

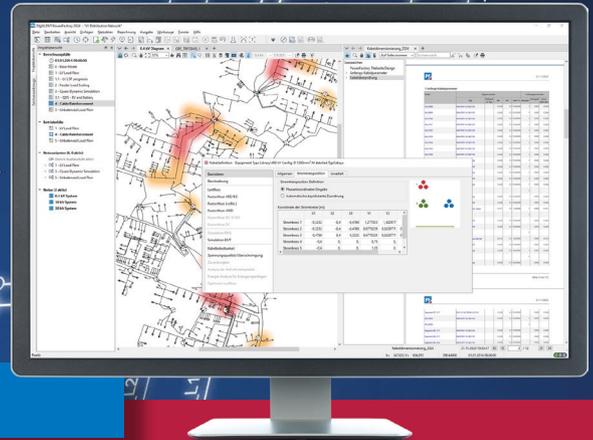
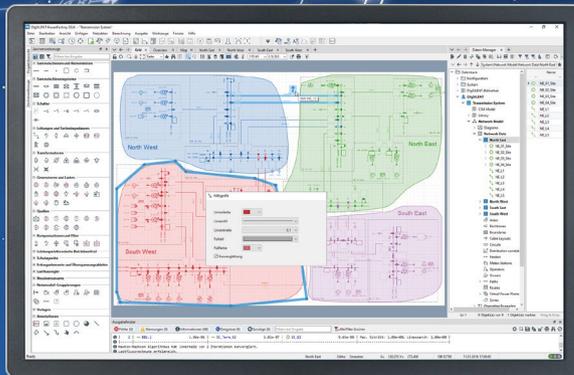
ETG *journal*

Engietechnische
Gesellschaft im VDE (ETG)



Leistungselektronik

Schlüssel für eine erfolgreiche Energiewende



POWERFACTORY

DIE VERSION 2024 IST JETZT VERFÜGBAR!

AUSGEWÄHLTE NEUE FUNKTIONEN

- Erweiterung des Moduls Kabelberechnung um die Unterstützung der VDE 0276-1000 und zusätzliche Berechnungsoptionen
- Unterstützung von kurativem Redispatch in der Funktion Kraftwerkseinsatzoptimierung durch Aktionen nach dem Fehlereintritt
- Zustandsschätzung von unsymmetrischen Systemen für den Einsatz in Verteilnetzen
- Erweiterung der Diagramm-Layout Werkzeuge zur einfachen Erstellung und Darstellung komplexer Netzmodellobjekte
- Einführung von benutzerdefinierten Tastenkürzeln und individuellen Schnellzugriffen sowie andockbaren Datenfenstern
- Neue Betriebsmittelmodelle, u.a. Mehrwicklungstransformator, PV-Modul und MPP-Tracker

Neugierig geworden? Weitere Informationen finden Sie im Dokument „What's New in PowerFactory 2024“.



Für weitere Informationen besuchen Sie:
www.digsilent.de

In mehr als 170 Ländern tätig.

POWER SYSTEM SOLUTIONS
 MADE IN GERMANY

Liebe ETG Mitglieder,



Bei den vielseitigen und hochdynamischen Änderungen in unserem Energiesystem kann es einem manchmal schwindelig werden. Große Herausforderungen und gleichzeitig große Chancen stehen vor uns: Wir reden derzeit in einigen Regionen in Deutschland davon, in wenigen Jahren die Kapazitäten der Netzinfrastruktur zu verdreifachen, und das bei alternden Betriebsmitteln. Gleichzeitig erkennen wir mehr und mehr die Notwendigkeit von Resilienz mit Blick auf zunehmende Störungen durch Naturereignisse und andere Einflüsse. Die wachsende Anzahl fluktuierender Einspeiser und neuer Verbraucher bringt zudem den Bedarf an Flexibilisierung mit sich, welche nur durch Digitalisierung möglich ist.

Als Energietechnische Gesellschaft im VDE nehmen wir uns dieser Herausforderungen und Chancen an. An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei allen aktiven ETG Mitgliedern bedanken, die ihre wertvolle Zeit ehrenamtlich für unsere gemeinsame Vision eines nachhaltigen, klimaneutralen, effizienten, sicheren und natürlich auch wirtschaftlichen Energiesystems einbringen. Gemeinsam bringen wir etwas Klarheit und Orientierung in diese komplexen Diskussionen. Sie sehen an den Berichten der Fachbereiche in diesem ETG *journal*, welche Themen dort diskutiert wurden. Wir sind stolz, dass erneut vielseitige Tagungen für die Gelegenheit zum fachlichen und persönlichen Austausch stattgefunden haben. Ich freue mich, dass unsere geschätzten Expertinnen und Experten ihre Einblicke in diesem ETG *journal* 01/2024 mit uns teilen.

Leistungselektronik wird eine Schlüsselrolle im neuen Energiesystem spielen – daher widmen wir die aktuelle Ausgabe diesem Thema unter “Technik und Trends”.

Als Vorstand blicken wir auf unser erstes Jahr der Amtsperiode zurück. Wir gratulieren den Task Forces zur Veröffentlichung ihrer Studien zum “Digitalen Zwilling”, zur “Hochautomatisierung von Nieder- und Mittelspannungsnetzen” und zur “Flexibilisierung des Energiesystems”. Diese Veröffentlichungen und die dazu gehörigen Webinare und Tagungen tragen zur Umsetzung unserer Strategie bei.

Unter unseren neuen Schwerpunkt-Themen sind erste Aktivitäten neu gestartet.

So wurde der Arbeitskreis „Digitale Zwillinge“ als Folgeaktivität aus der vorangehenden Task Force gegründet. Die Gründung einer Task Force “Künstliche Intelligenz in der Netzleittechnik” steht kurz bevor, der Call for Experts wird in Kürze bekannt gegeben. Der Dialog mit der Politik wurde in Zusammenarbeit mit dem Bereich VDE Politik weitergeführt. Die Fachbereiche arbeiten an Hintergrundpapieren für die politische Diskussion. Durch die sehr gute Zusammenarbeit mit der VDE Kommunikation sind wir nun auch in Sozialen Medien viel sichtbarer. Wir arbeiten daran, noch mehr

Allgemeinbildung zur Energie in die Gesellschaft zu bringen, zum Beispiel durch eine stärkere Zusammenarbeit mit den Bezirksvereinen.

Unsere Mitglieder sind eingeladen, sich an den internationalen Aktivitäten unserer Schwester-Organisationen CIRED und CIGRE zu beteiligen. Unter “Internationales” wird hierüber berichtet.

Der ETG Kongress vom 21.–22. Mai 2025 in Kassel wird Beiträge zu unseren fünf Schwerpunkten thematisieren:

- Ausbildung
- Multi-Energiesysteme
- Nachhaltigkeit
- KI-Anwendungen
- Politik und Gesellschaft

Der Kongress soll wieder Expertinnen und Experten aus allen Fachbereichen zum interdisziplinären Austausch zusammenbringen.

Das Jahr 2024 ist ein ganz besonderes für die Energietechnische Gesellschaft: Wir feiern unseren 50. Geburtstag! Das Jubiläum werden wir im Laufe des Jahres immer wieder zum Anlass nehmen, zurück und nach vorne zu blicken. Wir werden inspirierende ETG Geschichten sammeln – um aus Entwicklungen seit den Anfängen der ETG für die Zukunft zu lernen und um Menschen für unsere Energietechnik zu begeistern.

Unsere Einladung zur aktiven Mitarbeit gilt weiterhin. Für erfahrene Mitglieder ist es sicher eine spannende Aufgabe, bei den aktuellen Trends mitzugestalten und lebenslang weiter zu lernen. Für Kolleginnen und Kollegen am Anfang oder in der Mitte ihrer Karriere bietet die aktive Mitarbeit in einem Fachbereich oder bei einer Studie hervorragende Möglichkeiten zur persönlichen und fachlichen Entwicklung zur technischen Fach- und Führungskraft. Wenn Sie Interesse daran haben, bei unseren Aktivitäten mitzumachen und zu gestalten, freuen wir uns auf Sie!

Nun wünsche ich Ihnen eine spannende Lektüre des ETG *journals*.

Ihre
 Dr.-Ing. Britta Buchholz
 ETG Vorsitzende

Editorial 3

T TECHNIK UND TRENDS 6

- T1 Leistungsbaulemente für Energieeffizienz und Reduzierung der CO₂-Emissionen 6
- T2 Offene Potentiale und Chancen für SiC in der Mittelspannung 13
- T3 Wie Leistungselektronik das elektrische Energiesystem erst möglich macht 17

E ETG AKTUELL 21

Aktuelles aus den Fachbereichen

- E1 A1 Elektrische Maschinen und Antriebe, Mechatronik 21
- E2 A2 Bahnen mit elektrischen Antrieben 22
- E3 Q1 Leistungselektronik und Systemintegration 24
- E4 Q2 Werkstoffe, Isoliersysteme, Diagnostik . . 25
- E5 Q3 Kontaktverhalten und Schalten 26
- E6 V1 Erzeugung, Verbrauch und Speicherung im elektrischen Energieversorgungssystem . . 27
- E7 V2 Übertragung und Verteilung elektrischer Energie 28
- E8 V3 Energiewirtschaft 29

Erfahrungsbericht von Christian Gerdon 30

ETG Preise

- ETG Literaturpreis – Preisaufruf 2024 35
- Herbert-Kind-Preis – Preisaufruf 2024 35

ETG Task Forces

- E9 Aktueller Stand der ETG Task Force „Betriebsmittel im Netz der Energiewende“ 36

ETG Veröffentlichungen

- E10** VDE ETG Studie „Der Digitale Zwilling in der Netz- und Elektrizitätswirtschaft“ . . . 38
- E11** VDE ETG Studie „Flexibilisierung des Energiesystems“ 39
- E12** VDE ETG Hintergrund „Brennstoffzellen“ . . 40
- E13** VDE ETG Studie „Hochautomatisierung von Nieder- und Mittelspannungsnetzen“ 41
- E14** VDE Impulspapier „Mehr Resilienz für die Strom- und Kommunikationsnetze in Deutschland“ 42

Neuer ETG Arbeitskreis

- E15** Digitale Zwillinge in elektrischen Energiesystemen 43

ETG Veranstaltungen

- Vorschau 2024/25 44

Rückblick ETG Veranstaltungen

- E16** VDE ETG Fachtagung: Bauelemente der Leistungselektronik und Ihre Anwendungen 46
- E17** 9. Dialogplattform Power-to-Heat 48
- E18** VDE ETG Fachtagung Flexible Erzeuger, Verbraucher und Speicher: Organisation unseres zukünftigen Energiesystems . . . 50
- E19** Bericht zum Workshop „High Voltage Goes Green“ 52
- E20** VDE ETG Webinar: Systemstabilität der Stromversorgung 53
- E21** ETG CIREN D-A-CH Workshop 2023: Innovationen im Verteilernetz 54

I INTERNATIONALES 56

- I1** Aktuelle Informationen aus CIREN 56
- I2** Aktuelle Informationen aus dem Deutschen Komitee der CIGRE. 57

Y VDE YOUNG NET 60

- Y1** Veranstaltungen für junge Elektroingenieur*innen: Rückblick 2023 – Ausblick 2024 60

F FNN AKTUELL 62

- F1** Aktuelles aus dem Forum Netztechnik / Netzbetrieb (VDE FNN) 62

H HISTORIE DER ELEKTROTECHNIK 64

- H1** Geschichte des Stromwandlers, Teil 2 64

Veranstaltungskalender 71

T1 Leistungsbaulemente für Energieeffizienz und Reduzierung der CO₂-Emissionen

Gekürzte und deutsche Fassung des Beitrags auf der ETG Fachtagung „Baulemente der Leistungselektronik und ihre Anwendungen“ am 20.06.2023 in Bad Nauheim

Abstract

IGBT-basierte Frequenzumrichter haben bereits einen großen Beitrag zur Energieeinsparung in der Motorsteuerung geleistet. Nachdem mittlerweile ein Großteil der Motoren auf der Welt leistungselektronisch gesteuert wird, stehen wir vor dem nächsten Schritt: Nutzung optimierter IGBTs, SiC-Baulemente und GaN-Baulemente. Diese ermöglichen eine signifikante Reduzierung der Verluste. Bei Anwendungen unter anderem in der Elektromobilität, in Solarwechselrichtern, in Datenzentren und in der Energieübertragung können optimierte Leistungshalbleiter den nächsten großen Beitrag der Leistungselektronik für eine moderne Gesellschaft leisten. Nicht alles, was für Nachhaltigkeit als Hype gehandelt wird, ist das auch. Leistungsbaulemente jedoch sind es.

Einleitung

Wir sind mittlerweile im 'code red' auf dem Planeten Erde, in einer Klimakrise und einer globalen Katastrophe, die sich verschlimmern wird, und es ist nicht mehr möglich, weiterzumachen wie bisher – so der Pionier der Klimawissenschaft, William Ripple [1]. Dabei sind die CO₂-Emissionen nur ein Faktor der inzwischen stattfindenden globalen Umweltkatastrophe. Inzwischen sind wir in einem Wettlauf mit der Zeit, um ungeheures Leid der Menschheit noch in Grenzen zu halten. Doch was passiert? Die weltweiten Investitionen in fossile Energien betragen etwa 750 Mrd. \$ pro Jahr seit 2016 mit leicht steigender Tendenz [2], während die Investitionen in erneuerbare Energien etwa 300 Mrd. \$ pro Jahr mit stagnierender Tendenz ausmachen [3]. Also 2,5 mal mehr Investitionen in fossile als in erneuerbare Energie! Da stellt sich die Frage: Ist unser Wirtschafts- und Gesellschaftssystem in der Lage, ein Überleben der menschlichen Gesellschaft zu ermöglichen? Die Subventionen der Regierungen für fossile Energien haben sich, nach Daten der OECD und IEA, 2021 gegenüber 2020 verdoppelt [4]. Extrem widersprechen die Taten den Worten auf diversen Umweltgipfeln!

