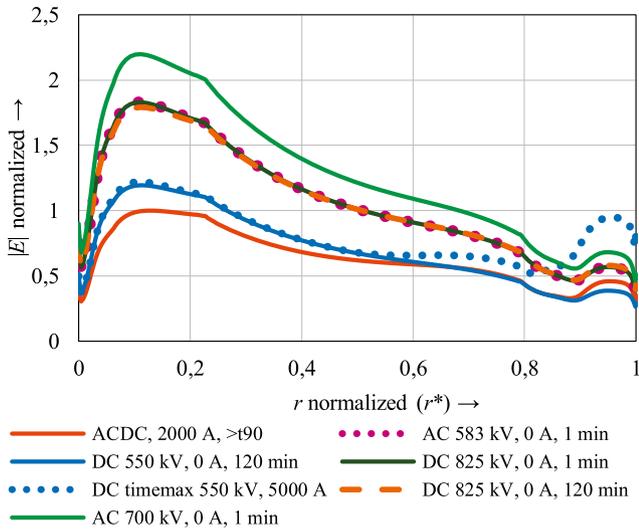


Figure 8: Normalized electric field at the concave gas-solid interface for AC-DC mixed voltage in comparison to the AC and DC type test voltages of the ±550 kV DC GIS

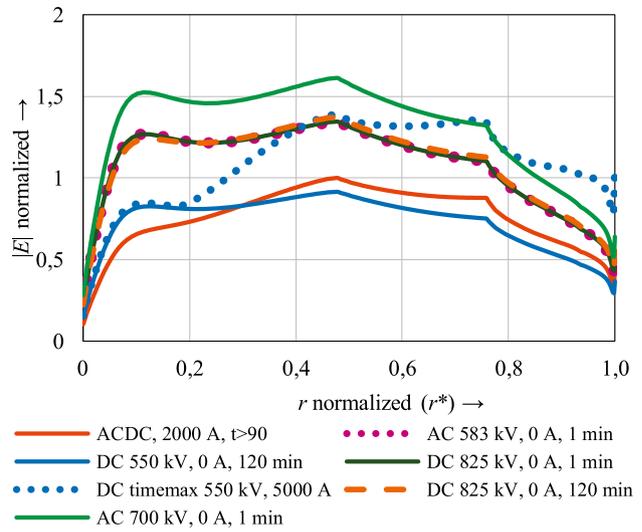


Figure 9: Normalized electric field at the convex gas-solid interface for AC-DC mixed voltage in comparison to the AC and DC type test voltages of the ±550 kV DC GIS

descriptions, refer to [19], [20]. For transmission voltages of ±525 kV and neglecting losses, the following values can be assumed:  $N = 2$ ;  $U_{dm} = 525 \text{ kV} / 2$ ;  $U_{vm} = 525 \text{ kV} / (2 \cdot 1.35)$ . The appropriate withstand test voltages can be found in Table 1 for converter transformer and wall bushing.

The relevant DC GIS has been tested according to CIGRE JWG D1/B3.57 recommendations with  $U_r = 550 \text{ kV}$ . AC and DC withstand voltage tests are performed with:

$$U_{AC} = \frac{1.5}{\sqrt{2}} \cdot U_r \quad \text{for 1 min} \quad (3)$$

$$U_{DC} = 1.5 \cdot U_r \quad \text{for 1 min} \quad (4)$$

Furthermore, a special test (*insulation system test*) is proposed for considering that the electric field distribution of insulators is influenced by the accumulation of electrical charge carriers and the operation-related inhomogeneous temperature distribution. In this test, the insulation system is charged with DC voltage starting from the thermally stationary state corresponding to the operating current until at least 90 % of the DC

voltage charge has been reached at all points in the system after a time called  $t_{90}$  (here:  $t_{90} \approx 120 \text{ h}$  [14]). In this state, the insulation system is stressed with superimposed lightning (LI) and switching (SI) impulse voltages as composite voltage to test its insulation performance with transient overvoltages. The appropriate test voltages can also be found in Table 1.

The AC withstand voltage levels for converter transformers, wall bushings and the relevant DC GIS can be considered as equal. In this special case, the DC GIS is even tested with a much higher AC voltage [7]. In terms of DC withstand voltage test, the DC GIS is also tested with a higher voltage. It has to be noted that for gas-solid insulation systems (e.g. DC GIS), a withstand voltage test of 1 min is sufficient, since the breakdown voltage according to the voltage-time curve is not further decreasing for times higher than  $20 \mu\text{s}$  [21]. DC specific aspects, such as field transition and charge accumulation at interfaces, are considered by the insulation system test with DC pre-stress of >120 h with temperature gradient and superimposed transient SI and LI voltages. Further for the DC GIS, superimposed voltages of DC and impulse voltage are performed after 2 hours of DC pre-stress with  $U_r$ .

EQUIPMENT		Converter transformer	Wall bushing	DC GIS ±550 kV	
STANDARD		IEC 60076-57-129	IEC 65700-19-03	CIGRE JWG D1/B3.57	
AC withstand voltage test	$U / \text{kV}$	586	586	583	700***
	$t / \text{min}$	60	60		1
	$I_n / \text{A}$	0	0		0
DC withstand voltage test	$U / \text{kV}$	794	794	825	550
	$t / \text{min}$	120	120	1	120**
	$I_n / \text{A}$	0	0	0	0
Insulation system test with DC pre-stress*	$U / \text{kV}$	-	-		550 kV
	$t / \text{min}$	-	-	> $t_{90}$ ([7]: $t_{90} = 120 \text{ h}$ )	
	$I_n / \text{A}$	-	-		5000

Table 1: Test requirements for different equipment for transmission voltages of ±525 kV DC

\* Max. field strength distribution during the test depicted by DC timemax

\*\* DC pre-stress before superimposed impulse voltage tests [8]

\*\*\* Special test by manufacturer [7]

For the evaluation of the performed tests of the DC GIS with AC and DC voltage in relation to the operational stress under AC-DC mixed voltage, the electric field at the gas-solid interface has been calculated for the concave and the convex side (Figure 8 and Figure 9).

In Figure 8, it can be seen that the area close to the conductor ( $0.05 < r^* < 0.25$ ) is basically tested by the AC withstand voltage with 583 kV with a margin of about (1.71... 1.94) and even (2.10... 2.32) by the special test with 700 kV. The area close to the enclosure ( $0.9 < r^* < 1$ ) is in this regard only tested with a margin of 1.2 and 1.5 respectively. Whereas the insulation system test of the DC GIS has been testing this area with a margin of 1.9 (cf. *DC timemax*). AC and DC withstand voltage test of 1 min with the same peak value lead to the same electric field stress. Even the DC withstand voltage test with a duration of 2 h would lead to a very similar electric field stress. Due to the low conductivity of the epoxy material, the field transition is very slow, reaching 90 % of the DC steady state after 120 hours, in this case [7].

In principle, the described evaluation at the concave side also holds for the convex side, but with a little different margin values (Figure 9).

Finally, it can be concluded that the operating stress of the insulating system of the DC GIS, described by the *DC timemax* with  $\pm 550$  kV, is always higher than the operating stress of the same insulating system under AC-DC mixed voltage. Hence, the AC and DC withstand voltage tests according to CIGRE JWG D1/B3.57 (DC GIS) have even higher safety margins for the AC-DC stress than for the pure DC stress. Furthermore, the AC and DC withstand voltage tests according to IEC 60076-57-129 (converter transformer) and IEC 65700-19-03 (wall bushing) are sufficiently testing the gas-solid interface close to the conductor, but the safety margin for the area close to the enclosure are much lower than with the insulation system test (*DC timemax*) of the respective insulating system.

## 6 Conclusion

Currently, DC GIS up to  $\pm 550$  kV are entering the market. They are type-tested according the recommendations of CIGRE JWG D1/B3.57. This contribution has investigated by calculation, if the insulating system of DC GIS can also withstand the stress of the AC-DC mixed voltage, occurring between main transformer and converter in bipolar systems for HVDC transmission voltages of  $\pm 525$  kV.

The following conclusions can be drawn from the investigations of the gas-solid interface of the DC GIS  $\pm 550$  kV:

- Field transition, known from DC application, occurs also under AC-DC mixed voltage.
- The operating stress of the insulating system of the DC GIS is always higher than the operating stress of the same insulating system under AC-DC mixed voltage.
- The AC and DC withstand voltage tests according to IEC 60076-57-129 (converter transformer) and IEC 65700-19-03 (wall bushing) are sufficiently testing the gas-solid interface close to the conductor, but not close to the enclosure.

- The dielectric test requirements of CIGRE JWG D1/B3.57 including the insulation system test have sufficiently tested the insulating system of DC GIS also for application under AC-DC mixed voltage, e. g. for off-shore bipole applications at  $\pm 525$  kV.

## 7 Literatur

- [1] U. Riechert, M. Kosse: HVDC gas-insulated systems for compact substation design. CIGRE Session, Paris 2020.
- [2] CIGRE Working Group D1.28: Optimized gas-insulated systems by advanced insulation techniques. Technical Brochure No. 571, 2014.
- [3] TenneT: Offshore projects Germany. Link: <https://www.tennet.eu/our-grid/offshore-projects-germany/offshore-projects-germany/#c54544>. Accessed: 12th June 2020.
- [4] Offshorewind: Breaking: UK Offshore Wind Strike Prices Slide Down to GBP 39.65/MWh. Link: <https://www.offshorewind.biz/2019/09/20/uk-offshore-wind-strike-prices-slide-down-to-gbp-39-65-mwh/>, Accessed: 12th June 2020.
- [5] Press Release: Siemens receives major order from TenneT for DolWin6 offshore grid connection. Link: <https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/siemens-receives-major-order-tennet-dolwin6-offshore-grid-connection>, 2018.
- [6] Federal Maritime and Hydrographic Agency (BSH): Site Development Plan 2019 for the German North Sea and Baltic Sea. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie, Hamburg, 2019.
- [7] M. Hering, H. Koch, K. Juhre: Direct current high-voltage gas-insulated switchgear up to  $\pm 550$  kV. CIGRE-IEC Conference on EHV and UHV (AC & DC), Hakodate 2019.
- [8] CIGRE Joint Working Group D1/B3.57: Dielectric testing of gas-insulated HVDC systems. Technical Brochure to be published.
- [9] C. Neumann, K. Juhre, U. Riechert, U. Schichler: Basic phenomena in gas-insulated HVDC systems and adequate dielectric testing. CIGRE-IEC Conference on EHV and UHV (AC & DC), Hakodate 2019.
- [10] L. Zavattoni: Conduction phenomena through gas and insulating solids in HVDC gas insulated substations, and consequences on electric field distribution. PhD thesis, Université de Grenoble, 2015
- [11] M. Hering, J. Speck, S. Großmann, U. Riechert: Field transition in gas-insulated HVDC systems. IEEE Dielectr. Electr. Insul. 24(3): 1608-1616, 2017
- [12] R. Gremaud, F. Molitor, C. Doiron, T. Christen, U. Riechert, U. Straumann, B. Kälstrand, K. Johansson, O. Hjortstam: Solid Insulation in DC Gas-Insulated Systems; CIGRE Session, Paris 2014.
- [13] K. Juhre, M. Hering: Testing and long-term performance of gas-insulated systems for DC application. CIGRE-IEC Conference on EHV and UHV (AC & DC), Hakodate 2019.

- [14] S. Zhao, J. Kindersberger, M. Hering, K. Juhre: Measurement of surface potential at the gas-solid interface for validating electric field simulations in gas-insulated DC systems. CIGRE Session, Paris 2018.
- [15] O. Pischler, A. Pirker, U. Schichler: Generation of AC-DC hybrid voltages with a modified Greinacher cascade (*in German*). VDE-Fachtagung Hochspannungstechnik, Berlin 2018.
- [16] A. Winter, J. Kindersberger, M. Tenzer, V. Hinrichsen, L. Zavattoni, O. Lesaint, M. Muhr, D. Imamovic: Solid/Gaseous Insulation Systems for Compact HVDC Solutions. CIGRE Session, Paris 2014.
- [17] R. Bärsch, A. Küchler: Stresses and electrical behaviour of insulation systems under direct and mixed field conditions (*in German*). ETG-Fachtagung, Cologne 2010.
- [18] T. C. Guo, W. W. Guo: A transient-state theory of dielectric relaxation and the Curie-von Schweidler law. *Journal of Physics C: Solid State Physics*, 16(10): 1955-1960, 1983.
- [19] IEC, IEEE, IEC/IEEE 60076-57-129:2017-11, Power transformers – Part 57-129: Transformers for HVDC applications, 2017.
- [20] IEC, IEEE, IEC/IEEE 65700-19-03:2014-07, Bushings for DC application, 2014.
- [21] K. Nakanishi, A. Yoshioka, Y. Shibuya and T. Nitta: Experimental Study of the Breakdown Characteristics of a Gas-Insulated Bus. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. EI-16, no. 2, pp. 111-117, 1981.
- [22] Siemens, HVDC – High-voltage direct current transmission: Unrivaled practical experience, Link: <https://new.siemens.com/global/en/products/energy/high-voltage/high-voltage-direct-current-transmission-solutions/hvdc-plus.html>, 2017.
- [23] K. Frey, M. Weiland, „Gleichstrom verhindert Netzengpässe“, *Physik in unserer Zeit* 03/2019, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co., Weinheim, ISSN 0031-9252, pp. 140-147, 2019.



*Dr. Maria Kosse,  
Siemens Energy*



*Christoph Klein,  
Siemens Energy*

#### **Weitere Autoren:**

- *Dr. Katharina Frey, Siemens Energy*
- *Christian Küttinger, Siemens Energy*
- *Thomas Haupt, Siemens Energy*
- *Dr. Matthias Foehr, Siemens Energy*

## T3 Partial discharges of artificial defects in cable joints under high DC voltage

### Abstract

With an increasing amount of extruded DC cable systems in operation [1], the interest in partial discharge (PD) measurements under DC voltage as a potential diagnostic tool for the detection of defects in the insulation has increased [2]. However, it is often reported that PD occur less frequent under DC than under AC [2–10], which can reduce the effectiveness of the PD measurement. In this paper the PD repetition rates of artificial defects in MV-AC cable joints assembled on non-commercial DC-XLPE cables under DC voltage up to  $\pm 180$  kV are presented, including the strong influence of the cable temperature and the DC voltage magnitude. As an alternative to constant DC voltage a repeatedly in- and decreasing DC voltage (*unipolar repetitive DC ramp voltage*) was applied to the cables, too. This resulted in higher PD repetition rates than under constant DC voltage. However, as the PD repetition rates are comparatively low under both constant DC voltage and unipolar repetitive DC ramp voltage it is very likely that detecting defects under DC voltage is much more challenging compared to PD measurements under AC voltages, even at higher DC voltage magnitudes.

### 1 Introduction

The worldwide number of installed extruded HVDC cable systems with rated voltages up to 320 kV has increased significantly in recent years [1]. As part of the German energy transition, thousands of kilometres of 525 kV HVDC cable systems with the corresponding number of joints will be build and put into operation in the next years. For HVAC cable systems AC partial discharge (PD) measurements and monitoring are common methods for evaluating the quality of on-site assembly and ageing. PD in polymeric insulations point onto defects that electrically weaken or overstress the insulation locally and eventually may lead to electric breakdown due to long-term degradation, accelerated ageing or not withstanding over-voltage events as lightning or switching impulses. As the PD repetition rate (PD rep. rate) of defects under constant DC stress often is reported to be significantly lower than under AC (50 Hz) voltage [2–10] it is likely that PD as a degradation mechanism is much less harmful under DC [2, 3]. However, defects still may reduce the insulations ability to continuously withstand all operational stresses in the lifetime of a cable system, including all the combinations of voltage stresses (DC, transients, harmonics, energization, de-energization) and thermal stresses (load, no load, transitions from load to no-load and vice versa) [2]. Type, size, shape and location of defects in cable systems can be very diverse. For the time being experiences regarding the lifetime reduction due to different defects in cable insulations under longterm DC stress in combination with the various in-service electric and thermal stresses are rather limited. Therefore more research activities

and in-service experiences are required regarding the specific thread of the different defects on the lifetime of DC cable systems. For both AC and DC cable systems the lengths of cables and the prefabricated accessories commonly are routine tested in the factory. Therefore it is likely that defects being present during an after-installation/commissioning test are predominately a result of damages during transportation, laying or assembly. As not all defects lead to breakdown in the limited time of a voltage withstand test, PD as a useful signal in a diagnostic measurement could enhance the probability of revealing potentially hazardous defects still being present [2]. However, it obviously is mandatory for that purpose that a sufficient number of PD above the sensitivity threshold occur in the defect and the reported PD rep. rates of artificial defects under DC voltage [2–10] often are significantly lower than known for AC (50 Hz) voltage. As testing DC cables with AC voltage is an option acc. to the German amendment of DIN IEC 62895:2019-02 an AC PD measurement may be preferred in many cases. However, depending on the specific cable system and design there can be some limitations of AC as a testing voltage for DC cables: The required reactive power/current may limit the maximum testable cable length, the specific DC cable design may not be suited for AC stress in every case and the AC electric field distribution may differ considerably from DC in operation [1]. Furthermore testing a DC cable system with AC after a repair may be controversial when the systems has been stressed with DC for years. For these reasons DC PD measurements may be an option in some cases despite their likely inferiority (lower PD rep. rate) to AC.

For this study it was the aim to gather experiences regarding the PD rep. rates of (artificial) defects in joints on a DC-XLPE cable under high DC voltage and to identify measures that could enhance the effectiveness of the DC PD measurement. For this purpose the influence of the cable temperature and of the applied DC voltage magnitude on the PD rep. rate were investigated (Section 4). In addition the PD occurrence under unipolar repetitive DC ramp voltage were compared to constant DC voltage and AC voltage in Section 5 and 6. In Section 2 some introducing theoretical considerations regarding DC PD are given.

### 2 Fundamentals

#### *Electric field distribution in DC cables*

The electric field distribution in a HVDC cable insulation depends on the operational stage and load situation [1]. The main DC voltage stress types are constant DC voltage during operation and a rising or decreasing DC voltage during energization or de-energization. Under load the cable conductor heats up due to Joule losses and a thermal gradient  $\Delta T = T_i - T_o$  occurs in the insulation, with  $T_i$  and  $T_o$  being the temperature at the inner semi-conductive layer and the outer semi-conduc-

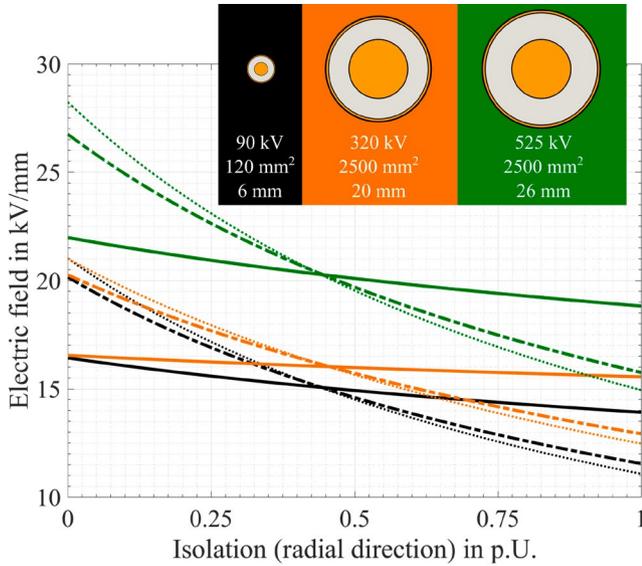


Figure 1: Calculated electric field strengths for AC stress (.....), DC stress without temperature gradient (-----) and with temperature gradient  $\Delta T = 15^\circ\text{C}$  (—) for three types of cables: A cable with a conductor cross-section of  $120\text{ mm}^2$  and an insulation thickness of  $6\text{ mm}$  at  $90\text{ kV}$  (black), a cable with  $2500\text{ mm}^2$  and  $20\text{ mm}$  at  $320\text{ kV}$  (brown) and a cable with  $2500\text{ mm}^2$  and  $26\text{ mm}$  at  $525\text{ kV}$  (green). All calculation were done with eqn. (3.1, 3.27, 3.29) in [1] and  $\alpha = 0.03$  and  $\beta = 0.01$ .

tive layer, respectively. During energization and de-energization the electric field is driven by the displacement current and therefore Laplacian as under AC voltage [1]. Thus during this stage the electric field is higher at the inner semi-conductive layer than at the outer semi-conductive layer (Figure 1, ..... ) and independent of the insulation temperature.

Under DC voltage the electric field distribution is determined by the local electric conductivities. The conductivity  $\sigma$  of a polymeric insulation itself is dependent on the local temperature  $T$  and the local electric field strength  $E$ , as can be seen by eqn. (1) [1].

$$\sigma(T, E) = \sigma_0 \cdot e^{\alpha(T-T_0) + \beta(E-E_0)} \quad (1)$$

In this equation  $T_0$  is a reference temperature,  $E_0$  is a reference electric field,  $\sigma_0$  is the conductivity at  $T_0$  and  $E_0$  and  $\alpha$  and  $\beta$  are the temperature and electric field coefficients. The electric field distribution under DC stress can be calculated with eqn. (3.27) and (3.29) in [1]. Under DC stress and no-load the electric field distribution resembles the Laplacian electric field under AC, being slightly different depending on the value of the electric field coefficient  $\beta$  and thus on the specific material characteristics. Under load a thermal gradient is present, which causes a gradient of the local conductivities in the insulation acc. to eqn. (1). Depending on the value of the temperature coefficient  $\alpha$  this can result in a more homogenous field distribution or even a field inversion with higher electric fields at the outer semi-conductive layer than at the inner one. In case of a defect being present in a cable insulation the electric field strength at the defect therefore is dependent on the operational stage, the load of the cable and the type, shape and location of a defect. Based on the field distributions shown

in Figure 1 it is reasonable to conclude that for voids (of the same kind) located nearby the inner semi-conductive layer the stress may be higher under DC voltage and no-load or AC voltage, whereas it is higher under DC voltage and load for voids located nearby the outer semi-conductive layer. Beside the differences in electric field strengths at a defect site there are also relevant differences for different operational stages regarding the charging process of a defect, which can have an influence on the PD rep. rate as is shown in the following.

#### PD under constant DC voltage

As the electric field distribution under DC voltage is determined by the conductivities the *abc-equivalent circuit* (abc-EC), which is used for basic considerations about PD processes of voids in solid insulations under AC voltage, has to be extended with resistors [3–5]. The resistor  $R_b$  in parallel to the capacitance  $C_b$  represents the resistivity of the insulation in series to the void. The resistance of the void  $R_c$  in parallel to the void capacitance  $C_c$  often is stated as surface resistance of the void walls, although it may be reasonable to take the void gas resistance into account, too. The capacitance  $C_a$  and the resistor  $R_a$  represent the healthy part of the insulation. Although the inhomogeneous field distribution in a cable is not taken into account by this equivalent circuit, it is sufficient to illustrate the basic PD effects under constant DC voltage and DC ramp voltage.

Under constant DC voltage (and steady state condition) the void voltage  $v_c$  is determined by the applied voltage  $v_0$  and the resistive voltage divider formed by  $R_b$  and  $R_c$ . It reaches a maximum value of  $v_{c,\text{max}} = v_0 \cdot R_c / (R_b + R_c)$ . As the capacitance of the void  $C_c$  is charged by the ohmic current through  $R_b$  the void voltage  $v_c$  follows an exponential RC charge characteristic with a time constant  $\tau$  [3, 4]:

$$v_c(t) = v_0 \cdot \frac{R_c}{R_b + R_c} \cdot (1 - e^{-t/\tau}) \quad (2)$$

$$\tau = \frac{R_b \cdot R_c}{R_b + R_c} \cdot (C_b + C_c) \quad (3)$$

When the void voltage  $v_c(t)$  reaches the *breakdown or ignition voltage* of the void  $v_{c,\text{ign}}$  a discharge from one side of the void

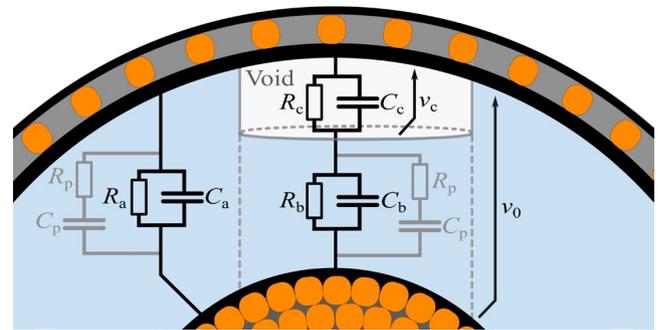


Figure 2: Equivalent circuit for PD in a void under constant DC stress, DC ramp stress and AC stress incl. the time-dependency of the apparent resistance of the insulation due to polarization effects of the insulation ( $R_p, C_p$ ).

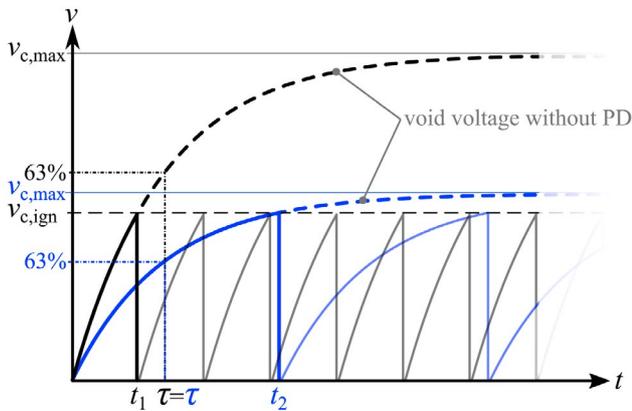


Figure 3: Charging process of a void under constant DC voltage for two different magnitudes of the applied DC voltage ( $v_0 > v_0$ ).

to the other occurs and discharges the void (Figure 3). After that the void voltage again rises exponentially until the next PD occurs. Since this process is continuously repeated, PD of unvarying polarity occur at approximately equal intervals. Stochastic factors, which are described in [5], are neglected here. The time between successive PD and therefore the PD rep. rate is related to the speed of the charging process of the void. Increasing the applied voltage  $v_0 > v_0$  will result in a higher maximum void voltage  $v_{c,max} > v_{c,max}$  (Figure 3). As the time constant  $\tau$  (eqn. 3) remains constant the void ignition voltage then will be reached earlier, resulting in a higher PD rep. rate ( $1/t_1 > 1/t_2$ ). Calculations in [3–5] state that the PD rep. rate increases approximately linear with the applied DC voltage.

As the insulation conductivity and thus also the insulation resistor  $R_b$  is a function of the temperature acc. to eqn. (1) the value of  $R_b$  decreases with increasing temperature and consequently the maximum void voltage  $v_{c,max}$  increases. As a result the same effect on the PD rep. rate occurs as illustrated before (Figure 3): The ignition voltage of the void is reached faster and the PD rep. rate becomes higher. As the *insulation current* or *leakage current* through  $R_b$  and  $R_a$  is proportional to the conductivity as well as to the applied voltage this current is also proportional to the PD rep. rate [3]. This correlation has been experimentally verified on plate-type samples by [3, 5, 8].

#### PD during DC voltage ramp-up and -down

During energization and de-energization, thus when the DC voltage is raised or decreased, the void is charged by the displacement current as under AC voltage. In this case the void voltage is determined by the capacitive divider formed by  $C_b$  and  $C_c$  and the void voltage  $v_c$  follows the change of the applied voltage:  $dv_c/dt = dv_0/dt \cdot C_b/(C_b + C_c)$ , see Figure 4. When a PD occurs the void voltage breaks down and then recharges again following the change of the applied voltage. In this *capacitive stage* the PD rep. rate is approximately proportional to the steepness  $dv_0/dt$  of the applied DC voltage [4]. When the DC voltage is repetitively in- and decreased acc. to Figure 4 and PD occur the void voltage and therefore the PD can have alternating polarities depending whether the applied

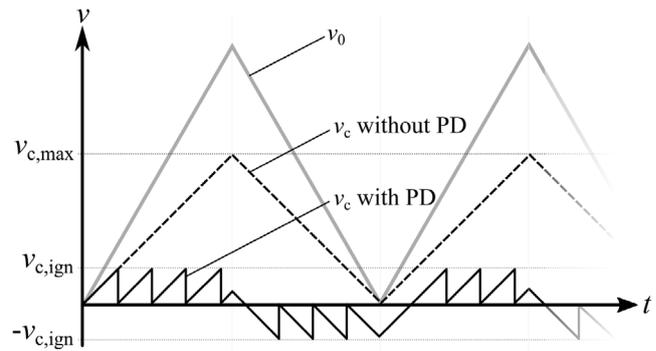


Figure 4: Charging process of a void under unipolar DC ramp voltage and occurrence of PD.

voltage currently is raised or decreased. This characteristic is in contrast to the unipolar PD which occur under constant DC stress.

#### Transition to steady state

It is known that after applying a DC voltage to a polymeric insulation the leakage current, and thus the *apparent conductivity* [11], is time dependent due to polarization effects [1, 3, 4, 11]. A constant leakage current (DC steady state) is reached after a time period of minutes to weeks depending on the material parameter [1, 4]. Polarization often is modelled using RC-serial circuits in parallel to the *geometrical* or *vacuum capacitance* and the *steady state resistor* of the insulation as can be seen in the equivalent circuit in Figure 2. This causes an exponential decrease of the leakage current with time after application of a DC voltage. As the leakage current charges the void the PD rep. rate follows the temporal course of the leakage current, which has been calculated [4] and experimental confirmed on polyethylene plate-type samples [3, 8]. Since several polarization processes with different time constants can occur simultaneously, the resulting current also can deviate from a natural exponential curve. For instance, in [10, 11] the temporal course of the leakage current is fitted with a power function  $c \cdot t^{-n}$  curve with  $t$  being the time and  $c$  and  $n$  being constants. In addition to that another transition takes place in cables, which may superimpose: When starting to be loaded the electric field distribution changes acc. to Fig. 1, eventually changing the electric field strength at the defect.

### 3 Experimental setup and method

For the presented experiments non-commercial DC-XLPE cables with a conductor cross-section of 120 mm<sup>2</sup> and an insulation thickness of 6 mm have been used. Based on comparisons of the calculated electric field strengths with a 320 kV cable (2500 mm<sup>2</sup>, 20 mm) the ‘rated DC voltage’ of the cable was defined to be 90 kV at the beginning of the researches, resulting in comparable calculated electric field strengths (Figure 2, black and brown). Compared to an 525 kV cable with a conductor cross-section of 2500 mm<sup>2</sup> and an insulation thick-

ness of 26 mm insulation (based on minimal tech. specifications in [12]) the electric field strengths are slightly lower in the cable used in the experiments (Figure 2, compare black to green). Medium voltage AC silicone cable terminations and medium voltage 3-piece silicone cable joints were assembled onto the cables. Artificial defects have been applied into the joints, reproducing defects caused by poor assembly.

*Types of artificial defects*

In this study PD results of three types of artificial defects applied in the joints are presented. A defect of the type *Cut* was made by cutting into the cable insulation nearby the end of the outer deflector (① in Figure 3). The depth of the defect was 1.4 mm with an axial length of 4.4 mm. The defects of type *CaE* (② in Figure 3) were made during peeling of the outer semi-conductive layer. At the end of the semi-conductive layer too much insulation was removed, resulting in a triangular shaped void at the edge of the end of the semi-conductive layer. For both defects of this type the length was approx. 10 mm and the depth at the deepest point was 1.5 mm and 1.8 mm, respectively. The defect *MP* (③ in Figure 3) replicates a not-connected deflector, which may happen due to wrong positioning of the joint. As a result discharges occur between the deflector and outer semi-conductive layer.

*Testing setup and PD measurement*

A Greinacher circuit supplied a DC voltage up to +180 kV or -180 kV, which was measured by a resistive divider. With a damping resistor of 20 MΩ and a 5 nF capacitor in parallel to the cable under test a ripple factor below 0.3 % was achieved. However, slow fluctuations of approx. 1 kV caused by the fluctuation of the AC supply voltage occurred over the hours of testing. A heating transformer inducing currents up to 500 A into the cable conductor loop was used to heat up the cable and accessories by Joule heating. The conductor temperature

was measured using a fibre optic sensor, which was inserted into a small hole drilled through the cable insulation at the termination. To securely identify PD from inside the cable joint a selective PD measurement method was used, which has been presented in [13]. The PD were measured using High Frequency Current Transformers (HFCTs) and OMICRON MPD 600 at a centre frequency of 1.2 MHz and 1.5 MHz filter bandwidth. Several preliminary measurements incl. external PD sources, PD-shaped calibration pulses injected at different locations and induced heating currents verified the functionality of the used method. The PD charge threshold was set to 5 pC for all defects other than *MP*, for which it was set to 10 pC. Thus the PD rep. rates presented in this paper refer to these threshold levels. During the measurements the DC voltage, the temperature and the time of occurrence, polarity and apparent charge of each single PD pulse was recorded. Analysis and visualisation was done offline after the measurement using MATLAB.

*Testing procedure*

Three types of DC testing procedures were used for the measurements presented in this paper: one-level tests, step-and-hold tests and unipolar repetitive DC ramp voltage tests (Figure 6). For the first-mentioned the DC voltage was raised slowly (slower or equal to 1 kV/s) up to ±180 kV and was held there for a specific time. After this time the DC voltage was reduced in the same manner. In one-level tests either the temperature was constant over the whole time or two heating cycles, each with 12 h of heating and 12 h of cooling-down, were applied as can be seen in Figure 8. The PD rep. rates for constant DC voltage were calculated for PD occurring from

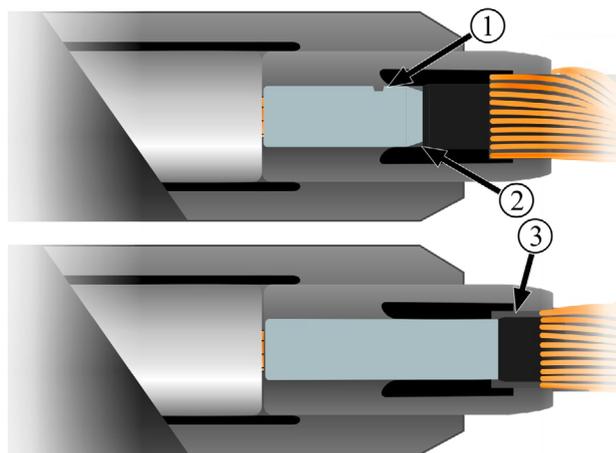


Figure 5: Illustration of sections of 3-piece cable joints, applied with artificial defects: ① Cut in the surface of the cable insulation, ② Void at the edge of the outer semi-conductive layer, ③ Deflector not contacted to the shield of the cable due to wrong positioning of the joint.

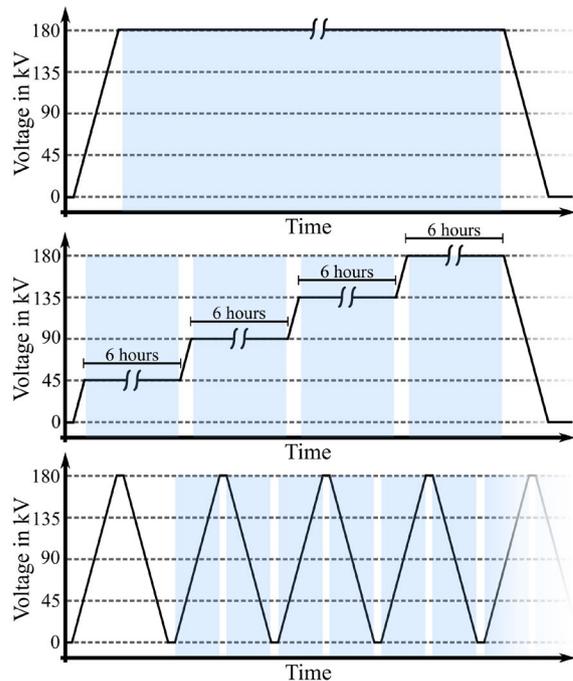
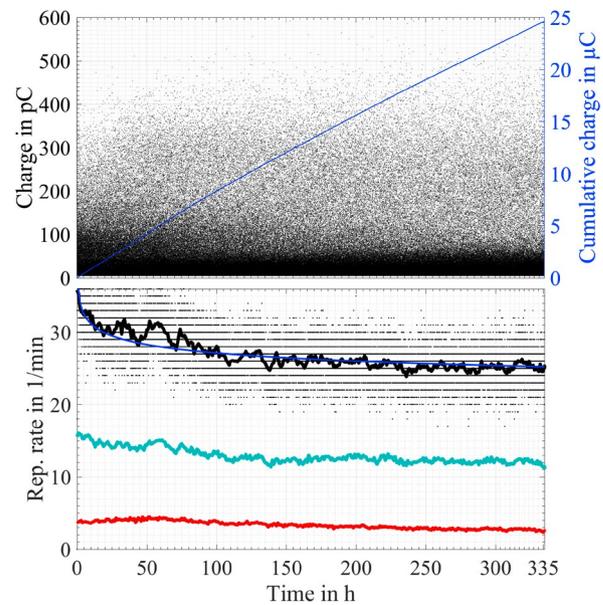


Figure 6: Experimental procedure: One-level test at ±180 kV (top) and step-and-hold test with steps of ±45 kV (middle) and unipolar repetitive DC ramps (bottom). PD rep. rates are determined during the blue time periods.

the 5<sup>th</sup> minute after reaching the voltage level to the 5 minutes before end of the voltage level and therefore PD occurring during the voltage raise/decrease were excluded. This is illustrated by the blue areas in *Figure 6*. For step-and-hold tests the voltage was raised in steps of 45 kV with 1 kV/s and was held for six hours at each voltage level. The step-and-hold tests have been done at different conductor temperatures at RT (23..30 °C), slightly elevated temperature (approx. 50 °C) and maximum temperature (approx. 70 °C). The heating current was induced before the voltage was applied to ensure a constant temperature when starting. In tests with unipolar repetitive DC ramp voltage 21 cycles of ramping up and down the DC voltage to  $\pm 90$  kV or  $\pm 180$  kV was done with 1 kV/s. To avoid overshooting the target voltage the DC voltage was raised slightly slower for the last 5 kV. At target voltage as well as at zero voltage a rest time of 15 s was held. To calculate the PD rep. rate independently of the specific value of the rest times this 15 s were not included in the calculation for *Table 1*. As the PD occurrence can be influenced by previous stress at opposite polarity the PD was counted starting at ramp cycle two (*Figure 6*, bottom). For the purpose of comparison the PD rep. rate at inception voltage under AC 50 Hz were determined, too.

#### 4 PD under constant DC voltage

The *Figure 7* shows results of a PD measurement for 335 hours at +180 kV and elevated temperature at the defect of type *Cut*. In the top part of *Figure 7* the apparent charge of every single detected PD (black dots) coming from the defect and the cumulative charge of these PD (blue line) are shown over time. As expected for DC PD the occurring PD were unipolar, depending on the polarity of the applied DC voltage. The cumulative charge reached almost 25  $\mu\text{C}$  after 335 h of DC stress. The steepness of the cumulated charge increase got slightly lower with time and became relatively linear with approx. 1.6  $\mu\text{C}/\text{day}$  at the end of the measurement. As can be seen by the density of the PD in the plot the majority of PD had comparable small apparent charges, which was also observed for the other void type defects investigated in the experiments. However, this may not be representative for void type defects in general. In the bottom plot of *Figure 7* the hourly PD rep. rate over time for PD larger than 5 pC (black line), larger than 20 pC (cyan) and larger than 100 pC (red) are shown, which illustrate that approx. the half of all PD had apparent charges between 5 and 20 pC. In addition, the PD rep. rate of each minute for PD larger than 5 pC is shown as black dots, showing that the PD rep. rate itself scattered around a mean value. The hourly PD rep. rate (black line) decreased over time from initial values of approx. 35 PD/min to values of approx. 25 PD/min, which can be considered to be close to a steady-state PD rep. rate for this defect at this voltage and temperature. As mentioned earlier the PD rep. rate often follows the polarisation current [3–5, 8, 10]. Although the current was not measured in the presented experiments, the observed temporal course of the PD rep. rate can be fitted by a  $c \cdot t^{-n}$  curve (blue line,  $c = 45.9$ ,  $n = 0.06$ ) as it is known for polarisation currents of PE and XLPE [10, 11]. In additional consecutive measurements it was observed that the pre-



*Figure 7: Top: PD charge of each single PD (•) and cumulative charge (blue) over 335 h of the defect Cut at +180 kV and elevated temperature. In this measurement the joint was heated by a fan from the outside. Bottom: Development of the hourly PD rep. rate for PD larger 5 pC (black), larger 20 pC (cyan) and larger 100 pC (red) and the overall PD rep. rate of each minute (•).*

stress history of the insulation has an influence on the temporal development of the PD rep. rate, even in cases when the samples are short-circuited and heated between the measurements for longer times than the prestress was present. For that reason the temporal course of the PD rep. rate of prestressed insulations can differ from the temporal decrease presented in *Figure 7*.

#### Influence of the temperature

The *Figure 8* and *Figure 9* show the PD rep. rates occurring under constant DC voltage and two consecutive heating cycles for the defect *MP* (*Figure 8*) and *CaE* (*Figure 9*). The green lines show the conductor temperatures whereas the black lines (for +180 kV) and grey lines (for –180 kV) show the PD rep. rates. As can be seen the PD rep. rates significantly increased when the temperature rose, which was most likely a result of the increasing conductivity of the cable insulation as reported in [11]. Furthermore it can be seen in the Figures that the PD rep. rate was higher under positive DC voltage than under negative DC voltage, which will be further discussed in the next section. It was experienced that the PD rep. rate cannot be expected to follow the exact same curve for the adjacent heating cycles, especially for the first hours of a measurement. The reason for that very likely can be found in the temporal development of the conductivity under continuous DC stress (Section 2), that superimposes the temperature-caused increase of conductivity as it was also shown in [11]. In addition, the prestress history, especially the polarity of previous DC stress can affect the PD rep. rate during the first hours. Moreover the transition of the field distribution in the cable from no-load to load (Fig.1) could be another temporal factor influencing the field at the defect and the PD rep. rate.

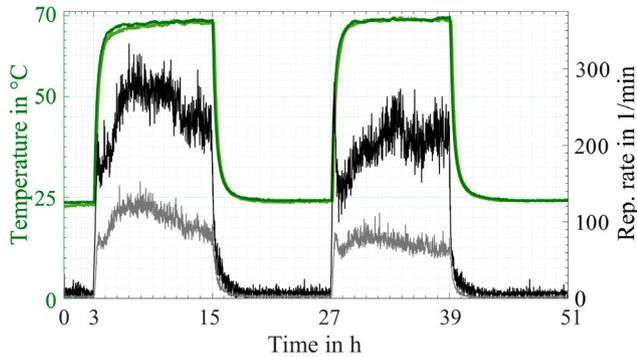


Figure 8: PD rep. rates of defect MP at +180 kV (black, dark green) and -180 kV (grey, light green) and two heating cycles with the green lines being the conductor temperatures. PD threshold was 10 pC.

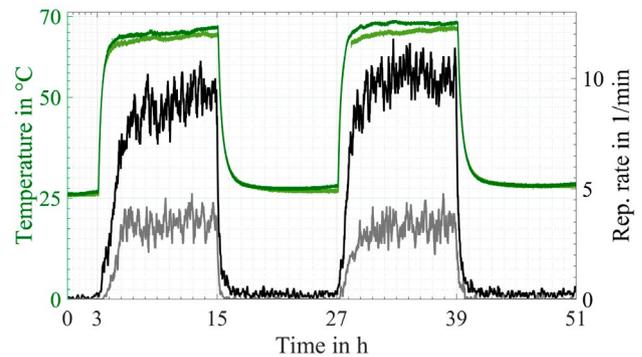


Figure 9: PD rep. rates (10 min mean values) of defect CaE at +180 kV (black, dark green) and -180 kV (grey, light green) and two heating cycles with the green lines being the conductor temperatures. PD threshold was 5 pC.

Figure 10 shows the observed PD rep. rate as a function over the conductor temperature of the two defects MP and CaE at both polarities gained at  $\pm 180$  kV and  $\pm 135$  kV in step-and-hold tests. It can be seen that the increase of the PD rep. rate over temperature is approximately exponential which is in accordance to results of [3, 10] on PE plate-type samples with artificial voids and in accordance to the eqn. (3). Again a

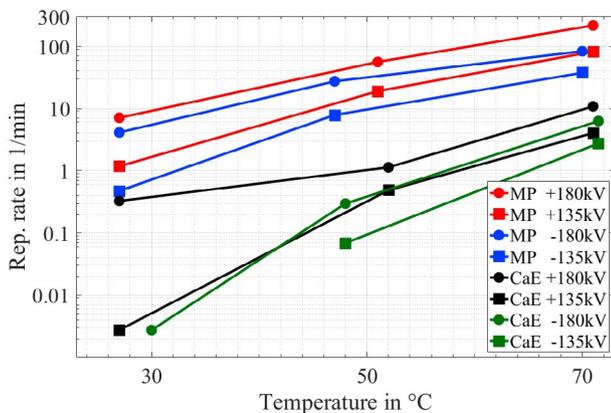


Figure 10: Average PD rep. rate as a function of the conductor temperature at  $\pm 180$  kV and  $\pm 135$  kV.

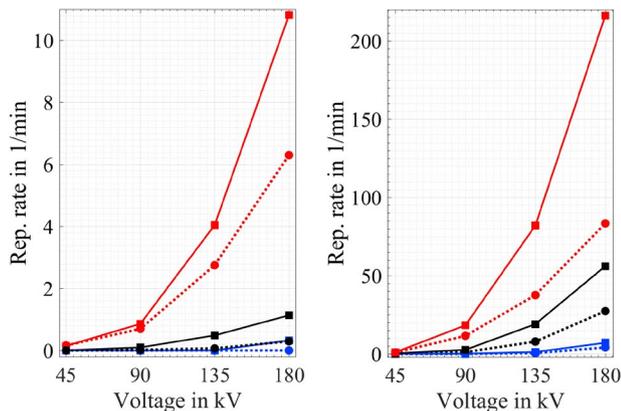


Figure 11: Average PD repetition rate as a function of the applied DC voltage for defect CaE (left) and MP (right) under positive DC voltages (■) and negative DC voltages (●) and room temperature (blue), approx. 50°C (black) and approx. 70°C (red).

difference of the PD rep. rate for positive and negative polarity can be seen, too.

#### Influence of the DC voltage magnitude

In Figure 11 the PD rep. rate over the applied DC voltage magnitude is shown for the defect CaE (left) and MP (right) for both polarities and at different conductor temperatures. It can be seen, that the PD rep. rate increased more than proportional with increasing voltage. Especially under elevated temperature this effect resulted in significantly higher PD rep. rates compared to lower voltages. Theoretical calculations in [3–5] suggested that the PD rep. rate increases approximately linear with the applied DC voltage, whereas the measurements presented here and in [3, 10] show a more than proportional increase. One but not necessarily the only reason for that may be the increase of conductivity at higher electric field stresses (eqn. 3), which was not taken into account in the referred theoretical considerations. In Figure 11 it again can be seen that the polarity of the DC voltage can have an influence on the PD rep. rate. For void type defects, that are located at or nearby the grounded outer semi-conductive layer or deflector, a high PD rep. rate occurs under positive DC voltage compared to negative DC voltage. This is in accordance to results for PE plate-samples with artificial voids reported in [3]. It further can be seen in the figures that for these two defects the PD rep. rate is higher at  $\pm 90$  kV and 70°C than at twice the voltage but room temperature.

#### 5 PD under unipolar repetitive DC ramp voltage

In Figure 12 the occurring PD at the defect CaE are shown for twenty unipolar repetitive DC ramps of negative polarity. In contrast to PD occurring under constant DC voltage PD pulses with positive and negative polarity occurred depending whether the DC voltage is currently raised or decreased, as it has been described in Section 2 and Figure 4. For the particular example of CaE 4293 PD occurred during the 141 min and 20 ramps, with approx. 10% more positive PD than negative PD. For this defect no significant difference between positive DC ramp voltage (not shown here) and negative DC ramp voltage were observed neither for the number of PD nor for their apparent charges.

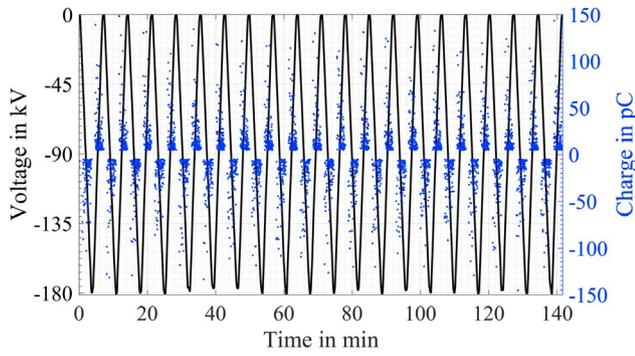


Figure 12: PD occurring under negative unipolar repetitive DC ramp voltage for the defect CaE.

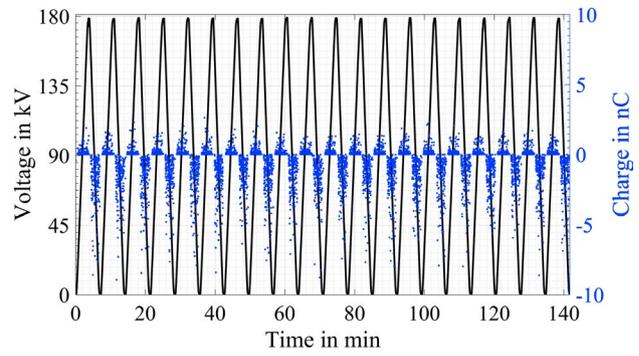


Figure 13: PD occurring under positive unipolar repetitive DC ramp voltage for the defect MP.

A different characteristic was observed for the defect MP: As can be seen in both the Figure 13 (positive DC ramp voltage) and Figure 14 (negative DC ramp voltage) the charges of the negative PD occurring during a negative DC voltage slope ( $dv/dt < 0$ ) were larger than the positive PD during positive DC voltage slope ( $dv/dt > 0$ ). On the other hand the latter occurred approx. 2.5-times more frequently. This characteristic was independent of the actual DC voltage polarity, caused by the fact that the displacement current is very similar for changing the DC voltage from  $-180$  kV to  $0$  kV as from  $0$  kV to  $180$  kV. The reason for the significant differences of positive and negative PD could be the very unsymmetrical shape of the defect which could cause a significant polarity effect. It appears that the defect ignition voltage under negative  $dv/dt$  was higher and thus more charges were transferred when finally the discharge occurred resulting in larger PD charge magnitudes. Although the two examples show that different PD pattern for different defects can occur under unipolar repetitive DC ramp voltage, up to now the number of investigated defects is too small to conclude any possibilities to use these pattern for concluding defect types as under AC voltage.

### 6 Comparison of the PD rep. rates

In Table 1 the PD rep. rates of four defects are shown for constant DC voltage at  $\pm 180$  kV, unipolar repetitive DC ramp voltage at  $\pm 180$  kV and  $\pm 90$  kV, both with  $1$  kV/s, and AC ( $50$  Hz)

	CaE1	CaE2	Cut	MP
cDC +180 kV	< 0.5	1.5...3	0.3...0.45	6...8
cDC -180 kV	< 0.2	1...3	< 0.1	1...2
rDC +180 kV	35.1...41	134	4.3	90...95
rDC -180 kV	32.7...41	-	-	102...103
rDC +90 kV	17.4...18.1	-	-	77
rDC -90 kV	15.7	-	-	83
AC (peak)	$\approx 70$ k at 48 kV	$\approx 30$ k at 38 kV	$\approx 8$ k at 49 kV	$\approx 20$ k at 14 kV

Table 1: Average PD rep. rate (1/min) for constant DC voltage (cDC) at  $\pm 180$  kV, unipolar repetitive DC ramp voltage (rDC) at  $\pm 180$  kV and  $\pm 90$  kV and AC ( $50$  Hz) at AC inception voltage for four defects at room temperature.

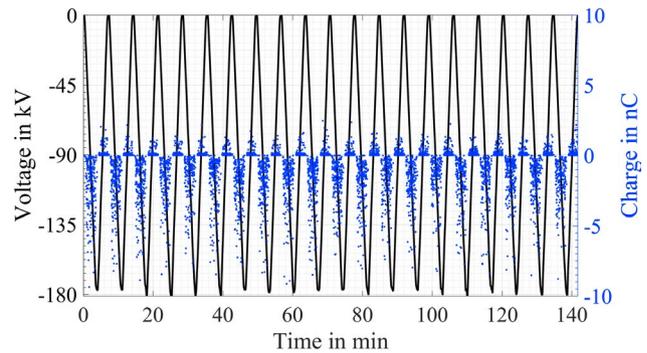


Figure 14: PD occurring under negative unipolar repetitive DC ramp voltage for the defect MP.

at AC inception voltage. Due to premature breakdowns of the highly stressed MV-AC joints, unrelated to the artificial defects, no data was gained about unipolar repetitive DC ramp voltage at  $-180$  kV and  $\pm 90$  kV for the defects CaE2 and Cut.

For the presented defects the PD rep. rates under constant DC voltage ( $\pm 180$  kV) and RT were very low for both the DC voltage polarities, even at DC voltages as high as twice the 'rated DC voltage'. With unipolar repetitive DC ramp voltage the PD rep. rates of the presented defects were at least 10 times higher than under constant DC voltage at the same voltage magnitude. In addition, the PD rep. rates of the two defects CaE1 and MP are significantly higher even at only  $\pm 90$  kV ramp voltage than at twice the constant DC voltage. Comparing the PD rep. rates under unipolar repetitive DC ramp voltages at both polarities it can be seen that there are only slight differences. Therefore and underpinned by the theoretical considerations in section 2 it is likely that the choice of DC voltage polarity for repetitive DC ramp voltage is much less important than under constant DC voltage because electric fields of both polarity are induced in the defect by the displacement current. Nevertheless the results of the defect Cut show that also under repetitive DC ramp voltage the PD rep. rates can be very low, although they still are high compared to constant DC. The observed PD rep. rates under AC ( $50$  Hz) voltage were very high compared to constant DC and unipolar repetitive DC ramp voltage for all defects, even at lower AC voltages.

## 7 Conclusion and discussion

PD measurements under DC voltage were presented for artificial defects in cable joints with focus on the PD repetition rate. Under constant DC voltage the observed PD repetition rates of the defects were very low. This significantly reduces the probability of success of a DC PD measurement, especially compared to AC (50 Hz) voltage. According to [2], for the time being there are no known defects in DC insulation systems that can be identified more easily with DC PD measurement than with AC PD measurement. Nevertheless, the limited experience with DC PD measurements to date leaves it open whether this always applies to all possible defects. Based on the results presented here and result of [9] even very low PD rep. rates under constant DC voltage can point onto very severe defects. On the other hand it is likely that very small defects hardly can be detected by a PD measurement under constant DC voltage. The PD rep. rate of a defect is very dependent on the conductivity of the insulation [3, 4] and therefore may also vary considerably between different insulation materials.

Despite the reduced capability of defect exposure and despite AC most likely being the better choice for a PD measurement, there might be cases in which a DC PD measurement still may be taken into consideration because AC simply is not applicable. Such cases could be PD monitoring of DC cable accessories in service as well as testing DC cable systems that are not suited for AC stress or require too much reactive power/current due to their length. Especially for testing a repaired/replaced cable component of a cable systems that has been stressed with DC voltage for months or years applying AC voltage may not be undisputed. When performing a DC PD measurement on a cable or cable accessory some measures could be taken into consideration to increase the PD rep. rate and therefore enhance the probability of a detection of defects: Heating the cable did significantly enhance the PD rep. rate of the presented defects, which very likely is a result of an increased insulation conductivity at higher temperatures. Due to that also the applied DC voltage at which a defect can be detected at all becomes lower with increasing insulation temperature. In both cases of DC PD testing and DC PD monitoring it is reasonable to compare the temporal development of the PD rep. rate with the temporal development of the cable temperature. This could enhance the certainty of measured pulses being PD from inside a cable system and therefore validate the PD measurement result as a whole. As the PD rep. rate also is very dependent on the DC voltage magnitude it is reasonable to apply the maximum admissible DC testing voltage during the whole testing time instead of stepwise raise and hold at lower voltage levels.

For the presented defects it was observed that applying unipolar repetitive DC ramp voltage with 1 kV/s resulted in higher PD rep. rates than under constant DC voltage - at least for some defects even at lower voltage magnitudes compared to constant DC. In addition, due to the bipolar charging process by the displacement current the PD rep. rate seems to be less dependent on the polarity of the DC ramp voltage than for constant DC voltage. Taking these advantages into account using unipolar repetitive DC ramp voltages instead of constant DC voltage can be a reasonable alternative to con-

stant DC voltage and still could be supplied by DC equipment. A lower or higher steepness of the DC ramp voltage, which may be dependent on the maximum ampacity of the DC supply equipment, can reduce or increase the PD rep. rate because less or more cycles per time can be applied.

### Acknowledgement

The authors would like to thank Dipl.-Ing. Mathias Behle and Dr. Volker Waschk (both NKT GmbH & Co. KG, Köln) for their valued contribution to these researches.

## 8 Literature

- [1] Mazzanti, G.; Marzinotto, M.: Extruded Cables for High-Voltage Direct-Current Transmission. ISBN 978-1-118-09666-6, 2013
- [2] CIGRE WG D1.63.: Progress on Partial Discharge Detection under DC Voltage Stress. Interim Report, CIGRE Colloquium, India, 2019.
- [3] Shihab, S.: Teilentladungen in Hohlräumen von polymeren Isolierstoffen bei hoher Gleichspannung. PhD thesis, TU Braunschweig, Germany, 1972.
- [4] Kreuger, F. H.: Industrial High DC Voltage: Fields, Breakdowns, Tests. ISBN 90-407-1110-0, 1995.
- [5] Fromm, U.: Partial Discharge and Breakdown Testing at High DC Voltage. PhD thesis, TU Delft, 1995.
- [6] Shekhar, A.; et al.: Impact of DC Voltage Enhancement in Partial Discharges in Medium Voltage Cables. Energies, 2017, Vol.10, Issue 12, 2017.
- [7] Elben, A.; et al.: Enhancing the Effectiveness of Partial Discharge Measurements on HVDC Cables by Use of Pulsed X-ray. Jicable'19, France, 2019.
- [8] Rogers, E. C.; Skipper, D. J.: Gaseous discharge phenomena in high-voltage D.C. cable dielectrics. Proceedings of the IEE - Part A, Vol. 107, Issue 33, 1960.
- [9] Gu, X.; et al.: Partial Discharge Detection on 320 kV VSC-HVDC XLPE Cable with Artificial Defects under DC voltage. IEEE TDEI, Vol.25, No.3, 2018.
- [10] Watanabe, K.: D.C. partial discharge and current in polyethylene. JJAP, Vol. 17, No. 3, 1977.
- [11] Häring, D.; Jenau, F.: DC conductivity measurements of polymeric HVDC insulation materials under consideration of a dynamic temperature profile. Jicable'19, France, 2019.
- [12] Braun, A.; et al.: PQ Test of Extruded HVDC 525-kV Underground Cables: Results and Conclusion. Jicable'19, France, 2019.
- [13] Esterl, F.; Plath, R.: Sensitive and selective partial discharge measurement method for DC and AC cable joints. Jicable'19, France, 2019.

### Authors:

- Florian Esterl, M.Sc., Technische Universität Berlin
- Prof. Dr.-Ing. Ronald Plath, Technische Universität Berlin
- Dr.-Ing. Christian Freitag, TenneT TSO GmbH
- Dr.-Ing. André Wagner, TenneT TSO GmbH
- Dr.-Ing. Roland Dongping Zhang, TenneT TSO GmbH

## E1 Resilienz der Strom- und Gasversorgungsnetze im Rahmen einer Gesamtsystembetrachtung

Mitte des Jahres wurden mehrere Stellungnahmen veröffentlicht, in denen sich VDE und DVGW (Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.) zur Bewältigung der Herausforderungen der Energiewende für eine konsequente Gesamtsystembetrachtung einsetzen (siehe hierzu u. a. ETG *journal* 2/2020). Das mit der Energiewende verfolgte Ziel der CO<sub>2</sub>-Reduktion in allen Sektoren kann durch optimale Nutzung und Weiterentwicklung bereits vorhandener Infrastrukturen erreicht werden. Deutschland hat eine zuverlässige Strom- und Gasinfrastruktur, die mit Blick auf die Dezentralisierung der Energieversorgung entsprechend anzupassen ist. Hierbei wird die Digitalisierung mit Sensorik, Aktorik und Kommunikationsinfrastruktur einen entscheidenden Beitrag liefern, um Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit weiterhin zu gewährleisten.

Im Rahmen langfristiger Lösungen – bezogen auf diese beiden Zielgrößen Wirtschaftlichkeit und Versorgungssicherheit – taucht in Fachkreisen zunehmend der Begriff „Resilienz“ auf, ohne dass es hierzu aus Sicht der Verbände VDE und DVGW eine einheitliche Definition und ein einheitliches Verständnis gibt. Der Koordinierungskreis Strom / Gas als Gemeinschaftsgremium von VDE und DVGW hat – ausgehend von einer Begriffsdefinition der Resilienz – seine Einflussfaktoren sowie die Möglichkeit eines grundsätzlichen Gestaltungsprozesses in einem Papier aufgezeigt. Hiermit soll u. a. eine Basis geschaffen werden, um Diskussionen zum Thema sowie ggf. stattfindende Forschungs- / und Normungsaktivitäten in einen einheitlichen Rahmen stellen zu können. Das Papier beschäftigt sich im Wesentlichen mit der Strom- und Gasinfrastruktur, da deren Resilienz Grundvoraussetzung für die Resilienz weiterer Systeme (z. B. Wasserversorgung, Wärmeversorgung, Telekommunikation) ist.

Nachfolgend werden die Kernaussagen des Papierses zusammenfassend wiedergegeben:

Der Begriff der Resilienz hat seinen Ursprung in der Materialwissenschaft. Er beschreibt die Fähigkeit eines Körpers, sich unter Druck zu verformen und anschließend wieder in die Ursprungsform zurückzukehren. Der Begriff der Resilienz wird heute in unterschiedlichen Bereichen verwendet: in der Psychologie, der Wirtschaft, der Ökologie, den Ingenieurwissenschaften, aber auch zunehmend in der Energiewirtschaft. Mit Blick auf das Energieversorgungssystem kann Resilienz allgemein als die Fähigkeit bezeichnet werden, Veränderungen zeitgerecht und wirkungsvoll zu bewältigen, mit ihnen umzugehen, sich anzupassen und sich nach möglichen Störungen von diesen schnell wieder zu erholen. Bezogen auf Strom- und Gasinfrastrukturen bedeutet Resilienz somit: Bewahren und Wiederherstellen der Grundstrukturen und Funktionen des Netzes.

Resilienz eines Netzes besteht gemäß der vom Koordinierungskreis vorgeschlagenen Definition aus folgenden drei Komponenten:

1. Robustheit von Komponenten (Widerstandsfähigkeit von Betriebsmitteln gegen äußere und innere Einflüsse zur Aufrechterhaltung der Struktur und Funktionalität des Systems im Rahmen des Normalbetriebes)
2. Anpassungsfähigkeit oder auch Robustheit des Systems, d. h. Begrenzung der Auswirkung von auftretenden Störungen im System (zeitlich, räumlich, Umfang) oder auch durch Vorhandensein funktional gleicher oder vergleichbarer Ressourcen oder Strukturen (Redundanzen), die bei Ausfall einzelner Komponenten die Funktionalität des Systems übernehmen zu können.
3. Erholungsfähigkeit, d. h. Fähigkeit, die Struktur und die Funktionalität des Systems nach einer Störung in möglichst kurzer Zeit wiederherstellen zu können und dann schrittweise zum Normalbetrieb zurückzukehren.

Robustheit und Anpassungsfähigkeit können im Wesentlichen durch die Kernprozesse „Planung“ und „Bau“, die Erholungsfähigkeit durch den Kernprozess „Betrieb“ gestaltet werden.

Äußere und innere Einflüsse bestimmen die Resilienz eines Systems. Um hierauf adäquat reagieren zu können, ist zunächst deren Kenntnis und eine entsprechende Risikoabschätzung notwendig. Äußere Einflüsse sind z. B. Wetterbedingungen, Einflussnahme / Beschädigungen durch Dritte, Lieferengpässe bei Materialien und Ersatzteilen, Verfügbarkeit externer Dienstleister. Innere Einflüsse resultieren wesentlich aus Entscheidungen und Handeln der einzelnen Unternehmen in Vergangenheit und Gegenwart. Neben der gewachsenen Netzinfrastruktur stellt hier das Personal mit seiner Qualifikation eine entscheidende Einflussgröße dar.

*Bild 1* zeigt die Einflussfaktoren in einem weiteren Detaillierungsgrad mit ihrer Zuordnung zur Robustheit, Anpassungsfähigkeit und Erholungsfähigkeit.

Um die Resilienz des Energieversorgungssystems zu gestalten, sind folgende fünf Schritte notwendig:

1. **Risikoanalyse durchführen:** Unter Hinweis auf VDE S 1001<sup>1</sup> / DVGW G 1001<sup>2</sup> besteht die Aufgabe darin, Schwachstellen zu ermitteln, ihre Auswirkungen auf das Versorgungssystem abzuschätzen und mögliche Optionen zur Neutralisierung der Risiken bezogen auf die Einzelkomponenten und das Gesamtsystem, bei dem ein wertorientiertes Assetmanagement (nach ISO 55000) unterstützen kann, zu identifizieren.

1 VDE FNN Hinweis „Sicherheit in der Stromversorgung – Hinweise für das Risikomanagement des Netzbetreibers“

2 DVGW Technischer Hinweis – Merkblatt „Sicherheit in der Gasversorgung; Risikomanagement von gastechnischen Infrastrukturen im Normalbetrieb“

Resilienz über alle Spannungs- und Druckebenen denken

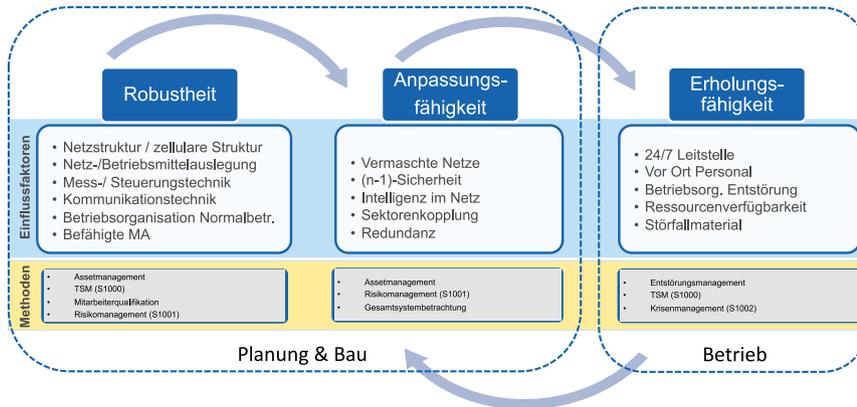


Bild 1: Einflussfaktoren auf die Resilienz und deren Zuordnung zur Robustheit, Anpassungsfähigkeit und Erholungsfähigkeit eines Systems

- Komponenten robust gestalten** (Kernprozesse „Planung“ und „Bau“): Äußere und innere Einflussfaktoren sollen die Funktion der Einzelkomponenten nur minimal beeinträchtigen. Basierend auf der durchgeführten Risikoanalyse führt eine entsprechende Netzinfrastrukturplanung sowie eine Auslegung der Betriebsmittelkomponenten unter Berücksichtigung ihrer Einbindung in das Gesamtsystem zur Resilienz der Versorgungsinfrastruktur.
- Anpassungsfähigkeit herstellen / System robust gestalten** (Kernprozesse „Planung“ und „Bau“): Ziel ist es, durch geeignete Maßnahmen bei Komponentenausfall die Auswirkungen auf das Gesamtsystem räumlich, zeitlich und vom Umfang zu begrenzen. Das Vorhalten von Systemkomponenten – mehr als für den Normalbetrieb notwendig – eröffnet die Möglichkeit, bei Ausfall einzelner Komponenten auf diese „Reserve“ umschalten zu können. Das (n-1)-Prinzip oder die Vermaschung der Netze wird seit vielen Jahren in der Netzplanung erfolgreich umgesetzt. Redundante oder sich ergänzende Systeme, wie z. B. bei der Schutzstaffelung erhöhen die Widerstandsfähigkeit bzw. die Robustheit des Systems gegenüber Störungen. Mit Blick auf die zunehmende Gesamtsystembetrachtung mit der Konvergenz von Strom- und Gasinfrastruktur (siehe hierzu auch die gemeinsamen VDE / DVGW Botschaften in ETG *journal* 2/2020) ergeben sich weitere, neue Möglichkeiten, die Anpassungsfähigkeit des Gesamtsystems zu erhöhen. Intelligente Systeme sowohl auf der Primär- als auch auf der Sekundärtechnik in Verbindung mit entsprechender Vernetzung über Informations- und Kommunikationstechnik eröffnen ebenfalls zusätzliche Perspektiven.
- Systemfunktionalität wiederherstellen** (Kernprozess „Betrieb“): Um bei Ausfall des Systems dessen Funktionen so schnell wie möglich wieder herstellen zu können, sind Umschaltungen (Nutzung von Redundanzen) oder weitergehende Maßnahmen zur Bewältigung außergewöhnlicher Situationen (Krisenmanagement nach VDE S 1002<sup>3)</sup> bzw. DVGW G 1002<sup>4)</sup> vorzubereiten und im Bedarfsfalle erfolgreich auch unter Stress anzuwenden. Prozess- und Aufbauorganisation, das Vorhalten bzw. die Zugriffsmöglich-

- keit auf das erforderliche Störfallmaterial, auf ausreichende, qualifizierte Personalreserven, sowie Schulungen des eingesetzten Personals inklusive des Krisenstabes sind hierbei wesentliche Voraussetzungen.
- Lernerfahrungen sammeln und Handlungsoptionen ableiten:** Lernen aus Übungen oder erfolgreich bewältigten Krisensituationen, aber auch aus der Vermeidung solcher Situationen, schaffen die Voraussetzungen, ein auf Resilienz ausgerichtetes System kontinuierlich zu optimieren und nachhaltig an verändernde Rahmenbedingungen anzupassen. Hierzu sind im Sinne eines Wissensspeichers detaillierte Dokumentationen von Krisenerfahrungen und auch identifizierten Vermeidungsstrategien notwendig. Diese fließen dann in dem Regelkreis wieder als Erkenntnis in die Risikoanalyse.

Aufgabe einer zukünftigen Resilienzstrategie wird es sein, Wirtschaftlichkeit und Bezahlbarkeit der Energieversorgung sowie Versorgungssicherheit im Rahmen eines langfristigen Betrachtungshorizontes nachhaltig zu optimieren. Die CO<sub>2</sub>-Reduktion in den einzelnen Sparten und spartenübergreifend, Sektorenkopplung und Dezentralisierung mit der Notwendigkeit einer zunehmenden Digitalisierung, machen das Gesamtsystem insgesamt komplexer. In diesem Kontext sind Methoden weiterzuentwickeln, die bei der Gestaltung von Maßnahmen zur Änderung der Resilienz Aussagen zu deren technischer Wirksamkeit sowie zu monetären Auswirkungen liefern. Aktuelle Forschungsinitiativen zum Monitoring der Resilienz und der Simulation von Szenarien mit Berücksichtigung von Sektorenkopplung und zellularen Ansätzen im Rahmen einer Gesamtsystembetrachtung gehen hier in die richtige Richtung. VDE und DVGW mit ihren Mitgliedsunternehmen werden im Rahmen ihrer Möglichkeiten diese Ansätze weiter unterstützen und aktiv begleiten.



Klaus Engelbertz  
Westenergie AG,  
Vorsitzender ETG FNN DVGW  
Kordinierungskreis Strom / Gas

3 VDE FNN Hinweis „Hinweise für das Krisenmanagement des Netzbetreibers“  
4 DVGW Technischer Hinweis – Merkblatt „Sicherheit in der Gasversorgung; Organisation und Management im Krisenfall“

# Aktuelles aus den Fachbereichen

## ETG Fachbereich A2

### E2 Bahnen mit elektrischen Antrieben

#### 1 Außendarstellung

Im (diesmal nur digitalen) ETG *journal* 2/2020 wurde unsere Positionierung bzw. Bestandsaufnahme zur Elektromobilität veröffentlicht (Teil 1 unseres um eine Präambel ergänzten Textdokuments). Gleichzeitig ist die Wabenstruktur auch auf der ETG Webseite veröffentlicht.

Um das Basisdokument nun endlich zu einer Metastudie aufzuwerten, ist es weiterhin erforderlich, geeignete Referenzdokumente zu benennen. Diese sollen zunächst in einer Liste auf dem ETG SharePoint des Fachbereichs A2 gesammelt werden.

#### 2 Organisation von Fachtagungen

##### 2.1 Elektrische Fahrzeugantriebe und -ausrüstungen (Dresden, 19. + 20.11.2020)

Zusammen mit Rail.S (Nachfolgeorganisation des IZBE (Innovationszentrum Bahntechnik Europa) nach dem Zusammenschluss mit dem BTS (Bahntechnik Sachsen e.V.)) wurde vereinbart, das wegen Corona ausgefallene Frühjahrssymposium „Energiebereitstellung für alternative Antriebe“ inhaltlich zu integrieren.

Wir erwarten eine sehr kontroverse Podiumsdiskussion; Hintergrund ist der latente Konflikt zwischen DB Energie und neuen Marktteilnehmern, die ebenfalls den Betrieb von Nachladeinfrastruktur anbieten möchten. Wir sollten u. a. herausarbeiten, welches Interesse die Aufgabenträger verfolgen und im Nachgang einen eigenen eb-Artikel zum Thema verfassen!

**Leider musste die Tagung ebenfalls wegen der CORONA-Pandemie verlegt werden. Neuer Termin ist nunmehr der 22.-23. April 2021.**

#### 3 Arbeitsprogramm und Ausblick 2021

##### 3.1 VDV-Schienefahrzeugtagung 2021 in Leipzig

In der letzten Sitzung des Schienefahrzeugausschusses „SFA“ wurde die angedachte Kooperation mit VDE ETG befürwortet und kann jetzt starten. Dabei wird der SFA „mechanische“ Schwerpunkte setzen und die ETG „elektrische“.

Unter dem Arbeitstitel „Verkehrswende – und jetzt?“ lassen sich viele Fragestellungen abhandeln, welche Forderungen an die Politik formuliert werden müssen, um deren Wünsche erfüllen zu können: Terminvorstellungen stehen im Konflikt mit der Machbarkeit, Umgang mit Sonderlösungen, u. v. m.

Ein weiteres Thema sind die „Erfolgsfaktoren für ein gesundes Wachstum“: Migration auf 750 V Nennspannung, Plädoyer für die klassische Fahrleitung, Spitzenstromkappung. Nach der Funktionalen Sicherheit kommt jetzt IT-Security, was ein fortwährender Prozess ist und damit neue Herausforderungen an langlebige Investitionsgüter mit sich bringt.

##### 3.2 ETG Kongress 2021 in Wuppertal

Wir haben zusammen mit den FB A1 und Q1 ein Konzept für eine eigene Session zur Elektromobilität entwickelt, das im Wissenschaftlichen Beirat der ETG auf große Zustimmung stieß. Dabei soll besonders die energetische Seite beleuchtet werden, und zwar „vom Erzeuger zum Verbraucher“. Es sind 7 ausgesuchte Doppelvorträge geplant, wobei jeweils ein Referent die Anforderungen umreißt und der andere die Lösungsansätze vorstellt.

##### 3.3 Sicherheit und Zulassung elektrischer Bahnausrüstungen (Dresden, 9. + 10.12.2021)

Folgende mögliche Themenschwerpunkte sind vorgesehen:

1. Erfahrungen mit der Fahrzeugzulassung nach 4.EP (ERA)
2. Zulassung Batteriespeichersysteme (Bombardier könnte z. B. über das Zusammenspiel von Systemsicherheit und Fahrzeugzulassung in D und F berichten)
3. IT-Security
4. Stationäre Anlagen
5. Automatisches Fahren

Letzteres können wir uns auch für die Podiumsdiskussion vorstellen:

„Automatisches Fahren – vom People Mover zur Vollbahn“

- Wie kann man die Erfahrungen von Metros auf die „große“ Eisenbahn übertragen?
- Was wären mögliche Migrationsstrategien und ihre Rückwirkungen?
- Wir müssen das Feld jetzt bestellen (Normung und Gesetze), um Neuentwicklungen dann auch einsetzen zu dürfen!
- Blick über den Tellerrand: Was macht das Kraftfahrt-Bundesamt bezüglich autonomer Straßenfahrzeuge?



Dr.-Ing.  
Carsten Söffker  
Alstom Transport  
Deutschland GmbH,  
Vorsitzender ETG FB A2

## E3 Wabenstruktur zur Elektromobilität (Teil 2)

*Im ETG Journal 2/2020 wurde eine Artikelserie begonnen, in der der Ansatz des ETG Fachbereichs A2 vorgestellt wird, mit Hilfe einer Wabenstruktur die vernetzten Fragen und Terminologien zur E-Mobilität in einem konformen System darzustellen und inhaltlich kontinuierlich weiterentwickeln zu können.*

*Der Fachbereich A2 hat sich zur Aufgabe gemacht, die Fragen der E-Mobilität ganzheitlich zu betrachten und zu strukturieren, um die Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen Technik und Betriebsweisen aufzuzeigen, sowie Gemeinsamkeiten aller elektrischen Verkehrsmittel herauszustellen.*

*Die Wabenstruktur und die hier in Teilen vorgestellten Erläuterungen sind in der Gesamtdarstellung auf der ETG Webseite [www.vde.com/etg](http://www.vde.com/etg) zu finden.*

*Hier folgt der zweite von insgesamt 5 Teilen, die sukzessive in den nächsten Ausgaben des ETG Journals veröffentlicht werden.*

### 2 Vernetzung

Die Vernetzung von Verkehrssystemen spielt für den zukünftigen Verkehr auf zwei Ebenen eine maßgebliche Rolle, einerseits auf einer technischen und andererseits auf einer organisatorischen Ebene.

Unter technischer Vernetzung ist dabei vor allem die Kommunikation zwischen einzelnen Fahrzeugen, der Infrastruktur, großen Datennetzwerken sowie ggf. verschiedener Verkehrsträger untereinander zu verstehen, insbesondere zur Ermöglichung automatisierten Fahrens (siehe Kapitel 9). Die organisatorische Vernetzung zielt vor allem auf die multimodale Vernetzung für den Kunden ab, dem komplexer werdende Reiseketten angeboten werden sollen – und zwar ohne Hürden bei der Reiseplanung, beim Zugang und bei der Bezahlung.

#### 2.1 Mobilitätsplattform

Als Mobilitätsplattformen werden meist internetbasierte Angebote bezeichnet, auf denen Verkehrsleistungen jederzeit verkehrsträgerübergreifend abrufbar angeboten werden können. Von bloßer Reiseinformation und Buchung bis zur Organisation der gesamten Reisekette gibt es vielfältige digitale Angebote, die Anbietern und Kunden neue Möglichkeiten bieten und den Zugang zu Mobilitätsangeboten insgesamt erleichtern können. Technisch umgesetzt werden diese Angebote über Applikationen auf Smartphones oder ähnlichen Geräten, durch die der Zugriff auf die Dienste von überall, jederzeit und möglichst nutzerfreundlich ausgestaltet ist. Der erfolgreiche Anbieter von Mobilitätsplattformen besitzt damit eine gewisse Möglichkeit, den Verkehrsmarkt über Unternehmensgrenzen hinweg zu beeinflussen und zu prägen.

Innovationen der Sharing Economy im Kfz- und Rad- bzw. Rollerverkehr und die angestrebte Automatisierung bestimmter Verkehrsträger ermöglichen es zukünftig, noch komplexere multimodale Reiseketten zu gestalten und so das jeweils für den aktuellen Zweck praktikabelste Verkehrsmittel zu wählen. Multimodalität wird so bei Mobilitätsangeboten und Reiseketten zur Regel. Hierzu ist die vollständige Vernetzung aller Verkehrsträger in Buchungs- und Informationsmedien zur Erstellung ganzer Reiseketten (statt aktuell nur einzelner Abschnitte) eine noch immer nicht umgesetzte Aufgabe. So sollen Kunden beispielsweise sowohl auf öffentliche Nahverkehrsangebote als auch als Teil der Reisekette auf Car- und Bike-Sharing-Angebote über das gleiche Buchung-, Abrechnungs- und Kundensystem zugreifen können. Ziel muss dabei sein, die Bereitstellung der Informationen und Dienstleistungen verkehrsträgerübergreifend auszuführen und multimodale Angebote zu entwickeln. Dazu gehört auch die Ausstattung mit Informations- und Unterhaltungsmedien für die Fahrgäste öffentlicher Ver-

kehrsmittel und deren mobile Endgeräte (z. B. durch W-LAN) und eine intensive Zusammenarbeit über Unternehmensgrenzen hinweg.

#### 2.2 Verkehrsleitsystem

Ein Verkehrsleitsystem (siehe auch Kapitel 2.7) beeinflusst den Verkehr auf Basis von dynamischen Verkehrsflussinformationen, die beispielsweise aus in der Straße installierten Sensoren, Lichtsignalanlagen-Steuergeräten, ÖPNV- und Taxiortungsdaten, etc. gewonnen werden. Die Beeinflussung erfolgt durch kollektive (z. B. Wechselverkehrszeichen und Wechselwegweiser) sowie durch individuelle Systemkomponenten (Navigationssysteme mit Leitsystemschnittstelle, über UKW-Frequenzen übertragene Informationen, etc.).

Hinzu kommen umfangreiche Überwachungsfunktionen von wichtigen Knotenpunkten oder Streckenabschnitten zur Stauvermeidung, Rettungsmittelbenachrichtigung oder insbesondere bei Tunnel- und Brückenabschnitten zur rechtzeitigen Sperrung bei Unfall- oder kritischen Stauereignissen. Auf umfangreich ausgebauten Verkehrswegen kommen zudem noch die Geschwindigkeitsregulierung und Spurfreigaben durch Wechselverkehrszeichen hinzu.

Im ÖPNV-Bereich entwickeln sich Verkehrsleitsysteme zunehmend durch die Anbindung an rechnergestützte Betriebsleitsysteme auch zu einem Optimierungsinstrument bei Bevorrechtigungsregelungen von ÖPNV-Fahrzeugen (z. B. verspätungs- oder knotenbelastungsabhängig). Hierbei kann dem Fahrpersonal außerdem eine energiesparende Fahrweise vorgeschlagen werden, so dass beispielsweise der nächste Knoten mit freier Fahrt erreicht wird. Solche Systeme befinden sich zurzeit auch in der Testphase für Individualfahrzeuge bzw. Fahrräder.

Die Relevanz von Verkehrsleitsystemen und deren Funktionsumfang nimmt mit dem Automatisierungsgrad von

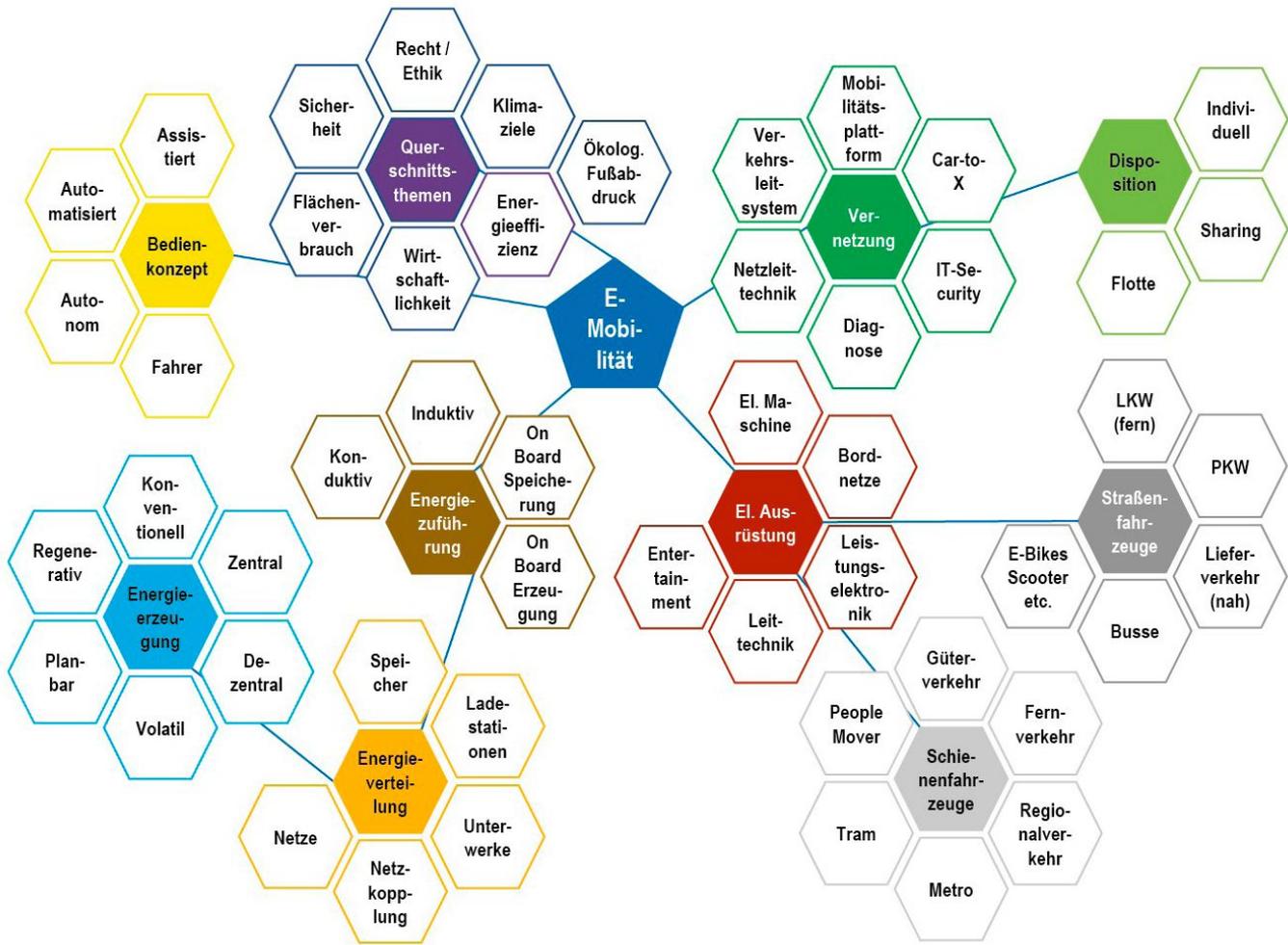


Bild 1: Wabenstruktur zur Elektromobilität

Verkehrsmitteln an Bedeutung zu, da für autonom fahrende Systeme insbesondere im Störfall präzisere Daten erhebliche Verkehrsflussverbesserungen, Stauvermeidung und Sicherheitsgewinne mit sich bringen können.

Der Stand der Technik liegt jedoch aktuell oft immer noch bei ausschließlich kollektiven Beeinflussungen, z.B. durch Umschaltung von Steuerungsprogrammen der Lichtsignalanlagen („Grüne Welle“ o. ä.), Umleitungsanweisungen durch Wechselverkehrszeichen etc. Eine Weiterentwicklung hin zur individuellen bzw. fahrzeugspezifischen Informationen steht noch aus.

### 2.3 Netzleittechnik

Die Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik in Netzwerken, beispielsweise von Energieübertragungsnetzen

oder rohrgebundenen Netzen für Flüssigkeiten und Gase, wird unter dem Begriff Netzleittechnik zusammengefasst. Der Betreiber der Leittechnik ist im überwiegenden Fall auch der Netzbetreiber bzw. das Versorgungsunternehmen. An Einspeise- bzw. Entnahmepunkten ergeben sich jedoch ggf. umfangreiche Schnittstellen und Zugriffsrechte zu bzw. auf Fremdanlagen. So ist die Leistungsanforderung an Kraftwerke beispielsweise immer Teil der Netzleittechnik des Übertragungsnetzbetreibers. Neue Aspekte ergeben sich durch die (temporäre und ortsveränderliche) Einbindung von Fahrzeugen mit Energiespeichern und volatile Energiequellen.

Aufgabe der Netzleittechnik ist es, dem Betriebspersonal der Netzbetreiber die Betriebsführung der Netze zu ermöglichen. Dazu gehört das Last- und Einspeisermanagement, die sicherheits-

relevante Netzüberwachung, die Bewältigung von Störsituationen und der Eingriff in das Netzgeschehen. Eingriffe und Überwachung können sowohl automatisiert und, wo nötig, auch manuell erfolgen. Basis der Netzleittechnik ist es, Prozessinformationen wie Zählwerte, Messwerte und Meldungen an eine zentrale Leitstelle zu übertragen. Nach einer bediengerechten Aufbereitung können diese dem Bedienpersonal nutzungsgerecht dargestellt und ggf. Handlungsempfehlungen und Steuergrößen für automatisierte oder manuelle Eingriffe abgeleitet werden. Zum Eingriff werden Steuer- und Stellbefehle an am Netzprozess beteiligte Anlagen ausgegeben. Die Netzleitung erfolgt heute meist zentralisiert bzw. mit einem hierarchischen Architekturprinzip.

In Verkehrsnetzen wird die Netzleittechnik heute in Form von Verkehrszentralen, Überwachungseinrichtungen von

besonderen Verkehrsanlagen oder der Leit- und Sicherungstechnik bei der Eisenbahn umgesetzt. Im Zuge neuer automatisierter Mobilitätskonzepte auf der Straße muss eine entsprechende netzübergreifende Leittechnik auch auf der Straße aufgebaut werden, die in der Lage ist, bei Störungsereignissen, Überlastung etc. steuernd einzugreifen.

Der hohe Automatisierungsgrad von Netzleittechnik jeglicher Art ermöglicht Störungsanalysen, Simulationen von Netzzuständen (beispielsweise Sperrungen, Netzfehlerfälle, Neubau, Ermittlung bzw. Einstellung optimaler Netzzustände, etc.). Dies hat unter anderem auch für das Betriebspersonal-Training und Schulungszwecke hohe Bedeutung, da automatisierte Netze auch im Fehlerfall manuell und intuitiv bedient werden müssen und ein Training am realen Objekt oft nicht möglich ist.

## 2.4 Diagnose

Die genaue Bestimmung der Ursache und des Orts eines Fehlers in einem technischen System wird als Fehlerdiagnose bezeichnet. Die Phasen der Fehlererkennung, des Fehlermanagements und der Fehlerdiagnose werden häufig in der „Diagnose“ zusammengefasst, Fehlerkompensation und Fehlerkorrektur folgen im zeitlichen Anschluss. In der Luftfahrzeug- und Bahntechnik werden bereits heute automatische Fahrzeugdiagnosesysteme eingesetzt, die die Funktion eines Gerätes intern oder extern überwachen und bei Fehlfunktionen umfangreiche Diagnosedaten für die Instandsetzung sowie den Bedienenden bereitstellen. Sind redundante Geräte (heiße Redundanz) vorhanden, so können auch über einen Vergleich der Funktionsergebnisse beider Geräte Fehlererkennungs- und Diagnosedaten gewonnen werden. Die Ergebnisse können dabei über Funk dem Betreiber übermittelt werden, sodass Handlungsempfehlungen und vorbereitende Maßnahmen für eine Instandsetzung getroffen werden können.

Neben der Funktion der eigentlichen Fehlerdiagnose nimmt die Diagnose von langsamen Zustandsveränderungen im Prozess – hin zu einer mehr prädiktiv geprägten Instandhaltung – eine zunehmende Bedeutung ein. Diese dient einer zustandsbedingten Instandhaltung,

d. h. frühzeitigen Eingriffen bei sich verschlechternden Parametern, bevor eine Komponente versagt. Dies gilt sowohl für Fahrzeugkomponenten, als auch für viele Infrastrukturbestandteile wie Fahrleitungen, Weichen, Schienenstöße etc., deren Zustand durch Fehlererkennungs- und ggf. externe Diagnoseeinrichtungen, beispielsweise an Fahrzeugen mit häufiger Vorbeifahrt, vermessen und im Anschluss prädiktiv beurteilt werden können. Die Bereitstellung der diagnosefähigen Daten muss dabei von Betreibern der Fahrzeuge erfolgen. Das Konzept der fahrzeugbasierten Zustandsdiagnose könnte mit Fahrzeugen im Straßenverkehr, denen es zunehmend möglich wird, mit der Infrastruktur zu kommunizieren, und die über ohnehin umfangreiche erfassende Sensoren verfügen, weiterentwickelt und genutzt werden.

Die Diagnose erhält insbesondere beim hochautomatisierten Fahren eine immense Rolle, da hier bei allen Verkehrsträgern auf Dauer keine sachkundigen Personen im Fahrzeug mehr zu erwarten sind, die in bestimmten Verfahren Fahrzeuge zur manuellen Weiterfahrt oder Räumung bedienen können. Es müssen deshalb einerseits bereits Ausfälle prädiktiv vermieden werden, sodass die Kadenz von Ausfallereignissen reduziert werden kann. Noch entscheidender sind andererseits jedoch hochdetaillierte und höchstzuverlässige Fehler- und Diagnosedaten, die eine Fernbeurteilung von Fehlerzuständen ermöglichen und so auch in hochautomatisierten Systemen Streckenräumungen und den sicheren Betrieb ohne Eingriff vor Ort zulassen. Dies bedeutet auch, dass auf Basis einer stark auszubauenden Fahrzeugdiagnose sicherheitsrelevante Fehler zuverlässig und adäquat eingeschätzt werden können müssen.

## 2.5 IT Security

Vernetzte Mobilitätssysteme schaffen neue umfangreiche Kommunikationsschnittstellen von und zu Fahrzeugen aller Verkehrsträger. Dasselbe gilt für umfangreiche infrastrukturbezogene Einrichtungen, die durch die Partizipation an der Fahrzeugdiagnose und andere Sensoren „intelligenter“ werden sollen. Insbesondere Kraftfahrzeuge

und das Internet wachsen dabei immer mehr zusammen. Ziele durch die Vernetzung großer Datenmengen sind eine steigende Verkehrsleistungsfähigkeit bei gleicher Infrastruktur, die Schaffung von mehr Sicherheit und die Reduzierung von Umwelt- und Klimabelastungen. Es entstehen zusätzliche Daten und Informationsströme, die manipuliert oder verändert werden könnten und/oder ggf. hohe datenschutzrechtliche Relevanz besitzen. Zum Schutz vor Datenmanipulation oder vor Missbrauch der für die Fahrzeugkommunikationssysteme erforderlichen Daten, sind Datenschutzprinzipien zu standardisieren und rechtliche und ethnische Fragen zum Recht an den eigenen Daten zu klären.