Obwohl dieser Beitrag nicht zum Klima, sondern zu Leistungsbaulementen ist, muss alles unter diesem globalen Gesichtspunkt gesehen werden. Wir haben auf keinen Fall mehr Zeit bis 2050 für eine Umstellung auf 100 % erneuerbare Energien.

Die Leistungsbaulemente können einen großen Beitrag zur Reduzierung von CO₂-Emissionen leisten. G. Vitale hat dazu 2016 [5] herausgearbeitet: Es hätten im elektrischen Energieverbrauch weltweit 22,6 % der CO₂ Emissionen vermieden werden können, wenn alle Anlagen zu dem Zeitpunkt auf dem bestem Stand der Technik gewesen wären.

Dies ist stimmig mit einer früheren Studie der ECPE von 2007 [6]. G. Vitale stellt fest: Die eingesparte Energie erfüllt die Definition von erneuerbarer Energie.

Der alte Pfad des Flusses elektrischer Energie geht von der Erzeugung in Generatoren, über Transformatoren, Übertragung im dreiphasigen AC Netz, weiteren Transformatoren, schließlich zum Verbrauch an einem Drehstrommotor oder in einphasigen Anwendungen wie Beleuchtung, TV und weiteren. Heute finden sich Leistungsbaulemente in vielen Stellen dieser Kette. Solarenergie braucht Netzwechselrichter, in Windrädern mit Direktantrieb wird gewandelt von AC zu DC, von DC wieder zu AC. Am Eingang jeder modernen Industriemaschine findet sich ein Gleichrichter gefolgt von einem dreiphasigen Frequenzwechselrichter. Im Netzteil jeder Informationstechnik ist ein Gleichrichter.

Wir haben noch einen Mix mit dem alten Weg, aber der Neue dominiert immer mehr. Wind und Solarenergie machten 37 % der Stromerzeugung in Deutschland 2022 aus (alle erneuerbaren zusammen 49,7 % [7]). Auf der Verbraucherseite wird der Anteil leistungselektronisch gesteuerter Anwendungen noch höher sein. 2013 habe ich geschätzt, dass aller Strom in Deutschland im Durchschnitt über ein Leistungsbaulement fließt. Heute wird es etwa zwei- bis dreimal der Fall sein. Und in Zukunft, wenn sich der neue Weg durchsetzt – erneuerbare Energie, leistungselektronisch gesteuerte Verbraucher – wird es fünf- bis sechsmal sein. Daher müssen Leistungsbaulemente also sehr verlustarm sein.

Heute konkurrieren die Wide-Bandgap Halbleiter SiC und GaN mit Silizium, bei dem der IGBT das dominierende Baulement ist. Aber auch beim IGBT sind noch große Fortschritte zu erwarten. Es wird wohl keine Verdrängung des IGBT geben, sondern ein starkes Wachstum mit Platz für neue Technologien in passenden Applikationen wie der Elektromobilität oder Schaltnetzteilen.

Leistungssteuerung für elektrische Motoren

Etwa 50 % des gesamten Stromverbrauchs erfolgt in elektrischen Motoren. In 40 bis 50 % der Anwendungen kann der Wirkungsgrad durch einen leistungselektronischen Frequenzantrieb (Variable Speed Drive VSD) erhöht werden. Bereits 80 bis 85 % der Motorapplikationen enthalten bereits diese Leistungselektronik [8]. Wenn wir das mit dem Referenzjahr 1990 als Basis ansetzen und annehmen, dass der VSD den Prozess-Wirkungsgrad um 50 % erhöht, führt das zu etwa 50 TWh Einsparung, wie in *Bild 1* dargestellt. Dabei wird ein Diagramm aus [9] genutzt.

Dies ist etwa 10 % des gesamten Stromverbrauchs in Deutschland. J. Popovic-Gerber et al. schätzten 2012, dass

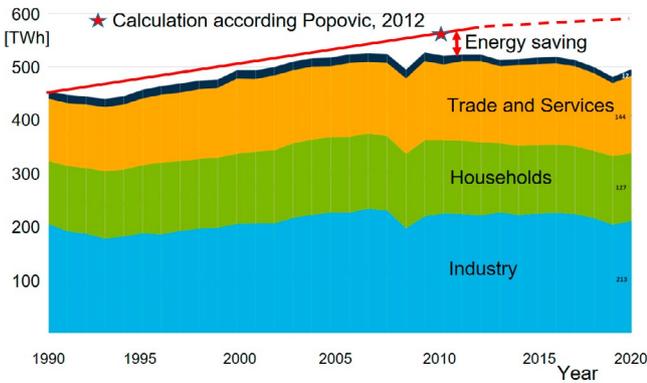


Bild 1: Stromverbrauch Deutschland 1990 bis 2021 aus [9], sowie eingesparte Energie durch IGBT-basierte Motorsteuerung

durch den VSD noch etwa weitere 5 % – 6 % des Stromverbrauchs in Europa eingespart werden können [8]. Heute enthalten alle neuen Motoren einen VSD, daher ist das zum Großteil bereits erfolgt. Der Stromverbrauch in Deutschland stieg 2007 bis 2021 nicht, trotz höherer Wirtschaftsleistung und Ausweitung der Nutzung von Elektrizität. Auch in Beleuchtungen, kleineren Schaltnetzteilen usw. wird effizienter mit Strom umgegangen. Doch der große Beitrag der Leistungselektronik für die Umwelt ist in der Gesellschaft nicht bekannt.

Der nächste Schritt sind VSDs mit verlustärmeren neuen IGBTs und Wide-Bandgap Bauelementen. Antriebe mit großem Anteil von Teillastbetrieb werden als erste davon profitieren.

Leistungsbaulemente für Elektromobilität – Si und SiC

Elektroautos arbeiten zumeist im Teillastbetrieb. Bild 2 vergleicht Si und SiC, sowie in der blauen Ellipse den typischen Nutzungsbereich [10].

Die Kniespannung des IGBT ist ein Problem. Der SiC-MOSFET mit seiner Ohm'schen Kennlinie arbeitet im Teillastbetrieb bei deutlich niedrigerem Spannungsabfall. Das führt zu einem signifikanten Vorteil im WLPT Class 2 Fahrzyklus. Der Stromverbrauch eines exemplarischen E-Autos sinkt von 152 auf 146 Wh pro Kilometer [10]. Wenn man bedenkt, dass der Großteil der Energie in die Überwindung des Luft- und des Rollwiderstands geht, ist dies viel: Die Verluste im Frequenzrichter nehmen von 9 Wh/km auf 3 Wh/km ab. Das führt zu 4 % weniger Energiever-

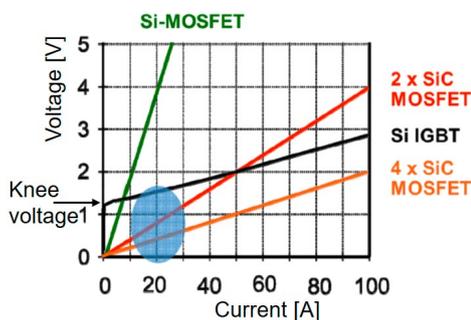


Bild 2: Kennlinien von Si und SiC Bauelementen. Bild: W. Wondrak

brauch des Fahrzeugs durch den Wechsel von Si auf SiC, wenn man ein 400 V System betrachtet. Wird ein 800 V System genutzt, ist eine Verbrauchsminderung um 8 % möglich. Diesen Vorteil kann man nun für höhere Reichweite oder geringere Batteriekapazität nutzen.

SiC ist heute Trend in Elektrofahrzeugen der Oberklasse. Für die meisten E-Autos werden noch IGBTs genutzt aufgrund niedrigerer Kosten und besserer Verfügbarkeit. Aus Bild 2 geht auch hervor, dass der IGBT bei hohem Strom besser ist. Man kann nun durch Parallelbetrieb die Vorteile beider Technologien nutzen. In einigen Tesla-Modellen wird das umgesetzt – durch zwei Motoren mit je eigenem VSD, einmal mit SiC, einmal mit Si. Im Teillastbetrieb arbeitet nur der SiC VSD. Inzwischen wird auch daran gearbeitet, IGBT und SiC MOSFET in einem Antrieb parallel zu schalten, wie in [11] vorgestellt wird.

Vom Standpunkt der Schonung der natürlichen Umwelt macht es keinen Sinn, den bestehenden Fuhrpark eins zu eins auf Elektroantrieb umzustellen. Wesentlich ist, dass verschiedene Verkehrsmittel sich sinnvoll ergänzen müssen. Ein sinnvolles Szenario kann etwa so aussehen, wie schon früher skizziert [12]:

In der Stadt:	öffentlicher Nahverkehr, Rad
Stadtbus:	Elektrobus
Individualverkehr bis 100 km:	Elektroauto
Gütertransport Kurzstrecke:	Elektro-Laster
Güterfernverkehr:	Schiene
Personenfernverkehr:	Schiene

Tabelle 1: Skizze eines möglichen nachhaltigen Verkehrs

Man wird in dem Szenario als typischer Stadtbewohner nicht mehr ein eigenes Auto benötigen. Man kombiniert die Systeme. Man erwirbt „Mobilität“, nicht unbedingt ein Auto. Das Auto holt man sich, wenn man es braucht.

In Bild 3 sind die Verkehrssysteme bilanziert. Die Daten sind von 2016, seither hat sich nichts zum Besseren ent-

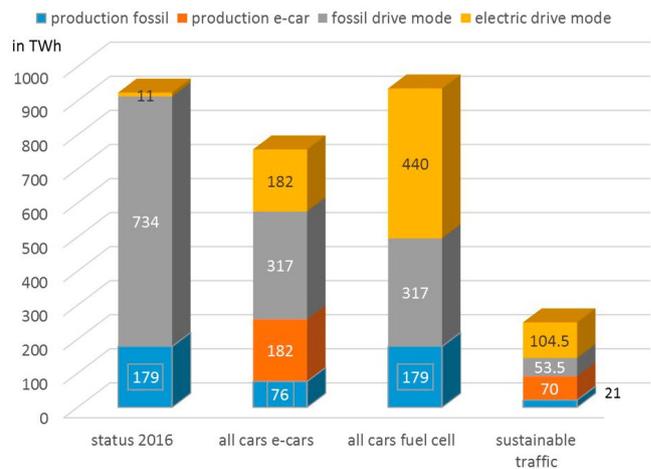


Bild 3: Energieverbrauch des Verkehrs in Deutschland. Derzeitige Situation und diskutierte mögliche Szenarien berechnet nach ihrem Energieverbrauch

wickelt. Der überwältigende Anteil wird durch klassische fossile Brennstoffe getragen. Nur 11 TWh sind Strom [13] – erstaunlich wenig dafür, dass der elektrische Güterzugverkehr, Personen-Zugverkehr und Straßenbahn-Nahverkehr zusammen gezählt werden (der Anteil von Elektroautos ist in der Zeit vernachlässigbar).

Würden wir nun alle Verbrenner-PKWs (2/3 des Verbrauchs des Straßenverkehrs) durch Elektrofahrzeuge ersetzen (Säule 2), führt das zu einem zusätzlichen Bedarf an Strom von etwa 1/3 der derzeitigen Stromproduktion im Bereich von 500 TWh. Der weitere Verkehr ist nicht berücksichtigt in Säule 2, es verbleiben 317 TWh fossil. Der CO₂-Fußabdruck der Elektroautoproduktion aus [14] ist auch berücksichtigt in dieser Säule. Er ist aufgeteilt auf 12 Jahre mit einer gesamten Fahrleistung von 180.000 km. Der Fußabdruck der Produktion (182 TWh) ist deutlich höher als der für Verbrenner, dies liegt an der Herstellung der Batterie. In der nächsten Säule sind alle Autos hypothetisch Brennstoffzellenfahrzeuge. Vereinfacht ist angenommen, dass ihr Fußabdruck der Produktion derselbe wie der Verbrenner wäre. Wegen des niedrigen Wirkungsgradpfads *Elektrolyse* → *Brennstoffzelle* → *Antrieb* würde der Strombedarf extrem hoch mit 440 TWh. Dies ist unrealistisch mit erneuerbaren Energien herzustellen. In der letzten Säule ist das vorher skizzierte nachhaltige Szenario berechnet. Hier ist der Güter- und Personenfernverkehr auf die Schiene verschoben. Hier sind die Verluste durch Reibung minimal und durch Luftwiderstand deutlich geringer. Dies macht den Hauptteil der Vorteile des nachhaltigen Szenarios aus. Der Kurzstrecken-Flugverkehr ist auch auf die Schiene gelegt. Für den Langstrecken-Flugverkehr ist keine nachhaltige Alternative zu finden, das ist der verbleibende fossile Anteil. PKWs verbleiben etwa mit 20 % der heutigen Flotte als Elektro-PKWs für den Verkehr ins ländliche Gebiet, wo eine öffentliche Anbindung zu umständlich ist. Der zusätzliche Strombedarf dafür und für den Güter-Kurzstreckenverkehr ist moderat. Das nachhaltige Szenario ist in [15] ausführlich beschrieben. Ein gutes Schienenverkehrssystem ist Voraussetzung. Jedoch sind hier die Zustände in Deutschland im internationalen Vergleich wirklich blamabel.

Der Bedarf an elektrischer Energie liegt im nachhaltigen Szenario bei rund 105 TWh, der Mehrbedarf gegenüber den heute 11 TWh ist bei 94 TWh. Wichtigster Faktor für die Gesamtbilanz ist, dass diese elektrische Energie regenerativ erzeugt wird. Im noch lückenhaften regenerativen Szenario können 93 % der fossilen Energie und damit derselbe Anteil an CO₂-Emissionen vermieden werden.