Technisch werden die sicherheitsrelevanten Systeme in der Fahrzeugelektronik wie Motor- und Bremssteuerung, Lenkung etc. von Navigations-, Telematik- und Infotainment-Anwendungen so weit möglich getrennt. Es handelt sich so beispielsweise beim Navigations- und Infotainmentnetzwerk im Fahrzeug und bei der Motorsteuerung um zwei unterschiedliche Datennetze. Wo Kommunikation zwischen den Netzwerken erforderlich ist, schotten Gateways und Firewalls die sicherheitsrelevanten Bereiche im vernetzten Fahrzeug ab. Daten müssen darin zudem verschlüsselt übertragen und gespeichert werden. Die Soft- und Hardwarearchitekturen der Fahrzeuge müssen jedoch stetig weiterentwickelt und angepasst werden, um auch bei Laufzeiten von vielen Jahren die IT Security gewährleisten zu können und um fortlaufend ein hohes technisches Sicherheitsniveau einzuhalten. Dies erfordert die zuverlässige Update-Fähigkeit und Betreuung durch die Hersteller über den gesamten Produktlebenszyklus – und dies bei je Subsystem zum Teil sehr unterschiedlichen Innovationszyklen.

Gleiches gilt für Infrastrukturanlagen wie die Leit- und Sicherungstechnik oder Steuergeräte von verkehrsregulierenden Anlagen im Straßenverkehr. Für Komponenten, die hochsicherheitsrelevante Funktionen erfüllen, müssen eigene IT-Sicherheitsstandards gelten, die eine Unveränderlichkeit der sicherheitsrelevanten Eigenschaften von außen sicher stellen. Der Bahnsektor verfügt für die funktionale Sicherheit bereits über den normativen Standard EN 50128, der jedoch eine kontinuierliche Anpas-

sung an neue technische Rahmenbedingungen erfordert.

Hinzu kommen Aspekte des Datenschutzes. Die fahrzeuggebundenen Informations- und Hilfsdienste stellen neben den Diagnosedaten einen umfangreichen Informationspool dar, der für den Betrieb und die Sicherheit des Fahrzeugs notwendig ist. Dieser kann zudem auch für Service-Dienste oder technische Weiterentwicklung nutzbar sein. Notwendig ist deshalb, dass die Eigentümer der Fahrzeuge wissen, welche Daten zu welchem Zweck erhoben und genutzt werden und dass zur Wahrung der Persönlichkeitsrechte relevanten Daten kein Abgriff von außen ermöglicht wird oder dass diese nur anonymisiert vorliegen.

## 2.6 Kommunikation „Fahrzeug $\Leftrightarrow$ Umfeld“

Automatisierte Systeme werden künftig für viele Verkehrssituationen aller motorisierten Verkehrsträger an Land die Fahrzeugführung übernehmen. Die Systeme müssen dabei durch Kommunikationstechnik vernetzt werden, wobei aktuell weltweit unterschiedliche Technologien und Standards Verwendung finden bzw. entwickelt werden und sich die Komplexität der Systembewertung, -auslegung und -standardisierung deutlich erhöht. So gibt es beispielsweise für die Car2X-Netzwerktechnologien weltweit divergierende reservierte Frequenzbänder für die Kommunikation, zudem Systeme sowohl auf W-LAN-sowie auf Mobilfunkbasis. Hinzu kommen Fahrzeug-Ad-hoc-Netzwerke und Short-Range-Communication-Netzwerke, die eine direkte Kommunikation zwischen dem jeweiligen Fahrzeug und dessen Umfeld ermöglichen.

Das vernetzte Fahren bezeichnet dabei die Kommunikation zwischen Fahrzeugen (Car2Car bzw. Vehicle2Vehicle-(V2V)-Communication) sowie zwischen Fahrzeugen und Infrastrukturen (Car2X bzw. Vehicle2X). Beim vernetzten Fahren werden verkehrsbezogene Informationen über Funktechnologien ausgetauscht. Dies sind beispielsweise aufbereitete Informationen zu Verkehrsfluss, Unfällen, Baustellen oder Wetterlagen. In der Regel erfassen Sensoren die notwendigen Informationen. Diese werden computergestützt auf-

bereitet und stehen dann zur Übermittlung an Fahrzeuge und Infrastruktur zur Verfügung. Durch den Austausch werden das Angebot und die Qualität (u. a. Aktualität, Genauigkeit, Sicherheitsrelevanz, Geschwindigkeit der Erstinformation) der Informationen für die einzelnen Verkehrsteilnehmer deutlich erhöht. Beispielsweise Gefahren durch ein Stauende oder einen Unfall können so von vorausfahrenden Fahrzeugen als Warnmeldungen direkt an die Folgefahrzeuge weitergegeben werden. Auch Informationen über sich nähernde Rettungsfahrzeuge können bereitgestellt werden.

### 2.6.1 Car2Car

Ein spezieller Anwendungsfall von Car2X-Kommunikationssystemen ist die direkte Car2Car-Kommunikation. Sie soll den Fahrer zum Beispiel vor Gefahren wie einem stark bremsenden Vordermann warnen, erkannte Hindernisse weitergeben, sich nähernde Rettungsfahrzeuge ankündigen etc. Für vollautomatisiertes Fahren ist außerdem vorstellbar, die nächsten Fahrtschritte wie Spurwechsel etc. zu kommunizieren und so zu erleichtern. Besondere Relevanz besitzt dabei, dass jedes Fahrzeug immer die Signale aller umliegenden Fahrzeuge empfängt und für sich die Relevanz feststellen muss. Hierzu sind präzise Ortungs- und Kartendaten erforderlich.

### 2.6.2 Car2X

Neben dem Datenaustausch zwischen Fahrzeugen mit Car2Car umfasst Car2X auch die Kommunikation zwischen Fahrzeugen und Infrastruktur, beispielsweise zur Ansteuerung von Lichtsignalanlagen, die Anzeige der passenden Geschwindigkeit für eine „grüne Welle“, die Schaltung „grüner Wellen“ für Kfz, Rettungsfahrzeuge oder ÖPNV etc. Weiteres Ziel kann die Übertragung von Routeninformationen sein, beispielsweise, um durch günstige Routen Staus zu vermeiden, durch angepasste Fahrweise den Schadstoffausstoß zu senken etc. Die Fahrdaten der vernetzten Fahrzeuge können anonymisiert dann auch in das übergeordnete Verkehrsleit- und Managementsystem oder sogar die zukünftige Verkehrsplanung einfließen.

### 2.6.3 Rail2X

Eine weitere Nutzungsmöglichkeit von Car2X-Kommunikationsanwendungen stellt ein Forschungsprojekt des DLR, der DB Systel, der Siemens AG und anderer Partnern dar, die sich in drei Anwendungsfällen mit der Nutzbarkeit der Car2X-Technologie für den Bahnmarkt beschäftigen. Anwendungsfall 1 thematisiert dabei den Informationsaustausch Zug – Infrastrukturanlagen (z. B. neue Form der zustandsorientierten Instandhaltung, inkl. Information an Dritte über eingeschränkten Zugverkehr). Anwendungsfall 2 hat zum Ziel, den Informationsaustausch zwischen Kfz und Bahnübergängen (BÜ) zu ermöglichen. Ziel ist die Übermittlung des BÜ-Status sowie die Aktivierung von Anrufschranken etc. Als Sonderform des Anwendungsfalls 1 soll außerdem der Informationsaustausch zwischen Zug und Stationen ermöglicht werden, beispielsweise zur Informationsübertragung von Bedarfsanforderungen an den Zug, Zugdurchfahrtmeldungen an Bahnteigen etc.

Quelle: <https://rail2x.berlin/>

## 2.7 Disposition

Im Sinne einer allgemeinen Erläuterung und Abgrenzung lassen sich die strategischen, technologischen und operativen Maßnahmen bei der Disposition wie folgt definieren:

### 2.7.1 Flotte

Die Disposition einer Flotte zeichnet sich dadurch aus, dass sie fast ausnahmslos zentral durch eine Leitstelle erfolgt. Diese Art der Disposition geschieht auf Grundlage eines festgelegten Programms (Fahrplan), welches häufig auch die Verfügbarkeit und aktuelle Kapazität der von den planmäßigen Fahrten (Missionen) genutzten Strecken (Trassen) berücksichtigt. Das festgelegte Programm (Fahrplan) ist vorbestimmt und orientiert sich an einem kollektiven Bedarf, der im Zwangsfeld von Angebot und Wirtschaftlichkeit bedient wird.

Störungen und Engpässe werden bei der zentralen Disposition einer Flotte nach Möglichkeit mit Hilfe entsprechender Handlungsleitfäden gelöst.

### 2.7.2 Sharing

Die Disposition beim Sharing einer Fahrt (Mission) zeichnet sich dadurch aus, dass sie in der Regel in dezentralen Instanzen und nach einem individuellen, aber kollektiven Bedarf einer kleinen Gruppe erfolgt. Bei komplizierteren Systemen ist einerseits die Disposition zentral durch eine Leitstelle anhand eines weitestgehend festen Plans nicht unüblich (z. B. Anruf-Sammel-Taxi), andererseits ist auch die Initiierung „on demand“ möglich.

### 2.7.3 Individuell

Die Disposition einer individuellen Fahrt (Mission) zeichnet sich dadurch aus, dass die Regelung in dezentralen, sogar singulären Instanzen nach einem individuellen, spezifischen Bedarf erfolgt. Die Fahrten (Missionen) werden zudem ohne Vorplanung, sozusagen „on demand“ ausgeführt.

Auf Störgrößen wird eher ohne operative Vorkehrungen und situativ reagiert.

## 3 Elektrische Ausrüstung

Die elektrische Antriebsausrüstung für Straßenfahrzeuge (siehe Kapitel 4) und Schienenfahrzeuge (siehe Kapitel 5) ermöglicht die Umsetzung der zugeführten Energie in Bewegungsenergie für das Fahren und Bremsen. Daneben stellt die elektrische Bordnetzausrüstung die für den Betrieb der Fahrzeuge erforderliche Energie für die elektrischen Verbraucher adäquat zur Verfügung.

### 3.1 Bordnetz und Bordnetzumrichter

Das elektrische Bordnetz hat die Aufgabe, elektrische Energie auf dem Fahrzeug für die Systeme an Bord wie Steuerungen, Lüfter, Pumpen, Kompressoren, Klimaanlage, Informationssysteme etc. bereitzustellen. Verbreitet sind Drehstrombordnetzsysteme oder Gleichstromsammelschienen, die von entsprechenden Bordnetzstromrichtern gespeist werden. Je nach Anwendungsfall sind Bordnetzsysteme mit (redundanter) zentraler Einspeisung oder dezentrale Systeme im Einsatz. Die Fortschritte in der Leistungselektronik

(Gewicht, Preis) begünstigen dezentrale Architekturen mit multiplen, redundanten Bordnetzumrichtern und spezifisch auf die Verbraucher angepassten Versorgungsspannungen. Gleichstromsammelschienen mit entsprechend hohen Spannungen und niedrigen Übertragungsverlusten gewinnen bei derartigen Architekturen an Bedeutung. Zur Pufferung werden Bordnetz-Batterien (Blei-Akkumulator, Nickel-Cadmium-Akkumulator, Lithium-Ionen-Batterie) verwendet, die den Start des Fahrzeugs sowie das Aufrechterhalten vitaler Fahrzeugfunktionen bei Energieausfall gewährleisten.

### 3.2 Elektrische Maschine

Als elektrische Antriebsmaschine kommen AC-Maschinen, insbesondere robuste Asynchronmaschinen und fremderregte oder permanenterregte Synchronmaschinen zum Einsatz. Gleichstrommaschinen (Reihenschluss, Nebenschluss oder fremderregt) sind bei modernen Fahrzeugen von den AC-Maschinen verdrängt worden. Daneben findet man auch Sonderlösungen wie Langstatormaschinen mit im Fahrzeug verlegten Spulen.

In Kombination mit der speisenden Leistungselektronik können die Maschinen motorisch im Fahren und generatorisch im Bremsen betrieben werden.

### 3.3 Leistungselektronik für Antriebe

Die Leistungselektronik ist zentraler Bestandteil heutiger, moderner Fahrzeuge. Sie hat die Aufgabe, die zugeführte Energie (siehe Kapitel 6) auf dem Fahrzeug den elektrischen Maschinen für das Fahren und (elektrodynamische) Bremsen zur Verfügung zu stellen.

Die leistungselektronischen Bauteile haben sich kontinuierlich weiterentwickelt, beginnend mit Thyristoren über Gate-turn-off-Thyristoren (GTO), Insulated-Gate-Bipolar-Transistoren (IGBT) bis hin zu Elementen mit Silizium-Carbid (SiC).

Zur Steuerung und Regelung stehen heute leistungsfähige, dynamisch hochwertige Verfahren zur Verfügung, deren Einsatz die Entwicklung moderner Signalprozessoren ermöglicht hat.

Infolge der geschalteten Spannungen und Ströme ist der Thematik der leitungsgebundenen Störströme und feldgebundenen Emissionen (EMV) besondere Beachtung zu schenken.

### 3.3.1 Energiezuführung

Weite Verbreitung bei Fahrzeugen mit konduktiver oder induktiver Energiezuführung haben die Stromrichterschaltungen mit Spannungszwischenkreis. Als netzseitiger Stromrichter hat sich bei AC-Bahnen der Vierquadrantsteller durchgesetzt, der die einphasige Spannung des speisenden Netzes in eine Gleichspannung umformt. Ein Kondensator im Zwischenkreis und optional ein auf die doppelte speisende Frequenz abgestimmter Saugkreis, die Reihenschaltung aus Drossel und Kondensator, dienen der Pufferung und Glättung der pulsierenden Energiezuführung mit dem Ziel niedriger Blindleistungsaufnahme aus dem Netz.

Bei speisenden DC-Netzen kommen Hoch- und Tiefsetzstellerschaltungen, kombinierte Schaltungen sowie über einen Netzfilter entkoppelte, direkte maschinenseitige Stromrichter zur Anwendung.

Für On-Bord-Speicher bzw. On-Board-Erzeugung (siehe Kapitel 6.3 und 6.4) werden geeignete Stellerschaltungen angewendet, welche die auf dem Fahrzeug gespeicherte oder erzeugte Energie für die maschinenseitigen Stromrichter aufbereiten.

### 3.3.2 Energieabführung

Ein Pulswechselrichter als Zweipunkt- oder Dreipunktschaltung formt die Gleichspannung des Zwischenkreises in eine gepulste Spannung mit variabler Grundschnwingungsamplitude und Frequenz, mit der eine (Synchronmaschine, Asynchronmaschine) oder mehrere parallelgeschaltete elektrische Maschinen (Asynchronmaschine) gespeist werden.

Stromeinprägende Phasenfolgewechselrichter sind von den kompakten spannungseinprägenden Pulswechselrichtern inzwischen vollständig verdrängt worden. Die Fortschritte in der Leistungselektronik hinsichtlich benötigtem Bauraum, Gewicht und Komplexität begünstigten diesen Trend.

### 3.4 Leittechnik

Unter Leittechnik der Fahrzeugsteuerung versteht man die übergeordnete Steuerung und Koordination aller Teilsysteme auf dem Fahrzeug, welche für den normalen Betrieb unmittelbar erforderlich sind. Die Teilsysteme, wie Türsteuerung, Steuerung der Klimaanlage, Fahr-/Bremssteuerung, Beleuchtung etc., sind hierzu bei modernen Fahrzeugen durch Bussysteme mit einer zentralen Fahrzeugsteuerung verbunden.

Eine weitere Leitebene für Information und Kommunikation ist darüber hinaus für das Management der funkbasierten Fahrzeug-Land-Kopplung zur Informationsübertragung verantwortlich. Weitere Systeme wie Kamerasysteme (CCTV), Fahrgastzähleinrichtungen und Fahrerassistenzsysteme, aber auch für das Entertainment der Fahrgäste sind bei heutigen Fahrzeugen in diese Art der Leitebene integriert. Letztere bildet meist den fahrzeugseitigen Fortsatz eines großen Netzwerks auf der Landseite für Information und Kommunikation, aber auch die Betriebsablaufsteuerung.

### 3.5 Entertainment

Der Bedarf an Entertainment- und Infotainmentsystemen steigt stetig. Beispiele hierfür sind Internet-on-board: alle Medien wie Video, Audio, Spiele, eBooks, IP TV, Routeninformationen; Fahrgastinformationssysteme (FIS): Abspielen von Videos des Entertainment-Systems, Displays am Sitzplatz sowie Werbung.

*Die Fortsetzung folgt in ETG journal 02/2021.*

#### Autoren:

- *Dr.-Ing. Daniel Horstmann,*  
*Siemens Mobility GmbH*
- *Dipl.-Ing. Sven Klein,*  
*Stadler Pankow GmbH*
- *Dr.-Ing. Ludger Schülting,*  
*Kiepe Electric GmbH*
- *Dr.-Ing. Carsten Söffker,*  
*ALSTOM Transport Deutschland GmbH*
- *Dipl.-Ing. Ulrich von Stockhausen,*  
*VAG Verkehrs-Aktiengesellschaft Nürnberg*
- *Dipl.-Ing. Nyascha Wittmann,*  
*Technische Univ. Dresden*
- *Dipl.-Ing. Martin Walcher,*  
*ehemals: Siemens Mobility GmbH*

### ETG Fachbereich V1

## E4 Erzeugung und Speicherung elektrischer Energie

Nachdem der Fachbereich V1 im letzten Jahr thematisch neu ausgerichtet wurde, konnten die Arbeiten im Berichtsjahr (11/2019 – 11/2020) unter dem Vorsitz von Herrn Dr. Martin Kleimaier und dessen Stellvertreter, Herr Prof. Dr. Hendrik Lens (Universität Stuttgart) zielgerichtet fortgeführt werden.

Im Vordergrund standen dabei die Arbeiten an dem geplanten Positionspapier zum Thema „Entwicklung der Stromerzeugung und des Speicherbedarfs unter dem Aspekt eines Ausstiegs aus Kernenergie und Kohleverstromung“. Gleichzeitig liefen die Vorbereitungen für eine Fachtagung unter dem Motto „Erzeugung und Speicherung elektrischer Energie – Wege zu einer klimaneutralen Energieversorgung“. Die Fachtagung sollte ursprünglich als Präsenzveranstaltung am 20. Oktober 2020 in Kassel stattfinden.

Aufgrund Corona-bedingten Einschränkungen musste die Fachtagung leider relativ kurzfristig auf ein Online-Format umgestellt werden, was Änderungen am Programm erforderlich machte, jedoch organisatorisch gut gelang. Obwohl die Veranstaltung nicht kostenlos angeboten wurde, haben etwa 90 Personen teilgenommen. Die Diskussion im Chat war sehr lebhaft und hat gezeigt, dass die Thematik auf großes Interesse stößt. Eine erneute Fachtagung zu diesem Themenkreis, soll im kommenden Jahr am 16. November 2021 in Kassel (Kongress Palais) – dann

hoffentlich wieder als Präsenztagung – durchgeführt werden.

Abweichend von der bei ETG Fachbereichen üblichen Sitzungsfrequenz von zwei Sitzungen pro Jahr, wurde aufgrund der dringlichen Aufgabenstellung auch in diesem Jahr an kürzeren Zeitabständen zwischen den Sitzungen festgehalten. Auf die Einrichtung einer Task Force, die üblicherweise derartige Aufgaben wahrnehmen würde, konnte damit verzichtet werden. Insgesamt wurden zunächst noch zwei Präsenz-Sitzungen in Frankfurt und aufgrund der Corona-bedingten Einschränkungen weitere sechs Online-Meetings durchgeführt. Dank der engagierten Mitarbeit der Fachbereichsmitglieder konnten die Arbeiten zu unterschiedlichen Teilaspekten umgesetzt werden. Das Online-Format erleichterte die höhere Sitzungsfrequenz, da Anreizeiten wegfallen. Dies sollte aus Sicht des Fachbereichs deshalb auch zukünftig ergänzend als alternatives Sitzungsformat in Betracht gezogen werden. Im Hinblick auf die Interaktion in der Gruppe sollten allerdings ausreichend häufig auch Präsenztreffen stattfinden.

Die derzeitige Gliederung des Positionspapiers ist wie folgt:

- Einleitung und Motivation
- Aktueller Stand der Energiewende
  - Erreichte Anteile bei PV, Wind, Biomasse/Biogas, Wasserkraft, Geothermie

- Ziele der Bundesregierung und Ziele der EU und mögliche Ausbaupfade für EE (Studienergebnisse)
  - mittelfristig und langfristig
- Entwicklung der Stromnachfrage unter Einbeziehung von Sektorenkopplung (Studienergebnisse)
  - mittelfristig und langfristig
- Erzeugungspotenziale für EE für die verschiedenen Optionen in Deutschland:
  - theoretisch, technisch, wirtschaftlich
  - großtechnisch vs. dezentral
- Erzeugungscharakteristiken von EE in Deutschland
  - zeitliche und örtliche Unterschiede
- Technische Entwicklungspotenziale und -trends für die verschiedenen EE-Technologien
- Bedarf und Optionen für planbare Stromerzeugung (Versorgungssicherheit)
  - Großkraftwerke (mit/ohne Wärmeauskopplung) vs. dezentrale Erzeugung (KWK)
  - Energieträger (Erdgas, Synthetische Kraftstoffe, Wasserstoff)
- Bedarf, Optionen und Potenziale für eine Steuerung der Stromnachfrage (Lastflexibilisierung)
  - allgemeine Lasten, Sektorenkopplung (PtX, Mobilität)
- Bedarf und Optionen für Energiespeicher (Leistung und Energieinhalt)
  - als zusätzliche flexible Last / als zusätzliche flexible Stromerzeugung
  - Zeitbereiche (Stunden, Tage, Monate)
  - Technologien
  - Lokalisierung (zentral/dezentral, Netz/Kunde ...)
- Bedarf und Optionen für Energieimporte/-exporte (Leistung und Energie)
  - welche Energieform (Strom, Erdgas, Wasserstoff ...)
  - Import-/Exportländer
- Betrieb des Gesamtsystems (Systemstabilität, incl. Regelleistung)
  - Entfall rotierender Massen, umrichterbasierte Erzeugungs- und Speichersysteme
- Umsetzbarkeit und Hemmnisse
- Handlungsempfehlungen

Während manche Kapitel des Positionspapiers schon weitgehend abgestimmt sind, gibt es zu anderen Kapiteln noch Abstimmungsbedarf. Die nächsten FB-Meetings werden sich daher schwerpunktmäßig unterschiedlichen Teilaspekten widmen (Flexibilisierung von KWK, Biogas als Speichermedium, PV-Potenziale in Deutschland ...). Hierzu sollen jeweils auch externe Referenten als Gäste eingeladen werden.

Die Arbeiten am Positionspapier sollen spätestens im Frühjahr soweit gediehen sein, dass eine erste Ausgabe veröffentlicht werden kann. In welchem Rahmen dies geschehen soll, wird derzeit noch diskutiert (z. B. im Rahmen des ETG Kongress 2021).

Die Abstimmung mit anderen Fachbereichen und Task Forces wird durch die gleichzeitige Mitarbeit einzelner Mitglieder gewährleistet, z. B. im Fachbereich V2, im Fachausschuss V2.1 „Netzregelung und Systemführung“, in der aktuellen Task Force „Zukunftsbild Energie“ sowie in der in Gründung befindlichen Task Force „Flexibilität“.

**Aktive Fachausschüsse:**

Fachausschuss V1.1: „Wasserstoff und Brennstoffzellen“ (Gemeinschaftsausschuss von VDI-GEU und VDE ETG)  
 Leiter: Martin Pokojski, Stellvertreter: Martin Kleimaier

Am 23.01.2020 wurde in Frankfurt im Landessportbund ein Workshop zum Thema „Die Bedeutung von Brennstoffzellen- und Batteriefahrzeugen für die Elektromobilität“ durchgeführt. Dort wurde nochmals die 2019 erstellte gleichnamige [Studie](#)<sup>1</sup> vorgestellt und diskutiert. Die Tagung konnte noch als Präsenzveranstaltung durchgeführt werden. Es haben etwa 60 Personen aus den unterschiedlichsten Bereichen teilgenommen. Einen ausführlichen Bericht zur Tagung finden Sie im ETG *journal* 02/2020.

Bislang ist vom Fachausschuss für 2021 noch keine weitere Veranstaltung geplant. Aktuelle Informationen zum Fachausschuss finden Sie hier: <https://www.vde.com/de/etg/arbeitsgebiete/v1-1-brennstoffzellen>

1 <https://www.vde.com/de/presse/pressemitteilungen/brennstoffzelle-fuer-die-mobilitaet-von-morgen>

**ETG Fachbereich V2**

**E5 Energieübertragung und -verteilung**

**Inhaltliche Arbeit**

Die Arbeit der ETG im Bereich der Energieübertragung und -verteilung war im Jahr 2020 – wie so vieles andere – von der Corona-Pandemie geprägt: So musste die Frühjahrssitzung des Fachbereichs komplett abgesagt, die Herbstsitzung konnte lediglich als Web-Konferenz durchgeführt werden.

Einen deutlichen Schwerpunkt der inhaltlichen Arbeit stellte weiterhin das Thema Flexibilisierung des Strom- aber auch des gesamten Energiesystems dar. Klar ist, dass die klassischen Flexibilitätsoptionen durch den Wegfall der konventionellen Kraftwerke zukünftig adäquat ersetzt werden müssen. Hier formiert sich zurzeit eine ETG Task Force, die in Kürze ihre Arbeit aufnehmen wird. Die Leitung der Task Force hat Prof. Wolter aus Magdeburg zugesagt.

Die ETG Task Force „Intelligente Ladeinfrastruktur“ steht dagegen kurz vor ihrem Abschluss, die Ergebnisse sollen zum Jahreswechsel vorliegen und spätestens zum ETG Kongress im Mai 2021 veröffentlicht werden.

**VDE Impuls Systematisierung der Autonomiestufen in der Netzbetriebsführung**

Im Herbst 2020 konnte der VDE Impuls „Systematisierung der Autonomiestufen in der Netzbetriebsführung“ als Er-



*Dr.-Ing.  
 Martin Kleimaier  
 kom. Vorsitzender  
 ETG FB V1*

gebnis einer Ad-hoc Arbeitsgruppe der ETG unter Leitung von Prof. Braun aus Kassel vorgestellt werden. Der Impuls arbeitet dabei deutlich heraus, dass die Netzautomatisierung kein Selbstzweck, sondern eine für einen stabilen und sicheren Systembetrieb unerlässliche Notwendigkeit darstellt. Dazu werden zunächst der Begriff der Automatisierung für die einzelnen Netzebenen differenziert und verschiedene Autonomiestufen definiert. Basierend auf dem aktuellen Stand der Technik in den Leitstellen der verschiedenen Netzebenen kann so der Handlungsbedarf zur Erreichung einer höheren Netzautomatisierung abgeleitet werden. Dabei ist die Automatisierung einzelner Funktionen mit einem zeitnahen Umsetzungshorizont bis 2030 besonders hervorzuheben.

## Veranstaltungen

Noch vor dem Ausbruch der Corona-Pandemie konnte Mitte Februar in Berlin das 11. Tutorial Schutz- und Leittechnik mit fast 600 Teilnehmerinnen und Teilnehmern wiederholt sehr erfolgreich durchgeführt werden. Die nächste Veranstaltung ist am 15.–16.02.2022 geplant. Neben vielen hervorragenden Beiträgen stellte ein wesentliches Highlight des Tutorials die Verleihung des ETG Award 2020 an den langjährigen Vorsitzenden des ETG ITG Fachausschuss Schutz und Automatisierungstechnik Herrn Dr. Heinrich Hoppe-Oehl für seine vielfältigen Verdienste um die ETG und den VDE dar. Die Nachfolge von Dr. Hoppe-Oehl als ETG Obmann des Arbeitskreises hat Dr. Sönke Loitz, Netze BW übernommen.

Bereits am 28.01.2021 findet eine ETG Fachtagung „Hochautomatisierter Netzbetrieb“ zum VDE Impuls „Systematisierung der Autonomiestufen in der Netzbetriebsführung“ als Web-Konferenz statt, zudem ist für 2021 eine ETG Fachtagung zu „Perspektiven der Übertragungstechnik“ möglichst als Präsenzveranstaltung geplant. Gleiches gilt für den ETG Kongress 2021 der unter dem Leitmotiv „Von Komponenten zum Gesamtsystem der Energiewende“ im Zeitraum vom 18.–19.05.2021 in der Stadthalle Wuppertal möglichst in Präsenz stattfinden soll.



Univ.-Prof. Dr.-Ing.  
Markus Zdrallek  
Bergische Universität  
Wuppertal  
Lehrstuhl für Elektrische  
Energieversorgungstechnik,  
Vorsitzender ETG FB V2

## ETG Fachbereich V3

### E6 Energiewirtschaft

Der Fachbereich V3 Energiewirtschaft der ETG beschäftigt sich schwerpunktmäßig mit der Frage, wie der energiewirtschaftliche Rahmen im Zuge der Energiewende weiterentwickelt werden sollte. Dabei versuchen wir Denkanstöße zu geben, in welche Richtung bestehende Konzepte anzupassen sind, um auch zukünftig den teilweise konkurrierenden energiepolitischen Zielen einer sicheren, effizienten und umweltfreundlichen Energieversorgung gleichermaßen gerecht zu werden.

Im Jahr 2020 haben wir die Ergebnisse unsere Diskussionen zum Thema Regionalmärkte im ETG *journal* 02/2020 und als VDE Impuls veröffentlicht. Ziel der Veröffentlichungen ist es, die Diskussion um Regionalmärkte besser zu strukturieren. Es ging nicht darum, ein

bestimmtes Modell als klar vorteilhaft herauszustellen, was nach unserer Einschätzung auch nicht möglich ist. Zur Strukturierung des Themas wurden Basismodelle entwickelt, auf die sich reale Ausprägungen von Regionalmärkten zurückführen lassen und die charakteristische Vor- und Nachteile aufweisen.

Des Weiteren haben wir diskutiert, ob, bzw. wie es möglich ist, Überschussstrom zu definieren, um sich auf der Basis Gedanken zu machen, wie dieser optimal genutzt werden sollte. Mit diesem Thema werden wir uns weiter beschäftigen. Ob die Ergebnisse der Diskussion veröffentlicht werden, ist aktuell noch unklar.

Auch für 2021 gibt es bereits eine Planung: Neben der weiteren Diskussion des Themas Überschussstrom ist vorgesehen, dass sich der Fachbereich Energiewirtschaft mit Fragen eines effizienten Marktdesigns für international angebundene Offshore Windparks beschäftigen wird. Und auch dem Thema Wasserstoff möchten wir uns widmen. Hier wird für uns die Frage im

Mittelpunkt stehen, in welcher Geschwindigkeit der Wasserstoffhochlauf in Deutschland nach aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnissen erfolgen sollte und an welchen Stellen marktwirtschaftliche Ansätze helfen können, um schnell und effizient innovative, zu den Herausforderungen der Energiewende passende Lösungen zu entwickeln. Diese Fragen unter anerkannten Experten zu diskutieren und daraus Fragestellungen zu extrahieren, bei denen die ETG einen Beitrag leisten kann, wird auch in 2021 wieder zu den spannenden Aufgaben im Fachbereich V3 gehören.



Dr.-Ing.  
Klaus von Sengbusch  
50Hertz Transmission  
GmbH,  
Vorsitzender ETG FB V3

## ETG Fachbereich Q1

**E7** Leistungselektronik und Systemintegration

Der Fachbereich Q1 „Leistungselektronik und Systemintegration“ hat sich zum Ziel gesetzt, verschiedene Veranstaltungen und Tagungen auszurichten, welche die aktuellsten Entwicklungen in diesem Gebiet aufnehmen und Gelegenheit zum intensiven fachlichen Austausch bieten.

Für das Jahr 2020 sind drei verschiedene, auf aktuelle Themen ausgerichtete Veranstaltungen geplant und vorbereitet worden:

- ETG Workshop Schaltungstechnik für GaN-Bauelemente in der Leistungselektronik am 23.03.2020 in Berlin
- 11. International Conference on Integrated Power Electronics Systems (CIPS) vom 24. bis 26.03.2020 in Berlin
- Industriearbeitskreis Mittelspannungs-Leistungselektronik am 21.09.2020 in Berlin.

Auf alle drei Veranstaltungen haben sich die Maßnahmen zur Eindämmung der Corona-Pandemie ausgewirkt.

Der Fachbereich lädt seit 2013 zu einem Workshop *Schaltungstechnik für GaN-Bauelemente in der Leistungselektronik* ein. Der Workshop wird von ECPE – dem European Center for Power Electronics e.V. – unterstützt. Das Format sieht Vorträge vor. In diesen Vorträgen werden Spezifika von GaN-Halbleitern, deren Auswirkungen auf die Messtechnik, die Aufbau- und Verbindungstechnik sowie den Einsatz sowie unterschiedliche Applikationen, die von GaN profitieren, vorgestellt und analysiert. Ziel ist es, die technischen Herausforderungen, die Möglichkeiten zur Ausweitung der Anwendungsfelder und Ursachenanalyse für deren Begrenzung anzusprechen und im Teilnehmerfeld zu diskutieren. Der Workshop richtet sich an Anwender, aber auch Schaltungs- und Bauelemententwickler aus Industrie, Instituten und Hochschulen und wurde auch in diesem Jahr sehr gut angenommen. Das Programm beinhaltete 9 Vorträge. Der Workshop musste jedoch aufgrund

der kurz zuvor erlassenen sehr strikten Corona-Maßnahmen abgesagt werden.

Die International Conference on Integrated Power Electronics Systems (CIPS) findet im Rhythmus von 2 Jahren statt und wird ebenfalls gemeinsam von Q1 und ECPE veranstaltet. In diesem Jahr war die 11. CIPS vom 24. bis 26.03.2020 in Berlin geplant und vorbereitet. Das Programm umfasste mehr als 130 eingereichte und eingeladene Beiträge aus der internationalen Fachwelt zu Themen über Bauelemente der Leistungselektronik, Aspekte von Gehäusen und ihrer Montage in mechatronischen Systemen sowie der daraus resultierenden Zuverlässigkeit und Aspekten der elektromagnetischen Verträglichkeit. Diese Themen sieht der Fachbereich als Schlüsselthemen der modernen Leistungselektronik in den diversen Stromversorgungen, Energieverteilungs- und Antriebslösungen an. Die 11. CIPS konnte im geplanten live-Format nicht stattfinden. Die Beiträge wurden jedoch publiziert und konnten über einen von der ETG kurzfristig eingerichteten SharePoint auch diskutiert werden. Die nächste CIPS ist für den 15.-17.03.2022 in Berlin geplant.

Der Fachbereich sieht Stromrichter in der Mittelspannungsebene als evidenten Thema in der Energieversorgung an. Ein Industriearbeitskreis Mittelspannungs-Leistungselektronik war für den 21.09.2020 in Berlin geplant. Die Veranstaltung wurde maßgeblich durch das Fraunhofer ISE Freiburg unterstützt und ist an Teilnehmende vorwiegend aus der Industrie gerichtet. Im Fokus des Interesses stehen dabei die Entwicklung von Mittelspannungs-geeigneter Leistungselektronik, aber auch die benötigten aktiven und passiven Bauelemente, Isolationstechnik, Mess- und Prüftechnik sowie Modellbildung und Simulation, so dass mehrere für die ETG relevante Themen adressiert werden. Der Arbeitskreis wurde aufgrund der nach wie vor schwierigen Lage auf den 15.09.2021 verschoben.

Der Fachausschuss Q1.1 Kontaktlose Energie- und Datenübertragung lud zu einem Arbeitstreffen ein. Die Schwerpunktthemen des Fachausschusses sind nach wie vor die aktuellen Aktivitäten der internationalen Normung betreffend der kontaktlosen Energie- und Datenübertragung insbesondere auch der Normung hinsichtlich des Schutzes vor magnetischen Feldern und hinsichtlich der Fremderwärmung. Konkret sind dies die Normung bei IEC, CISPR (CENELEC) und ETSI. Im Fokus stehen auch Werkstoffe für die kontaktlose Energie- und Datenübertragung sowie die Bestimmung elektromagnetischer Materialparameter dieser Werkstoffe.

Im Jahr 2022 wird die European Conference on Power Electronics and Applications (EPE – ECCE Europe) in Hannover stattfinden. Bei dieser Tagung handelt es sich um die umfassendste europäische Fachkonferenz zur Leistungselektronik. Sie bietet eine Austausch-Plattform zwischen Spezialisten aus Industrie, Instituten und Hochschulen zu den Schwerpunkten leistungselektronische Systeme und Komponenten. Der Fachbereich Q1 unterstützt die bereits begonnenen Vorbereitungen sowie die Durchführung der Tagung.



*Frau Prof. Dr.-Ing.  
Regine Mallwitz  
Technische Universität  
Braunschweig,  
Vorsitzende ETG FB Q1*

## ETG Fachbereich Q2

## E8 Werkstoffe, Isoliersysteme, Diagnostik

Der Fachbereich Q2 der ETG befasst sich mit den Betriebsmitteln im elektrischen Energieversorgungssystem unter den thematischen Schwerpunkten Werkstoffe, Isoliersysteme und Diagnostik. Die Arbeit des FB Q2 war im Jahr 2020 durch die Covid19-Eindämmungsmaßnahmen stark eingeschränkt und konzentrierte sich auf die Vorbereitung der Fachtagung Hochspannungstechnik am 09.–11. November 2020. Diese zunächst als Präsenz in Berlin geplante Veranstaltung musste wenige Wochen vor dem geplanten Termin in ein Online-Format umgewandelt werden. Die Durchführung als Online-Veranstaltung konnte der Programmausschuss überraschend positiv beurteilen. Ein ausführlicher Beitrag zur Fachtagung Hochspannungstechnik befindet sich in der vorliegenden Ausgabe des ETG journals (S. 52–54).

In der Branche nehmen die Mitglieder des Fachbereichs eine weitere Stärkung der Themen Hochspannungsgleichspannungsübertragung und lange Energiekabelstrecken wahr, was sich auch in der thematischen Verteilung der eingereichten Beiträge für die Fachtagungen zeigt.

Für das Jahr 2021 plant der Fachbereich Q2 die neue Fachtagung „High Voltage Goes Green“, welche verstärkt auf Fragestellungen der Hochspannungstechnik für eine dekarbonisierte Energietechnik eingehen wird. Diese Fachtagung beabsichtigt, bereits vorhandene nachhaltige Lösungen in der Branche zu stärken und den technischen Fortschritt sichtbar zu machen. Dabei sollen die Themen Materialien, Betriebsmittel und Diagnostik aus der Perspektive CO<sub>2</sub>-neutraler Lösungen adressiert werden.

Der Fachbereich Q2 hat 20 Mitglieder aus den Bereichen Herstellung, Netzbetrieb und Wissenschaft und wird von Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat von der Technischen Universität Braunschweig (Vorsitzender) und Prof. Dr.-Ing. Maik Koch von der Hochschule Magdeburg-Stendal (stellv. Vorsitzender) geleitet.



*Prof. Dr.-Ing. Maik Koch,  
Hochschule Magdeburg-  
Stendal, stellvertretender  
Vorsitzender des ETG  
FB Q2*

## ETG Fachbereich Q3

## E9 Kontaktverhalten und Schalten

### 1. Organisation von Tagungen, Diskussionsveranstaltungen, Schulungsseminaren

#### *Geplante Veranstaltungen:*

- 26. Albert-Keil-Kontaktseminar „Kontaktverhalten und Schalten“, 29. September 2021 – 1. Oktober 2021, KIT Karlsruhe, Tulla-Hörsaal

#### *Abgeschlossene Veranstaltungen:*

Keine

#### *Wiederholungsveranstaltungen:*

- Seminare an der Technischen Akademie Wuppertal e. V.
- Seminare an der Technischen Akademie Esslingen
- Seminare im Haus der Technik e. V. Essen

### 2. Bearbeitung von Fachthemen

Edelmetallbeschichtung für Kontaktsysteme, Schalten und Unterbrechung von Gleichstromsystemen (z. B. Photovoltaik, Bordsysteme, ...), Aluminium als Leiterwerkstoff und dessen Anschlusstechnik, DC-Schalttechnik, veränderte Rahmenbedingungen für Betriebsmittel und Netzschutz, Auswirkung auf Schaltgeräte, Isolierstoff für die Niederspannung, Kontaktmaterialien, neue Entwicklungen und Tendenzen, Simulation in der Schaltgeräte- und Anlagentechnik, Lichtbogensimulation, Prüfverfahren und Ausrüstungen für elektrische Kontakte und Geräte, Steckverbindertechnik, Schleifringssysteme

### 3. Erstellung von Fachberichten/ Veröffentlichungen

- VDE Fachbericht 75, Tagungsband 25. Fachtagung Albert-Keil-Kontaktseminar, KIT Karlsruhe, Oktober 2019
- regelmäßige Beiträge in den ETG/ITG Mitgliederinformationen



*Prof. Dr.-Ing.  
Frank Berger,  
Technische Universität  
Ilmenau,  
Institut Elektrische Energie  
und Steuerungstechnik,  
Vorsitzender ETG FB Q3*

*Foto: A. Kradisch*

# ETG Literaturpreis

Die ETG verleiht jährlich für herausragende Publikationen auf dem Gebiet der Elektrischen Energietechnik den ETG Literaturpreis.

## Preisaufruf 2021

Auch in 2021 wird der ETG Literaturpreis für hervorragende Veröffentlichungen aus dem Jahr 2020 (Abweichungen von +/- 3 Monaten werden toleriert) auf dem Gebiet der Elektrischen Energietechnik ausgeschrieben.

Der Autor soll nicht älter als 40 Jahre sein. Die mit dem Preis verbundene Prämie beträgt 3.000 €. Mögliche Themen sind alle Fachgebiete der Elektrischen Energietechnik (auch zusammenfassende Darstellungen).

Die Jury bewertet nach den Kriterien Bedeutung der Arbeit, Originalität, Kompetenz, Darstellung und Form. Einsendeschluss für Vorschläge oder Eigenbewerbungen ist der **12. Februar 2021**.

Weitere Informationen sind auf der ETG Homepage unter [www.vde.com/etgpreise](http://www.vde.com/etgpreise) verfügbar. Bewerbungen nimmt die ETG Geschäftsstelle gerne entgegen ([etg@vde.com](mailto:etg@vde.com)).



## ETG Literaturpreis 2021

Für herausragende wissenschaftliche Veröffentlichungen junger Autoren (Alter bis 40 Jahre) aus dem Jahr 2020 (± ¼ Jahr).

<p><b>Preis:</b> 3.000 €</p> <p><b>Themen:</b> Alle Fachgebiete der elektrischen Energietechnik</p> <p><b>Kriterien:</b> Bedeutung der Arbeit, Originalität, Kompetenz, Darstellung, Form</p> <p><b>Termin:</b> bis 12. Februar 2021 (auch Vorschlag von möglichen Kandidaten)</p>	<p><b>Bitte senden Sie Ihre Bewerbung an:</b> Energietechnische Gesellschaft im VDE (ETG) Stressemannallee 15 60596 Frankfurt/Main Tel: +49 69 6309-3440 Fax: +49 69 6309-9622 etg@vde.com</p>
--	--

Detaillierte Informationen / Bewerbungsformular:  
[www.vde.com/etgpreise](http://www.vde.com/etgpreise)

**VDE** ETG

# Herbert-Kind-Preis

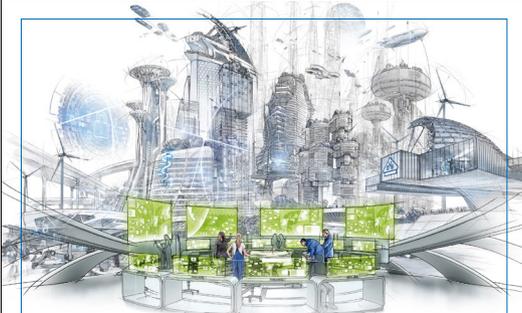
Mit dem Herbert-Kind-Preis würdigt die ETG überdurchschnittliche Studienleistungen auf dem Gebiet der Elektrischen Energietechnik.

## Preisaufruf 2021

Zur Förderung der internationalen Weiterbildung junger Studierender schreibt die ETG den Herbert-Kind-Preis aus. Die Stiftung von Herbert Kind finanziert ein Studium für einen Auslandsaufenthalt mit bis zu € 5.000.

Der Herbert-Kind-Preis richtet sich an Studierende mit überdurchschnittlichen Studienleistungen im Schwerpunkt Elektrische Energietechnik. Einsendeschluss für Vorschläge oder Eigenbewerbungen ist der **12. Februar 2021**.

Weitere Informationen sind auf der ETG Homepage unter [www.vde.com/etgpreise](http://www.vde.com/etgpreise) verfügbar. Bewerbungen nimmt die ETG Geschäftsstelle gerne entgegen ([etg@vde.com](mailto:etg@vde.com)).



## Herbert-Kind-Preis 2021

Mit dem Herbert-Kind-Preis wird die internationale Weiterbildung junger Studierender auf dem Gebiet der elektrischen Energietechnik gefördert.

<p><b>Preis:</b> 5.000 € Stipendium für ein Studium im Ausland</p> <p><b>Themen:</b> Alle Fachgebiete der elektrischen Energietechnik</p> <p><b>Kriterien:</b> überdurchschnittliche Studienleistungen</p> <p><b>Termin:</b> bis 12. Februar 2021 (auch Vorschlag von möglichen Kandidaten)</p>	<p><b>Bitte senden Sie Ihre Bewerbung an:</b> Energietechnische Gesellschaft im VDE (ETG) Stressemannallee 15 60596 Frankfurt/Main Tel: +49 69 6309-3440 Fax: +49 69 6309-9622 etg@vde.com</p>
---	--

Detaillierte Informationen / Bewerbungsformular:  
[www.vde.com/etgpreise](http://www.vde.com/etgpreise)

**VDE** ETG

# ETG Veranstaltungen

## Vorschau

**28. Januar 2021,  
Online-Fachtagung  
Hochautomatisierter  
Netzbetrieb**

[www.vde.com/netzbetrieb](http://www.vde.com/netzbetrieb)



Neben dem autonomen Fahren ist auch die Automatisierung im Netzbetrieb ein spannendes Zukunftsthema.

Die grundlegenden Trends der Dekarbonisierung (Strom, Wärme, Verkehr), Dezentralisierung und Digitalisierung sind mit umfangreichen regulatorischen Veränderungen und Kostendruck (z.B. Betrieb an den Kapazitätsgrenzen) verbunden. Die Komplexität hat inzwischen einen Grad erreicht, der umfangreiche Assistenzsysteme und Automatisierungsfunktionen erfordert, damit der Systemführer die notwendigen Aufgaben und Entscheidungen umsetzen kann. Wenn auch in Nieder- und Mittelspannungsnetzen verstärkt eine aktive Netzführung zur Koordination der regelbaren Prosumer angestrebt wird, ist auf Grund der großen Zahl der Mittel- und Niederspannungsnetze eine Automatisierung zwingend erforderlich.

Die Herausforderungen und eventuellen Vorteile einer weiteren Automatisierung sowie die erforderlichen Rahmenbedingungen werden diskutiert.

Der von einer ETG Ad-hoc Task Force erstellte VDE Impuls Systematisierung der Autonomiestufen in der Netzbetriebsführung wird vorgestellt.

**18.–19. Mai 2021,  
Wuppertal + Online, Kongress**

**ETG Kongress 2021**  
Von Komponenten bis zum Gesamtsystem

[www.etg-kongress.com](http://www.etg-kongress.com)



Die Kongressthemen sind, dem Thema der Energiewende entsprechend, breit gefächert und werden in Summe ein umfassendes Bild über den aktuellen Stand, Projekterfahrungen und über neue Entwicklungen vermitteln.

### Themen:

- Sektorenkopplung
- Elektromobilität
- Digitalisierung
- Schlüsselkomponenten und Technologien für die Energiewende
- Projekte und Anwendungen

Der ETG Kongress 2021 ist ein Ort, an dem junge Unternehmen und Start-ups ihre innovativen Ideen und Lösungen präsentieren können. Ausgewählten jungen Unternehmen und Start-ups wird die Gelegenheit gegeben, auszustellen und somit in den intensiven Austausch und Wissenstransfer zwischen Forschern, Entwicklern, Herstellern, Investoren, Nutzern und Entscheidern zu gehen. Für kürzere Produkt-Präsentationen in lockerer Atmosphäre stehen Ihnen unsere **Speakers and Innovation Corners** zur Verfügung. Oder multiplizieren Sie Ihre Sichtbarkeit und werden Sie Partner des ETG Kongress 2021!

**29. Juni 2021,  
Nürnberg + Online, Fachtagung  
Perspektiven der elektrischen  
Energieübertragung in  
Deutschland und Europa**

[www.vde.com/etg-veranstaltungen](http://www.vde.com/etg-veranstaltungen)



Der voranschreitende Umbau der elektrischen Energieversorgungssysteme erfordert zum Erhalt der System- und Versorgungssicherheit einen nachhaltigen Umbau der Übertragungsnetze. Die zukünftige Entwicklung der Übertragungsnetze ist dabei entscheidend durch die sich ändernden Übertragungsaufgaben, das Systemverhalten und die Interoperabilität der Komponenten innerhalb des Gesamtsystems geprägt.

Im Rahmen der Fachtagung werden von namhaften Expertinnen und Experten innovative und nachhaltige Lösungen für zukünftige Übertragungssysteme präsentiert und diskutiert. Die inhaltlichen Schwerpunkte liegen dabei auf

- leitungsgebundenen Übertragungssystemen,
- der Automatisierung und Digitalisierung sowie
- erweiterten Methoden und Analyseverfahren für die Netzplanung und Systemführung in Deutschland und Europa.

Die Fachtagung basiert auf der VDE Studie „[Perspektiven der elektrischen Energieübertragung in Deutschland](#)“.

**15. September 2021,  
Berlin + Online, Fachtagung  
Industriearbeitskreis  
Mittelspannungs-  
Leistungselektronik**

[www.ms-leistungselektronik.de](http://www.ms-leistungselektronik.de)



Die Veranstaltung rund um die Veränderungen in der Energieversorgung und Leistungselektronik findet zweijährig im Vorfeld der Messe InnoTrans im Fraunhofer-Forum Berlin statt. Schwerpunkt des Industriearbeitskreises Mittelspannungs-Leistungselektronik bilden aktuelle Entwicklungen in der Systemtechnik und neueste Erkenntnisse zu Leistungshalbleitern und passiven Bauelementen.

Die Veranstaltung richtet sich an Entscheidungsträger aus Industrie und Forschung mit Leistungselektronikentwicklung in Energie-, Bahn-, Industrie- und Medizintechnik sowie aus den Themengebieten der aktiven und passiven Komponenten für die Mittelspannung.

**21.–23. September 2021,  
Neckar Forum, Esslingen am Neckar,  
Fachtagung**

**STE 2021 – Sternpunktbehandlung  
in Netzen bis 110 kV (D-A-CH)**

[www.vde-ste.de](http://www.vde-ste.de)



Die Tagung zeigt den aktuellen Stand der Sternpunktbehandlung auf, stellt an Hand von Ausführungsbeispielen den Bezug zur Praxis her und erläutert mögliche Perspektiven. Angeboten werden Vorträge zu den Schwerpunktthemen:

- Status Quo und Trends der Sternpunktbehandlung
- Auswirkungen der zunehmenden Verkabelung
- Anforderungen an Erdungssysteme
- Umstellung der Sternpunktbehandlung
- Berechnung und Reduktion des Erdschlussreststromes
- Fehlerortung
- Beeinflussungsfragen
- Sonstige Aspekte

Die Veranstaltung wird mit einer Ausstellung sowie interessanten Sponsorpaketeten abgerundet.

**2.–3. November 2021,  
Hanns-Seidel-Stiftung e.V., München,  
Workshop**

**ETG CIRED Workshop 2021  
(D-A-CH)**

Innovationen im Verteilnetz

[www.vde.com/etg-veranstaltungen](http://www.vde.com/etg-veranstaltungen)



CIRED (Congrès International des Réseaux Electriques de Distribution) ist die international wichtigste Konferenz-Plattform zum Austausch von technologischen und regulatorischen Entwicklungen im Bereich der Verteilungsnetze. Hier treffen sich sämtliche Fachleute, um neue Produkte, Dienstleistungen, Konzepte und Geschäftsmodelle vorzustellen und zu diskutieren. Innerhalb der CIRED ist der D-A-CH-Raum einer der weltweit wichtigsten Technologieentwickler und Meinungsbildner. Speziell für den deutschsprachigen Raum wird damit eine regionale Plattform für den Austausch zwischen Wissenschaft und Praxis angeboten. Ansätze für Innovationen und deren Umsetzung in den Verteilungsnetzen können so in einem breiten Fachpublikum offen und lebhaft diskutiert werden.

Die Veranstaltung besteht aus drei Themenblöcken und einer Poster-

ausstellung. Die Vorträge werden mit einem moderierten Roundtable abgerundet, in dem sich neben den Referenten weitere Fachexperten einer intensiven Diskussion stellen.

**9.–10. November 2021,  
München + Online, Fachtagung**

**Elektromechanische Antriebs-  
systeme 2021 (D-A-CH)**

Electromechanical drive systems 2021

[www.vde.com/antriebssysteme](http://www.vde.com/antriebssysteme)



In der nunmehr achten Ausgabe beleuchtet die Fachtagung „Elektromechanische Antriebssysteme“ die Optimierung der Funktionalität und die Effizienz moderner elektromechanischer Antriebstechnik. Das Anwendungsspektrum umfasst industrielle und mobile Antriebssysteme, aber auch Erzeugereinheiten, wie z.B. Windkraftanlagen. Die enge mechanische Verzahnung und Integration elektrischer und mechanischer Antriebskomponenten wird in Zukunft immer wichtiger werden. Diese Entwicklung wird durch Erhöhung der Kompaktheit leistungselektronischer Komponenten, innovative E-Motor-Konzepte, optimierte mechanische Antriebsbauteile, Einsatz neuer Materialkombinationen und Fertigungstechnologien sowie den gezielten Einsatz modernster Mess- und Sensortechnik vorangetrieben.

Die Fachtagung wird die aktuellen **Trendthemen „Effizienzsteigerung im Gesamtsystem“** und **„Parasitär-effekte in wechsellrichtergesteuerten Antriebssystemen“** mit speziellen Sessions und Keynotes in den Fokus stellen. Die aus einer gesteigerten Effizienz resultierende Betriebskostensenkung gewinnt bei Anlagenbetreibern immer größere Beachtung. Parasitäre Effekte wie Geräusche, Lagerströme, Erwärmung durch Zusatzverluste oder mangelnder EMV kön-

nen zu unangenehmen Frühausfällen führen oder schädliche Auswirkungen auf die Umgebung haben.

Mit Blick auf den starken deutschsprachigen Wirtschaftsraum ist diese Fachtagung auf die **D-A-CH-Region** (Deutschland, Österreich und die Schweiz) ausgerichtet. Der

Programmausschuss setzt sich aus Vertretern dieser Länder zusammen, sodass wir bei unserem Aufruf zu Fachbeiträgen ein breites und interessantes Spektrum erwarten.

Die gewünschten Beiträge sollen sowohl aus der Forschung (Hochschulen) als auch aus der Praxis

(Industrie) kommen. Sie sollen das interdisziplinäre Vorgehen zwischen Elektrotechnik und Maschinenbau bei Planung, Entwurf, Inbetriebnahme und Betrieb antriebstechnischer Systeme verdeutlichen.

## E10 Einladung zur ETG Mitgliederversammlung am 19. Mai 2021 in Wuppertal

Sehr geehrte ETG Mitglieder,

anlässlich des ETG Kongresses 2021 laden wir Sie sehr herzlich zur 25. Ordentlichen Mitgliederversammlung ein, die

am **Mittwoch, den 19.05.2021  
von 12:00 bis 13:30 Uhr**

in der **Historischen Stadthalle Wuppertal**  
Johannisberg 40  
42103 Wuppertal  
<http://www.stadthalle.de>

stattfinden wird. Der ETG Kongress wird als Hybrid-Veranstaltung durchgeführt. Die ETG Mitglieder können daher auch Online an der Mitgliederversammlung teilnehmen.

### Tagesordnung

#### 1. Begrüßung

#### 2. Tätigkeitsbericht

Der ETG Vorsitzende Herr Dr. Michael Schwan wird einen Überblick über die wesentlichen Entwicklungen und Aktivitäten seit der letzten Mitgliederversammlung am 9. Mai 2019 in Esslingen am Neckar geben. Ergänzend hierzu wird ein schriftlicher Tätigkeitsbericht des ETG Geschäftsführers vorliegen.

#### 3. Aussprache über den Tätigkeitsbericht

Sie sind eingeladen, zu den ETG Aktivitäten Fragen zu stellen und eine rege Diskussion anzustoßen.

#### 4. Der neue ETG Vorstand stellt sich vor

Der von den ETG Mitgliedern im Sommer 2019 gewählte Vorstand stellt sich vor.

#### 5. Nationale Wasserstoff-Strategie und Handlungsfelder für die ETG

Der ETG Vorsitzende stellt die von ETG Vorstand und Wissenschaftlichem Beirat im Rahmen der Nationalen Wasserstoff-Strategie identifizierten Handlungsfelder für die ETG vor und diskutiert diese mit den ETG Mitgliedern.

Selbstverständlich ist auch für das leibliche Wohl gesorgt. Vor Beginn der Mitgliederversammlung steht für die Teilnehmer ein kleiner Imbiss bereit.

Bitte bestätigen Sie uns Ihre Teilnahme mit Angabe Ihrer Mitgliedsnummer unter [etg@vde.com](mailto:etg@vde.com) oder bei der Anmeldung zum ETG Kongress 2021.

Wir würden uns sehr freuen, Sie möglichst zahlreich in Wuppertal begrüßen zu dürfen.



Mit freundlichen Grüßen  
*Dr.-Ing. Michael Schwan*  
Vorsitzender der ETG



## Rückblick

### **E11** ETG Fachtagung eSTE 2020 Sternpunktbehandlung in Netzen bis 110 kV (D-A-CH) 22. September 2020, online

COVID-19 hat vieles verändert; auch wir als Veranstalter der STE 2020 hatten den aktuellen Entwicklungen Rechnung tragen müssen.

Ursprünglich sollte die 5. Fachtagung zum Thema „Sternpunktbehandlung in Netzen bis 110 kV“ (D-A-CH) im Neckar Forum Esslingen über den Zeitraum von 2,5 Tagen vom 21. September bis zum 23. September 2020 stattfinden. Corona-bedingt mussten wir die Tagung um genau ein Jahr verschieben, auf den 21.–23. September 2021 am gleichen Veranstaltungsort.

Dank der Unterstützung der ETG und zahlreicher Firmen konnten wir am 22. September 2020 eine kostenfreie Webkonferenz durchführen. Für die Fachtagung STE 2020 existierten bereits 50 akzeptierte Beiträge und Poster. Der Programmausschuss entschied sich, einige der Beiträge zusammenzufassen, zu kürzen und den Großteil der Vorträge bereits auf die STE 2021 zu verschieben. Dadurch besteht für die Autoren die Möglichkeit, Ihre Beiträge bis zum September 2021 auf den aktuellen Stand zu bringen, zu vervollständigen und mit neuesten Erkenntnissen zu ergänzen.

Sowohl die eSTE 2020 als auch die STE 2021 sind von der ETG und den weiteren D-A-CH Gesellschaften OVE und electrosuisse veranstaltete Tagungen. Beide befassen sich mit der Theorie der Sternpunktbehandlung, stellen an Hand von Ausführungsbeispielen den Bezug zur Praxis her und zeigen mögliche Perspektiven auf.

Vorträge zu folgenden Schwerpunktthemen wurden/werden sowohl auf der eSTE 2020 als auch auf der STE 2021 angeboten:

1. Auswirkung zunehmender Verkabelung
2. Anforderungen an Erdungssysteme
3. Neuentwicklungen bei Betriebsmitteln
4. Innovative Verfahren zur Sternpunktbehandlung
5. Neue Methoden zur Erdschlusserfassung und Lokalisierung
6. Auswirkungen der Harmonischen im Fehlerstrom
7. Erfahrungen aus dem Netzbetrieb
8. Erdschlussversuche
9. Fallbeispiele und Trends

Auf der auf einen Tag verkürzten Webkonferenz erfolgte eine kurze Darstellung des aktuellen Standes der Sternpunktbehandlung und eine sehr interessante Vorschau auf die STE 2021. Ein sehr gut gelungenes Experiment war der Round-Table zum Thema "Erdschlussreststrom – eine (überschätzte?) Gefahr".

Genauere Details des Programms sind zu finden unter [www.vde-ste.de](http://www.vde-ste.de).

Für die Webkonferenz hatten sich über 300 Teilnehmer aus 8 Ländern (Deutschland, Österreich, Schweiz, Luxemburg, Spanien, Ungarn, Tschechische Republik, Island) angemeldet.

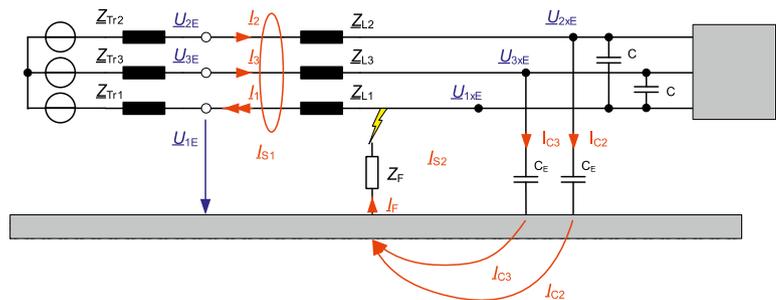
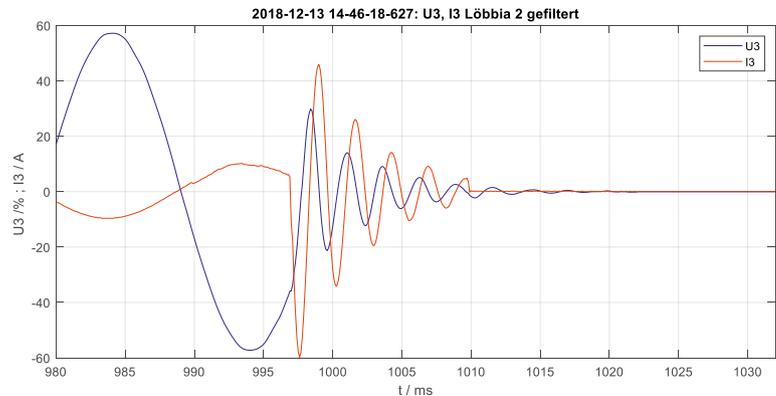
## Tutorial

Die eSTE 2020 begann mit einem Tutorial "*Einführung in die Sternpunktbehandlung*". Prof. Dr. Lothar Fickert hat in seiner bekannten Art eine sehr anschauliche Einführung über Erdschluss-Fehlersituationen und deren Beherrschung präsentiert. Durch diese Einführung war es dann für die folgenden Beiträge möglich, sich auf ihre speziellen Kernthemen zu konzentrieren. Diese Vorgehensweise wurde von den Teilnehmenden sehr begrüßt und daher ist dieses vorgelagerte Tutorial auch für die STE 2021 geplant.

## Kurzfassungen der eSTE 2020 Beiträge

### Erschlusswischerprüfungen im realen 110-kV-Netz und 20-kV-Netz

In diesem zusammengefassten Beitrag wurden sehr ausführliche Messungen und Prüfungen im 110-kV-Freileitungsnetz und 20-kV-Kabelnetz in Österreich präsentiert. Ziel war die Evaluierung neuer technischer Entwicklungen im Bereich der Erdschlussortung und eine Untersuchung des Löschverhaltens im 110-kV-Netz. Dazu wurde die Zündung des Lichtbogens bei unterschiedlicher Netzgröße (110 kV:  $I_{CE} = 50 \text{ A}$  bis  $1700 \text{ A}$ ) und unterschiedlicher Kompensation mit Hilfe eines Zünddrahtes durchgeführt. Dieser Zünddraht wurde als Pendel ausgeführt, wodurch die Isolationsstrecke langsam bis zum Überschlag reduziert wurde. Die Zündung erfolgte dadurch wie bei einem realen Erdschluss in der Nähe des Spannungsmaximums. Im 110-kV-Netz wurden über 30 Erdschlüsse und im 20-kV-Kabelnetz 68 Erdschlüsse mit unterschiedlichen Fehlerimpedanzen eingelegt. Das Kabelnetz hatte ein  $I_{CE} = 400 \text{ A}$  und verteilte E-Spulen. Einige Auswertungen sind bereits erfolgt und detailliertere Auswertungen werden auf der STE 2021 präsentiert werden.



### Neue Erkenntnisse bezüglich des Löschverhaltens des Lichtbogens und einer neuen Methode zur Erdschlussdistanzmessung (EDIST)

Basierend auf den oben gezeigten Messungen wurden die ersten neuen Ergebnisse bezüglich des Löschverhaltens des frei brennenden Lichtbogens präsentiert. Diese Messungen sind sehr wichtig, da es im Labor nicht möglich ist, so große gelöschte Netze ohne wesentliche Vereinfachungen nachzubauen. Im Labor werden immer, oft nicht zulässige, Vereinfachungen getroffen, die zu falschen Schlussfolgerungen führen können. Die Messungen im realen Netz dienen auch dazu, die bestehenden Modelle an die Realität anzupassen. Die Erkenntnisse bezüglich des Löschverhaltens werden wesentliche Verbesserungen für die zukünftige Betriebsführung bringen.

Die Erdschlussdistanzmessung ist derzeit im Distanzschutz eingebaut, aber wegen der kleinen Ströme über die Fehlerstelle im nicht niederohmigen geerdetem Netz abgeschaltet. Es wurde ein neues Verfahren vorgestellt, das den hohen Aufladestrom der beiden gesunden Phasen bei Erdschlusseintritt ausnutzt, um eine Entfernungsmessung durchzuführen. Auch hier wird das Verfahren, das mit Abstraten im kHz-Bereich auskommt, an Hand der oben beschriebenen Messung verifiziert. Die ausführlichen Ergebnisse werden auf der STE 2021 präsentiert werden.

Vorteile des Verfahrens:

- Großer Aufladestrom in nicht starr geerdeten Netzen
- 50-Hz- und DC-Anteile werden kompensiert
- $X_L$  wird für die Aufladefrequenz ermittelt und auf 50 Hz umgerechnet
- Unabhängig vom 50-Hz-Laststrom
- Unabhängig von Gegeneinspeisungen

### **Erdschlussortung mit Wanderwellen – Erfahrungen aus Feldprüfungen**

Im Zuge der oben beschriebenen Wischerprüfungen im 110-kV-Netz wurden auch Entfernungsmessungen, basierend auf Wanderwellen durchgeführt. Das Verfahren und die Ergebnisse der zweiseitigen Wanderwellen-Messungen mit einer Abtastrate von 10 MHz wurden ausführlich präsentiert. Die Auflösungsgenauigkeit lag im Bereich von 10 m bis 300 m bei einer Distanz von 70 km zwischen den Messstellen. Auf der STE 2021 sollen die Ergebnisse der einseitigen Messung präsentiert werden.

### **Versuche zur Messung der Potenzialverschleppung**

Die Befürchtung, dass unzulässige Spannungen in einem 400-V-Netz durch einen einpoligen Fehlerstrom im 380-kV-Netz entstehen, führte zu dieser Studie. Es wurden mehrere Maßnahmen zur Reduktion der Potentialverschleppung in einer gemeinschaftlich betriebenen Anlage sehr ausführlich beschrieben und verglichen. Die derzeit üblichen Vorgehensweisen brachten nicht das gewünschte Ergebnis. Der neue Vorschlag führte zu ausführlichen Diskussionen auch im Nachgang der Webkonferenz.

### **Round Table: Erdschlussreststrom – eine (überschätzte?) Gefahr**

Mit steigendem Verkabelungsgrad wächst auch der kapazitive Erdschlussstrom. In Mittelspannungsnetzen, die mit Erdschlusskompensation betrieben werden, kann dies zu einer Vergrößerung des Erdschlussreststromes führen. Dabei sind die Grenzwerte im Hinblick auf zulässige Berührungsspannungen an Hochspannungsanlagen und Beeinflussungsspannungen in der Telekommunikation im Dauererdschlussfall zu beachten. In diesem Zusammenhang wird häufig die Obergrenze für den Erdschlussreststrom nach VDE 0845-6-2 von 60 A diskutiert, bis zu der ein selbsttätiges Verlöschen von freibrennenden Lichtbögen erwartet wird.

Eine ETG Taskforce aus Netzbetreibern, Herstellern und Hochschulen widmet sich zurzeit dem Thema Erdschlussreststrom, um eine bessere Identifikation kritischer Anlagenteile zu ermöglichen. Die Ergebnisse werden auf der STE 2021 publiziert.

Ein Teilaspekt dieser Arbeit wurde bereits in dem digitalen Round-Table unter der Überschrift „Erdschlussreststrom – eine (überschätzte?) Gefahr“ diskutiert.

In einem einführenden Impulsbeitrag wurden die Anforderungen der betreffenden Normen vorgestellt. Es wurde gezeigt, dass für den Personenschutz die Einhaltung der zulässigen Berührungsspannung entscheidend ist. Somit sind hier unter der Voraussetzung, dass die Betriebserfahrung Doppelerdschlüsse als selten einstuft, Erdschlussrestströme über 60 A möglich.

In einem weiteren Beitrag wurde der „Resistive Ansatz“ vorgestellt, der es ermöglicht in der Planung, basierend auf Messgrößen aus dem ungestörten Netzbetrieb, Bereiche zu identifizieren in denen kritischen Anlagen bezüglich der Berührungsspannungen vermutet werden können.

In einem letzten Beitrag wurde der aktuelle Stand der Forschung zur Frequenzabhängigkeit von Reduktionsfaktoren dargestellt und diskutiert.

### **Betrachtungen zur Netzausbaugrenze von resonanzgeerdeten Mittelspannungsnetzen**

Das Resümee war, dass bezüglich der Netzausbaugrenze nicht die Löschgrenze, sondern die zulässige Berührungsspannung  $U_{Tp}$  die Grenze der Netzerweiterung vorgibt. Dies erfordert allerdings für jeden Einzelfall eine ausführliche Untersuchung und ein Erdschluss-Engineering.

### **Sicher Erden?! Ergebnisse aus Netzprüfungen in ländlichen NOSPE-MS-Netzen**

Grundlage für die Berechnung und den messtechnischen Nachweis liefert die DIN EN 50522. In der Praxis entstehen in MS-NOSPE-Netzen jedoch noch offene Fragen, wie z. B.:

- Auswirkung geschlossener Stromkreise inhomogener Netzstrukturen
- Wirkungsbereich des Reduktionsfaktors
- Eindeutige Definition von Kettenleitern
- Darstellung Doppelverwendung Erdseil/Schirm

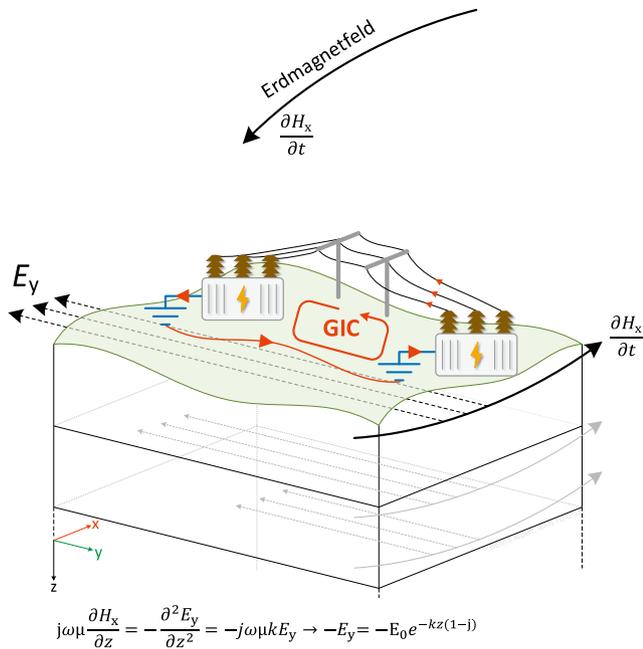
Die Antworten und neue Vorschläge wurden kurz präsentiert. Eine wesentlich ausführlichere Präsentation ist für die STE 2021 geplant.

### **Neue Möglichkeiten beim Prüfen von Erdschlusschutz mit transienter Simulation**

Es wurde eine neue Möglichkeit zur Vereinfachung und Wiederholbarkeit der Prüfung von Schutzgeräten mit einer Abtastrate im einstelligen kHz-Bereich für transiente Erdschlüsse vorgestellt. Die transiente Simulation basiert auf verteilter Leitungsnachbildungen und ermöglicht transiente Vorgänge wie wiederzündende Erdschlüsse, Sekundärlichtbögen bei einpoliger AWE, Doppelerdschluss, Kreisströme bei Ringtopologien, usw. Durch die einfache Simulation sind aufwendige Rechnungen und Überlegungen der physikalischen Vorgänge des transienten Vorganges stark reduziert. Diese Art der Simulation eignet sich auch hervorragend für die Ausbildung.

### **Sternpunktgleichströme im Hoch- und Höchstspannungsnetz – aktueller Stand der Forschung**

Es wurde eindrucksvoll gezeigt, dass die sehr niederfrequente "Geomagnetische Induktion" auch in Zentraleuropa, trotz der relativ kleinen Längenausdehnung des Netzes, zu Gleichströmen führt, die über den Trafosternpunkt fließen und die Transformatoren in die Sättigung treiben. Dies führt zu einer wesentlichen Geräuscherhöhung der Transformatoren. Auch hier wird auf der STE 2021 eine ausführlichere Präsentation bezüglich der Messung, Korrelation zu Sonnenwinden und Maßnahmen zur Reduktion der Beeinflussung erfolgen.



### Induktive und kapazitive Kopplung – Optimierung von gegenseitigen niederfrequenten Beeinflussungswirkungen von Hochspannungsfreileitungen

Durch die kapazitive und induktive Kopplung von Leitungssystemen kommt es zu Beeinflussungswirkungen, welche im Zuge von Projekten oder Änderungen der Beeinflussungstopologie untersucht werden sollten, um störende Auswirkungen im Vorfeld zu vermeiden.

- Beeinflussungswirkungen können durch gezielte Maßnahmen reduziert werden
- Treten z. B. bei der Beeinflussung zwischen Netzen mit galvanisch getrennten Leitungssystemen Beeinflussungswirkungen aufgrund der kapazitiven und induktiven Kopplung auf, müssen beide Kopplungsmechanismen bei der Optimierung berücksichtigt werden
- Es können Beeinflussungstopologien auftreten, bei welchen eine Optimierung nur mit sehr hohem Aufwand (zusätzliche Verdrillungen) reduziert werden können

Auf der STE 2021 sollen im Zuge dieses Beitrags die Ergebnisse einer detaillierten Untersuchung der induktiven und kapazitiven Kopplung bei einem Netzausbau mit Leitungsführung auf mehreren 220/110-kV-Gemeinschaftsgestängen gezeigt werden.

### Übertragung von Nullsystemspannungen über Transformatoren mit Erdung an mehreren Sternpunkten

In diesem Beitrag wurde gezeigt, dass und wie man auch bei mehrfacher Erdung an einem Transformator einen sicheren Netzbetrieb gewährleisten kann.

### Ausblick

Wie oben erwähnt, ist die nächste STE 2021 für den Zeitraum 21.–23. September 2021 geplant.

Dort sollen auch die bei der nun durchgeführten digitalen Veranstaltung vorgestellten Themen ausführlicher und mit neuen Erkenntnissen ergänzt präsentiert werden. Der Programmausschuss rechnet bis zum nächsten Jahr aber auch noch mit zusätzlichen, interessanten Beiträgen.

Unter anderem wird dann auch der sehr ausführliche „Leitfaden Sternpunktbehandlung“, erstellt von einem Autorenkollektiv aus Netzbetreibern, Herstellern und Hochschulen präsentiert werden.



Dr. techn. Gernot Druml,  
Wissenschaftlicher Tagungsleiter  
Sprecher-Automation GmbH

Rückblick

# E12 ETG Fachtagung

## VDE Hochspannungstechnik 2020

9.–11. November 2020, online

Die Fachtagung VDE Hochspannungstechnik 2020 wird als erstes Online-Event dauerhaft in Erinnerung bleiben: Unter erschwerten Bedingungen fand der wissenschaftliche Austausch statt. Trotz der fehlenden persönlichen Begegnung kamen die Diskussionen nach den Vorträgen nicht zu kurz. Auch in den Poster-Sessions konnten die Autoren die Beiträge einer großen Teilnehmerzahl präsentieren. So kann das Fazit gezogen werden: Es war eine erfolgreiche Veranstaltung.

### Die Fachtagung als Online-Event

Anfang Oktober, also knapp 4 Wochen vor Beginn der in Berlin geplanten Veranstaltung, musste der Programmausschuss die weitreichende Entscheidung treffen, die Fachtagung Hochspannungstechnik ausschließlich online umzusetzen. Zu diesem Zeitpunkt waren bereits zentrale Stadtteile Berlins als Risikogebiete eingestuft worden und die Indikatoren für das Infektionsgeschehen deuteten auf einen weiteren Anstieg hin. Der später verordnete „Lockdown light“ bestätigte die Richtigkeit der getroffenen Entscheidung.

Wie aber kann eine Veranstaltung, deren wesentliche Mehrwerte in Diskussion und Networking bestehen, online umgesetzt werden? Hier gelang es dem VDE Konferenz-Service, ein wirklich innovatives Online-Tool einzusetzen. HopIn.to ist auf nahezu unbegrenzte Teilnehmerzahlen zugeschnitten, ermöglicht aber gleichzeitig mittels Video- und Textchats eine direkte Kommunikation zwischen den Teilnehmern. Parallel stattfindende Sessions wurden in verschiedenen, elektronisch geschalteten Meetingräumen abgebildet, was das Wechseln der Räume während der Sessions zu einer Sache von Mausklicks machte. Die Präsentierenden hielten ihre Vorträge live vor ihren Computern. Fragen konnten über den Chat gestellt werden oder ebenfalls live, indem die Fragesteller ihr eigenes Audio und Video aktivierten. Dabei kamen lebendige Diskussionen zustande, die realen Events kaum nachstanden. Die Poster-Session wurde in Form von Kurzvorträgen durch die Autoren realisiert, was einen spürbaren Vorteil gegenüber der Poster-Session bei Präsenzveranstaltungen darstellte. Sogar eine Fachausstellung wurde digital abgebildet.

Schwierigkeiten des Online-Formats waren dennoch Legion: Firewalls blockierten die Videostreams, der individuell schlechte Uplink ließ oft nur verpixelte Bilder zu, nicht funktionierendes Audio oder Video führte zu erheblicher Ablenkung und Verspätung, den Vortragenden fehlte das unmittelbare Feedback der Zuhörer und – last but by no means least – das Knüpfen oder Vertiefen sozialer Kontakte und echte soziale Interaktion blieben nahezu undurchführbar.

Trotz des reinen Online-Formats konnten 240 Teilnehmer begrüßt werden; bei der letzten Präsenzveranstaltung im Jahr

2018 waren es 328. Die große Zahl von 159 Beiträgen wurde angemeldet (149 in 2018), allerdings zogen Autoren wegen Covid19-bedingter Verzögerungen 39 zurück.

Die freigegebenen Vorträge stehen für die Teilnehmer auf <https://www.vde-hochspannungstechnik.de/de> zum Download bereit.

### Tutorials von Cigré Arbeitsgruppen

Am ersten von drei Veranstaltungstagen wurden Tutorials von Arbeitsgruppen der Cigré vorgestellt. Prinzipiell sind alle Arbeitsgruppen der Cigré angehalten, ihr erarbeitetes Wissen durch Tutorials an die Fachcommunity weiterzugeben. Bei der Fachtagung Hochspannungstechnik präsentierten Leiter oder Mitglieder der Arbeitsgruppen 8 Tutorials in zwei parallelen Sessions, die von insgesamt 140 Zuschauern online verfolgt wurden. Themen waren: die Feldsteuerung in elektrischen Isolierelementen; die Errichtung, Teilentladungsbewertung und Fehlerlokalisierung an Hochspannungskabeln; die Interpretation von FRA-Messungen; Teilentladungsmessung im UHF-Bereich und Feuchtemessung in Transformatoren; sowie die Zuverlässigkeit von Durchführungen. Die wesentlichen Arbeitsergebnisse der Cigré Arbeitsgruppen können als technische Broschüren bei [www.e-cigre.org](http://www.e-cigre.org) heruntergeladen werden, für Cigré-Mitglieder ist dieser Service sogar kostenlos.

Wesentlicher Gegenstand der Arbeitsgruppe D1.56 waren neuartige Materialien zur Feldsteuerung z. B. mit Füllstoffen. Bild 1 zeigt die Feldsteuerung durch neuartige Werkstoffe, welche das elektrische Wechselfeld durch eine inhomogene Verteilung von Partikeln mit hoher Permittivität  $\epsilon$  steuern. Im Bild verringern die Partikel die Feldstärke an einem Stützer in einer SF<sub>6</sub>-Schaltanlage. Zu den noch offenen Fragen gehört die messtechnische Charakterisierung dieser neuartigen Werkstoffe.

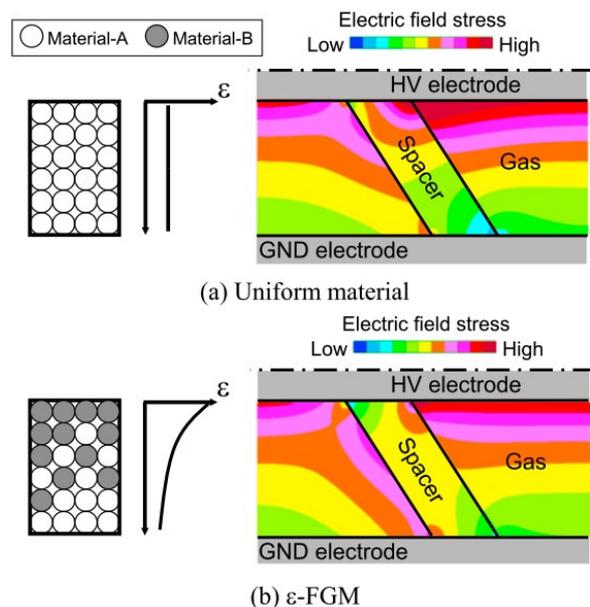


Bild 1: Steuerung des elektrischen Wechselfeldes am Stützer einer SF<sub>6</sub>-Schaltanlage durch inhomogen verteilte Partikel mit hoher Permittivität  $\epsilon$ -FGM [2]

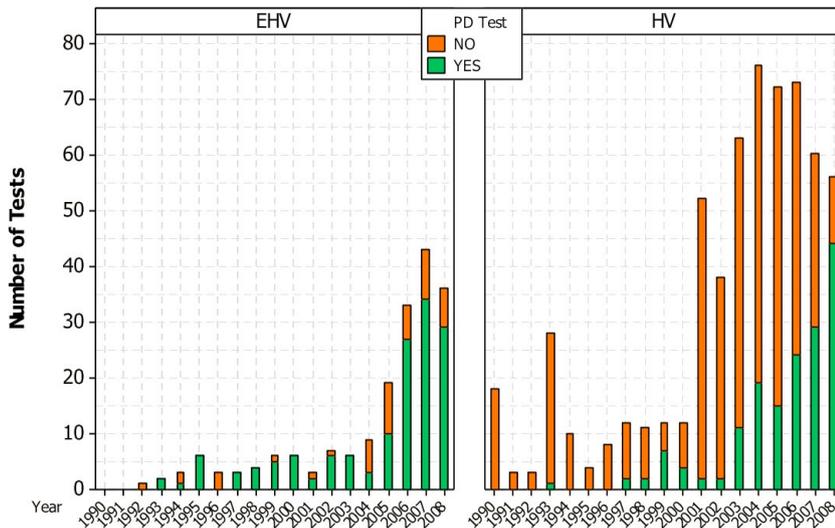


Bild 2: Trend zur TE-Messung bei der Abnahmeprüfung von Höchst- und Hochspannungskabel [3]

**Themenschwerpunkt Energiekabel**

Energiekabel bildeten aufgrund der weltweit einzigartigen HVDC-Projekte und dem grundsätzlichen Kabelvorrang in Deutschland einen wesentlichen Schwerpunkt der Veranstaltung. Beiträge thematisierten den erforderlichen Netzausbau und die mit dem Kabelvorrang verbundenen Mehrkosten; neuartige Isolierstoffe z.B. mit Nanopartikeln; spezielle Probleme bei Gleichspannung und viele Fragestellungen der Diagnostik, insbesondere der Teilentladungsmessung.

Herr Michael Jesberger (TransnetBW GmbH) präsentierte den Laborbericht Netzplanung 2050 mit dem erforderlichen Netzausbau, welcher die Zukunft der Schlüsseltechnologie Hochspannungstechnik betonte. Herr Patrick Düllmann (RWTH Aachen) zeigte im Beitrag „DC-DC Inter-system Faults in Parallel Partially-Cabled HVDC Links“, dass bei Fehlern zwischen benachbarten DC-Systemen hohe, schwingende Überspannungen entstehen, die stark vom Netzaufbau und vom Fehlerort abhängen. Für Hoch- und Höchstspannungskabelsysteme wird die Teilentladungsprüfung immer mehr zum Standard-Abnahmetest vor der Inbetriebnahme, stellte Professor Ronald Plath (TU Berlin) fest, Bild 2.

**Transformatorbetrieb und -diagnose**

Die Konvergenz von Transformatorüberwachung, -steuerung und Schutzfunktionen samt Auslösung im Fehlerfall, ausgeführt durch das universelle Kommunikationsprotokoll IEC 61850 in einem durchgängigen intelligenten Stationskonzept, macht Fortschritte, wie im Projekt DESIGNETZ demonst-

riert wurde. Die einfachere Verfügbarkeit der Betriebsdaten des Transformators auf der Leitebene ermöglicht modifizierte Betriebsweisen, wie zum Beispiel den dynamischen Überlastbetrieb. Dazu ist es sinnvoll, die Berechnungswerkzeuge zu schärfen, zum Beispiel durch Simulationen von Wicklungsverlusten und Wicklungskühlung, zeigte Rene Hellberg (Westnetz GmbH), Bild 3.

Im großen Themenkomplex Transformator diagnose wurde u. a. wiederum bewiesen, dass diagnostische Kriterien von Mineralöl nicht ohne weiteres für Isolierflüssigkeiten auf Pflanzenölbasis anwendbar sind, zum Beispiel für die Berechnung der Konzentration von gelösten Gasen (DGA). Es bleibt ein ständiges Interesse der Betreiber, die Alterung von ölprägnierten Isoliersystemen einerseits zu quantifizieren, andererseits zu verzögern. Mit diesem Themenkreis beschäftigten sich Beiträge zum Einsatz von Fuzzylogic-Algorithmen zur Korrelation von Schadgaskonzentrationen im Öl mit der Depolymerisation von Zellulose und zur nachträglichen Hermetisierung von Transformatoren.

Herr Tobias Münster (Uni Hannover) stellte Laborergebnisse einer innovativen optischen Messtechnik vor, welche einen faseroptischen Sensor zur Bestimmung des Polymerisationsgrads der Zellulose verwendet. Funktioniert ein solcher Sensor zuverlässig, so könnten genaue Aussagen zur Lebensdauer der Feststoffisolierung getroffen werden. Weitere Beiträge beschäftigten sich mit der Sensorik zur UHF-Teilentladungsmessung und einem besseren Verständnis von Leitungsvorgängen in Isolierflüssigkeiten, insbesondere bei Gleichspannung.

Herr Tobias Münster (Uni Hannover) stellte Laborergebnisse einer innovativen optischen Messtechnik vor, welche einen faseroptischen Sensor zur Bestimmung des Polymerisationsgrads der Zellulose verwendet. Funktioniert ein solcher Sensor zuverlässig, so könnten genaue Aussagen zur Lebensdauer der Feststoffisolierung getroffen werden. Weitere Beiträge beschäftigten sich mit der Sensorik zur UHF-Teilentladungsmessung und einem besseren Verständnis von Leitungsvorgängen in Isolierflüssigkeiten, insbesondere bei Gleichspannung.

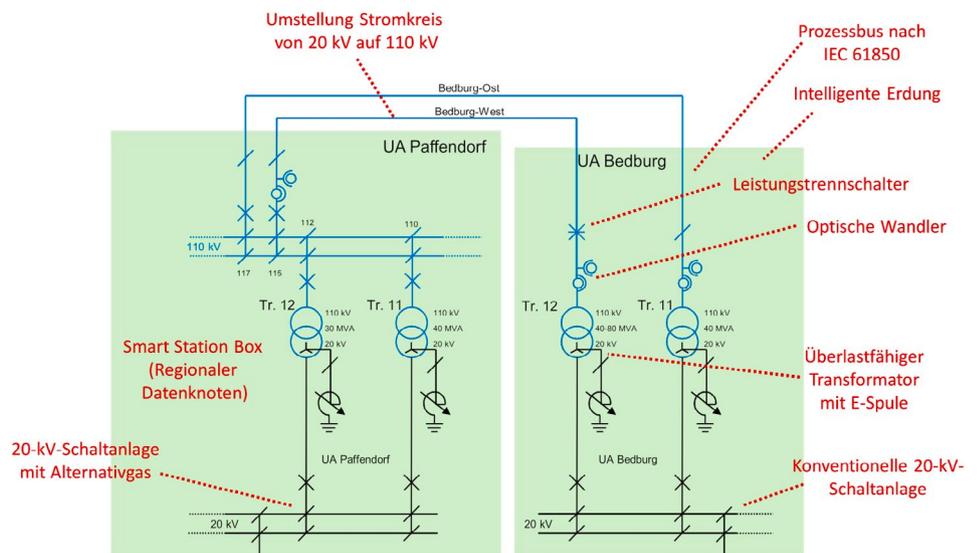


Bild 3: Weiterentwicklung der konventionellen Umspannanlagen zu einer Energie- und Datendrehscheibe für Städte

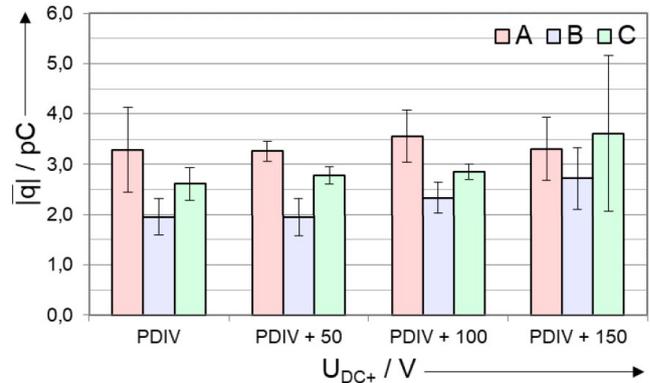
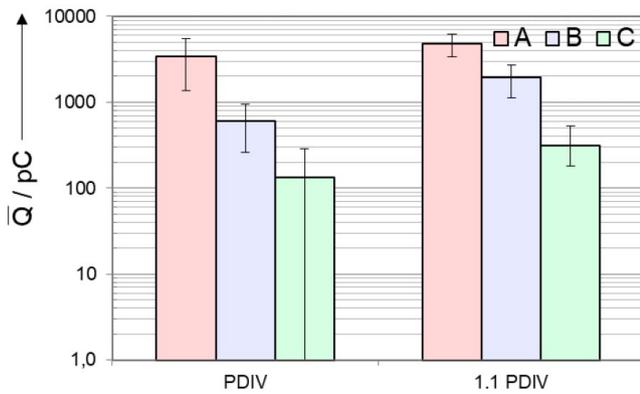


Bild 4: Vergleich der gemessenen TE-Amplituden der drei Labore A, B, C: bei 1,0- und 1,1-facher TE-Einsatzspannung als Wechselspannung (links) und bei positiver Gleichspannung oberhalb der Einsatzspannung (rechts)

### HVDC Betriebsmittel und Schaltanlagen

Hochspannungs-Gleichspannungs-Übertragung stellt eine wichtige Technologie der Energiewende dar. Vorgestellt wurden für HVDC geeignete Betriebsmittel wie kapazitiv gesteuerte Durchführungen, gasisolierte Schaltanlagen und spezielle Prüfungen für Betriebsmittel, insbesondere die Teilentladungsmessung und -interpretation bei Gleichspannung. Das gemeinsame Paper „Reproduzierbarkeit der Ergebnisse von Teilentladungsmessungen bei Gleitentladungen nach IEC 60270 unter Gleich- und Wechselspannungsbelastung“ von Forschungseinrichtungen (HS Bremen, TU Graz, Uni Hannover) präsentierte die Ergebnisse eines Round-Robin-Tests für Gleitentladungen bei Wechsel- und Gleichspannung. Bei Wechselspannung ergaben sich erhebliche Unterschiede zwischen den Laboren in der Höhe der TE-Pegel, jedoch waren bei Gleichspannung die Abweichungen geringer und bei allen Laboren unter 10 pC, Bild 4. Im direkten Vergleich der TE-Pegel ist zu beachten, dass die Einsatzspannung bei Wechselspannung bis zu viermal höher liegt als bei Gleichspannung.

### Ausblick

Die nächste Fachtagung Hochspannungstechnik plant der Programmausschuss des ETG Fachbereichs Q2 für November 2022 in Berlin, dann hoffentlich nach Corona in Präsenz. Das Angebot von Tutorials am Anreisetag soll wegen der guten bisherigen Erfahrungen wiederholt werden.

Bei der Fachtagung VDE Hochspannungstechnik wurden wieder mehrere Beiträge zu neuen und umweltfreundlichen Technologien vorgestellt, wie z. B. dem Ersatz des Isoliergases SF<sub>6</sub>, dem Ersatz von Mineralöl durch Pflanzenöle und umweltverträgliche Verarbeitungsmethoden. Der Einsatz von unter Umweltaspekten unkritischen Materialien steigert die Akzeptanz für Ausbau des elektrischen Energienetzes. Um diese Lösungen zu stärken, möchte der ETG FB Q2 bereits im Herbst des kommenden Jahres 2021 einen eintägigen Workshop unter dem Titel „High Voltage Goes Green“ durchführen. Wir freuen uns über Ihr Interesse und informieren gern rechtzeitig.

### Literatur

- [1] Tagungsband ETG Fachbericht 162: „Beiträge der Fachtagung VDE Hochspannungstechnik 2020“, 9. – 11. November 2020, online. 2020, ISBN 978-3-8007-5353-6 / ISSN 0341-3934
- [2] V. Hinrichsen et al.: „Field grading in electrical insulation systems“, technische Broschüre der Cigré WG D1.56, online verfügbar bei [www.e-cigre.org](http://www.e-cigre.org), Paris 2020
- [3] M. Fenger et al.: „On-Site Partial Discharge Assessment of HV and EHV Cable Systems“, technische Broschüre der Cigré WG B1.28, online verfügbar bei [www.e-cigre.org](http://www.e-cigre.org), Paris 2018



Prof. Dr.-Ing. Maik Koch,  
Hochschule Magdeburg-Stendal,  
stellvertretender Vorsitzender des FB Q2



## Rückblick

### E13 ETG Fachtagung

## Erzeugung und Speicherung elektrischer Energie

20. Oktober 2020, online

*Der neu ausgerichtete ETG Fachbereich V1 hat am 20. Oktober eine Fachtagung zum Thema „Erzeugung und Speicherung elektrischer Energie – Wege zu einer klimaneutralen Energieversorgung“ durchgeführt. Die Fachtagung sollte nach ursprünglicher Planung als Präsenztagung am 20. Oktober 2020 in Kassel stattfinden. Aufgrund der Corona-bedingten Einschränkungen musste leider relativ kurzfristig auf ein Online-Format umgestellt werden, was Änderungen am Programm erforderlich machte, jedoch organisatorisch gut gelang.*

Erzeugung und Speicherung elektrischer Energie ist eines der grundlegenden Themen der Energiewende. Dies wurde auch durch die hohe Teilnehmerzahl unterstrichen: obwohl die Veranstaltung nicht kostenlos angeboten wurde, haben etwa 90 Personen teilgenommen.