Die heute verfolgten Projekte der Elektromobilität greifen, gemessen an der eingangs behandelten Klimakatastrophe, alle zu kurz.

Das nachhaltige Szenario benötigt dabei viel mehr Leistungsbaulemente. Die Entwicklung von E-LKWs ist für kurze und mittlere Strecken sinnvoll, Langstrecken E-LKWs sind in Deutschland überflüssig. Leider vernachlässigt die deutsche Regierung seit Jahrzehnten den Schienenverkehr zugunsten des Individualverkehrs.

Anwendungen in der Photovoltaik

Photovoltaik (PV) Wechselrichter sind ein Kernstück für die Versorgung mit regenerativer Energie. Ein großer Fortschritt war der Übergang zum traflosen Wechselrichter. Er hat zwar keine galvanische Isolation, aber die Sicherheitsprobleme konnten gelöst werden. Als nächster Schritt können neue Leistungsbaulemente zu höherem Wirkungsgrad führen.

Tabelle 2 vergleicht einen modernen IGBT-basierten und einen neuartigen SiC-basierten Wechselrichter [16].

	IGBT based	SiC MOSFET based
P _{AC}	75 kW	150 kW
η _{Eu}	98.2 %	98.8%
f _{sw}	20 kHz	35 kHz
m	77 kg	85 kg
P _{AC} / m	0.974 W/kg	1.765 W/kg

Tabelle 2: Vergleich eines Si-basierten und SiC-MOSFET basierten Photovoltaikwechselrichters

Beides sind dreiphasige Wechselrichter mit 3-Level-NPC Leistungsmodulen. Der SiC-Wechselrichter ist auf die doppelte Leistung spezifiziert, wobei Volumen und Gewicht nur wenig größer sind als beim IGBT-Wechselrichter. Der SiC-Wechselrichter erreicht einen höheren Wirkungsgrad, hier angegeben als europäischer Wirkungsgrad, der verschiedene Leistungsverhältnisse wichtet:

$$\eta_{Eu} = 0.03\eta_{5\%} + 0.06\eta_{10\%} + 0.13\eta_{20\%} + 0.10\eta_{30\%} + 0.48\eta_{50\%} + 0.20\eta_{100\%}$$

Ein besserer Vergleich ist, dass der Si-Wechselrichter 1,8 %, der SiC-Wechselrichter 1,2 % Verluste aufweist, also 33 % weniger. Wesentlich beigetragen hat die höhere Schaltfrequenz f_{sw} mit SiC Bauelementen. Dies verringert den Aufwand für Filter, die voluminös und schwer sind. Es wird viel Kupfer eingespart, Rohstoffe werden geschont.

Die Schaltung eines hybriden 3-Level Leistungsmoduls ist in Bild 4 dargestellt. Da, wo keine hohe f_{sw} notwendig ist, sind IGBTs, wo eine hohe f_{sw} vorteilhaft ist, sind SiC MOSFETs verbaut [17]. Die rechte Seite vergleicht die Kennlinien im 1200 V Modul F3L11MR12W2M1_B74 [18], das für 100 A spezifiziert ist. Der IGBT gehört zu einer neueren Generation, der Spannungsabfall bei Nennstrom ist 0,5 V niedriger als bei früheren Versionen. Bei Nennstrom und 125° C ist er für Si und SiC nahe beieinander. Im Teillastbereich ist der SiC MOSFET besser. Aufgrund der typischen Überdimensionierung des Solarfelds im Verhältnis zur Wechselrichterleistung arbeitet der Wechselrichter großteils bei Vollast. Viele neue PV-Systeme werden mit Batteriespeicher ausgerüstet. Der Wechselrichter ist nun tendenziell 24 Stunden am Tag in Betrieb.

Solarwechselrichter sind also ausgereift, ein heutiger Wirkungsgrad nahe 99 % ist was notwendig ist. Dies ist eine Vorgabe für andere Umrichter-Anwendungen. Da wir in kurzer Zeit zu 100 % regenerativem Strom kommen müssen, und zwar noch vor 2030 (die Bundesregierung will nur

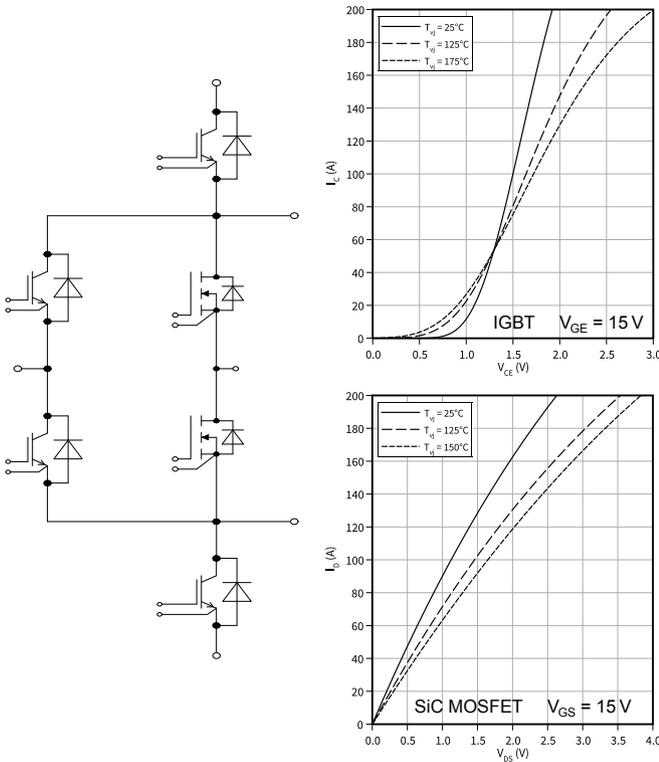


Bild 4: Schaltung und Kennlinien von SiC MOSFET und IGBT in einem 3-Level ANPC Leistungsmodul [18]. Nur die inneren SiC MOSFETs werden mit hoher Schaltfrequenz betrieben

80 %), müssen Wind- und Solarstrom stark zunehmen. In südlichen Ländern ist der Ertrag der Photovoltaik deutlich größer, im Mittelmeerraum Faktor 2 höher, in Afrika bis zum Faktor 3 höher als in Deutschland.

Leistungselektronik in Datenzentren

Datenzentren sind enorme Stromverbraucher. In Deutschland nehmen sich etwa 3000 Datenzentren 16 TWh Strom – so viel wie die Stadt Berlin [19]. Im Aspekt der Thermodynamik wird die elektrische Energie vollständig in Wärme umgewandelt. Die Wärmeabfuhr ist ein großes Problem in Datenzentren. Die privaten Haushalte verbrauchen 477 TWh zum Heizen [19], hauptsächlich aus fossilen Quellen. Theoretisch könnte die Abwärme der Datenzentren 3,4 % der Bevölkerung mit Wärme versorgen.

Die Stromversorgung eines Datenzentrums ist eine komplexe Leistungselektronik, da unterbrechungsfreie Stromversorgungseinheiten (UPS) und Redundanz verlangt werden. Bild 5 zeigt den Energiefluss in einem Datenzentrum, wo Energiewandlung in vielen Stufen auftritt [20].

Die Wirkungsgrade in Bild 5 sind angegeben für ein modernes Datenzentrum Stand 2019. Ältere Systeme haben viel schlechteren Wirkungsgrad. Im vollständigen Pfad zu den Prozessoren – Bild 5b – gehen weitere 18 % durch mehrere Stufen verloren, am Ende kommen nur 78 % der eingespeisten Energie an. Moderne einphasige Totem-Pole Gleichrichter mit integrierter Leistungsfaktorkorrektur (PFC) erzeugen eine Gleichspannung von 400 V. Es folgen Tief-

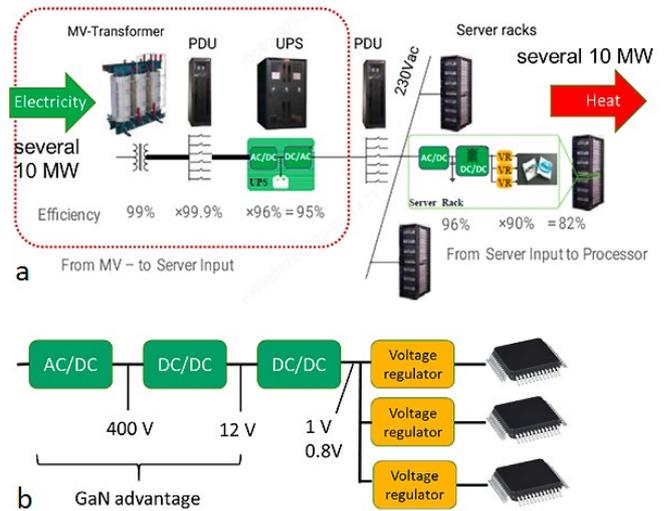


Bild 5: Leistungsfluss in einem Datenzentrum. a) vom Mittelspannungseingang, nach [21] b) vom Servereingang zum Prozessor

setzsteller, zumeist der Isolated LLC Converter [21]. Üblicherweise ist die Wandlung 400 V – 12 V – 1 V, bei Telekom-Anwendungen in drei Stufen 400 V – 48 V – 12 V (oder 6 V) – 1 V. Am Eingang des Prozessors wird eine Spannung von 1.8V, 1 V oder gar 0.8V benötigt und es wird dazu ein zusätzlicher Tiefsetzsteller als „voltage regulator“ eingesetzt.

In diesem Pfad können GaN Bauelemente Verbesserungen bringen. Von 230 V (AC) auf 12 V (DC) mit einer Leistungsdichte von 100 W/in³ ergibt ein optimiertes Si-System 96.3 %, ein optimiertes GaN System bis zu 97.8 % Wirkungsgrad, d.h. eine Verbesserung von 1.5 %. Die Verbesserung mit GaN ist plausibel [22], wenn man die Daten für den bisher eingesetzten Superjunction Si-MOSFET mit denen von neuartigen GaN Bauelementen vergleicht.

Mit der 5G-Technik wird der Energieverbrauch durch Datenzentren weiter drastisch ansteigen, 5G könnte den Strombedarf um bis zu 3,8 TWh bis 2025 steigen lassen [23]. Bisher nutzen nur wenige Datenzentren einen kleinen Teil ihrer Abwärme zum Heizen. Die Abwärme fällt meist als Warmluft mit knapp 40° C an. Wärmepumpen können das auf eine für die Verteilung ausreichende Temperatur bringen, das wird jedoch nur selten, z. B. in Stockholm, wo ein Fernwärmenetz besteht, in größerem Umfang genutzt. Die vielen Datenzentren allein in Frankfurt erzeugen möglicherweise genug Wärme, um die ganze Stadt zu heizen.

Weitere IT Anwendungen wie autonomes Fahren werden noch viel mehr Datenzentren benötigen. Viele Pläne für die IT berücksichtigen nicht in der notwendigen Weise die CO₂-Emissionen. Blockchain Technologien wie Bitcoin verschwenden eine große Menge an Energie. Es sind Regulierungen gegen Energieüberverbrauch bzw. Verschwendung notwendig.

HGÜ und Energieübertragung

„Smart Grids“ waren eine Zeitlang in vieler Munde, doch beschränkt auf kleine Strukturen wie eine Kleinstadt. Die In-

ternationale Energieagentur (IEA) jedoch definiert ein Smart Grid als Elektrizitätsnetzwerk, das digitale und andere moderne Technologien nutzt, um den Fluss der Elektrizität von allen Erzeugern aufzuzeichnen und zu steuern, sodass die variierenden Anforderungen der Endverbraucher erfüllt werden [24]. Dies gilt doch insbesondere für das großräumige Netz. Die Aktuatoren dort sind leistungselektronische Konverter. Derzeit ist nur China auf dem Weg dorthin, State Grid Corporation hat 500 Mrd. CNY mit Focus auf Ultrahochspannungsprojekte budgetiert zur Verstärkung des Verteilnetzes und höherem Grad an Digitalisierung.

Eine hohe Flexibilität und Kontrolle für die Hochspannungsgleichstromübertragung (HGÜ) ermöglicht der IGBT-basierte Modular Multilevel Converter (MMC), erfunden und entwickelt in Deutschland [25]. Die Vollbrückentechnologie ermöglicht auch die Unterbrechung des Gleichstroms sowie die Bildung eines Gleichstromnetzes. Dieses ist in China bereits im Bau [26].

Eine Studie an der TU Chemnitz zum CO₂-Fußabdruck von HGÜ-Verbindungen [27] kam zum Ergebnis, dass diese ab einer bestimmten Entfernung (deutlich unter 300 km) weniger Emissionen von CO₂e (Kohlendioxidäquivalente) über ihren Lebenszyklus erzeugen als die Drehstromübertragung. Der Vorteil wird besonders deutlich bei Einsatz von Kabeln, da Kupferkabel geringeren Widerstand als Aluminium-Freileitungen aufweisen. Kupferkabel sind daher nicht nur von Vorteil für den Landschaftsschutz, sondern auch für Klimaschutz. Auch ist der Einsatz der Halbbrückentechnologie beim MMC möglich, was ebenfalls zu weniger Verlusten führt. Die Betriebsverluste in Konverterstationen und Übertragungstrassen dominieren die Lebenszyklusanalyse bei Weitem.