Auf dieser Fachtagung sollten erste Ergebnisse zu den Arbeiten an dem Positionspapier zu diesem Themenkomplex, das im Fachbereich V1 aktuell bearbeitet wird, vorgestellt werden. Neben Referaten von Mitgliedern aus dem Fachbereich, konnten zusätzlich noch Beiträge von externen Referenten präsentiert werden.

Zu den folgenden vier Themenblöcken wurden insgesamt 12 Fachbeiträge vorgestellt:

- Entwicklung der Stromerzeugung
- Entwicklung der Nachfrage / Speicherbedarf und -optionen
- Versorgungs- und Systemsicherheit
- Technische und regulatorische Rahmenbedingungen

Die Diskussion im Chat war sehr lebhaft und hat gezeigt, dass die Thematik hoch aktuell ist. Eine erneute Fachtagung zu diesem Themenkreis soll daher im kommenden Jahr am 16. November 2021 in Kassel (Kongress Palais) – dann hoffentlich wieder als Präsenztagung – durchgeführt werden.

Da auf der Veranstaltung die Arbeiten zum Positionspapier „Entwicklung der Stromerzeugung und des Speicherbedarfs unter dem Aspekt eines Ausstiegs aus Kernenergie und Kohleverstromung“ im Mittelpunkt standen, soll an dieser Stelle bereits über den aktuellen Stand berichtet werden.

Um eine Absenkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zum Jahr 2050 in Deutschland um 80 bis 95 Prozent über alle Sektoren zu erreichen, müssen fossile Energieträger weitgehend substituiert (Defossilisierung) und die Stromerzeugung nahezu vollständig auf erneuerbare Energien umgestellt werden. Dies

werden in Deutschland insbesondere Wind- und Solarenergie sein. Daneben sind aber auch die Potenziale von Wasserkraft, Biomasse/Biogas und Geothermie zu betrachten. Alle Energieträger werden für die Zielerreichung von Bedeutung sein. Die Studien, die der Analyse zugrunde gelegt werden, verwenden dabei unterschiedliche Ansätze, bzw. werden in verschiedenen Szenarien unterschiedliche Verteilungen der einzelnen Energieträger angenommen. Während stärker windbasierte Szenarien Erzeugungsschwerpunkte im Norden zur Folge hätten – insbesondere durch den Einsatz von Offshore-Windenergieanlagen – wäre bei einer stärkeren Durchdringung mit Photovoltaik mit einer gleichmäßigeren lokalen Verteilung, jedoch mit einem Schwerpunkt in Süddeutschland, zu rechnen.

Eine zeitlich und örtlich bedarfsgerechte Leistungsbereitstellung kann aufgrund des fluktuierenden Dargebots weder von der Sonne noch aus Wind zu jeder Zeit in der erforderlichen Höhe gewährleistet werden. Ein über die Ländergrenzen reichender Energieaustausch über die Stromnetze kann einen gewissen Beitrag zur Vergleichmäßigung liefern, der jedoch bei weitem nicht ausreicht. Die Einspeisungen aus den erneuerbaren Quellen sind zwar in gewissem Maße prognostizierbar, aber im Sinn einer gesicherten Versorgung nicht planbar. Eine sichere Stromversorgung benötigt jedoch in jedem Augenblick eine ausgeglichene Bilanz zwischen Erzeugung und Bedarf. Entsprechende Eingriffsmöglichkeiten zur Flexibilisierung sind sowohl auf der Erzeugungs- als auch auf der Lastseite möglich. Neben einem Energieausgleich im Minuten-, Stunden- und Tagesrhythmus muss eine dem Bedarf entsprechende Stromerzeugung jedoch auch bei Extremsituationen gewährleistet werden und saisonale und überjährliche Erzeugungsunterschiede ausgleichen. In Mitteleuropa können insbesondere in den Wintermonaten Wetterlagen auftreten, bei denen großflächig über mehrere Tage kaum Wind weht, bei gleichzeitig sehr eingeschränkter Sonneneinstrahlung (sog. Dunkelflaute). Für die Beherrschung solcher Situationen werden Erzeugungseinheiten benötigt, die auch dann entsprechend dem jeweiligen Bedarf (Leistung und Energie) Strom erzeugen können und somit einen Bei-

trag zur gesicherten Leistung erbringen können. Hierfür muss auf gespeicherte Energieträger zurückgegriffen werden.

Eine Möglichkeit zur Flexibilisierung sowohl von Erzeugung als auch Bedarf bieten Energiespeicher. Je nach Speichersystem lassen sich damit unterschiedliche Zeitbereiche abdecken: von Tagesspeichern (mit einer Speicherkapazität für einige Stunden, z.B. Pumpspeicher oder Batterien) bis hin zu saisonalen Speichern, die Energie in dem hierfür erforderlichen Umfang in Form von chemischer Energie (z.B. Wasserstoff) speichern und bedarfsgerecht rückverstromen können. Während in der Übergangszeit und bei moderaten CO<sub>2</sub>-Senkungszielen (80 %) auch fossiles Erdgas als Speichermedium noch eine Rolle spielen wird, ist bei den ehrgeizigeren Zielen langfristig eine Erzeugung und Speicherung sowie ein Import von erneuerbarem Wasserstoff („grüner“ Wasserstoff) und / oder synthetischem Methan erforderlich. In diesem Zusammenhang ist auch die Flexibilisierung von KWK-Biogasanlagen – mit bedarfsgerechter lokaler Zwischenspeicherung des Biogases – zu nennen. Alternativ kann das Biogas, auf Erdgasqualität (Biomethan) aufbereitet, auch in ein vorhandenes Gasnetz eingespeist werden. Dadurch lassen sich die dort vorhandenen Speicher- und Transportfunktionen nutzen. In 2018 wurden 9,6 TWh Biomethan in das Gasnetz eingespeist.

Neben der Technologie der planbaren Energiebereitstellung wird auch der Ort und die Größe der Erzeugungs- und Speichereinheiten diskutiert: Neben großen Kraftwerken und Speichern werden auch kleinere Anlagen eine zunehmende Bedeutung erlangen. Anlagen zur Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), die gleichzeitig sowohl Strom und Wärme planbar bereitstellen, können insbesondere bei der Realisierung von zellularen Strukturen von Interesse sein, bei denen eine Nutzung der lokalen Erzeugungs- und Verbrauchsstrukturen im Vordergrund steht, ohne aber auf einen überregionalen Energieausgleich gänzlich zu verzichten. Entsprechend ausgebaute Energienetze für Strom, Gas und Wärme sind eine Grundvoraussetzung für einen sinnvollen Energieaustausch zwischen diesen Zellen.

Im Rahmen der Umsetzung der EU-Ziele, die bis 2050 die Erreichung einer Klimaneutralität vorsehen, müssen neben den Bedarfen im herkömmlichen

Stromsektor gleichzeitig auch weitere Sektoren mit in die Betrachtungen zur Defossilisierung einbezogen werden. Hierzu gehört neben dem Mobilitäts- und dem Wärmesektor auch der Ersatz von fossilen Energieträgern bei deren stofflicher Nutzung, z.B. in der Chemie (Petrochemie) und in anderen Industrien (beispielsweise Stahlherstellung). Neben einer in allen Sektoren immer anzustrebenden Effizienzsteigerung bei der Energienutzung muss die Stromerzeugung auf Basis erneuerbarer Quellen zur Abdeckung dieser zusätzlichen Bedarfe weiter ausgebaut werden.

Auch in den anderen Sektoren sind – neben einer Flexibilisierung der Bedarfe durch ein geeignetes Lastmanagement – zusätzlich auch die jeweiligen Speichermöglichkeiten mit in die Betrachtungen einzubeziehen. Dies sind z.B. das dargebotsgesteuerte und Netzrestriktionen berücksichtigende Laden von E-Fahrzeugen, die Nutzung von direkter und indirekter Wärme-/Kältespeicherung oder auch die Speicherung von Produkten bzw. Zwischenprodukten, soweit dies die jeweiligen Prozesse zulassen.

Während in den herkömmlichen Stromanwendungen die Optimierung üblicherweise zu einer Effizienzsteigerung und damit zu einer Reduzierung der Stromnachfrage führt, ist aufgrund von neuen Anwendungen (z.B. IT) und durch die Sektorenkopplung mit einem insgesamt deutlich zunehmenden Bedarf zu rechnen. Dies äußert sich sowohl in dem Energiebedarf als auch bei den zu erwartenden Leistungsspitzen. Auch diesbezüglich weisen die Studien erhebliche Unterschiede auf.

Neben der Nutzung des in Deutschland möglichen Dargebots an Erneuerbaren Energien werden auch Energieimporte zu diskutieren sein. Hierfür würde einerseits die in Deutschland nicht flächendeckend vorhandene Akzeptanz von EE-Anlagen – insbesondere von Windenergieanlagen – sprechen. Andererseits wird man auch aus meteorologischen und ökonomischen Gründen auf Energieimporte nicht verzichten können, wenn in anderen Ländern günstigere Konditionen gegeben sind. Dies gilt insbesondere für die Bereitstellung von „grünem“ Wasserstoff für die Industrie. Hier ist zu erwarten, dass Wasserstoff zukünftig als Handelsgut auf den internationalen Märkten angeboten wird. Dabei ist jedoch darauf zu

achten, dass der Wasserstoff nur aus Herkunftsländern importiert werden sollte, in denen auch dort gleichzeitig die Erzeugung von Strom aus Erneuerbaren Energiequellen ausgebaut und somit der Einstieg in eine klimafreundliche und umweltverträgliche Energieversorgung vorangetrieben wird, bei gleichzeitiger Reduktion des lokalen Bedarfs an fossilen Energieträgern. Das Erreichen der Klimaziele in Deutschland oder Europa darf nicht zu Lasten der Energiewende in anderen Ländern gehen, zumal das Klimaproblem in einem weltweiten Konsens gelöst werden muss.

Neben der Lösung von technischen Fragestellungen müssen insbesondere auch die regulatorischen Rahmenbedingungen angepasst werden, damit sowohl die Effizienzpotenziale genutzt als auch der Ausbau der Erneuerbaren Energien umwelt- und sozialverträglich in dem erforderlichen Rahmen vorangetrieben werden können. Unter dem Gesichtspunkt, dass in allen Sektoren die fossilen Energieträger durch Erneuerbare Energien substituiert werden sollen, wird eine möglichst umfängliche Zielerreichung nicht gelingen, solange die Nutzung fossiler Energieträger weiterhin zu kostengünstigeren Lösungen führt. Auf dem Weg zu einer klimaneutralen Energieversorgung ist eine technologieoffene Diskussion in einem Level Playing Field erforderlich.

Bei dem Umstellungsprozess darf auch die heute noch vorhandene breite Akzeptanz der Bevölkerung für die Energiewende nicht aufs Spiel gesetzt werden. Vielmehr müssen die erforderlichen Maßnahmen möglichst transparent vermittelt werden und die Bevölkerung muss so weit wie möglich in die Entscheidungsprozesse eingebunden werden. Hierzu müssen langfristig verlässliche Rahmenbedingungen geschaffen werden, damit die Wirtschaft und die Bürger in geeignete umweltfreundliche Technologien investieren können.

Die bislang in den Sitzungen des Fachbereichs erarbeiteten Kernaussagen und Handlungsempfehlungen lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Um einen aktiven Klimaschutz zu gewährleisten, sollten wir bei der Stromerzeugung so schnell wie möglich (deutlich vor 2050) fossile Energieträger durch Erneuerbare Energien ersetzen. Zentrale und dezentrale Erzeugung werden sich dabei sinnvoll

ergänzen. Zelluläre Ansätze sollten den lokal gegebenen Möglichkeiten entsprechend umgesetzt werden.

- Eine möglichst effiziente Nutzung der Erneuerbaren Energien gilt als Grundvoraussetzung für die Struktur der zukünftigen Energieversorgung.
- Die Stromerzeugung auf Basis Erneuerbarer Energien wird im Wesentlichen durch Photovoltaik und Windkraft abgedeckt werden. Je nach Annahmen der unterschiedlichen Szenarien und Studien beträgt der Ausbaubedarf bei PV bis zu 250 GW und bei Wind onshore bis zu 200 GW. Bei dezentralen Szenarien ist PV stärker ausgeprägt. Der Anteil von Wind offshore liegt zwischen 15 und 40 GW.
- Die Potenziale von Wasserkraft, Biomasse/Biogas und Geothermie sollten je nach regionaler Verfügbarkeit und ökologischer Verträglichkeit genutzt werden.
- Aufgrund des volatilen Charakters der Erneuerbaren Energien werden zur Gewährleistung der Versorgungssicherheit zusätzlich planbar einsetzbare Erzeugungs- und Flexibilitätskapazitäten (zentral und/oder dezentral) für alle Zeitbereiche und in etwa in Höhe der Lastspitze benötigt. Dies gilt insbesondere auch für die Überbrückung längerer Zeiten mit geringer erneuerbarer Einspeisung und hoher Nachfrage.
- Aufgrund geringer Volllaststunden dieser planbar einsetzbaren Erzeugungseinheiten werden eher kostengünstige und flexible Großkraftwerke bevorzugt werden. Der Wirkungsgrad verliert dabei an Bedeutung (Open Cycle Gas Turbine statt GuD): Flexibilität vor Effizienz
- Alle Erzeugungseinheiten sollten sich an der Erbringung der erforderlichen Systemdienstleistungen (insbesondere Regelleistung) beteiligen können. Dies gilt zukünftig insbesondere auch für Anlagen auf Basis Erneuerbarer Energien.
- Neben der Erzeugungsleistung für die gesicherte Versorgung sind hierfür entsprechende Speicherkapazitäten vorzuhalten, mit denen sich insbesondere auch längere Zeiten mit EE-Mangel überbrücken lassen (Langzeitspeicher).
- Erdgas (fossil) wird in der Übergangsphase nach vollzogenem Ausstieg

aus Kernenergie und Kohleverstromung (also auch nach 2038) sowohl bei der gesicherten Erzeugung als auch bei der Langzeitspeicherung noch eine wichtige Rolle spielen. Bei CO<sub>2</sub>-Senkungszielen von über 80 % wird Elektrolyse-Wasserstoff das Erdgas sukzessiv ersetzen. Des Weiteren sollten auch Biogas (als Rohgas oder auf Erdgasqualität aufbereitet) und Methan (synthetisches Erdgas) mit in die Betrachtungen einbezogen werden.

- KWK-Anlagen verschiedener Leistungsklassen und Technologien stellen einen wesentlichen Beitrag zur Systemstabilität und Reservebereitstellung sowie zur hocheffizienten gleichzeitigen Bereitstellung von Strom und Wärme für Gebäude und Wärmenetze dar und sind somit eine flexible Ergänzung zur direkten Strom- und Wärmeerzeugung aus Wind und Sonne.
- Die Lasten im Stromsektor – sowohl Energie als auch Leistung – werden sich gegenüber heute deutlich erhöhen, da neben dem herkömmlichen Strombedarf auch noch die Dekarbonisierung weiterer Sektoren (Mobilität, Wärme, Chemie, Industrie, etc.) abgedeckt werden muss.
- Die Lasten sollten zukünftig ebenfalls einen Beitrag zur Flexibilisierung leisten und sich – soweit wie möglich und sinnvoll – dem aktuellen Dargebot der Erneuerbaren Energien anpassen. Damit kann sowohl die vorzuhaltende Erzeugungskapazität als auch der Speicherungsbedarf begrenzt werden.
- Viele Lasten, die elektronisch geregelt werden, z.B. Ladegeräte für Elektrofahrzeuge, können und sollten sich ebenfalls an der Erbringung von Systemdienstleistungen, wie z.B. Primärregelleistung, Blindleistung etc., beteiligen und somit einen Beitrag zur Systemstabilität liefern.
- Energiespeicher (Strom, Wärme, gasförmige und flüssige Energieträger) und andere Flexibilitätsoptionen werden in allen Zeitbereichen (Kurzzeitspeicher und Langzeitspeicher) benötigt, um das volatile Dargebot der Erneuerbaren Energien an den Lastbedarf anzupassen. Die hierfür in Frage kommenden Technologien sind u.a. abhängig von Einsatzhäufigkeit und Effizienz. Der Bedarf

für Abregelungen der Erneuerbaren Energien soll dadurch – soweit wie möglich und sinnvoll – verringert werden, kann aber nicht vollständig vermieden werden.

- Die aktuellen Markt- und Rahmenbedingungen sind für wirtschaftliche Geschäftsmodelle in einem dezentralen und regenerativ geprägten Elektrizitätsversorgungssystem perspektivisch nicht geeignet. Dies gilt z.B. für die Vorhaltung von Leistung aus Spitzenlastkraftwerken im Energy-only-Markt und für die o.g. Systeme zur Sektorenkopplung. Auch die Bedingungen für Vorhaltung und Erbringung der Systemdienstleistungen (Momentanreserve, Kurzschlussleistung, Blindleistung, Schwarzstartfähigkeit, etc.) sind diesbezüglich in der Diskussion.

Die Arbeiten an dem Positionspapier sollen im ersten Quartal 2021 abgeschlossen und die Ergebnisse dann in einem größeren Kreis zur Diskussion gestellt werden. Auch dieses Positionspapier wird – wie alle bisher zu diesem Thema durchgeführten Studien – auf die aufgeworfenen Problemstellungen keine umfassende Antworten geben und keine finale Blaupause für die Umsetzung liefern können. Vielmehr sollen damit mögliche Lösungswege und die daraus resultierenden Implikationen aufgezeigt werden. Das Papier soll insbesondere als Basis und Anregung für die öffentliche Diskussion dienen.

Wenn Sie Interesse an einer aktiven Mitarbeit in unserem Fachbereich V1 – „Erzeugung und Speicherung elektrischer Energie“ haben und wenn Sie Beiträge zu diesen zukunftsweisenden Themen beisteuern können, wenden Sie sich bitte an die ETG Geschäftsstelle [etg@vde.com](mailto:etg@vde.com) oder direkt an den Fachbereichsleiter [martin.kleimaier@t-online.de](mailto:martin.kleimaier@t-online.de).



*Dr.-Ing.  
Martin Kleimaier  
kom. Vorsitzender  
ETG FB V1*



## Rückblick

# E14 ETG EFZN Fachtagung

## 6. Dialogplattform Power-to-Heat

3. Dezember 2020, online

*Wie kann die Wärmewende gelingen? Unter dieser Fragestellung begrüßten die wissenschaftlichen Tagungsleiter Dr.-Ing. Jens zum Hingst (CUTEC Forschungszentrum der TU Clausthal und Energie-Forschungszentrum Niedersachsen (EFZN)) und Dr.-Ing. Martin Kleimaier (Energietechnische Gesellschaft im Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik (VDE ETG)) am 3. Dezember mehr als 140 Teilnehmerinnen und Teilnehmer zur 6. Dialogplattform Power-to-Heat. Aufgrund der Maßnahmen zur Eindämmung der Corona-Pandemie fand die Veranstaltung in diesem Jahr nicht wie sonst üblich in der Niedersächsischen Landesvertretung beim Bund in Berlin statt. Stattdessen boten das EFZN und die ETG den Teilnehmenden in einem Online-Format die Plattform, um wissenschaftliche Fragestellungen im Kontext von Power-to-Heat-Anwendungen zu diskutieren, neue Projekte, Produkte und Verfahren vorzustellen, sowie über Erfahrungen mit bestehenden Anlagen zu berichten.*

Mit etwa 57% Anteil am deutschen Endenergieverbrauch – davon etwa 80% aus fossilen Quellen – bietet der Wärmesektor enormes Potential für die Erreichung der Klimaneutralität der Energieversorgung, also noch deut-

lich vor der Defossilisierung des Verkehrssektors. Dies wurde in der ersten Hälfte der Veranstaltung noch einmal deutlich herausgestellt. Der erste Vortrag rückte einleitend die Frage in den Mittelpunkt, was hinsichtlich der Klimaziele im Wärmesektor bereits erreicht wurde und was darüber hinaus noch zu tun ist (Vortrag von Dr.-Ing. Serafin von Roon, FfE – Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft mbH). Darauf aufbauend wurden grundsätzliche Optionen zur Defossilisierung des Wärmesektors in einem integrierten Energiesystem aufgezeigt (Vortrag von Dr. Cyril Stephanos, acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften). Dabei wurde insbesondere die direkte Nutzung von Strom im Wärmemarkt mit der indirekten – also über Wasserstoff – verglichen. In einem darauf aufbauenden Beitrag wurde die Rolle von Wärmepumpen – elektrische und gasbetriebene – in den verschiedenen Transformationspfaden dargestellt (Vortrag von Dr. Christoph Kost, Fraunhofer ISE). Den Abschluss des ersten Blocks bildete ein Vortrag, der die regulatorischen Rahmenbedingungen von Power-to-Heat-Anwendungen in den Blick nahm und zu dem Ergebnis kam, dass eine grundlegende Überarbeitung des gesamten Umlagen- und Abgabensystems sowie der Netzentgeltsystematik notwen-

dig sei (Vortrag von Dr. Malte Weitner, Oppenländer Rechtsanwälte). Um ein Level Playing Field der Sektoren und Technologien zu schaffen, müsse dieses sektorenübergreifend und vor allem zusammenhängend ausgestaltet sein. Derzeit herrsche ein Stückwerk von Regelungen zu verschiedenen Technologien, Energieträgern und Zielrichtungen vor, die eine technologieoffene Optimierung nicht zulassen.

Im zweiten Teil der Veranstaltung wurden Erfahrungen bei der Entwicklung und Simulation einer Hochtemperatur-Wärmepumpe zur Bereitstellung von industrieller Prozesswärme geteilt (Vortrag von Enrico Jende, DLR Cottbus/Zittau) und aus der Branchenstudie 2021 des Bundesverbandes Wärmepumpe berichtet, deren offizielle Veröffentlichung für Anfang kommenden Jahres vorgesehen ist (Vortrag von Lars Petereit, Bundesverband Wärmepumpe e.V. (BWP)). Den zweiten Schwerpunkt bildeten systemische Fragen. So wurde eine regionale und lokale Analyse von Sektorkopplungsoptionen vorgestellt (Vortrag von Dr. Anne Hagemeyer, Fraunhofer UMSICHT) und aus dem Projekt „Intelligente Wärme München“, das die Flexibilisierung von Power-to-Heat-Anlagen im Kontext eines dezentralen Energiesystems erprobt hat, berichtet (Vortrag von Andreas Weigand, SWM Services GmbH).

Eine verstärkte interaktive Beteiligung der Teilnehmerinnen und Teilnehmer fand durch ein Planspiel als Live Präsentation statt. Unter dem Titel „Energie für (m)eine Stadt: Wie ein breites Publikum die Herausforderung „Energiewende“ verstehen lernt“ lud Professor Christoph Pels Leusden von der Beuth Hochschule, Berlin, die online Anwesenden dazu ein, mit dem Smartphone per Abstimmung über verschiedene Fragen ein neues System zur Versorgung einer imaginären Kleinstadt mit Strom und Wärme zu entwickeln. Am Ende zeigte sich, dass die Schwarmintelligenz der Teilnehmenden an der 6. Dialogplattform Power-to-Heat im Vergleich zu anderen Gruppen, die das Planspiel zuvor durchgeführt hatten, zu sehr guten Ergebnissen führte. Insbesondere bei der erreichten CO<sub>2</sub>-Einsparung lag das Tagungspublikum mit dem von ihm entwickelten System vorn. Dieses Planspiel kann z. B. auch in Schulklassen durchgeführt werden, um den

Jugendlichen das Thema Energiewende und die hierfür notwendigen Optionen spielerisch zu vermitteln. Interessierte können sich direkt an Herrn Professor Pels Leusden wenden.

Obwohl das Online-Format den bisher bei dieser Veranstaltung üblicherweise im Mittelpunkt stehenden persönlichen Dialog nicht vollständig ersetzen konnte, wurde von der Möglichkeit, im Chat Fragen an die Referenten zu stellen und zu diskutieren, reger Gebrauch gemacht. Darüber hinaus wurden im Chat auch eigene Meinungen und Kommentare abgegeben und Hinweise auf themenrelevante Publikationen einge-

stellt. Insgesamt kam von den Teilnehmenden große Zustimmung zu diesem Online-Tagungsformat, das manchen die Möglichkeit bot, sich auch nur einzelne Vorträge anzuhören. Mit diesem positiv stimmenden Bild verabschiedeten die Tagungsleiter die Teilnehmenden bis zur hoffentlich im nächsten Jahr wieder in Präsenz in Berlin nahe an der Politik stattfindenden 7. Dialogplattform Power-to-Heat. Denn dass das Gelingen der Wärmewende weniger an technischen Innovationen krankt als am durch die Politik beeinflussbaren regulatorischen Rahmen, habe die diesjährige Veranstaltung wieder deutlich aufgezeigt.

Die freigegebenen Präsentationsfolien zu den Vorträgen sowie weitere Informationen zu der Veranstaltungsreihe Dialogplattform Power-to-Heat finden Sie auf den Internetseiten von VDE ETG und EFZN:

- [www.vde.com/etg](http://www.vde.com/etg)
- <https://www.efzn.de/de/veranstaltungen/efzn-veranstaltungsreihen/dialogplattform-power-to-heat/>

#### Autoren:

- Dr. Diana Schneider, Energie-Forschungszentrum Niedersachsen (EFZN)
- Dr.-Ing. Martin Kleimaier, kom. Vorsitzender ETG FB V1

## Rückblick

# E15 CIPS 2020 – 11. Internationale Konferenz über Integrierte Leistungselektroniksysteme

Ein kurzer Bericht zur Konferenz im Jahr 2020

In den nächsten Jahrzehnten wird die Entwicklung leistungselektronischer Systeme durch intelligentes Energiemanagement und Energieeffizienz, Erhöhung der Versorgungsqualität und Zuverlässigkeit sowie Systemminiaturisierung bestimmt. Die monolithische und hybride Systemintegration nutzt moderne Technologien, darunter Wide-Bandgap-Halbleiter, neue Aufbau- und Verbindungstechnologien und die Gesamtintegration von Aktoren oder Antrieben (mechatronische Integration).

Die CIPS konzentriert sich auf die folgenden Hauptaspekte, die heute wichtiger denn je sind, um die Funktionalität, Energieeffizienz und Zuverlässigkeit des Gesamtsystems zu erhöhen:

- Aufbau- und Verbindungstechnik für leistungselektronische Bauelemente und Stromrichter
- Integration von Hybridsystemen und mechatronischen Systemen mit hoher Leistungsdichte
- Betriebsverhalten und Zuverlässigkeit von Systemen und Komponenten

Grundlegende Technologien für integrierte leistungselektronische Systeme sowie kommende wichtige Anwendungen wurden in interdisziplinär eingeladenen Beiträgen vorgestellt.

Veranstalter der Konferenz waren der Fachbereich Leistungselektronik und Systemintegration (Q1) von VDE ETG und das European Center for Power Electronics (ECPE). Die Leitung hatten Leo Lorenz, ECPE e.V., und Thomas Harder, ECPE e.V., als General Chairs sowie Andreas Lindemann,



Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg und Nando Kaminski, Universität Bremen als Technical Chairs inne.

Die persönliche Begegnung in Berlin musste aufgrund der Pandemiesituation leider kurz vor den geplanten Termin 24. bis 26. März abgesagt werden. Stattdessen wurden die Beiträge in einem Online-Forum diskutiert. Der bewährte Tagungsband erschien als ETG Fachbericht 161 im VDE Verlag.



Prof. Dr.-Ing.  
Nando Kaminski,  
Universität Bremen



Prof. Dr.-Ing.  
Andreas Lindemann,  
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg,

Technical Chairs CIPS 2020



## I1 Aktuelle Informationen aus CIRED



2021 – Gremienarbeit der CIRED bleibt anders

Liebe ETG Mitglieder,

das Pandemiejahr 2020 hat alles durcheinandergebracht: persönliche Planungen, Veranstaltungen, Arbeitsgruppen, Netzwerke und vor allem die Art wie wir arbeiten. Eins ist sicher, die Welt 2021 ist eine andere als wir uns Ende 2019 vorstellen konnten und vielleicht vorstellen wollten. Auch vor Covid19 gab es Videokonferenzen und digitale Plattformen zur Zusammenarbeit. Das Jahr 2020 hat uns gezeigt, dass diese Werkzeuge wirklich von Vorteil sind und wir trotz aller Schwierigkeiten damit effektiv arbeiten können. Daher ist es unwahrscheinlich, dass wir diese Werkzeuge wieder aus der Hand geben werden. Andererseits ist das Bedürfnis einer direkten Interaktion in einem Gremium wie dem Deutschen Komitee (DK) der CIRED zutiefst menschlich. Es ist einfacher, aus der Körpersprache Zustimmung oder Vorbehalt zu erkennen als in einer Videokonferenz. Daher werden auch Präsenzveranstaltungen weiterhin notwendig bleiben. 2021 wird hoffentlich das Jahr, in dem wir alle miteinander die richtige Balance zwischen digitalen Möglichkeiten und den dringend notwendigen Präsenzveranstaltungen finden werden.

Rückblickend auf 2020 haben wir als DK CIRED erfolgreich den internationalen CIRED Workshop mitgestaltet. In der Community wird er weiterhin der Berlin-Workshop zu den Flexibilitäten im Verteilnetz genannt, obwohl die Veranstaltung eine rein virtuelle war. Mit über 350 Teilnehmern an zwei Tagen und wenigen technischen Schwierigkeiten war das Format ein voller Erfolg. Das gleiche gilt für die gemeinsame Informationsveranstaltung von DK CIGRE und DK CIRED im Oktober in Leipzig. Mit einem Hybridkonzept bei dem die Vortragenden vor Ort und die Teilnehmer im virtuellen Raum anwesend waren, konnten ebenfalls über 250 Interessierte erreicht werden.

Nun sollten wir auch in die Zukunft schauen! Für CIRED hat die Zukunft des Jahres 2021 im September 2020 begonnen. Mit 139 eingereichten deutschen Abstracts liegen wir nur knapp unter der Marke von 141 Abstracts in Madrid 2019. Das zeigt, wie stark die Verteilnetz-Community hierzulande ist, gerade auch weil die Gesamtheit der Einreichungen sich auf hohem und sehr hohem fachlichem Niveau bewegt. Für die Hauptkonferenz selbst ergibt sich ein Rückgang der Abstracts

um rund ein Drittel. Das Organisationskomitee für die CIRED 2021 hat die aktuelle Situation antizipiert und plant nun mit einer erfolgreichen Vor-Ort-Veranstaltung in Genf vom 20. bis 23. September 2021.

Nachdem wir als DK unseren ETG CIRED D-A-CH Workshop um ein Jahr auf den 02.–03. November 2021 verschoben haben, werden wir im Februar 2021 das Tagungsprogramm zusammenstellen. Hier stimmen wir uns mit den nationalen Komitees aus Österreich und der Schweiz ab. Klar ist, sollte die CIRED 2021 virtuell oder stark eingeschränkt stattfinden müssen, wird der Bericht über die fachlichen Highlights aus allen sechs Sessions einer der drei Schwerpunkte sein.

*In diesem Sinne, bleiben Sie gesund!*

*Dr. Uwe Kaltenborn & Dr. Roland Drewek  
Vorsitzende des DK CIRED*



*Dr.-Ing. Uwe Kaltenborn  
HIGHVOLT Prüftechnik Dresden GmbH*



*Dr. Roland Drewek  
SW Kiel Netz GmbH*

## 12 Aktuelle Informationen aus dem Deutschen Komitee der CIGRE



Liebe Leserinnen und Leser,

Auch für die CIGRE, die internationale technisch-wissenschaftliche Organisation für den Informationsaustausch von Fachleuten im Bereich elektrische Energieübertragung und -versorgung, war das Jahr 2020 aufgrund der Corona-Pandemie sehr herausfordernd. In den geraden Jahren findet normalerweise die CIGRE-Session statt, an der sich im Jahr 2018 mehr als 3600 Teilnehmende und 200 Aussteller beteiligt hatten. 2020 konnte dies natürlich pandemiebedingt so nicht stattfinden.

Die Gremien der CIGRE hatten bereits im Frühjahr entschieden 2020 eine virtuelle Session durchzuführen, die volle Session auf 2021 zu verschieben und in 2022 zum zweijährigen Rhythmus zurückzukehren.

Zu der erstmalig in dieser Form ausgetragenen virtuellen Session, die im Gegensatz zu einer üblichen einwöchigen Session, auf zwei Wochen verteilt wurde, hatten sich über 2500 Teilnehmer angemeldet, von denen im Durchschnitt auch täglich 1500 online waren.

In 55 sogenannten Paper Sessions der 16 Studienkomitees haben ausgewählte Autoren ihre Beiträge mittels vorher aufgenommener Videos in Blöcken vorgestellt. Während der Präsentation konnten per Chat Fragen gestellt werden, die dann nach dem Vortrag online beantwortet wurden. Alle Sessions wurden aufgenommen und können im Internet von den Teilnehmenden abgerufen werden. Darüber hinaus gab es 5 Workshops und 16 Tutorials zu besonderen Themen.

Eingebettet in die Session waren wie immer auch Sitzungen des Administration Committees, des höchsten Gremiums der CIGRE, in dem alle Nationalkomitees vertreten sind, und des Steering Committees.

Da die Amtszeit des amtierenden Präsidenten Rob Stephens aus Südafrika nach 4 Jahren zu Ende ging, wurde eine neue Führung der CIGRE gewählt. Neuer Präsident der CIGRE ist jetzt Michel Augonnet aus Frankreich, der bisher für die Finanzen der CIGRE verantwortlich war. Für diese Aufgabe ist Michael Heyeck aus den USA als neuer Vice President und Treasurer gewählt worden.

Natürlich ist eine Session auch immer ein Anlass, verdiente Mitglieder der CIGRE auszuzeichnen. Mit Stolz können wir als Deutsches Komitee mitteilen, dass Andreas Kubis als Gründer und erster Vorsitzender unseres Young Energy Net (YEN) mit dem „Next Generation Network Significant Contribution Award“ für sein Wirken für den Aufbau eben dieses New Generation Networks (NGN) in Deutschland ausgezeichnet wurde.

Diese Anerkennung unserer deutschen Organisation zeigt sich auch darin, dass Stefanie Cray, die aus privaten Gründen von England nach Deutschland gewechselt ist und ebenfalls diesen Award für ihre Arbeit in England erhalten hatte, aus unserem YEN zur Vorsitzenden des NGN der CIGRE gewählt wurde.

Das Deutsche Komitee der CIGRE hat im vergangenen Jahr seine Arbeit auch unter den schwierigen Pandemiebedingungen fortgesetzt. Schwerpunkt waren neben der Vorbereitung der e-Session vor allem auch unsere jährliche Informations-

veranstaltung gemeinsam mit dem Deutschen Komitee der CIGRE im Herbst 2020. Diese fand am 13.10.2020 als Hybridveranstaltung in Leipzig statt. Das heißt, ein Teil unserer Referenten, die meisten Mitglieder des DK CIGRE und ein Teil der Leiter der deutschen Arbeitsgruppen waren (selbstverständlich unter Einhaltung der geltenden Hygienebestimmungen) vor Ort. Die Vorträge konnten online im Netz verfolgt werden und die Diskussionen dazu fanden weitestgehend per Chat statt.

Unter dem Motto „Strom, Wärme, Mobilität – alles grün und digital?“ beteiligten sich bis zu 250 Experten aus der Branche an der Diskussion. Neben der Laststeuerung in urbanen Gebieten wurden auch Möglichkeiten der Dekarbonisierung von Verkehr und Industrie sowie Tendenzen der Schutz- und Leittechnik aus CIGRE vorgestellt und besprochen. Selbstverständlich ging es auch aus aktuellem Anlass um die Auswirkungen der derzeitigen Pandemie auf den Betrieb der Netze und Versorgungsunternehmen.

Diese sind bisher relativ gut mit der Ausnahmesituation zurechtgekommen. Der Betrieb der Netze war jeder Zeit gesichert! Auch die besonderen Herausforderungen mit den Genehmigungsverfahren, in denen aus Hygienegründen nur wenige physische Veranstaltungen stattfinden konnten, wurden gemeistert.

Der Austausch der Spezialisten im Rahmen der deutschen Arbeitskreise der CIGRE wurde virtuell so fortgesetzt, dass es praktisch zu keinen Einschränkungen der CIGRE-Arbeit kam. Als sechstgrößte Nationalorganisation der CIGRE sind wir damit unserer Verantwortung in der CIGRE-Gemeinschaft gerecht geworden.

In 2021 feiern wir nun den 100. Geburtstag der CIGRE. Einhundert Jahre Austausch der technischen Expertinnen und Experten auf internationaler Ebene und Erarbeiten von einheitlichen Standpunkten zu den unterschiedlichsten technischen Entwicklungen und Tendenzen sind ein Anlass, um stolz zurückzublicken, aber auch aktiv und detailliert die Zukunft in unserer Branche mitzugestalten. Gerade die drei großen D (Dekarbonisierung, Digitalisierung, Dezentralisierung) bieten sehr spannende Aufgaben, an deren Lösung die CIGRE-Mitglieder aktiv mitwirken. Insofern freue ich mich schon heute auf neue CIGRE-Mitglieder und verbleibe mit freundlichen Grüßen

*Ihr*

*Dr. Frank Golletz*



*Dr. Frank Golletz  
Technischer Geschäftsführer der  
50Hertz Transmission GmbH und  
Vorsitzender des DK-CIGRE*

## 13 10 Jahre CIGRE/VDE Young EnergyNet

*Das CIGRE/VDE Young EnergyNet (YEN) – die Jungmitgliederorganisation des DK CIGRE – wird 10 Jahre alt. Dies ist eine gute Gelegenheit auf die Gründungsphase und vergangene Erfolge zurückzuschauen und einen Blick in die Zukunft zu werfen. Das Ziel damals und heute: Junge Expert\*innen der Energiebranche in die Fachwelt der CIGRE zu integrieren und sie auf dem Weg als vollwertiges Mitglied zu unterstützen.*



Die Wurzeln des YEN und die Gründungsidee liegen im Jahr 2009. Herr Dipl.-Ing. Wolfgang Degen unterstützte, als damaliges Mitglied des DK CIGRE, das YEN intensiv in der Anfangsphase. Er stand den Gründungsmitgliedern als Brücke in die Welt zur CIGRE mit Rat und Tat zur Seite. Auf der CIGRE Session im Jahr 2010 fand die Vision weiteren Nährboden. Zusammen mit den damals noch wenigen weiteren internationalen Gruppen der CIGRE Jungmitglieder, wurden gemeinsame Ziele identifiziert und diskutiert. Insbesondere mit dem CIGRE Next Generation Network aus Großbritannien konnten viele Erfahrungswerte ausgetauscht und weiterentwickelt werden.

Zurück in Deutschland wurden die Kräfte gebündelt und eine gemeinsame Vision für das YEN entwickelt. Das CIGRE/VDE Young EnergyNet startete mit den drei Gründungsmitgliedern Andreas Kubis, Martin Aichriedler und Oleg Bautin. Mit Matthias Hoffmann und Markus-Oliver Maitz fanden sie weitere wesentliche Säulen mit viel Motivation und Engagement auf deren Arbeit und Erfolge das YEN noch immer beruht.

Der intensive Austausch mit dem DK CIGRE und dessen Unterstützung war im Weiteren stets wesentlicher Bestandteil für den Erfolg des YEN. Auch heute ist das YEN als ständiges Mitglied im DK CIGRE vertreten und konnte sich hier aktiv in die deutsche Gremienarbeit einbringen und diese mitgestalten. Das YEN ist als Kooperation zwischen dem VDE Young Net und dem DK CIGRE im VDE in die etablierten Strukturen des VDE integriert und als eine der Fachgruppen des VDE Young Net im entsprechenden Lenkungskreis vertreten und vernetzt.

Die internationale Verbindung im Next Generation Network begleitet das YEN seit dem frühen Austausch während der CIGRE Session 2010. Auch international ist das Jahr 2020 für das YEN ein besonderes Jahr. In enger Kooperation mit dem CIGRE Central Office in Paris wurde das NGN International Executive Committee gegründet und ihre ersten Vorsitzenden als direkte Vertreter der internationalen Jungmitglieder gewählt. Mit Stefanie Cray (Chair) und Stanislav Eroshenko (Vice Chair) sind zwei wichtige Personen mit viel CIGRE-Erfahrung in dieser neu geschaffenen Rolle und stehen zukünftig für einen noch engeren und intensiveren Austausch zwischen jungen und etablierten Expert\*innen in der CIGRE. Erstmals wurden dieses Jahr ebenfalls die „Next Generation Network Significant Contribution Awards“ der CIGRE verliehen. Mit großer Freude dürfen wir hierzu unter anderem zwei wichtige Mitglieder aus Deutschland beglückwünschen. Stefanie Cray und Andreas Kubis wurden für ihre herausragenden Beiträge für die CIGRE geehrt.

Dem Wunsch diese verschiedenen besonderen Ereignisse des Jahres 2020 als große Feier zu begehen, wurden durch die weltweit wirkende Corona-Pandemie nicht erahnte Grenzen gesetzt. Neben den gravierenden gesellschaftlichen und persönlichen Einschnitten, die zu verzeichnen sind, war auch die Welt der CIGRE und das YEN dazu gezwungen, den sonst üblichen und wertvollen persönlichen Kontakt vor Ort auf verschiedensten Veranstaltungen zu knüpfen und zu pflegen, in die digitale Welt zu verschieben. Dass dies trotz der Umstände gut gelungen ist, zeigen die Erfolge der CIGRE e-Session, der hybriden CIGRE/CIRED Informationsveranstaltung und der weiterhin enge Austausch im YEN.

Unsere aktuellen Aktivitäten sind hierdurch auch für das Jahr 2021 stark geprägt. Wir werden unser Angebot der CIGRE-Vorträge weiter als Online-Variante in Form von Webinaren auch in Kooperation mit beispielsweise dem NGN UK ausbauen. Nichts desto trotz wagen wir einen optimistischen Ausblick auf die CIGRE Session 2021 in Paris. Gemeinsam mit den weiteren Gruppen im Next Generation Network bereiten wir unsere Aktivitäten dort vor und gestalten diese mit. Unter Leitung des YEN startet demnächst eine NGN Arbeitsgruppe „Speed up the energy transition“. Die jungen Expert\*innen der Energiebranche von heute werden zukünftig einen wesentlichen Teil bei der Umsetzung der Energiewende beitragen. Ziel der Arbeitsgruppe ist es, ihre Ideen zu sammeln und ihre Sichtweise zu formulieren und in der CIGRE zu diskutieren. Kommen Sie gerne auf uns zu, wenn Sie mehr darüber wissen und uns dabei unterstützen möchten.



*Dr.-Ing. Andreas Kubis  
Bereichsleiter Forschung &  
Entwicklung PSI Software AG  
Gründer CIGRE/VDE  
Young EnergyNet*

*Stefanie Cray  
Business Development Manager  
Microgrids MTU / Rolls Royce  
Power Systems  
CIGRE NGN International Chair*

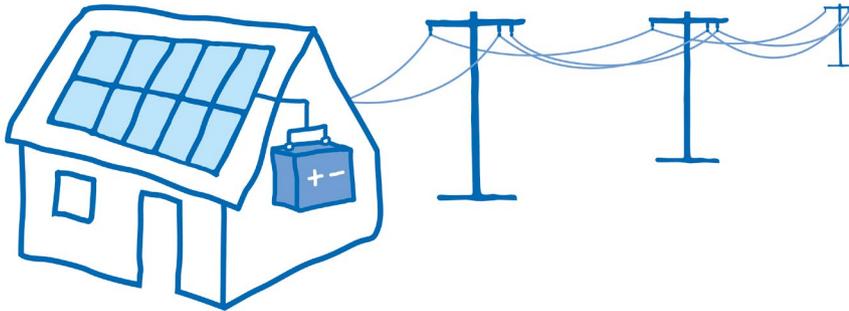
Unser heutiges Leitbild „Deine Brücke in das Expertennetzwerk der CIGRE“ besteht weiterhin auf der Vision aus der Gründungsphase und trägt uns in die Zukunft, die wir aktiv für junge Expert\*innen der Energiebranche gestalten werden. Mit vereinten Kräften im YEN-Kernteam setzen wir unser Leitbild in die Realität um. Danke hierbei an das Team: Jan Hendrik Buchmann, Stefanie Cray, Nina Hatje, Julia König und Maximilian Stumpe. Die Brücke zur CIGRE beruht auf vielen wichtigen Säulen. Herzlichen Dank an die Kolleginnen und Kollegen im DK CIGRE, im VDE und der ETG für die kontinuierliche Unterstützung und Motivation! Der direkte Austausch mit Ihnen, den Vorsitzenden des DK CIGRE, den Mitglieder und Vertretern der deutschen Arbeitskreise ist wesentlicher Bestandteil unseres Wirkens. Ganz besonders möchten wir uns an dieser Stelle bei zwei Personen bedanken, die in diesem Kontext jeweils im Hintergrund wirkten und wirken. Zum einen ein großes Dankeschön an Frau Jutta Männle, die in den vergangenen Jahren stets für einen guten und herzlichen Kontakt zum DK CIGRE stand und des Weiteren an Frau Olga Oberländer, die diese Rolle im Jahr 2019 übernommen hat und mit ebenso großer Motivation weiterführt.

Herzlichen Dank an alle weiteren Wegbegleiter\*innen, Wegbereiter\*innen und Unterstützer\*innen der vergangenen 10 Jahre! Trotz der herausfordernden Zeit im vergangenen Jahr, blicken wir mit Hoffnung und Zuversicht auf das Jahr 2021. Wir freuen uns auf die kommende Zeit und ganz besonders mit Ihnen und mit euch weiter so eng im Austausch zu bleiben und bald wieder zusammenkommen zu können – um die vergangenen Erfolge zu feiern und neue Ideen Wirklichkeit werden zu lassen.



*Andreas Lukaschik, M.Sc.  
Leiter CIGRE/VDE Young EnergyNet  
yen@vde-youngnet.de*

## F1 Aktuelles aus dem Forum Netztechnik/Netzbetrieb (VDE FNN)



### Bundesweite Netzanschlussregeln für Speicher

Speicher sind ein wichtiger Baustein der Energiewende. Sie bieten die Möglichkeit, mehr Flexibilität in das Energiesystem zu bringen. Insbesondere in Kombination mit erneuerbaren Energien bieten sie Möglichkeiten, auch dann Strom aus nachhaltigen Quellen zu liefern, wenn diese gerade keinen Strom erzeugen. Wichtig ist, dass der Anschluss und Betrieb von Speichern netzverträglich und netzdienlich erfolgt. Sie können wesentlich dazu beitragen, einen Netzausbaubedarf zu verringern. Denn sie bieten Potential für eine flexible Stromversorgung, die für ein stabiles Netz wichtig ist.

Technische Anforderungen für den Anschluss und Betrieb von Speichern sind in Deutschland in den VDE Anwendungsregeln festgelegt. Mit diesen sogenannten Technische Anschlussregeln (TAR<sup>1</sup>), definiert VDE FNN je Spannungsebene die spezifischen Anforderungen für das deutsche Stromsystem nach [europäischen Vorgaben](#)<sup>2</sup>. Ein technischer Hinweis für den Anschluss und Betrieb von Speichern am Niederspannungsnetz ergänzt dieses Regelwerk.