Ein Trassenszenario, aufbauend auf einer Studie von Greenpeace [28], wurde durchgerechnet. Anstelle des dort vorgesehenen Ausbaus von Drehstromverbindungen wurden neue Leitungen mit Gleichstrom vorgesehen, siehe Bild 6. Alle Knoten sind mit der MMC Vollbrückentechno-

logie gebildet. Kabel werden für Unterwasserverbindungen und Verbindungen durch dichtbesiedelte Regionen vorgesehen. Das skizzierte kontinentale HGÜ Multiterminal Netzwerk hat eine geringere CO₂e – Bilanz. Anstatt Zusatzaufwand würde es zur Reduktion von 461 Mt CO₂e führen – das sind die Emissionen von 2,5 Kohlekraftwerken der Leistung von 1 GW über 40 Jahre.

Derzeit sind drei HGÜ-Trassen in Deutschland beabsichtigt. Sie sind nicht Teil einer großräumigen Lösung. Nach Bild 6 sind nur zwei davon notwendig. Eine Lösung auf europäischer Ebene ist viel effizienter. Sie könnte das Rückgrat einer zuverlässigen Stromversorgung sein. Jedoch ist die Lage in Europa von Kleinstaaterei gekennzeichnet. Die Energiekonzerne planen für ihr eigenes Territorium und ihre Interessen, was zu kleinkarierten Lösungen führt.

Trends bei Silizium und Wide-Bandgap Halbleitern

Bei der Aufbau- und Verbindungstechnik sowie Zuverlässigkeit gab es große Fortschritte. In Bezug auf die am meisten wachsenden Anwendungen kann man sagen, dass auch der Bedarf an Si Bauelementen für die Motorsteuerung stark wachsen wird. Es kommt auch der rückwärtsleitende IGBT mit integrierter Diode, was eine höhere Stromdichte ermöglicht. Hochsperrende IGBTs ab 3,3 kV sind heute noch weit weg vom physikalisch Möglichen.

SiC Anwendungen wachsen stark. Viele Herausforderungen in der Zuverlässigkeit wurden gemeistert. Wie jedoch in den Abschnitten zur Elektromobilität und Photovoltaik gezeigt, kann eine Kombination von Si IGBT und SiC MOSFET Vorteile haben. Beide sind eher Partner als Konkurrenten.

Verglichen zur Einführung von SiC-Bauelementen wurden bei GaN-Bauelementen, obwohl sie jünger sind, nicht so viele gravierende Zuverlässigkeitsprobleme gefunden. In schnell schaltenden Anwendungen der Schaltnetzteile ermöglichen sie geringere Verluste und kompaktere Lösungen. Weiterhin erlaubt die GaN-Technologie die Integration von Ansteuerlogik und weiteren Komponenten. Bidirektional sperrende Bauelemente sind möglich. GaN-Anwendungen werden schnell wachsen.

An neuen Halbleitermaterialien wie Galliumoxid, Diamant und Aluminiumnitrid zur Anwendung für Leistungsbaulemente wird derzeit geforscht [29]. Es ist aber nicht zu erwarten, dass diese Materialien so kurzfristig verfügbar werden, dass sie zur Bekämpfung der Umweltkatastrophe beitragen können.

Zusammenfassung: Leistungselektronik als erneuerbare Energie

Der "European Green Deal" will zwar die Photovoltaik bis 2025 verdoppeln und 600 GW bis 2030 installieren [30], doch das ist bei weitem nicht genug. Windenergie wird nicht erwähnt, und Leistungselektronik ebenso wenig. Leistungselektronik wird stark unterschätzt.

Die IEA schätzt, dass allein durch konsequente Nutzung derzeitiger Technologien 3070 TWh eingespart werden könnten – mehr als 12 % des Weltstromverbrauchs

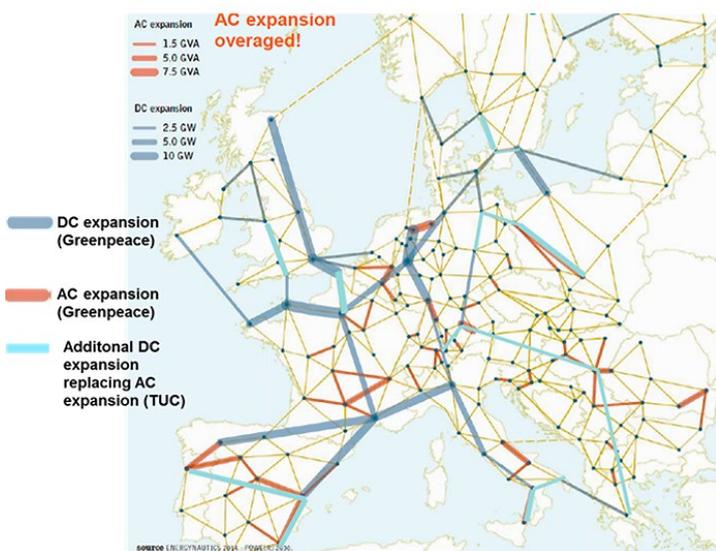


Bild 6: Vorgeschlagener Ausbau des europäischen Verteilnetzes aus [28], mit zusätzlichen HGÜ-Verbindungen (hellblau), die den AC-Ausbau (rot) ersetzen

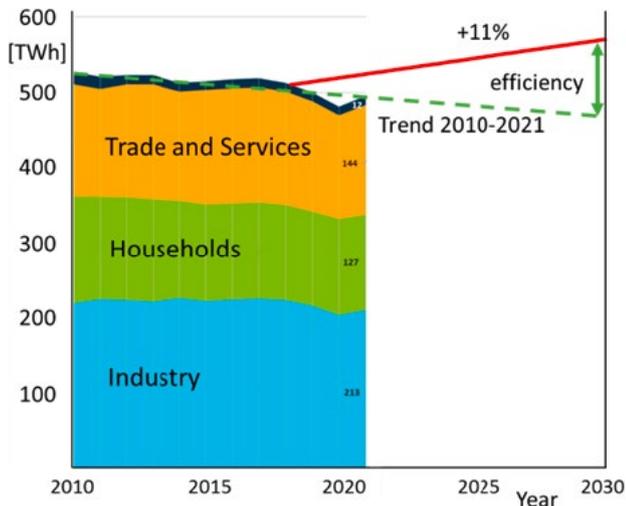


Bild 7: Nettostromverbrauch in Deutschland, siehe Bild 1, Prognose der Bundesregierung und Verlängerung des Trends 2010 bis 2021

2018 [31]. Dies bezieht sich auf die globale Situation. Wenig entwickelte Länder haben geringe, Industrieländer eine hohe Nutzung von Leistungselektronik in Haushaltsanwendungen und Industriemotoren. Der nächste Schritt ist der zu effizienteren Leistungsbauerelementen, wie vorher skizziert.

Nach dem deutschen Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz ist ein Wachsen des Elektrizitätsverbrauchs um 11 % bis 2030 zu erwarten. Haupttreiber seien der Transportsektor, Wärmepumpen und Wärmenetze, auch die Herstellung von „grünem“ Wasserstoff wird angenommen. Bild 7 zeigt die Prognose der Bundesregierung im Vergleich zum Trend 2010 bis 2021 aus Bild 1. Wenn die Energieeffizienz Priorität hat, sollte der Verbrauch nicht steigen, er sollte eher mehr sinken als der vorherige Trend. Der Einsatz von SiC, GaN und modernen IGBTs führt zu einer deutlichen Reduzierung von Verlusten. Leistungsbauerelemente sind Schlüsseltechnologie für Klima- und Umweltschutz, daher kann man von Leistungselektronik als grüne Elektronik sprechen.

Die Anwendungen für PV mit Wirkungsgraden nahe 99 % haben jetzt die Vorgabe gesetzt. Es gibt den Trend, neue PV Anlagen mit einem Batteriespeicher auszurüsten. Wenn das mit einem europäischen HGÜ-Netz kombiniert wird – es kam ja noch kaum vor, dass in Spanien keine Sonne scheint und gleichzeitig in Norwegen kein Wind weht – können wir zu 100 % erneuerbaren Strom in kurzer Zeit, bis 2030 erreichen. Das wäre ein Beitrag zum Wettlauf der Menschheit mit der Zeit angesichts der Umweltkatastrophe.

Acknowledgement

Wir bedanken uns bei Wolfgang Wondrak von Mercedes-Benz AG, Uwe Stickelmann von SMA AG und Roland Hümpfner von Huawei für die hilfreichen Anregungen.

Literatur

- [1] W. J. Ripple et al, “World Scientists’ Warning of a Climate Emergency 2022”, *BioScience*, Volume 72, Issue 12, December 2022, pp 1149–1155, <https://doi.org/10.1093/biosci/biac083>
- [2] <https://www.nau.ch/news/wirtschaft/credit-suisse-und-ubs-stecken-weitere-milliarden-in-fossile-energie-66143707>
- [3] REN21 “Renewables 2021 Global Status Report” https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2021_Full_Report.pdf p. 184
- [4] OECD August 9, 2022 <https://www.oecd.org/berlin/presse/die-foerderung-fossiler-energetraeger-hat-sich-2021-laut-neusten-zahlen-von-oecd-und-iea-fast-verdoppelt-und-bremst-so-die-fortschritte-bei-den-internationalen-klimazielen.htm>
- [5] G. Vitale, “Energy saving by power electronics: towards a new concept of renewable source,” *Renewable Energy and Power Quality Journal (RE&PQJ)* No.14 May 2016
- [6] EPE/ECPE Position Paper on Energy Efficiency – the Role of Power Electronics, March 2007
- [7] Bruno Burger, Energy charts, <https://www.energy-charts.info>
- [8] J. Popovic-Gerber et al “Power electronics enabling efficient energy usage: energy savings potential and technological challenges” *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 27, no. 5, pp. 2338-2353, May 2012
- [9] <https://www.cleanenergywire.org/factsheets/germanys-energy-consumption-and-power-mix-charts>
- [10] W. Wondrak, U. Böhme, A. Nisch, J. Weigold, „Potenziale von SiC im Elektrofahrzeug,“ Halbleiterkolloquium Freiburg 2017
- [11] Stefan Hain, „Neue Entwicklungen in der Leistungselektronik im automobilen Antriebsstrang,“ Halbleiterkolloquium Freiburg 2022
- [12] Josef Lutz, „Semiconductor Power Devices as Key Technology for a Future Sustainable Society“, Fachtagung Bauelemente der Leistungselektronik, Bad Nauheim 2017
- [13] <https://www.umweltbundesamt.de/daten/energie/stromverbrauch>, abgerufen 2018
- [14] <https://emcel.com/de/wie-umweltfreundlich-sind-elektroautos/>
- [15] J. Lutz, Wie kann ein umweltverträgliches Verkehrssystem verwirklicht werden? Studie zu Alternativen zum Verbrennungsmotor, Umweltgewerkschaft e.V., ISBN 978-3-9823322-1-5, 2021
- [16] Uwe Stickelmann, „SiC implementation in SMA inverters,“ Infineon-SiC-Developer-Forum Munich March 2020
- [17] B. Sahan, C. R. Müller, A. Lenze, J. Czichon, M. Slawinski: “Combining the benefits of SiC T-MOSFET and Si IGBT in a novel ANPC power module for highly compact 1500-V grid-tied inverters,” *Proceedings PCIM Europe 2019*, pp 693-697
- [18] Infineon-F3L11MR12W2M1_B74-DataSheet-v00_20

- [19] H. J. Neubert, „Sparsam in die Zukunft,“ VDE dialog 01/2023 p. 25
- [20] R. Hümpfner, „Innovative Data Center Power Solutions“, PCIM Europe digital days 2020
- [21] Roland Hümpfner, private communication
- [22] R. Siemieniec, R. Mente, W. Jantscher, D. Kammerlander, U. Wenzel, “600 V power device technologies for highly efficient power supplies,“ proceedings EPE'21 ECCE Europe, 2021
- [23] T. Höfer, S. Bierwirth, R. Madlene „Energie-Mehrverbrauch in Rechenzentren bei Einführung des 5G Standards,“ E.ON Energy Research Center at RWTH Aachen, 2019
- [24] <https://www.iea.org/reports/smart-grids>
- [25] R. Marquardt, “Modular multilevel converter topologies with DC-short circuit current limitation”. 8th Int. Conf. on Power Electronics – ECCE Asia, Jeju, Korea, 30 May–3 June 2011, pp. 1–6
- [26] Ting An, Guangfu Tang, Weinan Wang, “Research and application on multi-terminal and DC grids based on VSC-HVDC technology in China,“ IET trans. High Volt., 2017, Vol. 2, Iss. 1, pp. 1–10 doi: 10.1049/hve.2017.0010
- [27] J. Wiesner, J. Lutz: “Life-cycle analysis of the climate impact of present high-voltage direct current transmission systems,“ Power and Energy Student Summit, 2019, Magdeburg, Germany
- [28] Greenpeace: POWE[R] 2030 A EUROPEAN GRID FOR 3/4 RENEWABLE ELECTRICITY BY 2030, 2014
- [29] Yuan Qin et al, “Thermal management and packaging of wide and ultra-wide bandgap power devices: a review and Perspective,“ J. Phys. D: Appl. Phys. 56 093001, 2023
- [30] https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_22_3131
- [31] <https://www.iea.org/commentaries/how-energy-efficiency-will-power-net-zero-climate-goals>



*Prof. Dr. Josef Lutz,
Technische Universität Chemnitz*



*Prof. Dr. Thomas Basler,
Technische Universität Chemnitz*

T2 Offene Potentiale und Chancen für SiC in der Mittelspannung

Vorgestern war übermorgen schon heute, oder so. Die Zukunft vorherzusagen ist nicht so einfach und ähnlich ist es auch mit dem marktdurchbruch der hochsperrenden Siliziumkarbid (SiC)- Bauelementen. In der Mittelspannungs (MS)-Leistungselektronik mit SiC-Bauelementen ist es in der letzten Zeit augenscheinlich etwas ruhiger geworden, nachdem es um die Jahre 2010–2016 viele Veröffentlichungen zu SiC-Transistoren im Bereich von 3,3–25 kV gab. Beonders die die 3,3 kV Bauelemente finden schon ihre Anwendung in der Bahn- und Antriebstechnik. Bei höheren Spannungen wird es aktuell schwieriger. Man kann dabei zwei Gründe unterscheiden. Alles bis einschließlich 6,5 kV ist zumindest aus Sicht des Spannungsbereiches nicht vollkommen fremd. Man kennt dies auch von Silizium IGBTs und damit hat man auch schon ein wesentliches Argument. SiC muss sich gegenüber den Si-IGBTs in der Anwendung auch kostentechnisch behaupten. Auf Bauteilebene ist das schwer möglich und es funktioniert nur auf Systemebene gut. Dabei muss die Anwendung aber auch dazu passen. Ein direkter Ersatz war auch vor Jahren beim Aufkommen der 1200 V SiC-MOSFETs nicht sinnvoll. Alles über 6,5 kV ist in jeder Hinsicht technisches Neuland für einen schnellschaltenden Transistor. Es gibt keine hinreichende Grundlage, auf die man leicht aufbauen kann. Vom geeigneten Leistungsmodul bis hin zum Umrichtersystem bedarf es geeigneter Entwicklungen. Um den Faktor 20 höhere Schaltfrequenzen und vielfach höhere Spannungssteilheiten überschreiten bei weitem den Stand der Technik. SiC-Bauelemente mit 10 kV Sperrspannung und darüber sind aber keine Utopie und es gibt damit auch einige Mittelspannungsumrichter als Versuchsaufbauten, aber alles, was man sonst noch benötigt, um damit geeignete industrietaugliche Umrichter zu bauen, muss erst noch konzipiert, bzw. entwickelt werden.