- [Technische Anschlussregeln Niederspannung \(VDE-AR-N 4100\)](#)<sup>3</sup>

- [Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz \(VDE-AR-N 4105\)](#)<sup>4</sup>
- [FNN Hinweis: "Anschluss und Betrieb von Speichern am Niederspannungsnetz"](#)<sup>5</sup>

#### Ziele

- Regenerativ erzeugter Strom soll lokal genutzt, gespeichert und bedarfsgerecht eingespeist werden
- Stromnetz entlasten
- Netzdienlich ans Stromnetz angeschlossene Speicher können den Netzbetrieb verbessern und den Netzausbaubedarf reduzieren

### Ausbau des Übertragungsnetzes mit 525-kV-HVDC-Kabeln

Laut den Netzentwicklungsplänen sollen für den Ausbau des deutschen Übertragungsnetzes die Trassenkilometer und die Übertragungsleistung erhöht werden. VDE FNN unterstützt das Vorhaben mit einer Anwendungsregel zu den Anforderungen an 525-kV-HVDC-Kabel. Gemäß "Netzentwicklungsplan 2030" sollen HVDC-Korridore um rund 1.200 Kilometer ausgebaut und die Übertra-

gungsleistung um 6 Gigawatt (GW) erhöht werden. Dies erfordert den Einsatz von Kabelsystemen mit Isoliermedien in moderner Kunststofftechnik, die eine durchschnittliche Lebensdauer von 40 Jahren und eine Nennspannung von mindestens 525 kV erfüllen können. Hierbei ist die Verwendung extrudierter 525-kV-Kabelsysteme aus technischer Sicht anerkannt.

Schwerpunkte der Anwendungsregel:

- Gewährleistung der technischen Sicherheit
- Bedingungen einer zuverlässigen Verwendung extrudierter 525-kV-Kabelsysteme
- Zusammenstellung gültiger Normen und Regeln
- Anforderungen an Kabel, Garnituren und Prüfequipment
- Umfassende Prüfungen an Kabeln und Garnituren zu verschiedenen Zeitpunkten

Die Erarbeitung der Anwendungsregel startete Ende Oktober 2020. Das Regelwerk soll im Sommer 2021 veröffentlicht werden.

### Deutschland ist bei der Versorgungszuverlässigkeit Spitze

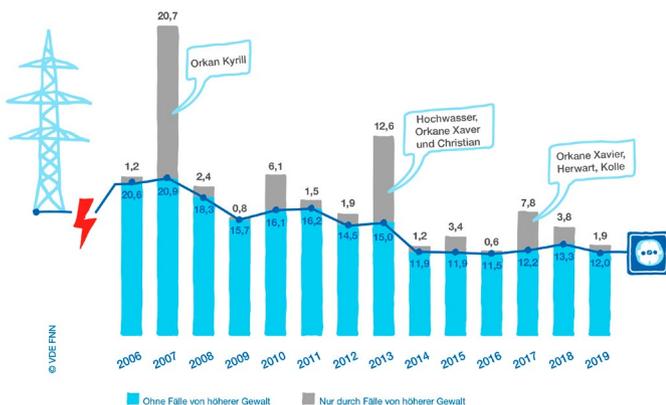
Die vollständige VDE FNN Störungs- und Verfügbarkeitsstatistik 2019 ist im VDE Shop erhältlich. Zusammenfassend lässt sich festhalten:

- 2019 betrug die durchschnittliche Strom-Unterbrechungsdauer pro Kunde (auch Nichtverfügbarkeit genannt) nur 12,0 Minuten.
- Deutschland ist bei der Zuverlässigkeit der Stromversorgung international an der Spitze.
- Besonders wichtig für Industrie und Gewerbe: Spannungseinbrüche sind auf gleichbleibend niedrigem Niveau.
- Die Netzbetreiber sichern mit großem Aufwand die hohe Versorgungszuverlässigkeit.

1 <https://www.vde.com/de/fnn/themen/tar>  
 2 <https://www.vde.com/de/fnn/arbeitsgebiete/europaeische-network-codes>  
 3 <https://www.vde.com/de/fnn/themen/tar/tar-niederspannung/tar-niederspannung-vde-ar-n-4100>

4 <https://www.vde.com/de/fnn/themen/tar/tar-niederspannung/erzeugungsanlagen-am-niederspannungsnetz-vde-ar-n-4105-2018>  
 5 <https://shop.vde.com/de/anschluss-und-betrieb-von-speichern-am-niederspannungsnetz-2>

**Durchschnittliche Strom-Unterbrechungsdauer pro Kunde in Minuten**



**Unterbrechungshäufigkeit durch Störungen pro Kunde in Anzahl**



**Wie lange ist ein Kunde nicht versorgt?**

Die durchschnittliche Strom-Unterbrechungsdauer lag 2019 bei 12,0 Minuten pro Kunde (2018: 13,3 Minuten). Das hat die Auswertung der VDE FNN Störungs- und Verfügbarkeitsstatistik ergeben. Im Durchschnitt 12 Minuten Nichtverfügbarkeit bedeutet – anders gesagt – dass jeder Haushalt zu über 99,997 Prozent versorgt war.

Die Nichtverfügbarkeit durch höhere Gewalt wurde überwiegend durch verschiedene Orkane, wie Benjamin (08.01.2019; im Norden Deutschlands), Bennet (04.03.2019; in Gesamtdeutschland), Eberhard (10.03.2019; in Mitte und Süden Deutschlands), Franz (12./13.03.2019; vor allem im Norden und Westen Deutschlands) verursacht.

**Wie oft ist ein Kunde nicht versorgt?**

Die Anzahl der Versorgungsunterbrechungen pro Stromkunde lag 2019 bei 0,25 Unterbrechungen (2018: 0,28) – inklusive der auf höhere Gewalt zurückgeführten Ereignisse. Drei von vier Kunden haben im gesamten Jahr keine Unterbrechung erfahren.

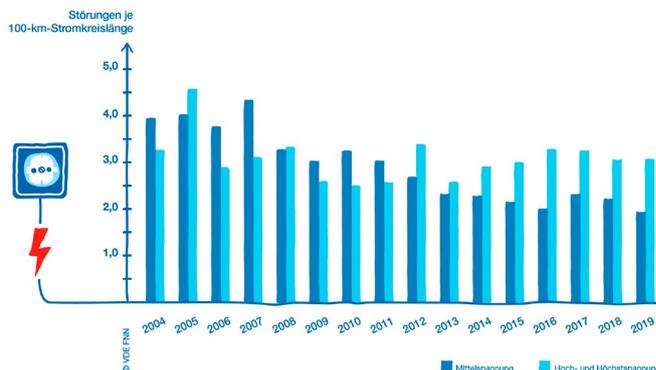
Neben Unterbrechungen aufgrund von Störungen finden auch geplante Abschaltungen statt. Diese erfolgen nach Abstimmung mit bzw. Vorankündigung bei Kunden. Diese geplanten Abschaltungen liegen auf gleichem niedrigem Niveau wie in den vergangenen Jahren – trotz verstärkter Bautätigkeiten im Netz.

**Durchschnittliche Strom-Unterbrechungsdauer im Ländervergleich (in Minuten)**



Quelle: CEER (Italien, Frankreich, Spanien, Portugal), CEER inkl. HG (Niederlande), e-Control (Österreich), U. S. Energy Information Administration (eia) (USA), VDE FNN (Deutschland), WorldBank (China, Japan, Südkorea)

**Kurzschlussartige Fehler in Anzahl**



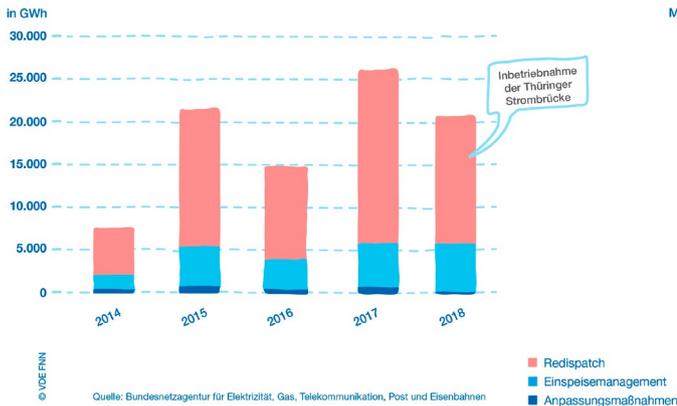
**Deutschland im internationalen Vergleich**

International vergleicht man den sogenannten SAIDI-Wert (System Average Interruption Duration Index). Dies entspricht der durchschnittlichen Unterbrechungsdauer. Hier belegt Deutschland einen der Spitzenplätze.

**Besonders wichtig für Industrie und Gewerbe: Spannungseinbrüche sind auf gleichbleibend niedrigem Niveau**

Spannungseinbrüche werden durch Fehler, zum Beispiel Kurzschlüsse, verursacht. Die bei den Netzkunden eingesetzten Geräte und Anlagen werden empfindlicher. Daher wird das Thema immer wichtiger. 2019 haben die Ereignisse, die zu Spannungseinbrüchen führen, nicht zugenommen.

**Maßnahmen zur Aufrechterhaltung der Netz- und Systemsicherheit**



**Entschädigungen für Maßnahmen zur Aufrechterhaltung der Netz- und Systemsicherheit in Mio. EUR**

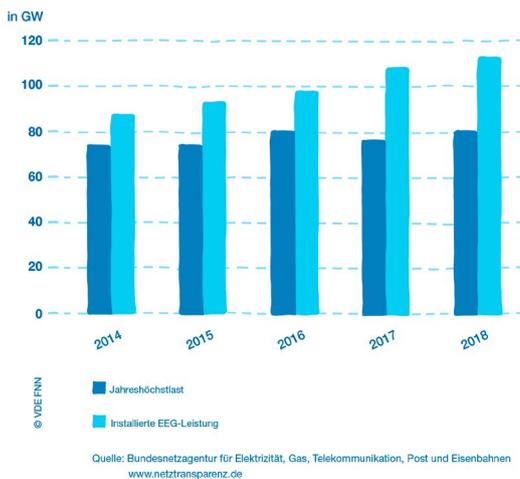


**Die Netzbetreiber sichern mit großem Aufwand die hohe Versorgungszuverlässigkeit**

Netzbetreiber leisten einen enormen Aufwand, um die Netze in den zulässigen Grenzen von Frequenz, Spannung und Leistungsbelastung zu betreiben. Die Anforderungen dabei steigen durch den Umbau auf erneuerbare Energien und u. a. dem dadurch notwendigen Stromtransport über weite Strecken. Die Netzauslastung steigt und wird zunehmend dynamisch. Gleichzeitig verzögert sich der Netzausbau. So entstehen vermehrt Engpässe im Netzbetrieb, die die Netzbetreiber beheben müssen.

Um alle Kunden sicher und zuverlässig mit Strom zu versorgen und dabei vorrangig erneuerbare Energien einzuspeisen, müssen die Netzbetreiber korrigierend eingreifen. Die Aufwendungen dafür sind in den vergangenen Jahren enorm gestiegen. Dadurch konnten die Netzbetreiber rund 3,5 Prozent des Jahresbruttoinlandstromverbrauchs nicht wie geplant einspeisen lassen.

**Installierte EEG-Leistung und Jahreshöchstlast**



**Im Ernstfall eine Lösung parat**

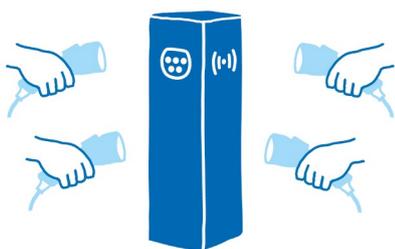
Wie lassen sich Krisen im Stromnetz vorbeugen und gegebenenfalls effektiv beheben? Maßnahmen dafür wird VDE FNN in einer VDE Anwendungsregel verbindlich gestalten. Die neue VDE-AR-N 4143-1 soll im Frühjahr 2021 als Entwurf verfügbar sein.

Jede Sekunde zählt: Um auf Krisen im Stromnetz souverän und sicher zu reagieren, bedarf es einer Vorbereitung. Hierbei sind die bisherigen Hinweise S 1001 und S 1002 eine optimale Grundlage, um das Risiko- und Krisenmanagement bei Netzbetreibern aufzubauen. Diese werden jetzt nacheinander überarbeitet und in eine VDE Anwendungsregel mit Teil 1 "Krisenmanagement" und Teil 2 "Risikomanagement" überführt.

Für die Anpassung von konventionellen Kraftwerken (Redispatch) haben Netzbetreiber 2018 803 Mio. Euro an Entschädigungen gezahlt (2017: 901 Mio. Euro). Die Entschädigungen für Erneuerbare-Energien-Anlagen im Rahmen des Einspeisemanagements schlugen 2018 mit 635 Mio. Euro zu Buche (2017: 610 Mio. Euro). Dieser hohe Aufwand ist notwendig, um die hohe Zuverlässigkeit der Stromversorgung zu sichern.

## Beitrag zum Schutz kritischer Infrastrukturen

Die Relevanz des Krisenmanagements wird nicht zuletzt durch die bundeseinheitliche Branchen- und Sektorenteilung kritischer Infrastrukturen deutlich: Denn alle Stromnetzbetreiber sind – unabhängig von ihrer Größe – als solche zu berücksichtigen. Dabei sind kritische Infrastrukturen eine unverzichtbare Rolle für das staatliche Gemeinwesen, weswegen Ausfälle oder Beeinträchtigungen unbedingt zu vermeiden sind.



## Ansturm auf Studien-Ausschreibung

Die Aussicht, sich an der FNN Studie zur Ermittlung von Gleichzeitigkeitsfaktoren für private Ladeeinrichtungen für E-Fahrzeuge beteiligen zu können, stieß auf große Resonanz. 17 Unternehmen bewarben sich für eine Mitarbeit. Durchgesetzt hat sich die Consentec GmbH.

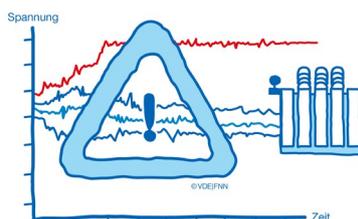
Netzbetreiber müssen bei der Auslegung der Stromnetze das Verhalten der Kunden und Gleichzeitigkeiten berücksichtigen. Durch neue leistungsstarke Verbraucher und die Möglichkeit der Steuerung wird sich die Belastung der Netze ändern und die Netze müssen künftig anders ausgelegt werden. Mit der nun startenden FNN Studie zur Ermittlung von Gleichzeitigkeitsfaktoren sollen konkrete Werkzeuge erstellt und Rechenwerte ermittelt werden, die den Einfluss von Bedarfsladen und regelmäßigem Laden von Elektroautos im privaten Bereich abbilden.

Im Sommer 2021 wird dann bereits mit einem Werkzeug und der Veröffentlichung der Studie gerechnet.



## Zielsetzung der Studie

Um Netzbetreibern eine Planungshilfe beim Auslegen des Stromnetzes zu bieten, sind im Zuge dieser FNN Studie konkrete Werkzeuge und Rechenwerte zu erstellen. Es sollen dabei der Einfluss von Bedarfsladen und regelmäßigem Laden auf die Gleichzeitigkeitsfaktoren und Leistungsannahmen bestimmt werden.



## VDE FNN Studie: Bestandsnetze auch bei höheren Spannungen sicher betreiben

Weil der Netzausbau für den Umbau des Energiesystems nicht so schnell möglich ist, muss das bestehende Netz soweit möglich ausgenutzt werden. In welchem Umfang Betriebsmittel höhere Spannungen bewältigen können, zeigt jetzt die neue Studie „Spannungsfestigkeit“.

Beim Umbau des Energiesystems auf Basis erneuerbarer Energien ist neben der Strombelastbarkeit auch die Spannungshöhe entscheidend, wenn es um die Auslastung des Netzes geht: Der Fokus in der öffentlichen Diskussion liegt oft darauf, die Strombelastung in Grenzen zu halten. Im Netzbetrieb ist jedoch auch die Spannung ein begrenzender Faktor. Betriebsmittel sind für eine bestimmte Maximalspannung ausgelegt, das heißt mit dieser Spannung können sie dauerhaft betrieben werden und die geplante Lebensdauer wird erreicht. In den internationalen Betriebsmittelstandards für beispielsweise Transformatoren und Schaltgeräte sind

kurzzeitige Spannungsüberhöhungen definiert. VDE FNN zeigt in seiner Studie „Spannungsfestigkeit“, unter welchen Bedingungen Betriebsmittel in Verteil- und Übertragungsnetzen temporär höhere Spannungen bewältigen können, die über die bisher in den einschlägigen Normen festgelegten Über Spannungshöhen und -zeitdauern sowie deren Häufigkeiten hinausgehen.

Die VDE FNN Studie „Spannungsfestigkeit“ ist im [VDE Shop](https://shop.vde.com/de/studie-spannungsfestigkeit)<sup>6</sup> erhältlich.



## Rückenwind für Strom von der See

VDE FNN legt Prüfkriterien für HGÜ-Systeme und Offshore-Windenergieanlagen vor und schafft damit eine wichtige Grundlage zur Netzstabilität von Systemen mit Wechselrichtern.

Die Nutzung von Offshore-Windenergie soll weiter ausgebaut werden – dazu hat die Bundesregierung kürzlich ihr Ziel von 15 Gigawatt (GW) Leistung auf 20 GW bis 2030 angehoben. Der Bund, die Länder an der Küste sowie die Übertragungsnetzbetreiber haben einen gemeinsamen Fahrplan für den Ausbau der Windkraft auf See verabschiedet. Wichtig dabei ist der effiziente Transport des gewonnenen Stroms zu den Kunden. Systeme zur Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) haben sich durch ihre verlustarme Übertragungsweise über weite Strecken als besonders wirkungsvoll erwiesen. VDE FNN hat nun für diese Systeme Prüfkriterien vorgelegt, um bereits vor der Installation das netzstabilisierende Verhalten der Systeme zu kontrollieren.

## Pionierarbeit für die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung

Aus vielen Lebensbereichen ist bekannt: Anforderungen definieren ist das eine, wie man diese genau prüft das andere. Deshalb stellt VDE FNN Herstellern und

<sup>6</sup> <https://shop.vde.com/de/studie-spannungsfestigkeit>

Betreibern von HGÜ-Systemen sowie Netzbetreibern eine konkrete Umsetzungshilfe bereit, um die notwendigen Nachweise gemäß den [Anschlussbedingungen für HGÜ-Anlagen \(VDE-AR-N 4131\)](#)<sup>7</sup> zu erbringen. Dazu gehört etwa ein exemplarischer Prüfablauf, beispielhafte Testnetze und -szenarien sowie ein visualisiertes Referenzverhalten von Anlagen für die spannungseinprägende Regelung, die von Netzbetreibern vorgegeben wird. Damit kann das Verhalten der Anlagen im System vorab simuliert werden.

Die im Hinweis beschriebenen Methoden und Nachweisverfahren zum spannungseinprägenden Verhalten sind prinzipiell auf leistungselektronische Erzeugungsanlagen anwendbar und nicht allein auf HGÜ-Systeme und Offshore-Windenergieanlagen begrenzt. Die Umsetzungshilfe ist als FNN Hinweis "Spannungseinprägendes Verhalten von HGÜ-Systemen und nichtsynchrone Erzeugungsanlagen mit Gleichstromanbindung" im [VDE Shop](#)<sup>8</sup> erhältlich.



### Smart-Meter-Gateway: Die Zentraleinheit des intelligenten Messsystems

Über das Smart-Meter-Gateway (SMGW) werden alle Verbindungen nach innen und außen abgewickelt. VDE FNN hat in Lastenheften die technischen Spezifikationen erarbeitet. Das Lastenheft für das SMGW liegt nun in einer aktuellen Version (1.2) vor.

Das Smart-Meter-Gateway ist die Zentraleinheit des Messsystems. Hier werden alle Verbindungen nach innen und außen abgewickelt (LMN, HAN, WAN). Von außen erhalten fest definierte Marktteilnehmer wie Messstellenbetreiber, Stromlieferanten oder Verteil-

netzbetreiber Zugriff auf das Gateway. Wer welchen Zugriff hat, ist streng nach den Vorgaben des Gesetzgebers sowie den technischen Regeln des Bundesamts für Sicherheit in der Kommunikationstechnik (BSI) geregelt. Nach innen gibt es sowohl Schnittstellen zu den intelligenten Zählern als auch für Kunden und Techniker. VDE FNN hat Konstruktion und Funktion des Gateways in Lastenheften definiert.

#### Funktionen

- **Kommunizieren:** Alle Kommunikationsverbindungen nach innen und außen laufen über das Gateway.
- **Informieren:** Durch das Gateway lassen sich die Messwerte aus der Ferne auslesen. Die Verbrauchswerte sind sowohl für Letztverbraucher als auch Messstellenbetreiber zur Abrechnung wichtig.

#### Nutzen

- **Übertragung von Messwerten:** Das Smart-Meter-Gateway als Kommunikationseinheit ist die zentrale Stelle, über die Messwerte an den Messstellenbetreiber übertragen werden. Das ermöglicht die Fernablesung des Stromverbrauchs durch autorisierte Marktteilnehmer und damit eine schnellere und genauere Rechnungsstellung.
- **Last- und zeitabhängige Tarife:** In Zeiten von Überangeboten von Strom sollen Marktteilnehmer in Zukunft zu bestimmten Zeiten günstige Tarife anbieten können. Technisch wird das über die Kommunikationsfähigkeit des Smart-Meter-Gateways umgesetzt. Damit lässt sich die berühmte Waschmaschine steuern, die zu günstigen Tarifen Wäsche reinigt.
- **Erzeugungsmanagement:** Netzbetreiber können unter bestimmten Voraussetzungen die Erzeugung dezentraler Anlagen, wie zum Beispiel Photovoltaik, abregeln. Für die Millionen Kleinanlagen in der Niederspannung soll das Smart-Meter-Gateway künftig dafür die Steuerbefehle der Netzbetreiber empfangen. Das Gateway leitet sie dann an die Steuerbox weiter. Sie übernimmt dann die tatsächlichen Schaltungen in der Kundenanlage.

- **Lastmanagement:** Auch für das Zu- und Abschalten von Verbrauchern (Lasten) in der Kundenanlage empfängt das Gateway Steuerungssignale vom Netzbetreiber oder Energielieferanten. Damit lassen sich in Zukunft zum Beispiel gezielt Elektroautos günstig laden.
- **Netzbetriebliche Anwendungsfälle:** Die Kommunikationsfähigkeit des Smart-Meter-Gateways ist Voraussetzung für das netzdienliche Schalten von Erzeugung und Verbrauch in der Kundenanlage. Das Gateway übernimmt somit eine ganz zentrale Rolle dabei, über das intelligente Messsystem die Erzeugungsanlagen in der Niederspannung netzdienlich anzusteuern.
- **Direkte Kundeninformation (Display, Apps):** Verbraucher können annähernd in Echtzeit ihren Verbrauch einsehen, umfangreiche Möglichkeiten zur Visualisierung und zum Vergleich der eigenen Verbrauchsdaten.
- **Mehrspartenfähig:** Über Schnittstellen kann der Zähler auch die Messwerte anderer Zähler wie z. B. Gaszähler einlesen und weiterleiten.



### Anlagensteuerung mit dem intelligenten Messsystem

VDE FNN formuliert netzbetriebliche Anforderungen an Steuerungsanwendungen, die durch das Gesetz zur Digitalisierung der Energiewende eingeführt werden.

#### Das Wichtigste in Kürze

- Der FNN Hinweis beschreibt die Anforderungen an Steuerungsanwendungen, die für einen sicheren und zuverlässigen Netzbetrieb unabdingbar sind
- Netzdienliche und netzkritische Steuerungsfunktionen haben hohe Priorität

7 <https://www.vde.com/de/fnn/arbeitsgebiete/tar/tar-hgue>

8 <https://shop.vde.com/de/fnn-hinweis-spannungseinpr%C3%A4gendes-verhalten-von-hg%C3%BC-systemen-und-nichtsynchrone-erzeugungsanlagen-mit-gleichstromanbindung>

Das Gesetz zur Digitalisierung der Energiewende legt die rechtlichen Grundlagen für ein digitales Stromnetz fest, um die Integration von erneuerbaren Energien zu erleichtern. Schwerpunkt ist die optimale Koordination von Stromverbrauch und fluktuierender Stromerzeugung. Das neue intelligente Messsystem soll dabei helfen, die Flexibilisierungspotenziale zu heben, indem es z. B. für die Steuerung von Kleinanlagen in der Niederspannung eingesetzt wird.

Die Entwicklung des intelligenten Messsystems erfolgte jedoch mit Fokus auf Mess- und Zähldatenerfassung, zu Zwecken der Bilanzierung und Abrechnung sowie der Marktpartnerkommunikation. Um durch das intelligente Messsystem auch netzdienliche oder sogar netzkritische Funktionen zu realisieren, sind entsprechende Anforderungen an die Kommunikationswege und Steuerungsschnittstellen zu erfüllen. Wie hoch die Anforderungen jeweils sind, ist unter anderem abhängig von der Systemrelevanz der Erzeugungs- oder Verbrauchsanlage.

Für einen sicheren Netzbetrieb stehen die netzdienlichen und netzkritischen Funktionen im Fokus.

Anlagen verhalten sich netzdienlich, wenn sie Engpässen entgegenwirken, d. h. sie ihren Verbrauch z. B. in die lastschwache Zeit verlegen. Insbesondere in der Niederspannung steigt die Zahl der installierten Anlagen, die einzeln betrachtet keine Auswirkungen auf den sicheren Netzbetrieb haben, weiter rasant an. Sobald viele Anlagen in Gruppen angesteuert werden oder z. B. synchron auf Preisanreize reagieren, wird die aggregierte Summenleistung systemrelevant und bestimmt die Anforderungen an die Kommunikations- und Steuerungsschnittstellen. Störungen und Fehler können Betriebsmittel und Anlagen schädigen und Einfluss auf weitere Netzebenen haben.

Netzkritische Funktionen haben das Ziel, die Versorgung der Netzkunden mit elektrischer Energie sicherzustellen, wenn die Systemstabilität gefährdet ist. Solche netzkritischen Situationen erfordern ein schnelles und effizientes Handeln und stellen hohe qualitative und quantitative Anforderungen an die Kommunikations- und Steuerungsschnittstellen.

Der FNN Hinweis „Netzbetriebliche Anforderungen an die Steuerung von Kundenanlagen im Verteilnetz“ be-

schreibt Anforderungen an die Steuerungsanwendungen, die von Seiten der Netzbetreiber zur Sicherstellung der Systemstabilität gestellt werden.

Im Mittelpunkt des Hinweises steht eine Anforderungstabelle, die die Relevanz der Anforderungen aus netzbetrieblicher Sicht entsprechend der Spannungsebene priorisiert. Ziel ist eine funktionierende und sichere technische Lösung für einen intensiven Austausch aller beteiligten Marktpartner. VDE FNN setzt sich für die Entwicklung einer tragfähigen und migrationsfähigen technischen Lösung für zukünftige Steuerungsanwendungen ein.



*Dipl.-Ing.  
Dieter Quadflieg  
Forum Netztechnik/  
Netzbetrieb im VDE  
(FNN)*

## Y1 Neues Leitbild und Umstrukturierung des VDE Young Net

*Das Jahr 2020 war auch für das VDE Young Net eine besondere Herausforderung. Doch wo die Gelegenheit für persönliche Treffen und die damit verbundenen oft sonst umfangreichen Veranstaltungsplanungen wegfielen, gab es viel Raum Neues anzugehen. So sind die Studierenden und Young Professionals im VDE Young Net im digitalen Raum enger zusammengerückt und haben sich im vergangenen Jahr u. a. ein neues Leitbild gegeben. Mit diesem stehen eine relevante Position in der Öffentlichkeit sowie eine agile und umsetzungsorientierte Arbeitsweise im Fokus.*

Um dieses Leitbild erreichen zu können, war es notwendig, die bisherige Organisationsform des VDE Young Net neu zu denken. Dafür wurde in einem aufwändigen Prozess (persönliche Interviews, Online-Befragung aller Mitglieder des VDE Young Net, Workshops) als neue Struktur eine transparente Projektorganisation erarbeitet, die allen Mitgliedern des VDE Young Net maximale und attraktive Beteiligungsmöglichkei-

ten eröffnen soll. Außerdem soll insbesondere die Zusammenarbeit mit anderen Bereichen des VDE gestärkt werden. So wird der VDE-weite Netzwerkgedanke gestärkt und die Einbindung von NachwuchssingenieurInnen in die Facharbeit vereinfacht.

Über ein Projekt-Canvas können in Zukunft aus allen Bereichen des VDE Projektideen für die Arbeit des VDE Young Net eingereicht werden. Diese werden durch einen Projektsteuerungskreis nach festgelegten Kriterien bewertet, freigegeben und mit den notwendigen Ressourcen ausgestattet. Dabei sollen nicht unbedingt nur Mitglieder des VDE Young Net Teil der einzelnen Projektteams sein. Auch erfahrene ExpertInnen sind herzlich eingeladen sich in den Projekten zu engagieren. Das VDE Young Net sieht sich mit der neuen Projektorganisation gut vorbereitet für die Zukunft. Entsprechend wurde im November 2020 sowohl auf der Jungmitgliederaus-schusssitzung als auch im Young Professionals Forum für die Umorganisation gestimmt, welche in den nächsten Monaten

- **Technologisch-wissenschaftlich**

Wir sind meinungsbildend in der technologisch-wissenschaftlichen Debatte. Aufbauend auf unserer Verbandsgeschichte und fachspezifischen Erfahrungen bieten wir ein branchenübergreifendes Austauschforum.

- **Gesellschaftlich relevant und sichtbar**

Zusammen nutzen wir die Kraft der Gemeinschaft, um technologische Transformationsprozesse nachhaltig zu gestalten. Wir prägen Forschung und Lehre und stoßen öffentliche Debatten an, statt nur mitzureden.

- **Individuell, vor Ort und zugänglich**

Im Leben persönlich und beruflich vorankommen – wir unterstützen auf individuelle und integrative Weise. Wir sind offen für neue Perspektiven und Kontroversen, sind sowohl bundesweit vernetzt als auch in deiner Region aktiver Wegbegleiter.

- **Agil**

Wir setzen auf innovative Formate bei der Zusammenarbeit, Kommunikation und Veranstaltungen. Wir bieten attraktive Angebote und transparente Kommunikation für deine Orientierung. Du übernimmst Eigenverantwortung in Projekten und wir bieten dir die Möglichkeit dich bei Entscheidungen einzubringen.

- **Umsetzungsorientiert**

Am Ende zählt die Umsetzung - wir arbeiten projektbasiert, bewirken echte Veränderungen und haben das richtige Gespür für das „Machbare“.

Bild 1: Neues Leitbild des VDE Young Net

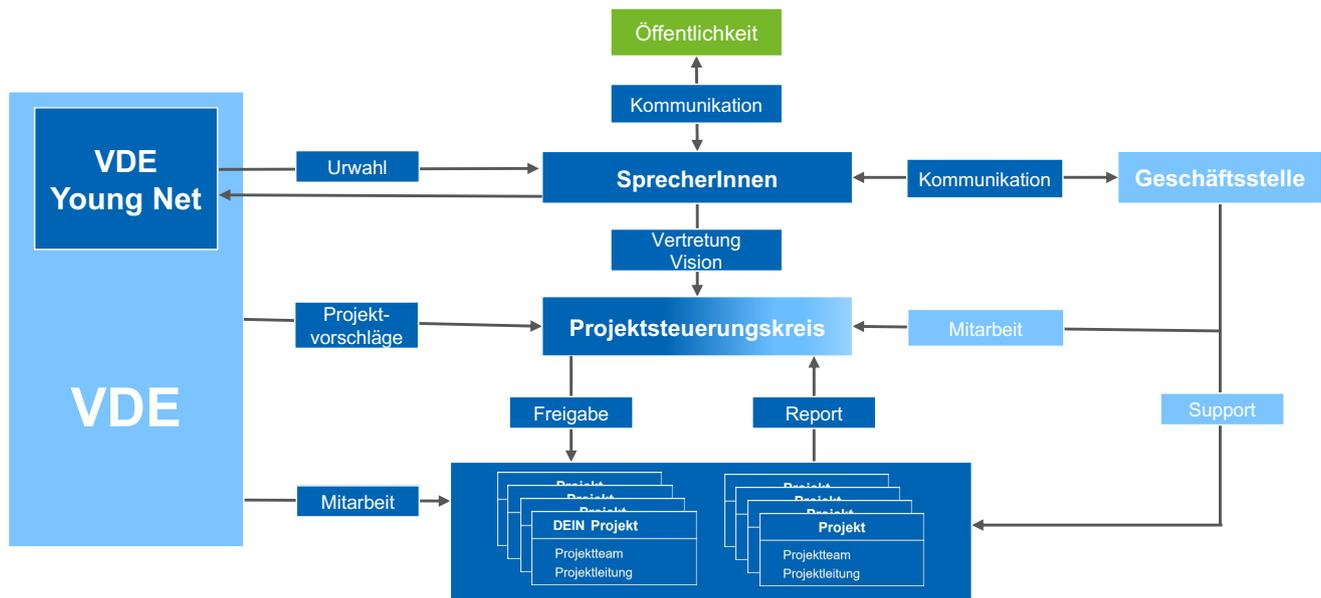


Bild 2: Künftige Projektorganisation des VDE Young Net

umgesetzt wird. Wir erhoffen uns bereits im Jahr 2021, viele spannende Projekte in Zusammenarbeit mit den Fachgesellschaften umsetzen zu können. Sei es weiterhin online und mit Abstand oder wieder im Rahmen von persönlichen Treffen und Veranstaltungen.

Wir freuen uns auf eure\* Beteiligung in Form von Projektideen und gerne auch Mitarbeit in den Projekten! Eine Anlei-

tung zum Einreichen von Projektideen sowie die zugehörige Canvas-Vorlage findet ihr auf dem SharePoint <https://teamwork.vde.com/youngnet/SitePages/Howto%20Projekte.aspx>

Bei Fragen zur neuen Projektorganisation wendet euch gerne an [sprecher@vde-youngnet.de](mailto:sprecher@vde-youngnet.de)



Juliane Selle, M.Sc.  
Energiekontor AG /  
Sprecherin VDE Young Net

\* **Anmerkung:** Das VDE Young Net hat beschlossen, seine Mitglieder und AbonnentInnen einheitlich zu duzen, da dies heutzutage dem guten Ton unserer Hauptzielgruppe entspricht. Dies hat unsererseits nichts mit mangelndem Respekt zu tun und wir hoffen, dass seht Ihr auch so. Es sind explizit alle Interessierten jeder Altersklasse angesprochen!

## S1 Politik und Regulierung

### Bundestag schafft rechtliche Voraussetzungen für niedrigere EEG-Umlage

Die Bundesregierung hat mit dem Klimaschutzprogramm 2030 am 9. Oktober 2019 beschlossen, dass die EEG-Umlage ab dem 1. Januar 2021 durch den Einsatz von Haushaltsmitteln abgesenkt werden soll. Die am 02. 07. 2020 durch den Bundestag verabschiedete „Änderung der Erneuerbaren-Energien-Verordnung (EEV)“ schafft nun die rechtlichen Voraussetzungen dafür, dass zu diesem Zweck ein Teil der Einnahmen aus dem Verkauf von CO<sub>2</sub>-Emissionsrechten als Bundeszuschuss zur anteiligen Finanzierung der EEG-Umlage eingesetzt werden können.

Quelle: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Artikel/Service/verordnung-zur-aenderung-der-erneuerbare-energien-verordnung.html>

### EEG-Umlage sinkt ab Januar 2021 auf 6,5 ct/kWh

Im Rahmen des Konjunkturprogramms zur Bewältigung der Corona-Folgen hat der Koalitionsausschuss beschlossen, zusätzlich zu den Einnahmen aus dem Emissionshandel einen Bundeszuschuss zu gewähren, um die EEG-Umlage im Jahr 2021 von derzeit 6,756 ct/kWh auf dann 6,5 ct/kWh zu senken. Ohne diesen Zuschuss wäre die Umlage 2021 vor allem infolge der Corona-Pandemie auf 9,65 ct/kWh angestiegen und hätte dadurch die Strompreise belastet.

Durch den Bundeszuschuss wird sichergestellt, dass das EEG-Konto im kommenden Jahr wieder einen positiven Stand aufweist. Es musste aufgrund der sinkenden Stromnachfrage in der Corona-Pandemie und der dadurch gesunkenen Preise an der Strombörse bis Ende September 2020 ein Minus von gut vier Milliarden Euro verbuchen. Der Zuschuss von 10,8 Milliarden Euro für 2021 setzt sich aus Mitteln des Konjunkturpakets und Einnahmen aus der neuen nationalen CO<sub>2</sub>-Bepreisung zusammen.

Zusätzlich zu den Mitteln aus dem Konjunkturpaket wird die EEG-Umlage in den kommenden Jahren durch Einnahmen aus der neuen nationalen CO<sub>2</sub>-Bepreisung entlastet. Steigen diese Einnahmen, steigen auch die Entlastungen beim Strompreis. Das hat die Bundesregierung im Klimaschutzprogramm 2030 beschlossen. Im nächsten Schritt soll die Umlage 2022 auf 6 ct/kWh gesenkt werden.

*Wer bezahlt eigentlich die EEG-Umlage?*

Knapp zur Hälfte wird die EEG-Umlage von Unternehmen und zu gut einem Drittel von privaten Haushalten bezahlt. Der Rest entfällt zum größten Teil auf öffentliche Einrichtungen. Derzeit macht die Umlage mehr als ein Fünftel des Haushaltsstrompreises aus. Stromkostenintensive Unternehmen und Schienenbahnen, die im internationalen Wettbewerb stehen,

können eine teilweise Entlastung von der EEG-Umlage beantragen. 2.201 stromkostenintensive Unternehmen und Schienenbahnen haben für das Jahr 2020 einen solchen Antrag auf teilweise Befreiung von der EEG-Umlage gestellt (Vorjahr: 2.261). Die überwiegende Mehrheit der Unternehmen (96 Prozent der Industriebetriebe) zahlt die volle EEG-Umlage.

Quelle: BMWi Newsletter „Energiewende direkt“, Ausgabe 11/2020, 17. 11. 2020

[https://www.bmwi-energiewende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2020/11/newsletter\\_2020-11.html](https://www.bmwi-energiewende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2020/11/newsletter_2020-11.html)

### Entwurf des Investitionsbeschleunigungsgesetzes verabschiedet

Die Bundesregierung hat am 12.08.2020 den vom Bundesverkehrsministerium (BMVI) vorgelegten Entwurf des Investitionsbeschleunigungsgesetzes verabschiedet. Mit dem Gesetz werden wichtige Beschleunigungen bei Planungsverfahren im Infrastrukturbereich umgesetzt. Das Bundeswirtschaftsministerium (BMW) hat hierzu Beschleunigungen im Energiebereich in das Gesetz eingebracht, vor allem eine Beschleunigung der Planungs- und Genehmigungsverfahren für Windenergieanlagen an Land. So wird der verwaltungsgerichtliche Instanzenzug und damit die Verfahrensdauer insgesamt verkürzt. Zudem entfällt bei Klagen gegen die Zulassung von Windenergieanlagen die sogenannte aufschiebende Wirkung von Widerspruch und Anfechtungsklage. Das Gesetz dient damit zugleich der weiteren Umsetzung des Aktionsplans zur Stärkung der Windenergie des BMWi vom Herbst 2019, der darauf zielt, den Ausbau von Windenergie an Land zu beschleunigen.

Quelle: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2020/20200812-investitionsbeschleunigungsgesetz-im-kabinett-verabschiedet.html>

### Klimaschutzbericht 2019: Die Emissionen in Deutschland sinken

Der am 19.08.2020 von der Bundesregierung veröffentlichte „Klimaschutzbericht 2019“ weist aus, dass Deutschland seinen CO<sub>2</sub>-Ausstoß im Jahr 2019 deutlich gesenkt hat – und sein Klimaschutz-Ziel für 2020 infolge der Corona-Krise sogar noch erreichen könnte.

Den Angaben zufolge hat Deutschland 2019 rund 35,7 Prozent weniger Treibhausgase ausgestoßen als 1990 und 6,3 Prozent weniger als im Vorjahr. Die Emissionen lagen bei rund 805 Millionen Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalenten. Besonders stark hat der Energiesektor zur Minderung beigetragen, während der CO<sub>2</sub>-Ausstoß im Verkehr und im Bereich Gebäude und Heizungen etwas anstieg.

Ein neuer unabhängiger Expertenrat für Klimafragen soll die Bundesregierung bei der Anwendung des Bundesklimaschutzgesetzes unterstützen. Die Aufgaben des Expertenrats sind im Bundesklimaschutzgesetz festgelegt: Er prüft die vom Umweltbundesamt (UBA) vorgelegte Abschätzung der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Vorjahres sowie die Annahmen, die den Angaben zur Treibhausgasminderungswirkung von Sofortmaßnahmen und Klimaschutzprogrammen zugrunde liegen.

Quellen: <https://www.bmu.de/download/klimaschutzbericht-2019/>  
<https://www.bundesregierung.de/breg-de/service/gesetzesvorhaben/klimaschutzbericht-2019-1777846>

### Marktgestützte Beschaffung nicht frequenzgebundener Systemdienstleistungen

Mit dem „Entwurf eines Gesetzes zur marktgestützten Beschaffung von Systemdienstleistungen für den Stromnetzbetrieb“, können sich erneuerbare Energien, Speicher oder Anbieter von Laststeuerung künftig an der Bereitstellung von nicht frequenzgebundenen Systemdienstleistungen für den Stromnetzbetrieb beteiligen. Diese sind:

1. Dienstleistungen zur Spannungsregelung
2. Trägheit der lokalen Netzstabilität
3. Kurzschlussstrom
4. dynamische Blindstromstützung
5. Schwarzstartfähigkeit
6. Inselbetriebsfähigkeit

Ausgenommen von der Vorgabe sind Komponenten im Eigentum des Netzbetreibers. Die BNetzA kann zudem Ausnahmen genehmigen, sollte eine marktgestützte Beschaffung einer Systemdienstleistung wirtschaftlich nicht effizient sein. Die Spezifikationen und damit verbundene technische Anforderungen legt die Bundesnetzagentur fest. Alternativ kann sie die Netzbetreiber auffordern, gemeinsam entsprechende Spezifikation und Anforderungen zu erarbeiten. Die Beschaffungsverfahren werden von den Netzbetreibern durchgeführt.

Die rechtliche Umsetzung erfolgt durch Einfügen des § 12h „Marktgestützte Beschaffung nicht frequenzgebundener Systemdienstleistungen“ in das Energiewirtschaftsgesetz (EnWG) vom 7. Juli 2005, zuletzt geändert am 25. Mai 2020.

Quelle: [https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/G/gesetzentwurf-aenderung-energiewirtschaftsgesetz-zur-marktgestuetzten-beschaffung-von-systemdienstleistungen.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/G/gesetzentwurf-aenderung-energiewirtschaftsgesetz-zur-marktgestuetzten-beschaffung-von-systemdienstleistungen.pdf?__blob=publicationFile&v=4)

### EEG 2021 – Umstieg auf die „Post-Förderung-Ära“

Das BMWi hat am 31.08.2020 seinen Referentenentwurf zur EEG-Novelle in die Ressortabstimmung gegeben. Die wichtigsten Inhalte des EEG 2021 gliedern sich in sechs Komplexe:

- Treibhausgasneutralität bis 2050,
- Umsetzung des Klimaschutzprogramms 2030,

- Dämpfung der Kostenentwicklung der Energiewende,
- Erhalt der Akzeptanz für den weiteren EE-Ausbau,
- Stärkung der Netz- und Marktintegration
- Einstieg in die „Post-Förderung-Ära“

In dem Gesetz soll die Treibhausgasneutralität Deutschlands bis 2050 gesetzlich festgeschrieben werden, und zwar sowohl für den hier erzeugten Strom als auch für den hier verbrauchten Strom. Die Bundesregierung will sich für entsprechende Regelungen im europäischen Kontext einsetzen. Mit dem neuen EEG soll auch das Zielmodell des Klimaschutzprogramms 2030, eine 65-prozentiger EE-Anteil am deutschen Stromverbrauch, verbindlich festgelegt werden. Zur Kostendämpfung des EE-Ausbaus enthält der Entwurf verschiedene Einzelmaßnahmen.

Um die Akzeptanz in der Bevölkerung zu steigern, werden Gemeinden an den Einnahmen von Windparks beteiligt. Bei der PV sollen die Rahmenbedingungen für Mieterstrom verbessert werden. Die Anforderungen an die Steuerbarkeit von EE-Anlagen sollen ausgeweitet und die Digitalisierungsstrategie über Smart-Meter-Gateways konsequent fortgeschrieben werden. Zur Stärkung der Netz- und Marktintegration sollen unter anderem „Südquoten“ in den EE-Ausschreibungen eingeführt werden. Die bisherigen Netzausbaugebiete werden aufgehoben.

Für Anlagen, die ab 2021 aus der EEG-Vergütung herausfallen („ausgeförderte Anlagen“), ist vorgesehen, dass ihnen „übergangsweise bis zu ihrer vollständigen Marktintegration“ eine Alternative zur Direktvermarktung geboten wird: Sie sollen ihren Strom bis Ende 2027 auch dem Netzbetreiber zur Verfügung stellen können und dafür den Marktwert abzüglich der Vermarktungskosten erhalten.

Der Bundestag hat am 17. Dezember 2020 mit den Stimmen der schwarz-roten Koalition die Reform des EEG beschlossen. Am 18. Dezember hat auch der Bundesrat zugestimmt, sodass das neue EEG wie geplant zum 1. Januar 2021 in Kraft treten kann. Allerdings ist schon jetzt absehbar, dass es bereits im ersten Quartal 2021 nochmals Korrekturen geben wird, wie z. B. eine Erhöhung der Ausbaupfade für die Erneuerbaren Energien.

Quelle: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2020/09/20200923-altmaier-eeg-novelle-2021-klares-zukunftssignal-fuer-mehr-klimaschutz-und-mehr-erneuerbare.html>

### McKinseys Energiewende-Index verbreitet wenig Optimismus

Bereits seit 2012 untersucht McKinsey mit dem Energiewende-Index halbjährlich den Status der Energiewende in Deutschland entlang der drei Dimensionen des energiewirtschaftlichen Dreiecks: Klima- und Umweltschutz, Versorgungssicherheit und Wirtschaftlichkeit. Innerhalb dieser Dimensionen werden insgesamt 15 Indikatoren analysiert und immer aktuell daraufhin bewertet, inwieweit sie ihre Zielwerte im geplanten Zeitverlauf der Energiewende erreicht haben.

Im aktuellen Energiewende-Index sind acht der 15 Ziele bis 2030 noch realistisch zu erreichen, drei davon stehen auf der Kippe:

Der Anteil erneuerbarer Energien, die Energiekosten für die Haushalte insgesamt, die verfügbare Importkapazität, die Sicherheit der Stromversorgung und die Strompreise für die Industrie werden als "realistisch" eingeschätzt. Die Ziele für den Anteil erneuerbarer Energien an der Gesamtenergienutzung, erneuerbare Wärmeerzeugung und eine sichere Reserveversorgung könnten jedoch mittelfristig durchaus noch scheitern.

CO<sub>2</sub>-Emissionen und Arbeitsplätze im Bereich der erneuerbaren Energien werden als "anpassungsbedürftig" eingestuft.

Die Senkung des Primärenergieverbrauchs, der Übergang im Verkehrssektor, die Kosten für das Netzmanagement, der Netzausbau und die Strompreise für Haushalte bleiben weiterhin unrealistisch.

Quellen: <https://www.mckinsey.de/branchen/chemie-energie-rohstoffe/energiewende-index>

### Energiewende funkt künftig auf 450 MHz

Die Bundesnetzagentur hat am 16. 11. 2020 im Einvernehmen mit dem Beirat entschieden, die 450-MHz-Frequenzen vorrangig für kritische Infrastrukturen der Energie- und Wasserwirtschaft bereitzustellen. Die bestehenden Nutzungsrechte laufen zum Ende des Jahres 2020 aus.

Aufgrund der guten Ausbreitungseigenschaften bieten sich die 450-MHz-Frequenzen an, um kosteneffizient ein funktionsfähiges, ausfallsicheres Funknetz aufzubauen. Sie weisen gute Ausbreitungseigenschaften und eine Gebäudedurchdringung auch bis in die Keller auf. Die Technik wird zum Teil schon genutzt, geeignete Endgeräte sind am Markt verfügbar. Mit der Vergabeentscheidung ist nun der Weg für die Digitalisierung der Energie- und Verkehrswende gebnet.

Frequenzen, die nicht für Anwendungen kritischer Infrastrukturen eingesetzt werden, sind für sicherheitsrelevante Nutzungen der Behörden und Organisationen mit Sicherheitsaufgaben (BOS) sowie bei Bedarf der Bundeswehr bereitzustellen.

Quellen: <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2020/11/20201116-altmaier-450-mhz-frequenzen-machen-stromnetze-widerstandsfahig-und-sicher.html>  
[https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2020/20201116\\_450mhz.html](https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2020/20201116_450mhz.html)

### Erneuerbare lieferten 2019 knapp 243 Milliarden Kilowattstunden

Die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland verzeichnete im Jahr 2019 ein deutliches Plus um rund acht Prozent und stieg auf knapp 243 Milliarden Kilowattstunden. Auch der Anteil der erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch stieg 2019 entsprechend deutlich auf 42,1 Prozent. (2018: 37,8 Prozent). Zur Steigerung trugen vor allem gute Windverhältnisse und der weitere Ausbau von Wind-

energieanlagen an Land und auf See sowie der Zubau von Photovoltaikanlagen bei.

Sonnenenergie stellte 2019 einen Anteil von 19,1 Prozent an der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien. Biomasse lieferte 20,6 Prozent. Wasserkraft steuerte einen Anteil von 8,3 Prozent bei, Geothermie kam auf 0,1 Prozent. Mehr als die Hälfte der 242,5 Milliarden Kilowattstunden wurden durch Windkraft erzeugt. Davon steuerte Windenergie an Land 41,7 Prozent bei, Windenergie auf See schaffte 10,2 Prozent.

### Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien steigt weiter an

Windenergie stellt mehr als die Hälfte der Stromerzeugung aus Erneuerbaren

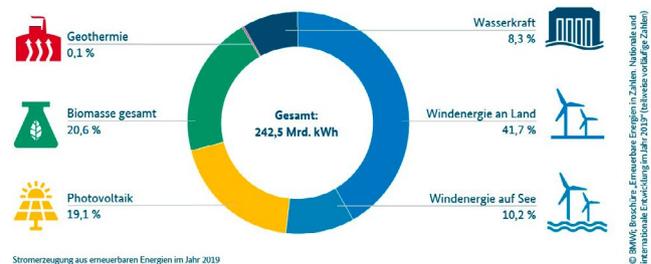


Bild (© BMWi): Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in Deutschland im Jahr 2019

Quelle: BMWi Newsletter „Energiewende direkt“, Ausgabe 11/2020, 17. 11. 2020

[https://www.bmwi-energiewende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2020/11/newsletter\\_2020-11.html](https://www.bmwi-energiewende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2020/11/newsletter_2020-11.html)

Weitere aktuelle Daten, Statistiken und Informationen zur nationalen und internationalen Entwicklung der Erneuerbaren Energien finden Sie hier: [https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare\\_Energien\\_in\\_Zahlen/erneuerbare\\_energien\\_in\\_zahlen.html](https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Navigation/DE/Service/Erneuerbare_Energien_in_Zahlen/erneuerbare_energien_in_zahlen.html).

## S2 Industrie und Forschung

### Startschuss für Forschungsnetzwerk Wasserstoff

Ende September 2020 hat das vom BMWi gegründete Forschungsnetzwerk Wasserstoff mit einer Auftaktveranstaltung und mehr als 1.000 Teilnehmenden seine Arbeit aufgenommen. Das Netzwerk bringt Beteiligte aus Wirtschaft, Forschung und Politik zusammen, die sich über Fragen der Erzeugung, Speicherung, Verteilung und sektorübergreifenden Nutzung von Wasserstoff austauschen wollen. Damit soll der Transfer von innovativen Wasserstofftechnologien in den Markt beschleunigt werden. Das Forschungsnetzwerk Wasserstoff, angekündigt mit der Nationalen Wasserstoffstrategie, ist das neunte Forschungsnetzwerk im Rahmen des Energieforschungsprogramms. Es wird wichtiger Impulsgeber für die Forschungs- und Innovationspolitik im Wasserstoffbereich mit Blick auf Anwendungsnähe und Praxistransfer. Link zur Webseite: <https://www.forschungsnetzwerke-energie.de/wasserstoff>

Quelle: BMWi Newsletter „Energiewende direkt“, Ausgabe 10/2020, 13. 10. 2020

[https://www.bmw-energie-wende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2020/10/newsletter\\_2020-10.html](https://www.bmw-energie-wende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2020/10/newsletter_2020-10.html)

### Forschungsprogramm SINTEG geht zu Ende

Im November 2020 ist das Förderprogramm „SINTEG – Schaufenster intelligente Energie – Digitale Agenda für die Energiewende“ in großen Teilen zu Ende gegangen. Einzelne Projekte laufen noch bis zum 31. März 2021. In fünf „Schaufenster“ genannten Modellregionen wurden zuvor vier Jahre lang deutschlandweit innovative Lösungen für die technischen, wirtschaftlichen und regulatorischen Herausforderungen der Energiewende entwickelt und getestet. Das BMWi hat die Schaufensterregionen mit insgesamt rund 200 Millionen Euro gefördert. Zusammen mit zusätzlichen privaten Investitionen der beteiligten Unternehmen wurden so rund 500 Millionen Euro in die intelligente Energieversorgung der Zukunft investiert.

*WindNODE: Flexible Verbraucher*

Das Schaufenster WindNODE umfasst alle Bundesländer im Nordosten Deutschlands. Im Fokus des Projekts standen einerseits Speichertechnologien wie große Batterien, Elektroautos oder elektrische Wärmezeugung („Power-to-Heat“) und andererseits Stromkunden, die ihren Verbrauch flexibel erhöhen können, wenn gerade viel Wind- und Sonnenenergie zur Verfügung steht.

*C/sells: Kommunizierende Zellen*

Im Projekt C/sells wurde ein Energiesystem erdacht und erprobt, in dem sich kleinere Energie-„Zellen“ – zum Beispiel

eine Region, ein Stadtteil oder einzelne Häuser – weitestgehend selbst versorgen. Die Zellen tauschen untereinander überschüssige oder fehlende Energie aus. Sie sind digital miteinander vernetzt, so dass überschüssige Energie automatisch immer dorthin gelangt, wo sie gerade gebraucht und sonst gespeichert wird. Dafür entwickelte C/sells zum Beispiel ein innovatives Infrastruktur-Informationssystem (IIS), das den sicheren Austausch von Informationen und Daten zwischen den einzelnen „Zellen“ möglich macht. Es setzt außerdem auf einen flexiblen Energiemarkt – also die Möglichkeit, den Verbrauch an die Energieerzeugung anzupassen. Das Schaufenster C/sells nimmt die Fläche der Bundesländer Baden-Württemberg, Bayern und Hessen ein.

*DESIGNETZ: Drei Bundesländer testen das Stromnetz der Zukunft*

Das Projekt DESIGNETZ hat Lösungen für ein sicheres und flexibles Energiesystem mit hohen Anteilen erneuerbarer Energien entwickelt. Wichtigstes Ziel: Strom möglichst dort verbrauchen, wo er erzeugt wird. Dazu braucht es auch Speichertechnologien für die Sektorenkopplung, bei der grüner Strom für Wärmeerzeugung und Elektromobilität eingesetzt wird. Entstanden sind mehr als 30 Einzelprojekte in Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz und dem Saarland.

*NEW 4.0: Digitale Technologien*

Das Schaufenster NEW 4.0 (Norddeutsche Energiewende 4.0) verbindet Hamburg als großen Stromverbraucher mit dem viel Windenergie liefernden Schleswig-Holstein. Ziel war hier eine sichere und kostengünstige Stromversorgung mit einem Erneuerbare-Energien-Anteil von 100 Prozent im Jahr 2035. Eine flexible Stromhandelsplattform (ENKO, kurz für „Energien intelligent koordiniert“) bringt dafür Marktteilnehmer zusammen, um Stromangebot und -nachfrage zu bündeln und das Ungleichgewicht zwischen Stromverbrauch und -erzeugung ins Gleichgewicht zu bringen. So kann mehr Strom aus erneuerbaren Energien ins Stromnetz eingespeist werden. Neue Batteriespeicher helfen dabei, das Netz zu entlasten und kurzfristige Schwankungen auszugleichen.

*enera: Regionaler Marktplatz*

In der Modellregion enera im Nordwesten Niedersachsens werden große Mengen Windenergie erzeugt, für deren Transport die Netzkapazität nicht immer ausreicht. enera hat deshalb getestet, wie sich Stromnetze und Märkte, Speicher-, Kommunikations- und Verbrauchstechnologien mit Hilfe digitaler Technologien intelligent kombinieren lassen. Dazu wurden zum Beispiel Stromzähler in Haushalten und Betrieben mit einem intelligenten Auslese- und Kommunikationsmodul (SAM) ausgerüstet, das mit Smartphone und App einen genauen Vergleich des täglichen Stromverbrauchs möglich

macht. Zusätzlich wurden Knotenpunkte im Stromnetz mit digitaler Messtechnik ausgestattet – die Grundlage für ein intelligentes Energiesystem, das den Strom automatisch dorthin steuert, wo er gebraucht wird. Die erzeugte Energie wird hier über einen digitalen Marktplatz gehandelt. Dank dieser lokalen börsenbasierten Stromhandelsplattform können sogenannte Netzengpässe vermieden werden. Ein ins Netz integrierter Hybrid-Großspeicher lieferte Erkenntnisse über die Leistungsfähigkeit von Speichern und über Vermarktungsstrategien im Rahmen neuer Stromhandels-Geschäftsmodelle.

### Blaupausen und Netzwerk für die Energiewendezukunft

Mit den Ergebnissen kann das Sortiment aus Blaupausen jetzt nicht nur erweitert werden, sondern bald auch „in Produktion“ gehen. Die Ergebnisse werden dafür gerade gesammelt und so aufbereitet, dass sie allen Beteiligten als eine Art Bauplan-Satz für die weitere Energiewende zur Verfügung stehen. Sie sind voraussichtlich im Laufe des Jahres 2021 auf der SINTEG-Website ([www.sinteg.de](http://www.sinteg.de)) online, die nochmal einen umfassenden Überblick über alle Schaufenster und Projekte gibt und viele der technischen Lösungen spannend aufbereitet erzählt.

Im Rahmen von SINTEG ist auch ein Netzwerk aus Hunderten Expertinnen und Experten entstanden, das auch nach Projektende weiter bestehen und gepflegt werden soll. Ein „Who-is-Who“-Verzeichnis, mit dem sich Expertinnen und Experten zielgenau finden lassen, ist unter [wirSINTEG.de](http://wirSINTEG.de) verfügbar. Die Plattform „ResearchGate“ listet wissenschaftliche Publikationen aus allen fünf SINTEG-Schaufenstern auf und macht sie per Link zugänglich ([www.bit.ly/SINTEG-RG](http://www.bit.ly/SINTEG-RG)) und das Karrierenetzwerk „LinkedIn“ stellt für Energie-Professionals einen Kommunikationskanal über SINTEG bereit.

Quelle: BMWi Newsletter „Energiewende direkt“, Ausgabe 11/2020, 17.11.2020

[https://www.bmw-energiewende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2020/11/newsletter\\_2020-11.html](https://www.bmw-energiewende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2020/11/newsletter_2020-11.html)

### Weltweit erster hybrider Offshore-Interkonnektor eingeweiht

Am 20.10.2020 haben die beiden Übertragungsnetzbetreiber 50Hertz Transmission (Deutschland) und Energinet (Dänemark) die weltweit erste Anbindung von Offshore-Windparks an mehrere Länder (hybrider Offshore-Interkonnektor) eingeweiht. Die Combined Grid Solution (kurz: CGS), das sind zwei 25 km lange parallele Drehstrom-Seekabel mit einer Leistung von je ca. 200 Megawatt (MW), verbindet nicht nur die Umspannplattformen Baltic 2 (DE) und Kriegers Flak (DK) in der Ostsee, sondern auch die Landanbindungen der beiden Windparks (Bild). Dadurch kann die CGS Offshore-Windstrom nach Dänemark oder nach Deutschland leiten und zusätzlich für den grenzüberschreitenden Stromhandel genutzt werden.

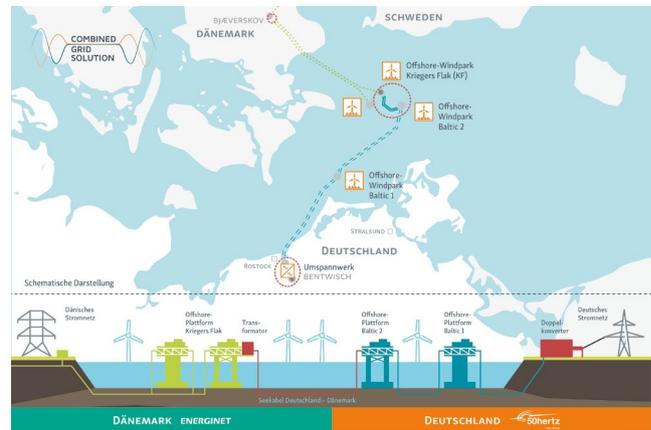


Bild: Combined Grid Solution – Hybrider Offshore-Interkonnektor zwischen Deutschland und Dänemark (© 50Hertz Transmission GmbH)

Weil die Übertragungsnetze Ost-Dänemarks und Deutschlands nicht synchron arbeiten und damit nicht direkt verbunden werden können, war für diesen Interkonnektor die Errichtung einer sogenannten HGÜ-Kurzkupplung (Hochspannungs-Gleichstrom-Kurzkupplung oder Back-to-Back-Converter) am Umspannwerk Bentwisch bei Rostock erforderlich. Darin wird der ankommende Wechselstrom in Gleichstrom und sofort wieder in Wechselstrom gewandelt. Der Back-to-Back-Converter ist ebenfalls in der Lage, einen Teil der notwendigen Blindleistungskompensation für die Kabelverbindung zu erbringen. Nur so kann der Strom problemlos von Dänemark nach Deutschland und umgekehrt von Deutschland nach Dänemark fließen.

Der hybride Interkonnektor zwischen Deutschland und Dänemark soll bald nicht mehr der einzige in der Ostsee sein. Weitere Projekte, die bis 2030 entstehen sollen, sind bereits in Planung: die Danish Energy Hubs (von Dänemark aus in Nord- und Ostsee), North Sea Wind Power Hub (zwischen den Niederlanden, Deutschland und Dänemark), WindConnector (zwischen den Niederlanden und Großbritannien) und Nautilus zwischen (Belgien und Großbritannien).

Quellen: BMWi Newsletter „Energiewende direkt“, Ausgabe 11/2020, 17.11.2020

[https://www.bmw-energiewende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2020/11/newsletter\\_2020-11.html](https://www.bmw-energiewende.de/EWD/Redaktion/Newsletter/2020/11/newsletter_2020-11.html)

<https://www.50hertz.com/de/News/Details/id/7151/europa-verbinden-50hertz-und-energinet-weihen-weltweit-ersten-hybriden-interkonnektor-ein>

## S3 International

## IEA: Energy Technology Perspectives 2020

Am 09.09.2020 hat die IEA ihren Report „Energy Technology Perspectives 2020“ veröffentlicht. Demnach erfordert das Erreichen der Energie- und Klimaziele eine umgehende und konsequente Ausweitung sauberer Energietechnologien. Die Umgestaltung des Energiesektors allein werde der Welt nur ein Drittel des Weges zur Netto-Null-Emission ermöglichen, heißt es in dem Bericht, in dem die Notwendigkeit größerer Anstrengungen in anderen Schlüsselsektoren hervorgehoben wird. Insbesondere müssten die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus Bereichen außerhalb des Energiesektors wie Verkehr, Gebäude und Industrie reduziert werden. Auf diese Bereiche würden rund 55 Prozent der weltweiten CO<sub>2</sub>-Emissionen entfallen. Hier wäre eine zügige Elektrifizierung der richtige Weg.

Der Bericht untersucht, wie die Herausforderung langlebiger Energieanlagen, die weltweit betrieben werden, angegangen werden kann – einschließlich ineffizienter Kohlekraftwerke, Stahlwerke und Zementöfen. Die IEA unterstreicht dabei die Notwendigkeit von CO<sub>2</sub>-Reduktionstechnologien wie CCS und CCU.

Die IEA geht davon aus, dass die Wasserstofftechnologie künftig eine zentrale Rolle spielen wird. Im Szenario für nachhaltige Entwicklung – ein Weg zur Erreichung internationaler Energie- und Klimaziele – wird die globale Kapazität von Elektrolyseuren von heute 0,2 Gigawatt auf 3.300 Gigawatt im Jahr 2070 erweitert. Damit würden diese dann jedoch in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts doppelt so viel Strom verbrauchen wie die chinesische Volkswirtschaft heute, heißt es in dem Bericht.

Quelle: <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020>

Weitere Daten und Veröffentlichungen im IEA-Webstore: <https://webstore.iea.org>

## Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien in der EU

## Windenergie

Nach einem vergleichsweise schwachen Vorjahr konnte der EU-weite Ausbau der Windenergie im Jahr 2019 wieder deutlich an Fahrt aufnehmen. Mit 13,2 Gigawatt lag der Netto-Leistungszubau (an Land und offshore) laut European Wind Energy Association (EWEA) um ein Viertel höher als im Jahr 2018. Insgesamt verfügte die EU-28 Ende des Jahres 2019 über eine installierte Windenergieleistung von 192,2 Gigawatt. Mit 32 Prozent belegte Deutschland hier die Spitzenposition. Es folgten Spanien mit 13 Prozent, das Vereinigte Königreich mit zwölf und Frankreich mit neun Prozent Anteil an der gesamten in der EU installierten Windenergieleistung.

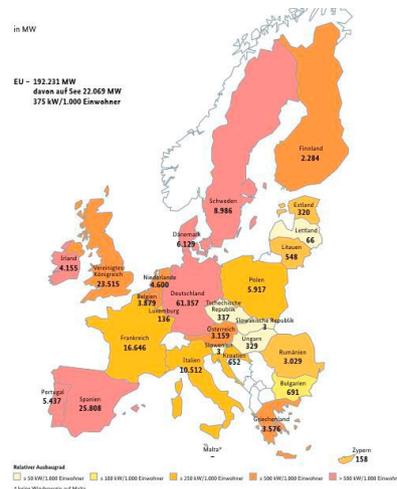


Bild (© BMWi):  
Gesamte installierte  
Windenergieleistung  
in der EU Ende des  
Jahres 2019

## Photovoltaik

Ende des Jahres 2019 waren in der EU-28 insgesamt knapp 130,7 Gigawatt Photovoltaikleistung installiert. Mit 37,5 Prozent hatte Deutschland hieran nach wie vor den mit Abstand höchsten Anteil. Es folgten Italien mit 16 Prozent, das Vereinigte Königreich mit zehn Prozent, Frankreich mit acht Prozent und Spanien mit sieben Prozent.

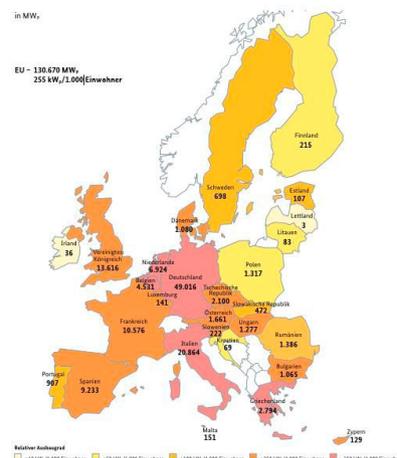


Bild (© BMWi):  
Gesamte installierte  
Photovoltaikleistung  
in der EU im Jahr 2019

Durch den Leistungszubau nahm auch die Stromerzeugung aus Photovoltaikanlagen in der EU-28 gegenüber dem Vorjahr um über sieben Prozent auf 131,8 Milliarden Kilowattstunden zu (2018: 122,9 Milliarden Kilowattstunden).

Quelle: BMWi: Erneuerbare Energien in Zahlen – Nationale und internationale Entwicklung im Jahr 2019, Oktober 2020 <https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/Berichte/erneuerbare-energien-in-zahlen-2019.html>



Dr.-Ing. Thomas Benz  
Geschäftsführer ETG

# G1 Wofür stehen $H, D, M$ und $P$ ?

## Zusammenfassung

In diesem Artikel wird gezeigt, dass das als „makroskopische Maxwellgleichungen“ oder „Maxwell'sche Gleichungen für Materie“ bekannte Gleichungssystem ein Spezialfall der Maxwell'schen Gleichungen „ohne Materie“ ist. Anhand der Herleitung wird klar, dass die normalerweise mit  $H, D, M$  und  $P$  bezeichneten Größen selbst keine Felder, sondern Feldanteile sind. Der Unterschied zwischen Feld und Feldanteil ist für ein Verständnis dieser Größen wesentlich.

## Zwei Kräfte – zwei Kraftfelder

Die Gleichungen für die Lorentz-Kraft  $F = Qv \times B$  und die Coulomb-Kraft  $F = QE$  spielen in der Elektrodynamik eine ähnlich zentrale Rolle wie die Maxwell'schen Gleichungen. Denn andere die Ladung  $Q$  beeinflussende Kräfte sind nicht bekannt. Ohne diese beiden gäbe es keinen Stromfluss, und alle elektrischen Maschinen ständen still. Egal unter welchen Namen wir sie kennen, für einen geladenen Körper sind  $E$  und  $B$  daher schlicht Kraftfelder, nämlich das elektrische Kraftfeld  $E$  und das magnetische Kraftfeld  $B$ .

Die herausgehobene Rolle der beiden Kräfte spiegelt sich in der Bedeutung der Felder  $E$  und  $B$  wider: Die Quantenelektrodynamik kennt keine anderen Felder und der relativistische elektromagnetische Feldtensor enthält neben  $E$  und  $B$  auch keine weiteren Felder. Wie kann es dann aber sein, dass in der Elektrotechnik die Größen  $H, D, M$  und  $P$  eine genauso wichtige Rolle spielen? Haben Quantenelektrodynamik und Relativitätstheorie keinen Bezug zur technischen Wirklichkeit? Oder ist alles außer  $E$  und  $B$  das Resultat von Missverständnissen? Im Folgenden wird gezeigt, dass die Größen  $H, D, M$  und  $P$  selbst keine Felder sind, sondern für Anteile an den Feldern  $E$  und  $B$  stehen. Auf diese Weise können die scheinbaren Widersprüche zwischen der klassischen Elektrotechnik und den Ergebnissen der Grundlagenforschung aufgelöst werden.

## Die Maxwell'schen Gleichungen

Die Maxwell'schen Gleichungen können für die Felder  $E$  und  $B$  mithilfe der Ladungsdichte  $\rho$  und der Stromdichte  $J$  als

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \epsilon_0 E &= \rho & \nabla \cdot B &= 0 \\ \nabla \times E &= -\frac{\partial B}{\partial t} & \nabla \times \left(\frac{B}{\mu_0}\right) &= J + \frac{\partial}{\partial t} \epsilon_0 E \end{aligned} \quad (1)$$

formuliert werden. Ein hervorstechendes Merkmal dieser vier Gleichungen ist die Linearität. Ladungen, Stromdichten, Felder und die sie verknüpfenden Differenzialgleichungen können daher ohne Verlust an Korrektheit addiert und subtrahiert werden. Dies ist der Schlüssel zur Bestimmung derjenigen Gleichungen,

welche den Einfluss der Materie auf elektromagnetische Felder beschreiben.

Alle uns umgebenden Materialien bestehen aus geladenen Teilchen, den Elektronen und Atomkernen. Dabei bilden diejenigen Stoffe das Rückgrat der Elektrotechnik, in denen ein Teil der Ladungsträger „frei“ beweglich ist, also Strecken jenseits eines Atomdurchmessers zurücklegen kann. Die verbleibenden Ladungsträger sind gebunden. Innerhalb eines solchen Materials ist die Gesamtheit von Ladungen und Strömen durch

$$\rho = \rho_{\text{frei}} + \rho_{\text{geb.}} \quad J = J_{\text{frei}} + J_{\text{geb.}} \quad (2)$$

gegeben. In der gleichen Weise, also so:

$$E = E_{\text{frei}} + E_{\text{geb.}} \quad B = B_{\text{frei}} + B_{\text{geb.}} \quad (3)$$

werden dann die Feldanteile addiert. Für beide Teilladungen und Ströme gelten die zu ihnen gehörenden Maxwell'schen Gleichungen:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \epsilon_0 E_{\text{frei}} &= \rho_{\text{frei}} & \nabla \times \left(\frac{B_{\text{frei}}}{\mu_0}\right) &= J_{\text{frei}} + \frac{\partial}{\partial t} \epsilon_0 E_{\text{frei}} \\ \nabla \cdot \epsilon_0 E_{\text{geb.}} &= \rho_{\text{geb.}} & \nabla \times \left(\frac{B_{\text{geb.}}}{\mu_0}\right) &= J_{\text{geb.}} + \frac{\partial}{\partial t} \epsilon_0 E_{\text{geb.}} \end{aligned} \quad (4)$$

Und nun das Dilemma: Weder Gl. (1) noch Gl. (4) sind im technischen Alltag zu gebrauchen. Denn die Felder wirken immer in ihrer Gesamtheit: Weder eine Hallsonde noch der Rotor in einem Elektromotor unterscheiden zwischen verschiedenen Anteilen des Magnetfeldes. Andererseits misst ein Stromzähler immer nur die von den freien Ladungsträgern getragenen freien Ströme, also einen Anteil der Gesamtladungen und -ströme. Gesucht wird also ein System von Gleichungen, welches die Gesamtfelder in Beziehung zu den freien Teilladungen und Teilströmen bringt. Dieses System erhält man durch Einsetzen von Gl. (3) in Gl. (4). Das Ergebnis,

$$\nabla \cdot \epsilon_0 (E - E_{\text{geb.}}) = \rho_{\text{frei}} \quad \nabla \cdot B = 0 \quad (5)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad \nabla \times \left(\frac{B - B_{\text{geb.}}}{\mu_0}\right) = J_{\text{frei}} + \frac{\partial}{\partial t} \epsilon_0 E_{\text{frei}}$$

ist meist in der folgenden Form bekannt

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\epsilon_0 E + P) &= \nabla \cdot D = \rho_{\text{frei}} & \nabla \cdot B &= 0 \\ \nabla \times E &= -\frac{\partial B}{\partial t} & \nabla \times \left(\frac{B}{\mu_0} - M\right) &= \nabla \times H = J_{\text{frei}} + \frac{\partial D}{\partial t} \end{aligned} \quad (6)$$

und wird oft als „Maxwell'sche Gleichungen für Felder in Materie“ oder auch „makroskopische Gleichungen“ bezeichnet. Diese Gleichungen sind also nicht Kern der Theorie, sondern eine Anwendung der Maxwell'schen Gleichungen (1) auf den

Feldgröße	$H$	$D$	$M$	$P$
Bedeutung	$B_{\text{frei}} / \mu_0$	$\epsilon_0 E_{\text{frei}}$	$B_{\text{geb.}} / \mu_0$	$-\epsilon_0 E_{\text{geb.}}$
Ursache	freie Ströme	freie Ladungen	geb. Ströme	geb. Ladungen

Tabelle 1: Bedeutung der traditionellen Feldgrößen

Spezialfall, dass zwischen freien und gebundenen Ladungen und Strömen unterschieden wird. Der Vollständigkeit halber sei noch darauf hingewiesen, dass sich aus den Gleichungen (3) und (4) auch noch zwei Gleichungen für die gebundenen Ladungen und Ströme gewinnen kann. Es gibt also in Wahrheit sechs „Gleichungen mit Materie“.

Der Vergleich von (5) und (6) ergibt die in *Tabelle 1* gezeigte Bedeutung der Feldgrößen  $H$ ,  $D$ ,  $M$  und  $P$ . Sie alle sind selbst keine Felder, sondern ununterscheidbare Anteile an den beiden Feldern  $E$  und  $B$ . Berechnet man zum Beispiel die Größe  $\mu_0 H$  an einem Punkt, so gibt das Ergebnis an, welchen Beitrag die freien Ströme an dieser Stelle zum Magnetfeld leisten.

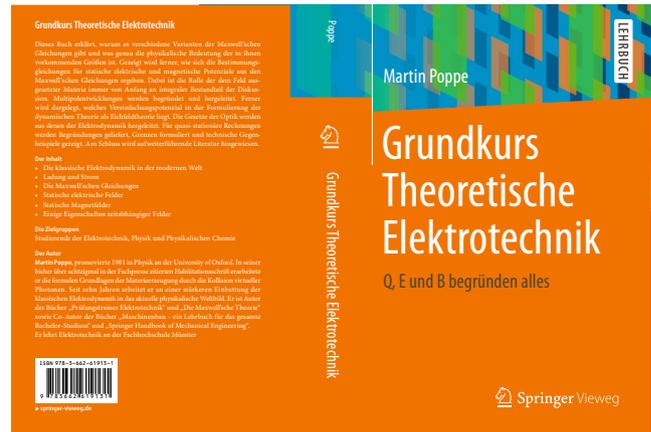
## Feld oder Feldanteil: ein wesentlicher Unterschied

Warum der Unterschied zwischen Feld und Feldanteil tatsächlich bedeutsam ist, kann ein Beispiel aus der Hydrodynamik erhellen. Bei diesem geht es ebenfalls um das Zusammenkommen ununterscheidbarer Anteile aus unterscheidbaren Quellen: Bei Hannoversch Münden vereinigen sich die beiden Flüsse Werra und Fulda zur Weser. Nimmt man einen Liter Wasser aus der Werra so enthält dieser ein Kilogramm Werrawasser. Entnimmt man ihn aber der Weser, so enthält dieser nur ein halbes Kilogramm Werrawasser, denn etwa die Hälfte der Wassermoleküle kommt aus der Fulda. Nun würde deshalb niemand auf die Idee kommen, dass ab Hannoversch Münden das Werrawasser sein spezifisches Gewicht halbiert. Denn die Halbierung der Werrawassermoleküle pro Liter hat als Ursache ausschließlich das Zusammenfließen der beiden Flüsse. Nein, Wasser ist Wasser, egal aus welcher Quelle.

Genauso verhält es sich in der Elektrodynamik: Ein Magnetfeld ist ein Magnetfeld, egal ob von freien oder gebundenen Strömen erzeugt. Der Satz „Das  $H$ -Feld hat Pole“ beruht auf dem gleichen Missverständnis wie die Aussage „unterhalb von 122 m über dem Meeresspiegel halbiert Werrawasser seine Dichte.“



Prof. Martin Poppe, D. Phil. oxon  
 Fachhochschule Münster  
 Fachbereich Elektrotechnik und Informatik



# H1 Gleichstromkabel für die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung

Der folgende Beitrag schließt die Reihe der auf der gemeinsamen Tagung der ETG und des Ausschusses Geschichte der Elektrotechnik 2011 in Berlin gehaltenen Vorträge ab und stellt die damalige Situation der Gleichstromkabel für Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungen dar. In den seither vergangenen 10 Jahren haben sich Entwicklung und Einsatz von Gleichstromkabeln sehr deutlich verändert, indem 320 kV polymerisolierte Gleichspannungskabel zur Anbindung von offshore Windkraftanlage bereits seit einigen Jahren in Betrieb sind, Präqualifikationstests für 525 kV polymerisolierte Gleichspannungskabel erfolgreich abgeschlossen wurden und Planungen für Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungen über ca. 700 km mit 525 kV polymerisolierten Gleichspannungskabeln laufen. Diese technische Weiterentwicklung sowie die heute bestehenden Betriebserfahrungen konnten gewinnbringend in nationale und internationale Standards zur Prüfung der Kabelsysteme einfließen.

## 1. Einleitung

Das erste Energiekabel für die Versorgung von Beleuchtungsanlagen mit Gleichstrom wurde 1880 in Berlin von der Firma Siemens & Halske gefertigt und verwendete Guttapercha, eine Art Kautschuk, als Isoliermedium, das allerdings den großen Nachteil hatte, bereits bei ca. 50° C weich zu werden [1]. Die sich daran anschließende Entwicklung der Energiekabel beschränkte sich auf die Wechselspannungstechnik, da so leicht mit Hilfe des Transformatorprinzips hohe Spannungen erzeugt werden und somit eine hohe Leistung bei relativ geringen Strömen übertragen werden konnte. Der Einsatz von mehreren Wechselstromsystemen, das sich als Drehstromsystem mit drei phasenverschobenen Wechselspannungssystemen durchsetzte, erlaubte eine wirtschaftliche Übertragung der Leistung, da auf eine Mitführung des Nullleiters verzichtet werden konnte. In der Kabeltechnik führte das zu der Entwicklung von sogenannten Gürtelkabeln, bei denen drei isolierte Leiter in einem Gürtel zusammengefasst wurden [1]. Der Nachteil dieses Kabeltyps war die Feldstärkeverteilung zwischen den einzelnen Leitern, wie es in Bild 1 zu sehen ist. Eine erhebliche Verbesserung konnte durch die Einführung des sogenannten Höchststädter Kabels erreicht werden, indem um jeden Leiter

eine leitfähige Folie gelegt wurde, so dass sich ein koaxiales elektrisches Feld für jeden Leiter ergab, was eine Vergleichmäßigung des elektrischen Feldes bewirkte und somit eine Erhöhung der Spannung zuließ.

Die Entwicklung der Kabelisolierung ging dann mit der Einführung von Öldruckkabeln zur Vermeidung von Teilentladungen im Öl-Papier-Dielektrikum in den Jahren 1924/1926 weiter und es wurden Spannungen von über 100 kV erreicht [1], [2]. Das erste Hochspannungskabel mit polymerer Isolierung wurde 1944 mit Polyvinylchlorid (PVC) als Isolierstoff hergestellt, wobei allerdings die Spannungsebene 6 kV betrug. Später wurden dann PVC-Kabel bis zu einer Spannung von 20 kV eingesetzt. Aber die Einführung von Polyethylen (PE) und später vernetztem Polyethylen (VPE) führte zu einem mehr oder weniger vollständigen Ersatz von PVC durch VPE als Isolierstoff für Hochspannungskabel. Das erste VPE-Kabel für eine Spannungsebene von 20 kV wurde 1968 hergestellt [1]. Die weiteren Entwicklungen, insbesondere in der Extrusionstechnik für das VPE mit der Einführung der Dreifachextrusion, die innere Leitschicht aus leitfähigem VPE, Isolierung aus VPE und äußere Leitschicht aus leitfähigem VPE, führten dazu, dass heute VPE-Kabel für Wechselspannung bis zu der Spannungsebene von 500 kV zur Verfügung stehen [3].

Kabel für die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ) wurden erst dann gebraucht, nachdem es mit Hilfe von Quecksilberdampfventilen möglich war, auch hohe Gleichspannungen zu erzeugen. Die erste Planung für ein Gleichstromkabel für die HGÜ zwischen dem Kraftwerk Elbe bei Dessau und Berlin-Marienfelde im Jahr 1941 basierte auf Entwicklungen, die im Hochspannungsinstitut der TU Braunschweig durchgeführt wurden. Die Planung umfasste eine bipolare Verbindung mit einer Spannung von 200 kV. Diese Anlage ging aber infolge der Kriegereignisse nie in Betrieb, sondern wurde ab 1951 für eine HGÜ-Verbindung Kashira – Moskau in der UdSSR eingesetzt, mit einer Spannung von 200 kV und einem Einleiter-Massekabel mit einem Leiterquerschnitt von 150 mm<sup>2</sup> bei einer Übertragungsleistung von 60 MW. Das erste Seekabel für eine HGÜ wurde 1954 für die Verbindung Schweden – Gotland (Dänemark) eingesetzt und übertrug eine Leistung von 20 MW bei einer Spannung von 100 kV. Die Länge der Kabelstrecke betrug 98 km, als Isoliersystem wurde eine Masse-Papier-Isolierung verwendet [2]. 2008 ging die Gleichstromverbindung Norwegen – Niederlande (NorNed) mit einer Kabellänge von 580 km und einer Übertragungsleistung von 700 MW bei einer Spannung von ± 450 kV in Betrieb. Die Verbindung wurde bipolar mit zwei Kabeln ausgeführt und als Isoliersystem wurde Masse-Papier eingesetzt. Die Länge der weltweiten Gleichstromkabel ist im Vergleich zu Wechselspannungskabeln gering, aber Überlegungen für ein zukünftiges überlagertes HGÜ-Netz, die vielfachen Möglichkeiten der Gleichspannungserzeugung durch die Leistungselektronik und die Anbindung von Offshore-Windenergieanlagen über Gleichspannungssysteme lassen die Bedeutung der Gleichstromkabel ständig wachsen.

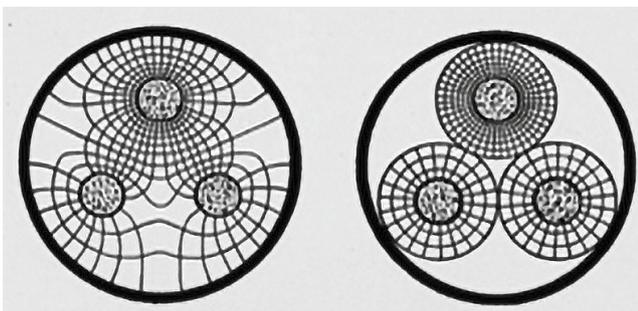


Bild 1: Feldverteilung bei Kabeln [1]

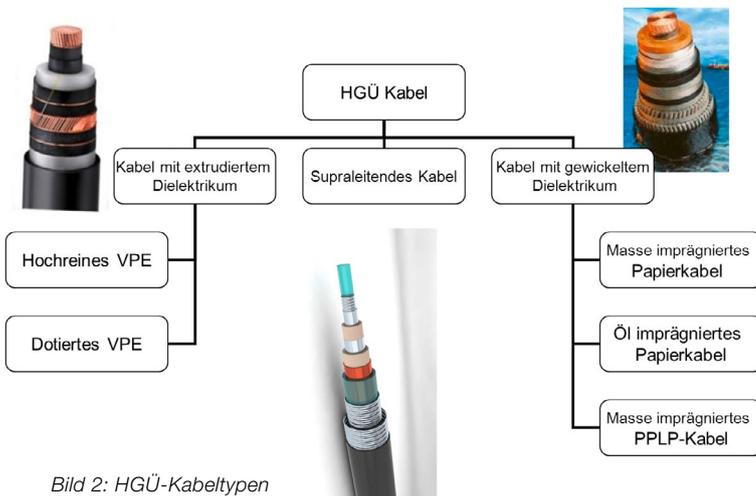


Bild 2: HGÜ-Kabeltypen

## 2. Gleichstromkabeltypen

Die Kabel für Gleichstrom lassen sich vereinfacht in zwei Typen unterscheiden: Kabel mit polymerem extrudiertem Dielektrikum und Kabel mit Flüssigkeit-Feststoff-gewickeltem Dielektrikum. Eine Ausnahme bildet dabei das supraleitende Kabel, das bislang noch nicht zum Feldeinsatz gekommen ist. Kabel mit polymerem Dielektrikum haben vernetztes Polyethylen als Isolierstoff, wobei noch zwischen hochreinem und dotiertem Polyethylen unterschieden werden kann.

Bei Kabeln mit gewickeltem Dielektrikum kommt Masse oder Öl in Verbindung mit Papier als Isolierung zum Einsatz oder Masse mit laminiertem Polypropylen-Papier (PPLP) [4]. Bild 2 zeigt schematisch die Aufteilung der Kabel nach der Art des Dielektrikums und typische Ausführungsformen.

## 3. HGÜ-Systeme

Der Einsatz von Kabeln in der HGÜ-Technik ist sehr eng mit der Technologie der Umrichter verbunden, da das polymere Dielektrikum sehr viel empfindlicher auf Polaritätswechsel reagiert als das gewickelte Dielektrikum. Die Gleichrichtung der

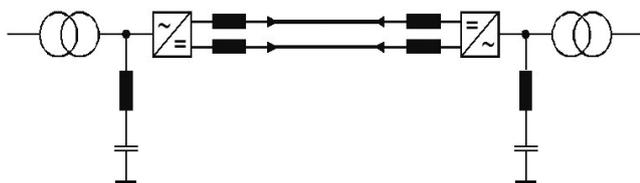


Bild 3: Vereinfachtes Ersatzschaltbild einer netzgeführten HGÜ mit Gleichstromzwischenkreis (Kabelinduktivitäten glätten)

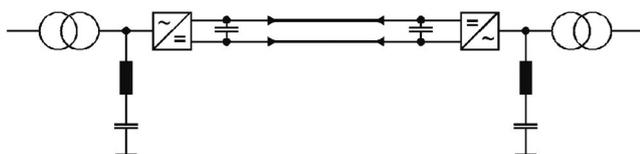


Bild 4: Vereinfachtes Ersatzschaltbild einer selbstgeführten HGÜ mit Gleichspannungszwischenkreis (Kabelkapazitäten glätten)

Wechselspannung durch Thyristoren ist netzgeführt und benötigt starke Wechselspannungssysteme. Thyristoren können unter bestimmten Bedingungen eingeschaltet werden, benötigen aber zum Ausschalten einen Stromnulldurchgang (Bild 3).

Eine Umkehr des Leistungsflusses wird bei dieser HGÜ durch Umpolung der Spannung erreicht, was zu einer Änderung der Polarität des Leiters im Kabel führt. Die geringe Empfindlichkeit des Öl-Papier- oder Masse-Papier-Dielektrikums gegenüber dem Polaritätswechsel des Leiters führte dazu, dass diese Technik eine breite Anwendung fand. Die aus der Fertigung der Wechselspannungskabel mit diesem Dielektrikum vorhandene Erfahrung konnte auch bei der Herstellung von Gleichstromkabelstrecken insbesondere als Seekabel seit vielen Jahren in Betrieb sind.

Die Entwicklung der Leistungselektronik mit Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) führte zu einer neuen selbstgeführten HGÜ-Technologie mit einem Gleichspannungszwischenkreis (Bild 4). Mit dieser Technologie sind monopolare oder bipolare Ausführungen möglich. Die Umkehr des Energieflusses wird durch die Umkehr des Stromflusses und nicht der Polarität der Spannung erreicht. Damit war es möglich, auch Kabel mit polymerem Dielektrikum einzusetzen, da die Empfindlichkeit des polymeren Dielektrikums gegenüber Polaritätswechsel des Leiters nicht mehr beachtet werden muss.

Als Beispiel für den Einsatz von Gleichspannungskabeln bei netzgeführten Stromrichtern soll die Kabelverbindung von Norwegen nach den Niederlanden (NorNed) dienen. Das NorNed-Kabel verwendet als Isoliersystem Masse-Papier und wird bei einer Spannung von  $\pm 450$  kV betrieben, mit einer Leistung von 700 MW und einer Länge von 580 km. Als Beispiel für eine Kabelverbindung mit selbstgeführten Stromrichtern ist die Verbindung in der Bucht von San Francisco zu nennen. Das Kabel ist mit 88 km deutlich kürzer, wird bei einer Spannung von  $\pm 200$  kV und einer Leistung von 400 MW betrieben, hat aber eine VPE-Isolierung, die bei dieser Technologie der Stromrichter möglich ist.

## 4. Besonderheiten polymerisolierter Gleichspannungskabel

Die Verteilung der elektrischen Feldstärke in einer coaxialen Anordnung, wie bei einem Kabel, ist bei Wechselspannung von der Permittivität  $\epsilon$  und bei Gleichspannung von der Leitfähigkeit  $\kappa$  abhängig. Die elektrische Feldstärke ist an der stärker gekrümmten Elektrode, hier dem Leiter des Kabels, am höchsten und nimmt zum Schirm hin ab, wenn lediglich die

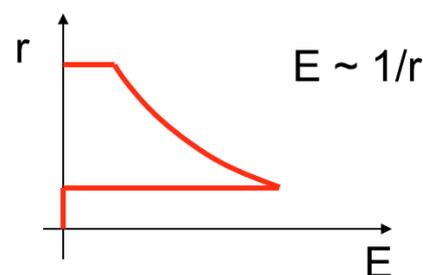


Bild 5: Vereinfachter Verlauf der elektrischen Feldstärke in Abhängigkeit des Radius

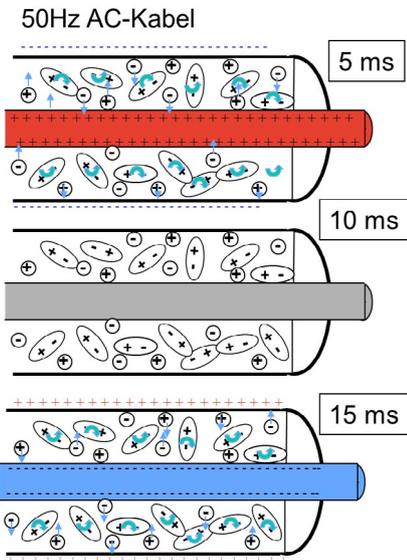


Bild 6a: Dipolbewegung im polymeren Isoliersystem mit koaxialer Leiteranordnung bei 50 Hz Wechselspannung

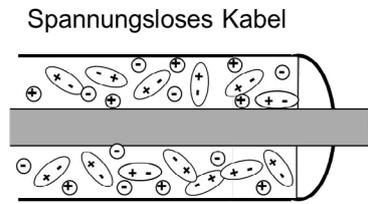
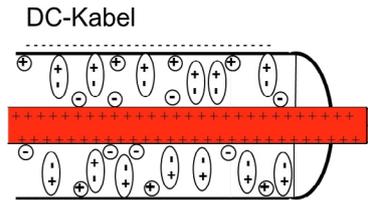


Bild 6b: Raumladungsbildung in polymerem Isoliersystem bei Gleichspannungsbeanspruchung



geometrische Feldstärkeverteilung, ohne Beachtung der Materialeigenschaften des Isolierstoffes und der Temperatur, in Betracht gezogen wird. Bild 5 zeigt vereinfacht den Verlauf der elektrischen Feldstärke in Abhängigkeit des Radius des Kabels. In polymeren Isolierstoffen sind aber Dipole vorhanden, die sich im elektrischen Feld ausrichten und sich bei Wechselspannungsbeanspruchungen ständig mit der Frequenz der anliegenden Wechselspannung umpolen und somit Verluste verursachen (Bild 6a).