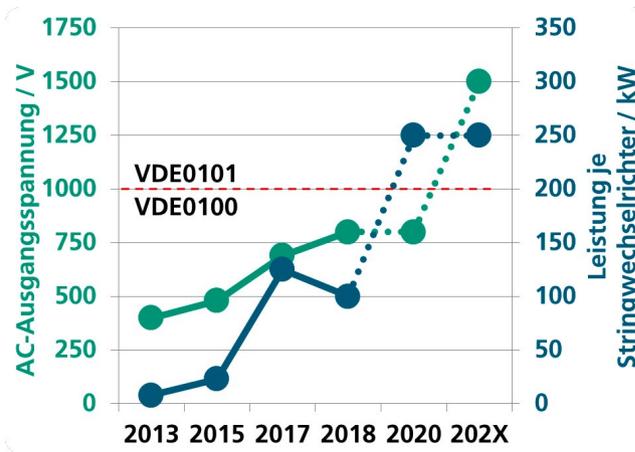


Bild 1: Spannung und Leistung bei Stringwechsellrichtern

Und wann ist die Zukunft nun da? Jede Neuentwicklung birgt auch ein finanzielles Risiko. Ein guter Grund für eine Neuentwicklung, ist aber stets, wenn man mit den bestehenden Lösungen an eine technische Sättigung kommt, die Normenlage sich ändert oder neue Absatzmärkte entstehen und neue Technologien verfügbar sind.

Ein schönes Beispiel für die Sättigung einer Technologie zeigt sich bei PV-Wechselrichtern. Die Systemspannung von Wechselrichtern von PV-Kraftwerken hat sich über die Jahre langsam aber stetig in Richtung der Grenze der Niederspannung von 1000 V_{AC} geschoben. Neben Einsparungen bei Installationskosten bei hohen Kraftwerksleistungen, hat auch die Normänderung der zulässigen Spannung eines Modulstrings von 1000 V_{DC} auf 1500 V_{DC} diesen Trend beschleunigt.

PV-Module sind aktuell auf eine Spannungsfestigkeit von 1500 V_{DC} spezifiziert. Das gilt sowohl für Glas-Glas wie

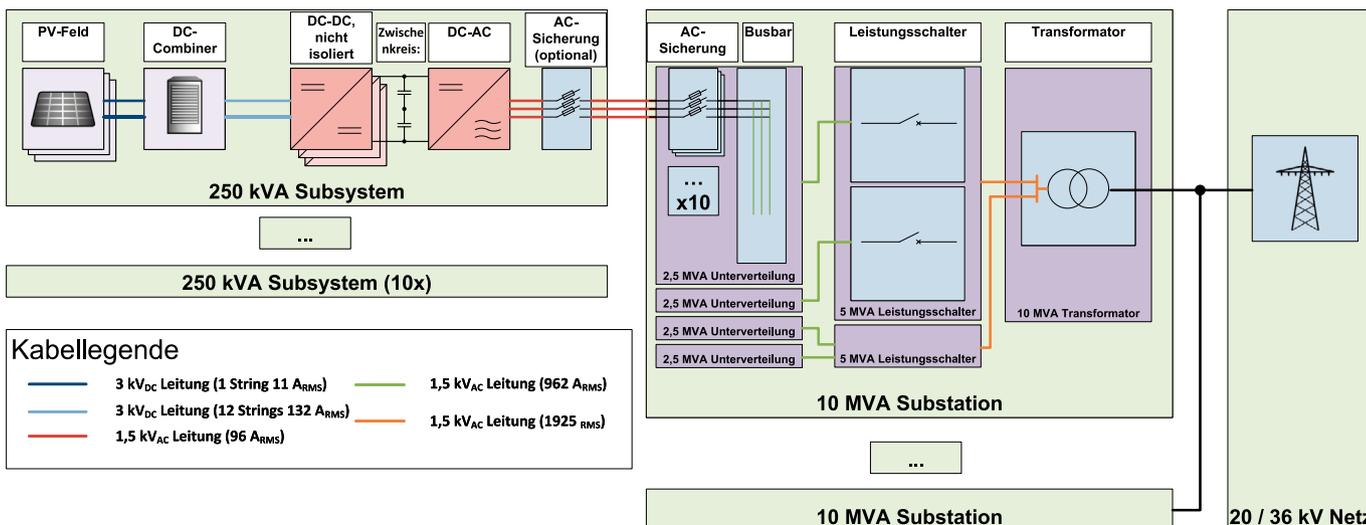


Bild 2: Kraftwerkskonzept für zukünftige Mittelspannungs-PV-Großkraftwerke

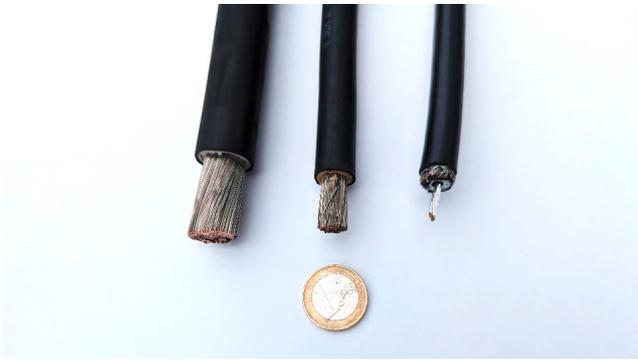


Bild 3: Kabelquerschnitte für 250 kW bei unterschiedlichen Spannungsebenen. Von links nach rechts: 129 mm² bei 800 V_{AC}, 35 mm² bei 1500 V_{AC} und 4 mm² bei 5.000 V_{AC}

auch Glas-Folien Module. Je nach Systemkonfiguration lassen sich damit in aktuellen PV-Großkraftwerke AC-Systemspannungen zwischen 480 V_{AC} und 880 V_{AC} erreichen. Das obere Ende dieses Bereiches kann allerdings nur von Geräten mit DC/DC-Steller erreicht werden, da ohne Steller die mögliche AC-Ausgangsspannung abhängig von der maximum power point (MPP)-Spannung des PV-Strings ist. Wie in Bild 1 dargestellt, ist die obere Grenze über die Jahre immer weiter angestiegen. Durch eine Anhebung der Systemspannung können die Ströme herabgesetzt werden. Dadurch können die Leitungsquerschnitte stark reduziert werden. Daraus resultieren erhebliche Einsparungen sowohl beim Material als auch in den Installationskosten für die Verkabelung. Gleichzeitig kann die Leistung der Subsysteme erhöht werden. Bei gleicher Kraftwerksgröße resultiert daraus eine geringere Anzahl an Transformatoren und Schaltanlagen.

Im Gegensatz zu Windkraftanlagen mit Leistungen eines einzelnen Systems von bis zu 15 MVA sind die Leistungsunterteilungen der PV-Wechselrichter relativ klein und liegen bei 150 kVA bis 3,75 MVA, je nach Systemarchitektur und wie kleinteilig sich die Unterteilung des Kraftwerks wirtschaftlich gestaltet. Das ist dabei unabhängig von der Gesamtleistung des PV-Kraftwerks. Ausschlaggebend für die kleinen Einzelleistungen ist die räumliche Ausdehnung und der hohe Flächenbedarf bezogen auf die Leistung. Hohe PV-Wechselrichterleistungen führen zu einem größeren Einzugsgebiet der zugehörigen PV-Module. Die Strecken werden sehr groß und entsprechend steigen die Leitungsverluste.

Gegenüber Windkraftablage oder Batteriegroßspeichern, die eine hohe Leistung pro Fläche haben, lohnt es sich bei PV mehr über höhere Systemspannungen nachzudenken und erste Schritte in die Mittelspannung zu machen. Dabei geht es um PV-Kraftwerksleistungen größer 80 MVA.

Bild 2 zeigt die mögliche Systemarchitektur eines PV-Kraftwerks mit einer Systemspannung von 1,5 kV_{AC}. Das Gesamtkraftwerk wird aus Stringwechselrichtern aufgebaut mit einer Sammlung auf AC-Ebene vor dem Transformator in die nächsthöhere Netzebene.

Die Leerlaufspannung des PV-Generators wurde auf maximal 3 kV_{DC} festgelegt. Diese Spannung wird mit Glas-Glas PV-Modulen in Zukunft umsetzbar sein. Die minimale MPP-Spannung liegt damit bei 1,7 kV_{DC}. Durch die höheren Spannungen innerhalb des Kraftwerkes ergibt sich ein

großes Einsparpotential bei den Leitungen. Bei gleichem Querschnitt können die Verluste stark reduziert und damit ein höherer Ertrag erzielt werden. Wahlweise können bei gleichbleibenden Verlusten die Kabelquerschnitte reduziert werden. Dies senkt die Material- und Installationskosten. Zur Verdeutlichung sieht man in Bild 3 drei unterschiedliche Kabelquerschnitte, ausgehend von einer Nennleistung von 250 kW bei unterschiedlichen Spannungen. Es ergibt sich eine Einsparung von vielen Tonnen Kupfer, bzw Aluminium in großen Anlagen und Kraftwerken. Die Kostenreduktion geht dabei nicht nur durch die reine Materialersparnis einher, sondern wird auch wesentlich durch die geringeren Installations und Montagekosten bestimmt.

Dieser Effekt wird sich weiter stark auswirken, wenn vermehrt Mittelspannungskabel verwendet werden und sich durch die damit steigenden Stückzahlen die Differenz in den Kosten zwischen Nieder- und Mittelspannungskabeln verringert. Die Leistung eines Subsystems beträgt 10–12 MVA. Dies entspricht der maximalen Leistung, welche bei einem Transformator mit einer 1.500 V_{AC} Unterspannungswicklung noch realisiert werden kann. Heutige Konzepte nutzen meist Subsysteme in der Größe zwischen 3–5 MVA. Eine größere Leistung lässt sich in einem Niederspannungstransformator nur durch zusätzliche forcierte Kühlmaßnahmen verwirklichen. Durch die größeren Subsysteme ergibt sich ein Einsparpotential, da weniger Transformatoren, Schaltanlagen und zugehörige Baumaßnahmen notwendig sind.

Der Umrichter (Bild 4) wird am Fraunhofer ISE entwickelt. Er hat eine Nennleistung von 250 kVA und besteht aus DC/DC-Steller mit Wechselrichter. Durch die hohe PV-MPP-Spannung kann DC-seitig ein einfacher Hochsetzsteller mit 3,3 kV SiC-MOSFETs bei einer Schaltfrequenz von 24 kHz eingesetzt werden. Die Zwischenkreisspannung be-



Bild 4: Dreiphasiger 1,5 kV_{AC} / 250 kVA PV-Wechselrichter

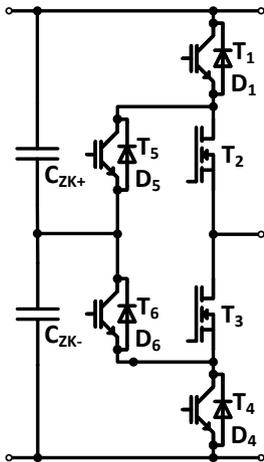


Bild 5: Hybride Modultopologie mit IGBTs und SiC-MOSFETs

Bestückung. Das heisst, es gibt technisch keine nennenswerte Nachteile, aber finanziell deutliche Vorteile, da weniger SiC-Bauelemente benötigt werden. Es lässt sich damit für den Wechselrichter einen maximalen Wirkungsgrad von 99 % erzielen.

Aber nicht nur durch große PV-Kraftwerke öffnet sich ein neues Anwendungsfeld, sondern auch mit der geplanten Elektrifizierung des LKW-Verkehrs.

Durch die Vorgabe zur CO₂-Reduktion und das Aus für Neuzulassung von Verbrennermotoren im öffentlichen Verkehr ab 2035 wird die Mobilitätswenden hin zu Elektrofahrzeugen beschleunigt werden. Es gibt viele Forschungsprojekte zu den Fahrzeugen selbst und den Ladesystemen. Allerdings findet man weniger Projekte, die die Bereitstellung der Infrastruktur und Leistung behandeln. Die Strecke im System zwischen Ladesäule und öffentlichem Netz wird weniger betrachtet. Dabei stellen sich hier viele Herausforderungen und Chancen für die Hochleistungselektronik.

Die Studie „Einfach Laden an Rastanlagen“ der Nationalen Leitstelle Ladeinfrastruktur behandelt den Leistungsbedarf von Elektrotankstellen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Fahrzeugklassen, Verkehrsknotenpunkte, Gleichzeitigkeitsfaktoren und Leistungspriorisierung. Es wurden bei den Annahmen zur erforderlichen Leistung sowohl Gleichzeitigkeitsfaktoren berücksichtigt wie auch von einem optimierten Lademanagement und Lastverteilung ausgegangen. Die Prognosen wurden bis 2035 gestellt. Dabei wurde von 50 % elektrifiziertem LKW-Verkehr ausgegangen. Das heißt nach 2035 wird noch ein weiterer Ausbau erforderlich sein.

Es wird in der Studie zwischen drei Anlagentypen unterschieden und den jeweiligen Anschlussleistungen mit vorhandener Lastoptimierung:

- Prototyp I, 26 MVA: Dies sind große Rast- und Autohöfe an internationalen Knotenpunkten und Autobahnabschnitten mit hohem Verkehrsaufkommen.
- Prototyp II, 16 MVA: Stationen an Abschnitten mit durchschnittlichem Verkehrsaufkommen.
- Prototyp III, 8 MVA: Bisher unbewirtschaftete Rastplätze, also was man als einfache Parkplätze entlang der Autobahn mit Sitzgelegenheit kennt.

trägt 2,4 kV_{DC}. Wenn man die zulässige Spannung ansetzt, dann läge die PV-MPP-Spannung unter 1000 V und es wären DC-Stellerschaltungen mit HF-Trafo sinnvoller. Im Wechselrichter wird ein hybrides ANPC-Modul mit 1700 V IGBTs und MOSFETs eingesetzt (Bild 5). Die Schaltfrequenz beträgt hier ebenso 24 kHz. Es gibt bei dieser Schaltfrequenz keinen nennenswerten Unterschied in der Gesamtverlustleistung zwischen dem hybriden ANPC-Modul oder einem ANPC-Modul mit reiner SiC

Dabei ist die Vorgabe entlang der Autobahnen, dass mindestens alle 50 km eine Lademöglichkeit für LKWs und PKWs gegeben sein soll. Es gibt rund 13.200 Autobahnkilometer in Deutschland. Man kann daher von einer zu installierenden Anlagenleistung im hohen zweistelligen Gigawatt-Bereich ausgehen.

Diese Zahlen gelten nur für die Autobahnen. Große Elektrotankstellen in Städten und Ladestationen bei Fuhrunternehmen sind dabei nicht berücksichtigt.

Die hohen Anlagenleistungen werden aber nicht nur fürs Schnellladen benötigt werden. Langsam laden mit kleiner Leistung über Nacht bedeutet bei LKWs eine Leistung in der Größenordnung von 100 kVA. Große Autohöfe haben um 100–150 LKW-Stellplätze. Damit liegt man auch beim Laden über Nacht je nach Gleichzeitigkeitsfaktor in dem Bereich von 5–7 MVA.

Es wird auch eine Herausforderung für bestehende Speditionen werden. Bisher galten als wichtige Kriterien für einen Standort nur ausreichend Platz und gute Verkehrsanbindung. In Zukunft wird je nach Größe der Spedition die Anbindung an das 110 kV Netz ausschlaggebend sein, wenn man im eigenen Betrieb laden mag. Bei kleinen Speditionen mag es wirtschaftlicher sein an öffentliche Elektrotankstellen zu fahren. Aber auch diese müssen gebaut werden.

Es ist erforderlich, dass man bei diesen Anlagengrößen von Beginn an nicht nur als industrielle Verbrauchereinrichtungen betrachtet. Die Gesamtfläche von großen LKW-Autohöfen liegt um 6–10 ha. Auch wenn nur die kleinere asphaltierte Parkplatzfläche mit PV überdacht wäre (ca. 5 ha), so wären Leistungen um 4 MWp möglich. Eine stationäre Batterie wird allein schon zur Reduktion der Spitzenlast wirtschaftlich sinnvoll werden, insbesondere zu Beginn, wenn die Anlage noch nicht über einen ausreichenden Netzanschluss verfügt. Gleiches gilt für das langsame Laden über Nacht bei Speditionen. Der Leistungsbedarf schwankt stark im Tag-Nacht-Rhythmus. Der Einsatz einer stationären Batterie ist dabei naheliegend. Technisch kann diese tagsüber auch sehr gut als netzdienlicher Speicher genutzt werden.

Elektrotankstellen sind daher möglichst von Anfang an als Hybridkraftwerk mit Erzeuger und Speichereinrichtungen zu betrachten, um die Wirtschaftlichkeit zu steigern und generell mit dem erforderlichen Ausbau der Leistung auch bis 2035 zeitlich zurecht zu kommen.

Für die leistungselektronische Systemtechnik bedeutet allein die Anschlussleistung, dass es keine Niederspannungsanlagen sein können. Es ist klar, dass ein Anschluss mindestens an die Mittelspannung erfolgen muss und bei hohen Bezugsleistungen von großen Anlagen direkt an die Hochspannung.

Schnellladung bei LKWs kann nach Norm bei bis zu 1250 V_{DC} / 3 kA_{DC} erfolgen. Schnellladung von PKWs bedeutet aktuell um 850 V_{DC} / 350 kW.

Stand der Technik sind Ladesysteme mit einer gemeinsamen AC-Ebene. Bei MCS-Laden bedeutet dies dann Einheiten um 3 MVA / 20 kV mit Schaltanlage, Trafo, Ladeumrichter. Bild 6 zeigt exemplarisch möglich Container-Konzepte mit Varianten zu vollem Leistungsbezug aus dem Netz, reduzierte Anschlussleistung durch Lademanagement und reduzierte Anschlussleistung mit Batteriestützung. Damit lassen sich schnelle Lösungen für den Anfang schaffen.

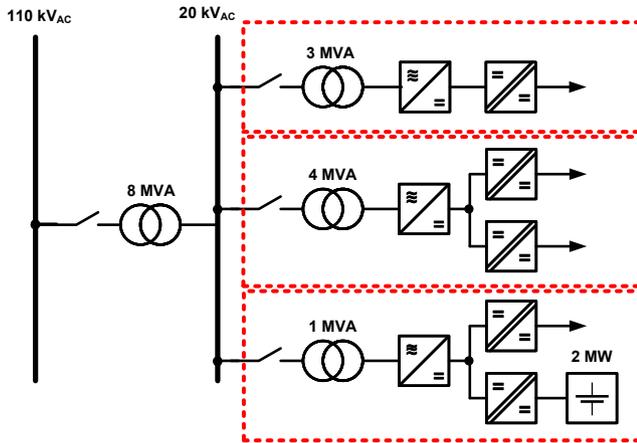


Bild 6: Beispiel von AC-Systemlösungen für MCS-Ladestationen

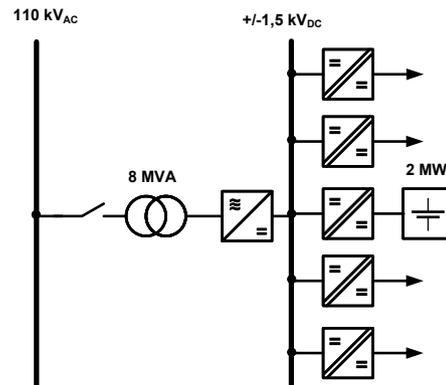


Bild 7: Beispiel einer DC-Systemarchitektur für MCS-Ladestationen

In der zukünftigen Entwicklung mit wachsendem Leistungsausbau der Anlagen können DC-Systeme mit Spannungsebenen um $1,5\text{--}3\text{ kV}_{\text{DC}}$ wirtschaftlich interessant werden, insbesondere wenn Batterien oder PV eingebunden werden.

Dabei sind auch bipolare Netze mit z. B. $\pm 1,5\text{ kV}_{\text{DC}}$ denkbar (Bild 7). Die Ladeumrichter sind galvanisch trennend, so dass an $1,5\text{ kV}_{\text{DC}}$ die Ladeumrichter für PKWs bei Schnellladung oder LKWs mit langsamen Laden angebinden werden können. Zwischen den Außenleitern mit 3 kV_{DC} können LKWs mit hohem Leistungsbezug beim Schnellladen angeschlossen werden.

Zusammenfassung

Mit SiC zeigt sich in der Mittelspannung ein fantastisches Entwicklungspotential, das jedoch noch viel Arbeit benötigt, um es technisch über das volle Potential nutzbar zu machen. Die klassische Anwendung von MS-Leistungselektronik sind Antriebe. Hier hat sich im Bereich der Bahn auch einiges bei der Anwendung von SiC getan. Wenn man zurückblickt auf die anfangs kleinen Schritte, die man vor 14 Jahren mit $1200\text{ V SiC MOSFETs}$ gemacht hat und damals in PV-Wechselrichtern die Schaltfrequenz von 16 kHz auf $24\text{--}48\text{ kHz}$ erhöht hat, dann wirkt das mit den Möglichkeiten von heute sehr zögerlich. Ähnlich wird es in einem zukünftigen Rückblick auch mit SiC in der Mittelspannung sein. Die breite industrielle Anwendung jenseits der Antriebe steht aber noch aus, aber der stetig wachsende Innovationsdruck auf die leistungselektronische Systemtechnik, der sich aktuell im Bereich der Energietechnik und Elektromobilität aufbaut ist groß.

Im Kraftwerksbau stößt die PV-Systemtechnik bereits an die Grenzen der Niederspannung. In Normungsgremien wird an einer Erweiterung der PV-Modulspannung gearbeitet. Erste PV-Kraftwerke mit 2 kV_{DC} -Modulstrings sind bereits in USA und China aufgebaut. Höhere Spannungen sind technologisch umsetzbar.

Es wäre utopisch zu glauben, dass bei Megawatt-Ladestationen die Systemarchitektur von schnell verfügbaren Komplettlösungen im Container mit Schaltanlage, Trafo

und Ladeumrichter sich von heute auf morgen zu einer neuen DC-Systemarchitektur entwickelt. Aber ebenso wäre es fahrlässig zu hoffen, dass man mit dem Stand der Technik elegant über die nächsten 10–20 Jahre durch die Mobilitätswende kommt. Der benötigte Zubau und die begrenzten Flächen bei hohen Anlagenleistungen erfordern angepasste Lösungen. Generell ist es sinnvoll solche Industrieanlagen bereits ab wenigen MVA-Anschlussleistung schon von vornerein als Hybridkraftwerk zu betrachten.

Die Märkte der Energie- und Mobilitätswende sind für die Leistungselektronik sehr groß. Beide haben die Chance den klassischen Markt der Mittelspannungsumrichter für die Antriebstechnik zu überholen.



Dirk Kranzer
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme,
Freiburg, Deutschland



Michael Geiss
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme,
Freiburg, Deutschland



Andreas Hensel
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme,
Freiburg, Deutschland

T3 Wie Leistungselektronik das elektrische Energiesystem erst möglich macht

Einleitung

Bis 2050 wird ein Großteil der weltweiten Energiesysteme auf erneuerbaren Energien und CO₂-armer Erzeugung basieren. In vielen Teilen der Welt findet der Ausbau von erneuerbaren Energien bereits mit sehr hoher Geschwindigkeit statt und beschleunigt sich immer noch weiter. Die Grundlage für den Ausbau der erneuerbaren Energien – insbesondere von Windkraft- und Photovoltaikanlagen – ist eine Schlüsseltechnologie, die sich derzeit überragend schnell entwickelt: Leistungselektronik.

Vor 30 Jahren hätte der Pionier in der Wissenschaft Frede Blaabjerg, Professor für Leistungselektronik und Antriebe an der Aalborg University in Dänemark, nicht gewagt sich vorzustellen, dass Leistungselektronik eine kritische Schlüsseltechnologie werden würde, um zu einem klimaneutralen Energiesystem beizutragen. Elektrifizierung ist der Dreh- und Angelpunkt der Energietransformation. [1]

Aktuell trägt elektrische Energie zu etwa einem Fünftel der gesamten Energieversorgung bei. Dieser Anteil wird sich in den kommenden Jahrzehnten auf zwei Drittel oder noch mehr erhöhen. Wir hätten die heutige installierte Leistung an Windenergie nicht ohne Leistungselektronik in den Windkraftanlagen selbst und den Lösungen für die Netzanbindung wie STATCOM und Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragungs-Technologie (HGÜ-Technologie) geschafft.

Zusätzlich zur Netzintegration von erneuerbaren Energieanlagen spielt Leistungselektronik eine Schlüsselrolle bei der stabilen Führung des immer komplexeren Systems mit variablen Erzeugern und neuen Verbrauchern auf verschiedenen Spannungsebenen. Die Systemträgheit sinkt mit dem Wegfall rotierender Massen. Bei Flexibilität geht es unter anderem darum, eine effiziente und schnelle Reaktion auf dynamische Änderungen bereitzustellen, um die Frequenz zu halten. Wegen dem ständig wachsenden Anteil von fluktuierenden Energiequellen im System steigt der Bedarf an solcher Flexibilität an. Zu jedem Zeitpunkt müssen Erzeugung und Verbrauch ausgeglichen sein. Zudem ist der Transport der Energie über lange Strecken immer wichtiger für den Ausgleich von Erzeugung und Verbrauch zwischen Regionen. Batteriespeichersysteme (BESS – Battery Energy Storage Systems), Flexible Wechselstrom Übertragungssysteme (FACTS – Flexible AC Transmission Systems) und die HGÜ-Technologie sind gute Beispiele dafür, wie Leistungselektronik diese Herausforderungen auf verschiedenen Spannungsebenen meistert.

In den letzten Jahren wurden neue Wechselrichtertopologien entwickelt – von einfachen Zwei-Level Topologien bis hin zu Drei-Level und modularen Multi-Level Umrichtern (MMC). Diese bringen größere Flexibilität mit sich und können einfacher modularisiert und skaliert werden. Durch ihre

starke Leistungsfähigkeit können sie sowohl in Kilowatt- als auch in Gigawatt-Anwendungen eingesetzt werden, auch in HGÜ- und FACTS-Anwendungen. Darüber hinaus hat die Halbleiterindustrie Technologien auf Basis neuer Materialien wie z. B. Siliciumcarbid (SiC) entwickelt. Dieses Material ermöglicht eine höhere Schaltfrequenz und insgesamt effizientere und erheblich kompaktere Lösungen für den Bedarf an Flexibilität.

Es gibt viele Beispiele, die zeigen, wie Leistungselektronik die Flexibilität im Energiesystem erhöht. In Verbindung mit Energiespeichern wie Batterien oder Supercapacitors ermöglicht Leistungselektronik die Bereitstellung von zusätzlichen Netzdienstleistungen – wie beispielsweise Wirkleistung für die Frequenzhaltung von Systemen mit geringer Trägheit. HGÜ-Verbindungen zwischen Ländern in Europa stärken den regionalen Ausgleich von elektrischer Energie. Mit Hilfe von FACTS können Leistungsflüsse gesteuert und somit die Betriebsmittel in den Netzen besser ausgelastet werden. Die Entwicklung zukünftiger Offshore-HGÜ-Netze für die dort entstehenden Windparks ist ein Beispiel dafür, wie die Technologie zur Sicherung der regionalen Energieversorgung und zur Beschleunigung der Energietransformation beiträgt.

Ein weiteres Beispiel sind MVDC-Verbindungen. Leistungselektronik kann hier Flexibilität in Verteilnetze bringen, indem sie benachbarte Netzabschnitte direkt auf derselben Spannungsebene verbinden kann. Durch die Gleichstrom-Verbindung können unter anderem Abschnitte mit hoher Erzeugung und solche mit hohem Verbrauch effizient gekoppelt werden.

Anwendung und Entwicklung: HGÜ-Technologie

Die Entwicklung der Leistungselektronik führte in der zweiten Hälfte der 1990er Jahre, auf Basis von Leistungstransistoren (Insulated-Gate Bipolar Transistor, IGBT), zu der neuen selbstgeführten HGÜ-Technologie (Voltage Source Converter, VSC). Diese Technologie ermöglicht es, das grundlegende Regelverhalten eines Synchrongenerators nachzubilden. Die Wellenform kann dadurch in Bezug auf Amplitude und Phase geregelt und durch diese beiden Faktoren sowohl der Blind- als auch der Wirkleistungsfluss unabhängig voneinander gesteuert werden. [2] Große Herausforderungen gab es hier in Bezug auf das entsprechende Verhalten im Fehlerfall, und viel Aufwand wurde in die Entwicklung und Optimierung von Redundanzstrukturen investiert.

Bis zur Einführung der VSC-Technologie kam die HGÜ-Technologie vor allem bei der Verbindung asynchroner Stromnetze, der Anbindung großer Erzeugungsleistungen über weite Distanzen und der Verstärkung bestehender

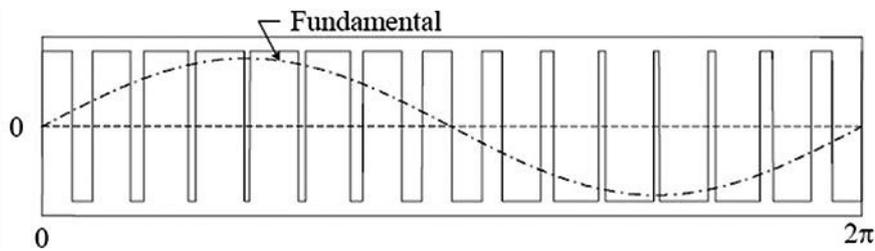


Bild 1: Schaltprinzip, Zwei-Level Konverter [2]

Verbundnetze zur Anwendung. Hierzu wurden insbesondere Leistungsthyristoren eingesetzt. Mit Einführung der selbstgeführten HGÜ-Technologie ergaben sich zusätzliche Anwendungsgebiete wie die Anbindung von Offshore-Windparks an das Onshore-Übertragungssystem und die Versorgung von Offshore-Bohrinseln. [3]

Die erste Generation der VSC-Technologie mit einer Leistung von 10–100 MW und einer Spannung von etwa ± 80 kV basierte auf einem Zwei-Level Konverter mit Pulsweitenmodulation (PWM). Die hohe Schaltfrequenz der Ventile führte zu hohen Umrichterverlusten von ca. 3 %. Außerdem war ein Tiefpassfilter notwendig, um die gewünschte Sinusform zu erzeugen. Die Schaltfolge eines Zwei-Level Konverters ist in Bild 1 dargestellt.

Die Weiterentwicklung der IGBTs mit einer höheren Stromtragfähigkeit und somit einer höheren Leistungsdichte, sowie die Einführung der Drei-Level Topologie ermöglichten in der nächsten Generation der VSC-Technologie eine Leistung von ca. 300 MW bei einer Spannung von ± 150 kV. Ein verbessertes Oberschwingungsverhalten führte außerdem dazu, dass der Bedarf an Tiefpassfiltern reduziert werden konnte. Dadurch sowie durch die weiter reduzierte Schaltfrequenz, konnten die Stromrichterverluste der zweiten Generation auf ca. 1,7 % reduziert werden.

Im Jahr 2005 wurde die dritte Generation der VSC-Technologie, mit einer Leistung von bis zu 500 MW bei einer Spannung von ± 150 kV vorgestellt. Diese ging zurück auf eine Zwei-Level Topologie, allerdings mit einem optimierten PWM-Schaltmuster. Dadurch blieben die Verluste auf dem gleichen Niveau wie beim Drei-Level Konverter, allerdings konnte die Anzahl der IGBTs reduziert werden. Durch

den reduzierten Platzbedarf bot sich diese Entwicklung vor allem für die Netzanbindung von Offshore-Windparks an, da hier der Platzbedarf und das Gewicht stark mit den Gesamtkosten korrelieren. Im Jahr 2009 wurde BorWin1, die weltweit erste Netzanbindung eines Offshore-Windparks mit HGÜ-Technologie mit einer Leistung von 400 MW, in Deutschland in Betrieb genommen. [4] Bild 2 zeigt die Konverterplattform von BorWin1.

Der nächste Schritt der VSC-Entwicklung wurde im Jahr 2010 mit dem kaskadierten Zwei-Level (CTL) Konverter im Markt eingeführt. Die CTL-Topologie in Kombination mit dem PWM-Schaltmuster führt zu einer nahezu sinusförmigen Ausgangsspannung des Konverters. Dadurch waren keine Filter mehr notwendig und die Umrichterverluste wurden auf unter 1 % gesenkt. Mit dem NordLink Interkonnektor wurden die Übertragungsnetze von Norwegen und Deutschland erstmals miteinander verbunden. Mit einer Übertragungsleistung von 1.400 MW bei einer DC-Spannung von ± 525 kV wird die Integration und der Austausch erneuerbarer Energien wie Wind-, Solar- und Wasserkraft zwischen beiden Ländern ermöglicht. [5]

Um sowohl die Spannung als auch die Leistungskapazität zu erhöhen und gleichzeitig die Verluste und den Platzbedarf weiterhin zu verringern, wurde der Modulare Multilevel-Konverter entwickelt. Die verbesserte Topologie ermöglicht eine verringerte Schaltfrequenz und eine verbesserte Ausgangsspannung wodurch die Konverterverluste weiter gesenkt wurden. Die VSC-Generation 5 verringerte weiterhin den Platzbedarf sowohl durch ein optimiertes mechanisches Design sowie durch die Verwendung von „Bimode-Insulated Gate Transistoren“ (BIGT). [2]



Bild 2: BorWin1 Offshore HGÜ Konverter



Bild 3: Nordlink Onshore Konverterstation, Quelle: TenneT

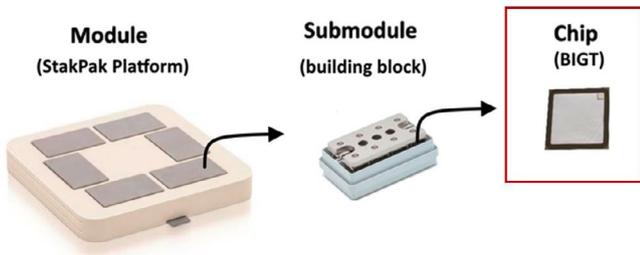


Bild 4: Aufbau eines StakPaks mit Submodul und BIGT-Chip.

Halbleiterinnovation

Der BIGT ist ein sogenanntes „Reverse Conducting Device“, also ein Leistungshalbleiter, der nicht nur wie ein einzelner IGBT in eine Stromrichtung leitet, aber auch in die entgegengesetzte Stromrichtung leiten kann. Dies wird, nicht wie in anderen Fällen zum Beispiel bei Leistungshalbleitern für den Einsatz in der Eisenbahntechnik mit einer Anti-Parallelschaltung von Dioden und IGBTs erreicht, sondern mit einem IGBT, der gleichzeitig auf dem gleichen Chip die Funktionalität einer antiparallelen Diode bietet. Dafür werden anspruchsvolle Rückseiten-Prozesse während der Herstellung des BIGTs benötigt. Gleichzeitig ermöglicht diese Implementierung aber die kompakte Bauweise und die Performance, die für diese anspruchsvolle Applikation benötigt wird. [6]

Dadurch werden Nennleistungen von bis zu 3 GW in einer Bipol-Konfiguration bei ± 525 kV erreicht. Da in Deutschland hauptsächlich HGÜ-Kabelverbindungen zum Einsatz kommen, und damit der Strom auf ca. 2 kA begrenzt ist, haben sich hierzulande Systeme mit einer Spannung von ± 525 kV und 2 GW Übertragungskapazität etabliert. [6]

Seit jeher werden gerade in Bezug auf die Leistungshalbleiter kontinuierlich Anstrengungen unternommen, um die Verluste weiter zu senken. Durch die niedrige Schaltfrequenz in der MMC-Topologie bietet sich eine Optimierung der Leitverluste an, weitere wichtige Einflussfaktoren sind aber auch die zulässigen Betriebsbereiche (SOA = „Safe Operating Area“) gerade auch in Bezug auf das Verhalten bei Fehlerströmen, die durch die immer höher werdenden Übertragungsleistungen stark angestiegen sind und die maximale Sperrschichttemperatur, die zum Beispiel eine generelle Erhöhung der Stromtragfähigkeit erlaubt. Wie bereits mehrfach erwähnt, ist gerade der Platzbedarf in einigen Anwendungen, wie zum Beispiel Offshore Wind äußerst kritisch. Durch die kontinuierliche Optimierung war es während 4 Generationen BIGT möglich die Leistungsdichte sig-

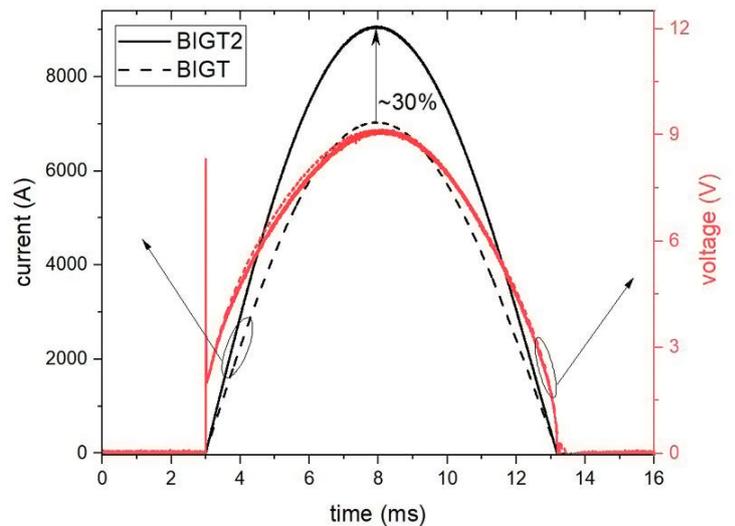
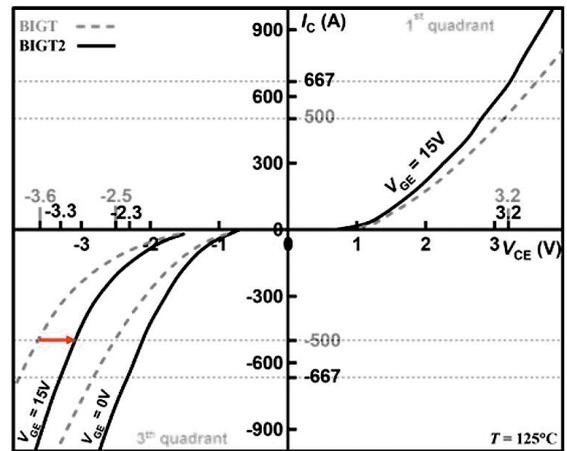


Bild 6: StakPak BIGT1 im Vergleich zu BIGT2. [6]

nifikant zu erhöhen. So konnten zum Beispiel von BIGT1 auf BIGT2 die Stromtragfähigkeit um 20 % und die SOA sogar um 25 % bei gleicher Baugröße erhöht werden.

Durch Weiterentwicklungen und die Verwendung neuester Technologien, sowie kontinuierliche Verbesserungen wird die Leistungselektronik auch in Zukunft sicherstellen, dass auch die anspruchsvollsten Szenarien im elektrischen Energiesystem abgedeckt werden können.



Bild 5: Generationen von StakPak mit der Anwendung in HVDC

Bibliographie

- [1] Hitachi Energy, "How Power Electronics is enabling the net-zero Energy System"; Perspectives, <https://www.hitachienergy.com/news/perspectives/2023/09/how-power-electronics-is-enabling-the-net-zero-energy-system>, Zürich, September 2023
- [2] Elin Rahmqvist, Mauro Monge, Peter Lundberg "Twenty-five years of Voltage Source Converter development for High Voltage DC transmission – a vendor perspective of the VSC HVDC applications evolution", CIGRE Conference, Vienna 2023
- [3] Athanasios Krontiris, „Auf dem Weg zum europäischen HGÜ-Netz“, in EW 8/2017
- [4] ABB, "Special Report 60 years of HVDC" in ABB Review, technical journal, Zürich, 2014
- [5] Hitachi Energy, "One of the world's most powerful interconnectors: Nordlink – A glimpse into the future carbon-neutral energy system", in Perspectives, <https://www.hitachienergy.com/news/perspectives/2021/05/one-of-the-world-s-most-powerful-interconnectors-nordlink-a-glimpse-into-the-future-carbon-neutral-energy-system>, Zürich, 28.05.2021
- [6] Luca De Michielis et al., "New 5.2 kV StakPak Platform with Innovative Second Generation BIGT chip", PCIM Asia, Shanghai, 09.09.2021



*Benedikt Kurth,
Vertriebsleiter, Grid & Power Quality Solutions
Deutschland, Hitachi Energy*



*Tobias Keller,
Vice President, Head of global Product
Management & Marketing, Semiconductors,
Hitachi Energy*



*Dr. Ines Romero,
Vice President Product Management
and Strategy, Hitachi Energy*



*Dr. Britta Buchholz,
Vice President Active Distribution Grids,
Hitachi Energy*

Aktuelles aus den Fachbereichen

ETG Fachbereich A1

E1 Elektrische Maschinen und Antriebe, Mechatronik

Der Fachbereich A1 („Elektrische Maschinen, Antriebe, Mechatronik“) konnte im Jahr 2023 zwei Treffen und eine Fachtagung organisieren.

Das erste Treffen fand im Februar bei der Firma Enercon in Aurich statt und war gut besucht.

Die Arbeitsgruppe hatte die Gelegenheit, eine 7,5 MW Windturbine im Feld zu besichtigen. In einer zweiten Besichtigung konnte die Prototypenfertigung von Enercon angeschaut werden. Dabei bestand auch die Gelegenheit, eine halbfertige Gondel von innen zu besichtigen und die derzeit modernste Technik detailliert zu sehen.

Enercon ist einer der größten Windenergieanlagenhersteller, die gesamte installierte Leistung beträgt ungefähr 60 GW. Ein neuer Trend ist das individuelle Pitchen der Rotorblätter im Verlauf der Drehung. In der unteren Stellung herrscht weniger Wind, also weniger Schub als in der oberen Stellung. Daraus entsteht normalerweise ein Kippmoment auf den Turm. Durch individuelles Pitching während des Umlaufs um ca. 1-2 Grad wird das verringert.

Bei Starkwind (Überwind ab 25 m/s) oder starken Turmschwingungen oder Überdrehzahl (z. B. wegen Pitchproblemen) wird die Anlage abgeschaltet (= Notfahrt = Blätter gehen so schnell wie möglich in eine sichere Position, dauert ca. 30 s). Damit verbunden ist eine Verringerung des Schubs, d.h. die Anlage kommt aus der Rückneigung wieder nach vorne in senkrechten Stand und daraus können Schwingungen entstehen. Diese Schwingungen werden online per Software über eine geeignete Pitchverstellung ausgeregelt.

Das zweite Treffen wurde im November bei der Firma Flender (ehemals Loher bzw. Siemens Energy) in Ruhstorf an der Rott bei Passau ausgerichtet. Es war ebenfalls gut besucht. Flender hat seinen Hauptsitz in Bocholt und fertigt traditionell industrielle Großgetriebe und Kupplungen. Etwa 2/3 des Konzernumsatzes entfallen auf den Windsektor.

Loher wurde 1895 am Standort Ruhstorf gegründet. Der Einstieg in Entwicklung und Produktion von Windkraftgeneratoren erfolgte bereits 1982, zunächst mit Festdrehzahlmaschinen bis 100 kW.

Bei Flender gibt es drei Varianten von Generatoren für Windkraftanlagen: High-Speed (50 Hz 4-polig 1.500/min oder 60 Hz 6-polig 1.200/min) mit Getriebe, Mid-speed mit kleinerem Getriebe oder Direct-drive ohne Getriebe. Angeboten werden Induction, Doubly-Fed und PM-Synchron Generatoren bis 10 MW. Auch Statorsegmente für Direct-Drive Synchronmaschinen (vor allem für off-shore). Achshöhe 500 bis 710 (DFIG bis 800) mm.

In China gibt es bei Off-Shore Anlagen eine starke Tendenz weg von Direct-Drive hin zu Mid-Speed. In Europa bleibt es überwiegend bei Direct-Drive. Derzeit sind in 50 % aller Off-Shore Anlagen weltweit Segmente von Winergy im Einsatz.

Eine spannende neue Entwicklung ist ein PM-Generator mit ölgekühlter Statorwicklung. Dadurch können Leistung und Bemessungsstrom gesteigert werden. Der Rotor ist mit V-förmig vergrabenen NdFeB-Magneten ausgerüstet und gegen kapazitive Aufladung durch einen Faraday-Käfig geschirmt (leitfähiger Lack auf Hülse). Damit konnte die Lagerspannung halbiert und auf Erdungsbürsten verzichtet werden.

Im November fand die 2-tägige VDE Fachtagung „Elektromechanische Antriebssysteme“ in Wien im Haus der Ingenieure statt. Ausrichter war diesmal der OVE, die wissenschaftliche Organisation übernahm der VDE, Tagungsleitung hatten die Kollegen Binder, Doppelbauer und Neudorfer. Die Tagung war mit 110 Teilnehmern ein voller Erfolg. Es konnten interessante 10 Keynotes aus der Industrie eingeworben werden. Die mehr als 40 wissenschaftlichen Beiträge wurden über zwei parallele Sessions und eine Postersession verteilt. Am Abend des ersten Tages wurde eine eindrucksvolle Stadtführung durch Wien mit anschließendem „Get Together“ im Wiener Rathaus organisiert.

Aufgrund des schönen Erfolges soll die Fachtagung turnusgemäß in zwei Jahren erneut organisiert werden. Gemäß dem neuen D-A-CH-Konzept ist dann erstmals eine Austragung in der Schweiz vorgesehen.



Prof. Dr.-Ing. Martin Doppelbauer
Karlsruher Institut für Technologie (KIT),
Vorsitzender ETG FB A1

ETG Fachbereich A2

E2 Bahnen mit elektrischen Antrieben

1 Außendarstellung

Erstellung der Studie „Mut zur Fahrleitung“

Mittlerweile haben zwei Arbeitssitzungen stattgefunden, und die Struktur des Positionspapiers wurde festgelegt. Wichtige Arbeitshypothese:

Das Dokument soll den Befürwortern einer fortschreitenden Elektrifizierung helfen, Gegenargumente zu relativieren und einen Interessensausgleich mit Kritikern herbeizuführen. Damit soll es langfristig angelegt und allgemeingültig sein; im Gegensatz zu den vielfältigen Fallstudien und Gutachten, die nur unter bestimmten zeitlichen und örtlichen Randbedingungen gelten und deshalb oft technische und/oder betriebliche Sonderlösungen propagieren.

Präambel (Auszug):

Elektrisch fahren ist unbestritten die bevorzugte Traktionsart: Leistungsfähig, Robust, Effizient, Rückspesefähig... Aber wie kommt die Energie auf den Zug?

Mittlerweile gibt es zwar leistungsfähige und (halbwegs) effiziente Alternativen zur Fahrleitung, in Form von Batteriespeichern mit und ohne „range extender“ (z. B. Wasserstoff-Brennstoffzelle), aber diese bedeuten IMMER einen Verlust an Effizienz und einen Mehraufwand bei der Beschaffung und Instandhaltung, sowie betrieblich ungewünschte Klein-/Sonderserien, wenn der fahrleitungslose Betrieb nicht weitgehend „netzeinheitlich“ umgesetzt ist.

Rohstoffe für Speichertechnologien als auch die Energiemenge sind leider kostbar und endlich.

Folglich wäre grundsätzlich und langfristig eine Elektrifizierung der meisten Strecken (integrale Netze nach Schweizer Vorbild) anzustreben. Dies mag

- kurzfristig (z. B. wegen anderer Priorisierung),

- mittelfristig (z. B. wegen schwieriger Rahmenbedingungen oder Finanzierung) oder
 - langfristig (z. B. wegen besonders sensibler/komplexer Abschnitte, Naturschutzgebiet, etc.)
- nicht so sein, und dafür sind Übergangs- oder Sonderlösungen sinnvoll.

2 Organisation von Fachtagungen

2.1 Elektrische Fahrzeugantriebe und -ausrüstungen
(Dresden, 1. + 2. 12. 22)

Inhaltlich war es eine rundum gelungene Veranstaltung, wenn auch mit weniger Teilnehmern als gewöhnlich. Eine mögliche Ursache wird in der „Überfüllung“ des zweiten Halbjahres mit Veranstaltungen nach der Corona-Pause gesehen, kombiniert mit Budgetknappheit. Eine ausführliche Zusammenfassung der Inhalte wurde in der Januarausgabe der eb veröffentlicht.

2.2 Sicherheit und Zulassung elektrischer Bahnausrüstungen
(Dresden, Dezember 23)

Unter Mitwirkung zweier Kollegen vom Eisenbahn-Bundesamt wurde das Tagungsprogramm ausgearbeitet. Inhaltliche Schwerpunkte:

- Beschleunigungskommission Schiene – Was unterstützt die Umsetzung?
- Sektorinitiativen Fahrzeugzulassung – Ergebnisse und Fallbeispiele für Verbesserungen
- Inverkehrbringen neuer Technologien – Erfahrungen und Perspektiven
- Digitalisierung der Prozesse – Welcher Nutzen wird erwartet?

Motto der Podiumsdiskussion: „Prozeduren oder Sachverstand: Wer macht das Rennen?“

3 Arbeitsprogramm und Ausblick 2023/24

3.1 Mobilitätskongress / Forum Bahntechnik
(Nürnberg, 17. 04. 24)

Die Planung ist seitens unseres Partners c-na bereits weit fortgeschritten; das „Forum Bahntechnik“ soll mit dem Logistikforum am Vortag kombiniert werden. Unter dem Motto „unlocking opportunities“ sollen folgende Themen adressiert werden:

- Vergleich Bahnindustrie – Autoindustrie
- Politischer Block „Stärkung des Schienengüterverkehrs“
- DC-Netze Bahn vs. Haustechnik vs. Industrie (unter Beteiligung des Clusters Leistungselektronik)
- Block Antriebs- und Steuerungstechnik.

3.2 Fachtagung des VDV-Schienenfahrzeugausschuss
(Erfurt, November 24)

Der Schienenfahrzeugausschuss bestätigte das Interesse an einer gemeinsamen Vorbereitung der SFA-Tagung, die nach aktueller Planung am 5./6. 11. oder 6./7. 11. in Erfurt stattfinden soll.

Hauptthema bei der Fahrzeug-Entwicklung sei der kostengünstige Betrieb (Energie und Instandhaltung) bei weiter steigenden Komfort-Anforderungen.

- Weiterhin sind angedacht:
- Drehstromantrieb: wo geht die Reise hin?
 - Überführung BOStrab in DIN 564x
 - Workshops nach dem Muster der AEE-Fachtagung
 - Prozessnorm + IT-Security.

3.3 Fachtagung „El. Fahrzeugantriebe und Ausrüstungen“ (Dez. 24)

Zur Steigerung der Teilnehmerzahlen wurden verschiedene Ansätze diskutiert, die Veranstaltung für Teilnehmer attraktiver zu machen:

- Kann man sie als „zertifizierte“ Weiterbildungsmaßnahme anbieten?
- Wer wäre die Zielgruppe; Einsteiger oder eher Fachleute/Experten?
- Kann man einen oder beide Vormittagsblöcke am Freitag in Tutorials umwandeln? Mögliche Themen:
 - EMV (Beeinflussungen, Achszähler usw.)
 - Energieeffizienz im System Vollbahn
 - Schutzmaßnahmen und Erdung (z. B. → Lagerströme)
 - Netzverträglichkeit
 - Ladeinfrastruktur für Akkuzüge
 - (professionelle) Spezifikation / Antriebsauslegung
 - ...
- Wie viel Anleihe ist bei Industriekomponenten / Straßenfahrzeugen möglich?

Die erste Sitzung des Programmausschusses wird am Vortag der Zulassungstagung (6.12.23) an der TU Dresden stattfinden.



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

ETG Fachbereich Q1

E3 Leistungselektronik und Systemintegration

Die Mitglieder des Fachbereich Q1 „Leistungselektronik und Systemintegration“ diskutieren in ihren Sitzungen aktuelle fachliche Themen. Im Ergebnis engagiert sich der Fachbereich in der Ausrichtung und Ausgestaltung von Veranstaltungen, die die aktuellsten Entwicklungen in der Leistungselektronik und angrenzender Fachgebiete aufzeigen. Ziel ist es dabei, das interessierte Fachpublikum zusammenzubringen und auf diese Weise Gelegenheit zum intensiven fachlichen Austausch zu geben, künftige, relevante Themen zu diskutieren und somit voranzutreiben. Dies ist mit den in 2023 stattfindenden Veranstaltungen wieder sehr gut gelungen.

Am 20. und 21.06.2023 fand die