Bei Gleichspannung erfolgt die Ausrichtung der Dipole nur am Anfang. Gleichzeitig ist eine Trennung der freien Ladungsträger zu erkennen, die sich zu der jeweiligen Elektrode bewegen und dort im Isoliermaterial als sogenannte Raumladung verbleiben können (Bild 6b). Eine vereinfachte Darstellung der elektrischen Feldverhältnisse in einer Anordnung mit Anode und Kathode erlaubt eine Bewertung der Situation in einem polymerisolierten Kabel. Das durch die anliegende Spannung im Isolierstoff verursachte Feld ist zunächst von der Anode zur Kathode gerichtet. Durch ungleichnamige Ladungen vor den jeweiligen Elektroden erfolgt eine lokale Felderhöhung vor den Elektroden, was zu einer erhöhten elektrischen Beanspruchung des Isoliersystems in diesen Bereichen führt (Bild 7, linke Seite), da eine Überlagerung des äußeren Feldes mit dem durch Raumladungen erzeugten elektrischen Feld auftritt. Gleichnamige Ladungen vor den jeweiligen Elektroden führen hingegen zu einer Feldschwächung in diesen Bereichen, da dem ursprünglichen elektrischen Feld ein weiteres durch die Raumladungen verursachtes Feld überlagert wird, das aller-

dings nicht lokal, sondern im gesamten Isolierstoffbereich parallel zum äußeren Feld liegt.

Die Raumladungen und deren Beweglichkeit sind bei Gleichspannungsbeanspruchung von Bedeutung und hängen von der Möglichkeit des Ladungsaustausches zwischen Isolierstoff und Elektrode ab, der wiederum von der elektrischen Feldstärke und der Temperatur beeinflusst wird. Zusätzlich wirkt auch noch die Ionisierbarkeit der Moleküle im polymeren Isolierstoff. Die Berücksichtigung der verschiedenen Effekte führt bei einem Gleichspannungskabel zu den in Bild 8 exemplarisch dargestellten Verteilungen der elektrischen Feldstärke.

Bei konstanter Leitfähigkeit des polymeren Isolierstoffes ergibt sich die erwartete Verteilung der elektrischen Feldstärke mit dem höchsten Wert am Leiter und einer Abnahme in Richtung Schirm. Eine derartige Verteilung der elektrischen Feldstärke ist auch bei Wechselspannungskabeln zu beobachten, da die Permittivität gleichmäßig verteilt ist und sich mit der Temperatur nur gering verändert.

Wenn sich bei der elektrischen Beanspruchung des Kabels der Leiter erwärmt und die Wärme über den polymeren Isolierstoff zum Kabelmantel transportiert werden muss, dann ändert sich die Leitfähigkeit sehr stark und die Verteilung der elektrischen Feldstärke kann sich in der Art einstellen, dass die elektrische Feldstärke am Leiter niedriger ist als die dort ursprünglich vorhandene elektrische Feldstärke und die elektrische Feldstärke am Schirm höher ist als am Leiter

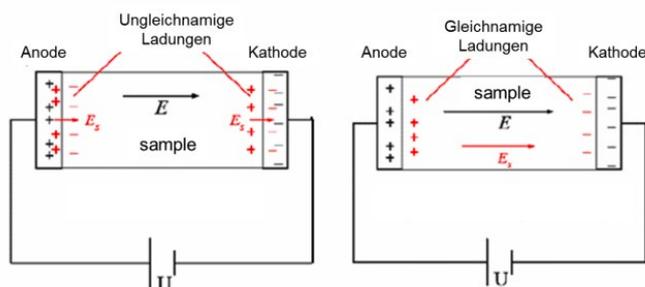


Bild 7: Einfluss der Raumladungen

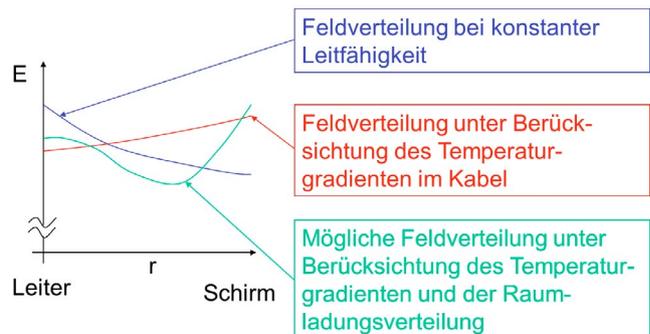


Bild 8: Elektrische Feldstärkeverteilung

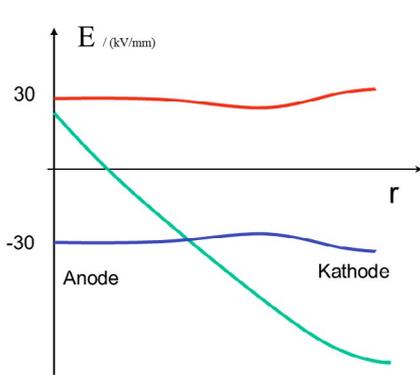


Bild 9: Exemplarische Feldverteilung;  
rote Linie – konstante Feldstärkeverteilung bei dauernder positiver Gleichspannung;  
blaue Linie – konstante Feldstärkeverteilung bei dauernder negativer Gleichspannung;  
grüne Linie – mögliche Feldstärkeverteilung bei Polaritätswechsel

und bei ungünstigen Bedingungen sogar höher sein kann als die ursprünglich am Leiter aufgetretene höchste Feldstärke (Bild 8). Wenn neben der Temperatur auch noch der Einfluss der Raumladungen berücksichtigt wird, dann kann sich der Verlauf der elektrischen Feldstärke noch weiter ändern und – je nach Isoliersystem und Temperaturverlauf – am Schirm oder am Leiter sehr hohe Werte annehmen. Dieser Effekt ist in Bild 9 schematisch besonders herausgestellt, indem die elektrische Feldstärke zwischen Anode (hier Leiter) und Kathode (hier Schirm) in Abhängigkeit des Radius bei langer Einwirkung einer Gleichspannung, d. h. einige Stunden nach einer Umpolung und direkt während der Umpolung, dargestellt sind. Die kritische Situation mit der höchsten Feldstärke am Schirm ist unmittelbar nach der Umpolung zu erwarten, da dann eine extreme Feldstärkeerhöhung infolge der Raumladungen und der entgegengesetzten Polarität der nahen Elektrode auftritt.

Für den Einsatz in Gleichspannungsanlagen ist bei der Entwicklung von Hochspannungskabeln für Spannungen oberhalb 300 kV zu beachten, dass für eine Minimierung der Verluste und damit zum Einhalten der thermischen und elektrischen Stabilität bei hohen Betriebstemperaturen eine geringe Grundleitfähigkeit erreicht wird. Es muss also eine Kontrolle der Beweglichkeit der im Isolierstoff verbleibenden Ladungsträger erfolgen und damit eine Kontrolle der elektrischen Feldverteilung und der Grenzflächen zwischen Leiter und Isolierstoff.

### 5. Zukünftige Entwicklungen

Die Gleichspannungstechnik wird aufgrund der Fähigkeiten der Leistungshalbleiter an Bedeutung gewinnen und damit werden in Zukunft auch Gleichstromkabel erforderlich sein. Im Bereich der Kabel mit Flüssigkeit-Feststoff-gewickeltem Dielektrikum werden Kabel mit PPLP-Isolierung und -Masse als Isolierstoff ihre Anwendung finden, wobei Spannungen bis 750 kV möglich sein werden.

Im Bereich der polymeren Isolierstoffe werden zurzeit Gleichstromkabel bis zu einer Spannung von 320 kV hergestellt; sie sollen demnächst in Betrieb gehen [5]. Erfahrungen liegen also im Bereich der Gleichstromkabel mit polymerer Isolierung nur begrenzt vor, so dass erst der zukünftige Betrieb von Offshore-Windkraftanlagen, bei denen Gleichstromkabel bis 320 kV zum Einsatz kommen werden, Informationen über die Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit von polymeren Gleichstromkabeln bringen wird.

### 6. Prüfanforderungen an Kabel mit polymerer Isolierung

Die Prüfanforderungen für Gleichstromkabel wurden für einen Spannungsbereich bis 250 kV in einer CIGRE Broschüre [6] zusammengestellt. Für einen Typtest wurde ein Zeitraum von ca. 4 Wochen veranschlagt, innerhalb dessen Prüfungen bei positiver und negativer Polarität jeweils mit einem 24-stündigen Lasttest vorgesehen waren, die aus jeweils 8 Stunden Erwärmungsdauer bis zu einer vom Hersteller festgelegten maximalen Leitertemperatur und 16 Stunden Abkühlungsdauer bestanden. Die angelegte Spannung sollte die 1,85-fache Nennspannung sein.

In dieser Broschüre wird auch ein sogenannter Prequalification-Test beschrieben, für den eine Zeitdauer von ca. 1 Jahr veranschlagt wird. Der Prüfling soll dabei Kabel mit einer Länge von ca. 100 m sein, mit allen dazugehörigen Komponenten, wie Kabelendverschlüsse und Kabelmuffen. Die angelegte Spannung soll das 1,45-fache der Nennspannung betragen (Bild 11).

CIGRE hat die Broschüre TB 219 überarbeitet und eine neue Broschüre TB 496 *Recommendations for Testing DC Extruded Cable Systems for Power Transmission at a Rated Voltage up to 500 kV* [7] veröffentlicht. Diese Broschüre beschreibt ausführlicher und zum Teil mit höheren Anforderungen die Prüfungen für Gleichstromkabel mit polymerer Isolierung für Spannungen bis 500 kV. Die Prüfungen werden auch detailliert spezifiziert für netzgeführte oder selbstgeführte

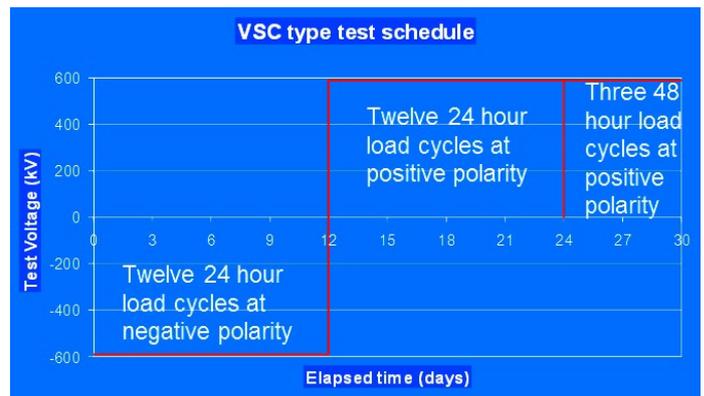


Bild 10: Zeitlicher Verlauf der Typprüfung eines Kabels mit selbstgeführten Stromrichtern (VSC) [6]

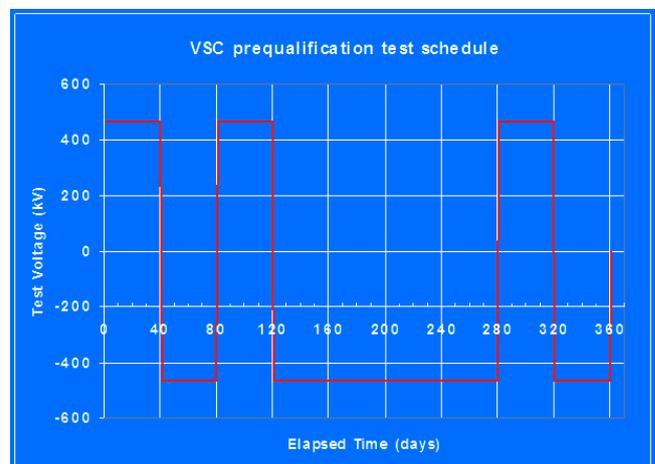


Bild 11: Zeitlicher Ablauf der Prequalification [6]

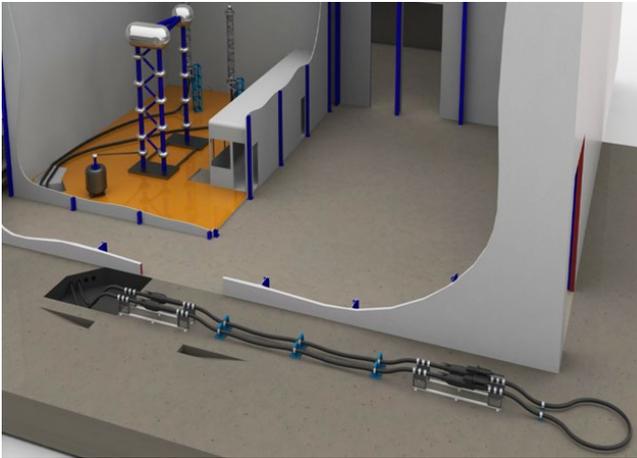


Bild 12: Simulation einer Prequalification-Prüfung mit verschiedenen Installationsvarianten

Stromrichteranlagen, da die Spannungsbeanspruchungen bzw. elektrischen Feldstärkeverhältnisse bei Umkehr des Leistungsflusses anders sind. Die Prüfungen erfordern einen erheblichen Aufwand im Hinblick auf Aufbau des Prüflings und Laboreinrichtungen (Bild 12).

## 7. Supraleitende Kabel

Die durch die thermischen Bedingungen begrenzte Übertragungsleistung eines Hochspannungskabels mit Kupferleiter kann durch den Einsatz eines Kabels mit sogenanntem Hochtemperatur-Supraleiter um ein Vielfaches gesteigert werden. Der Widerstand des Leiters fällt ab einer bestimmten Temperatur auf Null, so dass die Verluste vernachlässigbar sind; allerdings ist in der Leistungsbilanz die Kühlleistung zum Erreichen und Erhalten des supraleitenden Zustands des Leiters zu berücksichtigen. Die kritische Temperatur  $T_c$  liegt je nach Leitermaterial bei ca. 80 K [4].

Das supraleitende Kabel kann für Wechselstrom und für Gleichstrom eingesetzt werden. Die Isolierung erfolgt durch ein gewickeltes PPLP, das mit flüssigem Stickstoff imprägniert wird. Das Kühlmedium wird unterhalb des Siedepunktes betrieben, um Blasen zu vermeiden, die mögliche Quellen für

Teilentladungen darstellen. Um auch bei einem supraleitenden Leiter eine hohe Leistung zu erhalten, wird neben dem hohen zulässigen Strom auch eine Spannung im Bereich der Hochspannung eingesetzt. Das erste supraleitende Kabel (AC) in der Übertragungs- bzw. Verteilerspannungsebene wurde in New York (Long Island) eingesetzt [8].

Im Hinblick auf die Einsatzmöglichkeiten eines supraleitenden Kabels ist zu beachten, dass Kühlstationen erforderlich sind, die sich beim derzeitigen Entwicklungsstand in einem Abstand von 1 bis 2 km befinden. Für Gleichstromsysteme sind Spannungen im Bereich von 150 kV bis 320 kV angedacht, bei denen Ströme im Bereich von 3,5 kA bis 15 kA zu einer Übertragungsleistung von z. B. 4,5 GW bei einer Spannung von 320 kV und einem Strom von 7 kA führen.

## 8. Literatur

- [1] Speck, Dieter u.a.: *Energiekabel im EVU, Entwicklung, Technik, Anwendung, Prüfung und Betriebserfahrung der Energiekabel vom Niederspannungs- bis zum Höchstspannungsnetz*. expert-Verlag 1994, ISBN 3-8169-1064-5
- [2] Peschke, Egon F.; Olshausen, Rainer von: *Kabelanlagen für Hoch- und Höchstspannung. Entwicklung, Herstellung, Prüfung, Montage und Betrieb von Kabeln und deren Garnituren*. Publicis-MCD-Verlag 1998, ISBN 3-89578-057-X
- [3] Nexans Druckschrift: *Hochspannungskabel zur Energieübertragung*. Hannover, 2009
- [4] Nexans Druckschrift: *Nexans Superconducting Cable Systems*, Hannover, o.J.
- [5] Benz, Thomas; Görner, Raphael: *Freileitungen und Erdkabel. Möglichkeiten der Stromübertragung mit Gleichstrom*. Vortrag der Veranstaltungsreihe „Technik-Dialog“ der Bundesnetzagentur, 17.-18. April 2012, Hannover
- [6] CIGRE: *Recommendations for Testing DC Extruded Cable Systems for Power Transmission at a Rated Voltage up to 250 kV*. TB 219, 2003
- [7] CIGRE: *Recommendations for Testing DC Extruded Cable Systems for Power Transmission at a Rated Voltage up to 500 kV*. TB 496, 2012
- [8] Maguire, J.F., Schmidt, F., Hamber, F., and Welsh, T.E., *Development and Demonstration of a Long Length HTS Cable to Operate in the Long Island Power Authority Transmission Grid*, IEEE Trans. On Appl. Superconductivity, Vol. 15, No. 2, 2005, p. 1787 – 1792

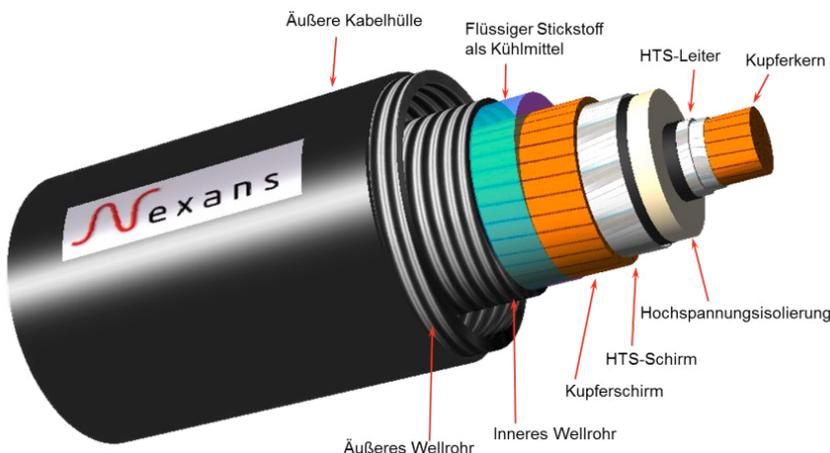


Bild 13: Grundsätzlicher Aufbau eines supraleitenden Kabels für eine Spannung von 138 kV



Prof. Dr. Ing.  
Ernst Gockenbach,  
Gottfried Wilhelm Leibniz  
Universität Hannover,  
Institut für Elektrische  
Energiesysteme

Dr. Christian Frohne, Nexans Deutschland  
Industries GmbH & Co. KG

## H2 100 Jahre Elektrische Antriebe und Leistungselektronik an der TU Braunschweig

Das Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen der Technischen Universität in Braunschweig (IMAB) feiert in diesem Jahr das 100-jährige Bestehen.

### Die Geschichte des IMAB

Die hundertjährige Geschichte des Instituts beginnt im Jahr 1920 mit der Berufung von Prof. Franz Unger auf den zweiten elektrotechnischen Lehrstuhl der Technischen Hochschule zu Braunschweig für die Lehrfächer Elektromaschinenbau, Starkstromanlagen und elektrische Bahnen.

In dem „Plan für die Einrichtung des Instituts für Elektromaschinenbau“ heißt es:

*„Das Institut soll zunächst den Zweck haben, im Anschluss an die Vorlesungen im Elektromaschinenbau die dort theoretisch erörterten Eigenschaften der elektrischen Maschinen im praktischen Betrieb vorzuführen und die Studierenden durch Vornahme eigener Messungen und Untersuchungen mit der Schaltung und dem Verhalten der Maschinen vertraut zu machen.“ ... „Daneben hat das Institut noch eine andere Aufgabe zu erfüllen. Die Hochschule soll ihre Studierenden zu selbstständiger technischer Arbeit erziehen, das kann sie aber nur, wenn ihre Institute selbst Stätten wissenschaftlicher Forschung und technischen Fortschrittes sind. Es muss also die Möglichkeit bestehen, laufend neuartige Maschinen und Apparate zu untersuchen.“*

Im Jahr 1951 emeritierte Prof. Unger und Prof. Kübler übernahm die Leitung des Instituts bis zum Jahr 1961. Im Jahr 1961 übernahm Prof. Weh die Institutsleitung für die nächsten 34 Jahre.

In diesen Zeitraum fällt auch der Umzug des Instituts in das neu errichtete „Haus der Elektrotechnik“ an der Hans-Sommer-Straße 66 in Braunschweig.

Dort wurden dem Institut umfangreiche Räumlichkeiten und technische Ausstattung bereitgestellt. Dies ermöglichte Prof. Weh die Etablierung des neuen Forschungsgebiets der elektrischen Linearantriebe mit Magnetschwebetechnik, die unter anderem zur Entwicklung des Transraps führte.

Im Jahr 1966 wird das Institut um eine Professur für die „Berechnung und Konstruktion elektrischer Maschinen“ erweitert, zunächst besetzt durch Prof. Frohne und von 1968 bis 1993 durch Prof. Eckhardt. Nach dessen Ausscheiden wurde diese Professur mit der Berufung von Prof. Meins thematisch durch das Fachgebiet der Leistungselektronik besetzt, sodass seit diesem Zeitpunkt eine ganzheitliche Forschung und Lehre bezüglich elektromechanischer Energiewandlung gewährleistet ist. Im Jahr 1995 folgte Prof. W.-R. Canders auf Prof. Weh. Seine Forschungsarbeiten lagen in supraleitenden Lagerungen, schnelldrehenden Maschinen und der Einführung der Fahrzeugantriebe am Institut.

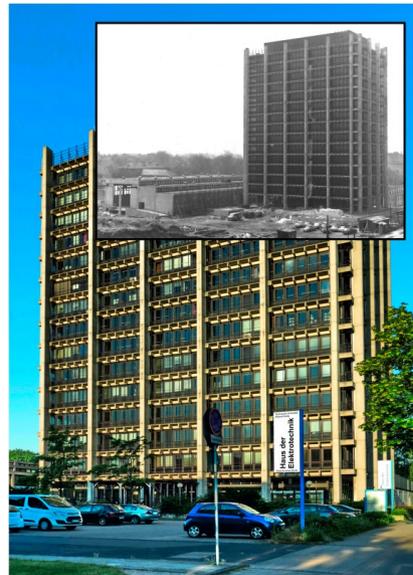


Bild 1: Neubau des Elektrotechnik-Hochhauses der TU-Braunschweig

### Das IMAB heute

Im Rahmen zahlreicher Forschungsprojekte, verbunden mit attraktiven Lehrveranstaltungen betrachten die Wissenschaftler am IMAB leistungselektronische und antriebstechnische Fragestellungen im Umfeld vieler sehr unterschiedlicher Anwendungen. Themen aus den Bereichen elektrische Fahrzeugantriebe, induktive und leitungsgebundene Ladesysteme, Systeme für das elektrifizierte Fliegen sowie Flugzeugbordnetze, aber auch Speichertechnologien wie Schwungradspeicher werden am IMAB theoretisch und praktisch in zahlreichen Forschungsprojekten mit wissenschaftlichen und industriellen Partnern bearbeitet. An all diesen Fragestellungen arbeiten Doktorand\*innen und viele Studierende in ihren Abschlussarbeiten, unterstützt von mehreren Auszubildenden und Mitarbeiter\*innen in Technik und Verwaltung. Dabei teilt sich das Institut nach wie vor auf zwei Lehrstühle auf, die jedoch interdisziplinär zusammenarbeiten. Dies sind die Lehrstühle für Elektrische Antriebssysteme unter dem Institutsleiter Prof. Markus Henke und der Lehrstuhl für Leistungselektronik unter Prof. Regine Mallwitz.

Ein großes Forschungsfeld am IMAB ist die Elektromobilität. Hier werden grundsätzliche Fragestellungen bezüglich des Ladens, der Energieverteilung im Bordnetz und der Elektrifizierung von mobilen Antriebssträngen betrachtet. Dabei werden neue Ansätze zu den verbauten elektrischen Antrieben und leistungselektronischen Systemen erforscht, wie zum Beispiel das induktive Laden von Fahrzeugen, hochkompakte und -effiziente On-Board-Lader, der Integration von Leistungselektronik in die elektrische Maschine oder Hochdrehzahlantriebe.

Der Entwurf elektrischer Maschinen beinhaltet heute stark interdisziplinäre Fragestellungen, die nur in einem ganzheitli-

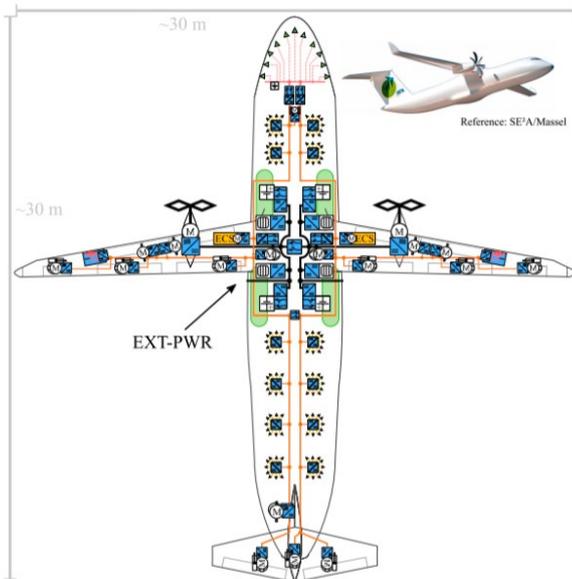


Bild 2: Elektrische Energieversorgung eines Regionalflugzeugs mit E-Antrieb

chen systemischen Ansatz gelöst werden können. Am IMAB erfolgt der Entwurf daher im Team vieler Fachexpert\*innen. Für elektromagnetische, thermische und systemorientierte Untersuchungen werden Berechnungsverfahren und Tools eingesetzt, die im Rahmen vieler Forschungsprojekte entwickelt und optimiert werden. Die am IMAB realisierten Maschinenprototypen werden durch eigene leistungselektronische Systeme geregelt angesteuert. In den Antrieb fließen damit neueste Technologien zur Steigerung von Effizienz, Performance und Leistungsdichte ein. Eine detaillierte Vermessung und Prüfung der Antriebsprototypen erfolgt auf eigenen automatisierbaren Prüfständen bis zu Leistungen von 300 kW. Einige Forschungsprojekte, die am IMAB aktuell im Bereich Elektromobilität bearbeitet werden, sind nachfolgend kurz beschrieben.

Innerhalb des DFG Cluster of Excellenz *SE<sup>2</sup>A – Sustainable and Energy-Efficient Aviation* wird auf leistungselektronischer Seite das Electrical Power Supply System eines All Electric Aircrafts untersucht. Es stehen zurzeit mehrere Ansätze im



Bild 3: Rapid Prototyping System für Batterielader

Fokus der wissenschaftlichen Arbeiten: Das Hochvoltbordnetz und die Einbindung supraleitender Elemente. Für die harschen Umgebungsbedingungen werden in Versuchen passive sowie aktive Bauelemente unter den Randbedingungen belastet, Dimensionierungsgesetze abgeleitet und eine auf Zuverlässigkeitsaspekten basierende Dimensionierungsmethodik für leistungsdichte Leistungselektronik erhoben. Parallel erfolgt auf Elektromaschinenseite die Betrachtung leistungsdichter Flugantriebe. Der Schwerpunkt der Forschung liegt auf der Erhöhung der Leistungsdichte durch effiziente Maschinenkühlung mit einer Gesamtsystembetrachtung einschließlich der Rückkühlung. Darüber hinaus finden Untersuchungen, Modellbildungen und Versuche zu supraleitenden Antrieben statt.

Ein weiteres Projekt (*EPROREF*) beschäftigt sich damit, einen vollständigen hochkompakten und hocheffizienten elektrischen Antriebsstrang, vom Wechselrichter bis zum Propeller zu entwerfen, aufzubauen und zu vermessen. Am IMAB entsteht dafür ein auf Siliziumkarbid basierender, sechsphasiger Wechselrichter mit einer Leistung von 200 kW.

Ein Forschungsprojekt im Rahmen der Elektromobilität ist das von der DBU geförderte Projekt „*Linearaktuatoren mit elektrischer Leistungsversorgung*“, in welchem die Elektrifizierung eines Nutzfahrzeuges untersucht wird. Die Herausforderung besteht darin, im vorhandenen Bauraum von hydraulisch dominierten Stellgliedern ein konkurrenzfähiges Antriebssystem zu entwickeln. Gelingt dies, profitiert das Gesamtsystem von einer höheren Energieeffizienz als auch der Minimierung der Umweltgefährdung durch Entfall der Leckagegefahr.

In anwendungsnahen Projekten werden die Auswirkungen schneller Schaltvorgänge auf die Isolation der elektrischen Maschine untersucht. Hierzu werden die durch hohe Spannungsgradienten ausgelösten Vorgänge mathematisch modelliert und im Versuch mittels Teilentladungsmessungen verifiziert.

In einem weiteren Projekt, *LISA4CL*, geht es um den Entwurf, den Aufbau und die Erprobung eines induktiven Ladesystems für elektrische Nutzfahrzeuge im Bereich der Logistik. Bei Leistungsklasse von 22 kW und mehr sollen die elektrischen Kleintransporter effizient und kontaktlos geladen werden.

Der systematische Vergleich verschiedener Leistungselektronik-Konzepte für das kabelgebundene Laden steht im

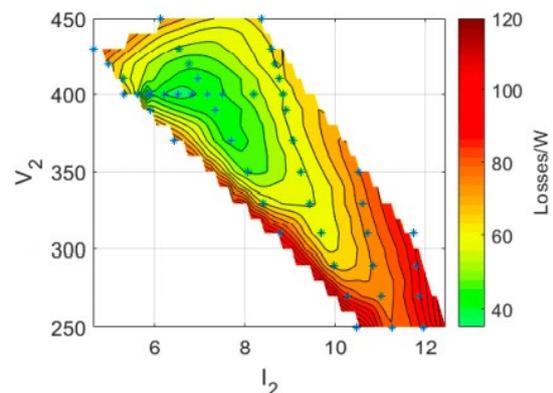


Bild 4: Verlustübersicht einer Dual Active Bridge im Batterielader

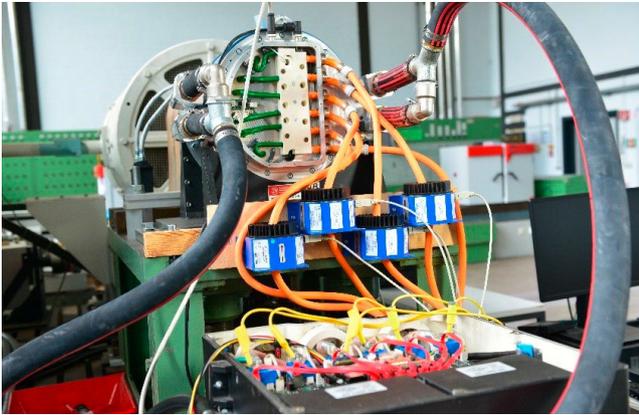


Bild 5: Vermessung der sechsphasigen E-Maschine aus dem IMAB-Racer

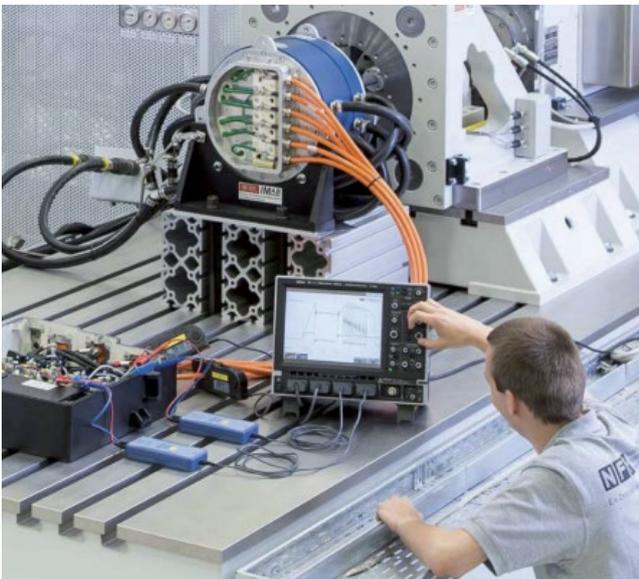


Bild 6: Prüfstandsarbeiten am Niedersächsischen Forschungszentrum Fahrzeugtechnik (NFF)

Antriebsstrang	Antriebsmaschine	Leistungselektronik	HV-Batterie
Fahrzeugbau	Bordnetz	Ladetechnik	HMI
Regelung	Kühlung	Steuergeräte	Software



Bild 7: Der fahrbereite IMAB-Racer

Projekt *Sysal* im Fokus. Bezüglich Effizienz aber auch Leistungsdichte interessante Konzepte bzw. Schaltungsvarianten können für verschiedene Leistungsbereiche (z. Z. bis 20 kW) systematisch untersucht und verglichen werden.

Ziel des *ARIEL*-Projektes ist die Entwicklung eines hochdrehenden elektrischen Luftverdichters mit Permanentmagneterregung für ein Brennstoffzellensystem. Dabei soll der Luftverdichtermotor hinsichtlich Bauraum, Wirkungsgrad und Leistungsfähigkeit optimiert werden und somit einen Beitrag zur Kostenreduzierung eines gesamten Brennstoffzellensystems für mobile Anwendung liefern. Untersuchungen zur Effizienz und Kompaktheit des Wechselrichters innerhalb des Antriebs runden das Projekt ab. Dafür werden systematisch verschiedene schnell schaltenden Leistungshalbleiter und ihr Einsatz in geeigneten Schaltungstopologien in Theorie und Praxis verglichen.

Um die Untersuchungen und die Auslegung der Antriebssysteme auch überprüfen zu können, verfügt das IMAB in seiner Maschinenhalle über zahlreiche Prüfstände, die ein breites Leistungs- und Drehzahlenspektrum abdecken. Darüber entstand mit dem neu hinzugekommenen Standort am Niedersächsischen Forschungszentrum für Fahrzeugtechnik (NFF) die Möglichkeit, mit zwei vollautomatisierbaren Prüfständen neuester Prüfstandstechnologie auch auf die ständig steigenden Anforderungen der Elektromobilität reagieren zu können. Dabei bieten die Prüfstände beispielsweise die Möglichkeit die Prüflinge thermisch zu konditionieren, automatische Prüfläufe zur Vermessung von Kennfeldern abzufahren oder aber auch Schwingungsmessungen durchzuführen.

Zur besseren Verknüpfung von Forschung und Lehre zur Elektromobilität, wurde mit dem *IMAB-Racer* eine instituts-eigene fahrbare Plattform entwickelt, die Studierenden und Wissenschaftlern als praxisnaher Erprobungsträger für Antriebs- und Ladetechnologien dient.

Dabei wurden viele der Komponenten des Fahrzeuges von Studierenden entwickelt, denen dieses Projekt einen wertvollen, praktischen Einblick in die Herausforderungen der Elektromobilität bietet. Der *IMAB-Racer* basiert dabei auf einem Kit-Car, welches mit selbst entwickelten Komponenten wie dem Antriebsakku, einem auf SiC-Technologie basierenden Antriebswechselrichter, der Bordnetzversorgung sowie einer sechsphasigen permanentmagneterregte Synchronmaschine ausgestattet wurde.

Ein weiteres Forschungsfeld, welches am IMAB bearbeitet wird, greift Themen der Energiewende auf. Hierbei wer-



Bild 8: Blick unter die Karosserie

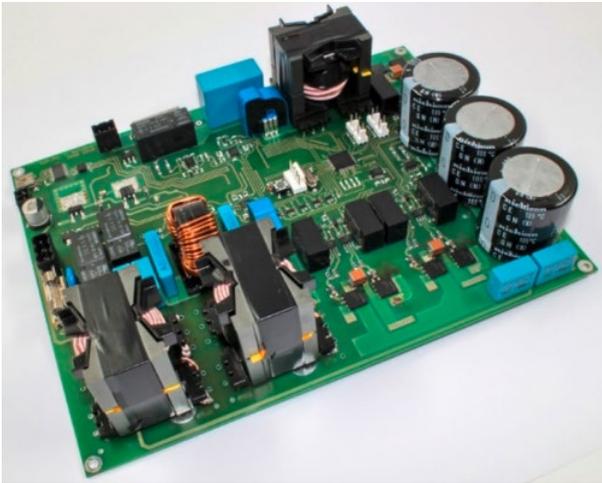


Bild 9: Ein auf GaN basierender PV-Inverter

den Fragestellungen zur Energieumformung und -speicherung aber auch der Energieeffizienz betrachtet.

Im Forschungsprojekt *enersphere* wurden dabei supraleitend gelagerten Schwungmassenspeicher konstruktiv ausgelegt, realisiert und erprobt.

Weiterhin reicht das Spektrum über Leistungselektronik für hocheffiziente und besonders kompakte Bordnetzrichter für Flugzeuge bis hin zur Entwicklung neuartiger Energieverteilungssysteme zur effizienteren Anbindung von Erneuerbaren Energien, Batteriespeichersystemen und Ladesäulen.

Ein beispielhaftes Projekt aus diesem Forschungsbereich ist das BMWi-geförderte *NetProsum2030*. In diesem Projekt beschäftigt sich das IMAB mit einem auf SiC-basierenden Gesamtsystem für einen normalen Haushalt zur effizienten Kopplung von PV-Anlage, einem HV-Speichersystem aus 2nd-Life-Traktionsbatterien, einer DC-Schnellademöglichkeit und dem öffentlichen Versorgungsnetz. Dabei unterscheidet sich das System von herkömmlichen PV-Speicher-Anordnungen vor allem durch den transformatorlosen Aufbau und die 800 V DC-Kopplung der modular aufgebauten Komponenten. Im BMWi-geförderten Projekt *Ide3A1* wird das Potenzial zur Effizienzsteigerung von WBG-Halbleitern in Industrieantrieben untersucht. Dabei werden auch Filtertechnologien in die Betrachtung einbezogen.

Hier wird auch erkennbar, dass eine der Kernkompetenzen am IMAB in der Applikation von Wide-Bandgap-Halbleitern wie Siliziumcarbid (SiC) oder Galliumnitrid (GaN) besteht. Es werden einerseits allein die Halbleiter, Treiberschaltungen und das Design der Kommutierungszellen untersucht, und andererseits Schaltungen entworfen, aufgebaut untersucht, die mithilfe dieser Halbleiter Schaltfrequenzen bis in den Gigahertz-Bereich hinein erreichen. Ziel ist es, hocheffiziente, hochkompakte aber auch zuverlässige und EMV-gerechte Energiewandlung zu ermöglichen. Die durch die Applikation dieser Halbleiter entstehenden Vorteile wie aber auch die daraus resultierenden Herausforderungen, wie das veränderte EMV-Verhalten oder die hochfrequenten Eigenschaften passiver Bauelemente sind dabei Gegenstand der aktuellen Forschungen am IMAB.



Bild 10: Klimakammer und Powercycler im Zuverlässigkeitslabor

Zuverlässigkeit und Lebensdauer stehen schon früh bei der Auswahl von Energiewandlungskonzepten, Topologien und Bauelementen im Fokus. Um hier in frühen Dimensionierungsphasen Aussagen, z.B. auch zu neuen Bauelementen wie SiC- oder auch GaN-Halbleitern treffen zu können, sind verschiedene z.T. lang anhaltende Zuverlässigkeitstest notwendig. Darüber hinaus variieren die Umgebungsbedingungen zwischen den Applikationen. Im kürzlich neu aufgebauten Zuverlässigkeitslabor am IMAB sind nun auch diverse Untersuchungen zu Zuverlässigkeit und Lebensdauer der Leistungselektronikbauelemente und -baugruppen möglich. Derzeit verfügt das IMAB über eine Klimakammer, einen Wechsellastteststand zur definierten Zyklisierung der Halbleiter und einige weitere bei solchen Untersuchungen notwendige Geräte wie Hochspannungsnetzteil, Messwerterfassungen und Steuersequenzteil.

Dieser kleine Einblick in die Aktivitäten und Möglichkeiten des IMAB zeigt, dass bei uns ein breites Spektrum an Forschung und Lehre in den Bereichen Elektromobilität und Energiewende stattfindet. Dadurch hoffen wir, dass wir auch in Zukunft der langjährigen Tradition des nun 100 Jahre alten IMAB gerecht werden können.



Prof. Dr.-Ing. Markus Henke  
TU Braunschweig  
Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe  
und Bahnen  
Lehrstuhl Elektrische Antriebssysteme



Prof. Dr.-Ing. Regine Mallwitz  
TU Braunschweig  
Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe  
und Bahnen  
Lehrstuhl Leistungselektronik

# Neue Veröffentlichungen

## V1 Handbuch Netzintegration Erneuerbarer Energien – Netzanschluss, Stromerzeugungsanlagen und Regelung

**Autor:** Boris Valov

**Verlag:** Springer Vieweg

**Erschienen:** 2. Juli 2020 (1. Aufl.)

**ISBN (print):** 978-3-658-28968-3

**ISBN (eBook):** 978-3-658-28969-0

<https://www.springer.com/de/book/9783658289683>



Im Mittelpunkt dieses Handbuch steht die Integration Erneuerbarer Energien in die elektrischen Netze an Land und im Offshore-Bereich. Dabei werden Netze und Stromerzeugungsanlagen als eine Einheit betrachtet. Unterschiedliche Generatorsysteme, systemtechnische Anforderungen an Stromerzeugungsanlagen und deren Netzrückwirkungen werden in diesem Werk ausführlich beschrieben. Die vorgeschlagenen einfachen Berechnungsverfahren, Gleichungen und Grafiken bilden ein hilfreiches Werkzeug zur Planung des Netzanschlusses, zur Analyse der Netzrückwirkungen und der Auswirkungen auf die bestehenden Netze. Zu den weiteren Inhalten dieses Buches gehören das internationale Glossar zu den wichtigsten, einschlägigen Fachbegriffen, das zwölf-sprachige Wörterbuch aus dem Gebiet der Netzintegration sowie der Anhang mit Beispielen für technische Charakteristiken relevanter Netzbetriebsmittel. Die theoretischen Grundlagen eignen sich besonders für Studierende, Be-

rufsanfänger\*innen und Wissenschaftler\*innen. Die dargestellte Verbindung von Theorie und Praxis ist für Netzbetreiber, Ingenieur\*innen und Fachkräfte von besonderem Interesse. Im Fokus des Buches stehen:

- Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien (kinetische Energie des Windes, Strahlungsenergie der Sonne, Bewegungsenergie des Wassers, Energie von Gezeiten, Wellen und Meeresströmungen)
- Elektrotechnisches Basiswissen zur Netzintegration der Erzeugungsanlagen
- Elektrische Netze mit Erzeugungsanlagen erneuerbarer Energien
- Erzeugungsanlagen mit Nutzung erneuerbarer Energien
- Netzanschluss dezentraler Erzeugungsanlagen
- Netzrückwirkungen der Erzeugungsanlagen
- Beurteilung der Spannungsänderungen am Netzanschlusspunkt der Erzeugungsanlage



Boris Valov

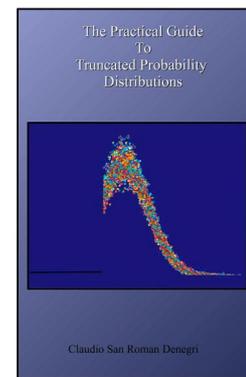
## V2 The Practical Guide To Truncated Probability Distributions

**Autor:** Claudio San Roman Denegri

**Erschienen:** September 2020 (1. Aufl.)

**Als PDF auf Anfrage verfügbar:**

<http://sudamericaciencia.org/PracGuideTrunc.html>



Ingenieur\*innen finden Variablen im Feld, die in Kapazität, Zeit, Sensorbereich, Richtung und anderen Aspekten begrenzt sind. Dieses Buch hilft Ingenieur\*innen, diese Variablen mit effektiven Methoden zu beschreiben, zu analysieren, und Parameter zu schätzen.



Claudio San Roman Denegri

## ■ Ihre Meinung interessiert uns

Liebe ETG Mitglieder,

unsere Einladung an Sie bleibt bestehen: Senden Sie uns geeignete Beiträge zur Veröffentlichung und nehmen Sie aktiv an der Kommunikation in der ETG teil.

Wenn Sie die Beiträge im ETG *journal* kommentieren möchten, dann schreiben Sie uns, am besten per E-Mail an [etg@vde.com](mailto:etg@vde.com)

Bitte halten Sie Ihren als **Leserbrief** gekennzeichneten Beitrag kurz, ansonsten behalten wir uns Kürzungen vor. Ein Anspruch auf Abdruck besteht nicht.

Wir freuen uns auf Ihre Zuschriften.

*Ihre Geschäftsstelle*

## ■ ETG Newsletter

Liebe ETG Mitglieder,

seit 2012 versendet die ETG zwischen den Erscheinungsterminen des ETG *journals* in unregelmäßigen Abständen einen elektronischen Newsletter. Der Newsletter wird immer dann verschickt, wenn es aktuelle Informationen von der ETG gibt, maximal einmal pro Monat. Dabei setzen wir eine „intelligente Technik“ ein: Jeder Empfänger erhält einen individuellen Newsletter, der nur die Artikel enthält, die seinen Interessen entsprechen. Bitte nutzen Sie das Online-Formular unter [www.vde.com/etg-newsletter](http://www.vde.com/etg-newsletter), um uns Ihre aktuellen Interessensgebiete mitzuteilen.

Viel Spaß beim Lesen!

## ■ ETG *journal* elektronisch

Liebe ETG Mitglieder,

nutzen Sie die energie- und ressourcenschonende Variante des ETG *journals* und schicken Sie uns bei Interesse bitte eine E-Mail mit Ihrer Mitgliedsnummer an [etg@vde.com](mailto:etg@vde.com).

*Ihre ETG Geschäftsstelle*

Der Schutz Ihrer Daten ist uns wichtig. Unsere Datenschutzerklärung finden Sie unter [www.vde.com/de/datenschutz](http://www.vde.com/de/datenschutz)

# ETG Veranstaltungskalender 2021/22

## 2021

28. Januar

Online-Fachtagung

[Hochautomatisierter Netzbetrieb](#)

18.–19. Mai, Wuppertal + Online  
Kongress

[ETG Kongress 2021](#)

Von Komponenten bis zum  
Gesamtsystem für die Energiewende

29. Juni, Nürnberg + Online  
Fachtagung

[Perspektiven der elektrischen  
Energieübertragung in  
Deutschland und Europa](#)

15. September, Berlin + Online  
Fachtagung

[Treffen des Industriekreis-  
Mittelspannungs-  
Leistungselektronik 2021](#)

21.–23. September, Esslingen am Neckar  
Fachtagung

[STE 2021 –  
Sternpunktbehandlung in Netzen  
bis 110 kV \(D-A-CH\)](#)

28.–29. September, Leipzig  
Fachtagung

[Netzregelung und Systemführung](#)

2.–3. November, München  
Fachtagung

[ETG CIRED Workshop 2021  
\(D-A-CH\)](#)

Innovationen im Verteilnetz

9.–10. November, München + Online  
Fachtagung

[Elektromechanische  
Antriebssysteme 2021](#)

Electromechanical drive systems  
2021

16. November, Kassel  
Fachtagung

[Erzeugung und Speicherung  
elektrischer Energie](#)

## 2022

15.–16. Februar, Berlin  
Fachtagung

[FNN ETG Tutorial Schutz-  
und Leittechnik](#)

14. März, Berlin  
Fachtagung

[Schaltungstechnik für  
GaN-Bauelemente in der  
Leistungselektronik](#)

15.–17. März, Berlin  
Fachtagung

[CIPS](#)

12th International Conference  
on Integrated Power Electronics  
Systems

## Herausgeber

VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik  
Informationstechnik e.V.  
Energietechnische Gesellschaft (ETG)  
Stresemannallee 15  
60596 Frankfurt

Tel. 069 / 63 08-346  
Fax 069 / 63 08-98 22  
[etg@vde.com](mailto:etg@vde.com)  
[www.vde.com/etg](http://www.vde.com/etg)



# ETG Kongress 2021

Von Komponenten bis zum Gesamtsystem  
für die Energiewende

18. – 19. Mai 2021

Historische Stadthalle Wuppertal + Online

[www.etg-kongress.com](http://www.etg-kongress.com)

In Zusammenarbeit mit:



**VDE** ETG

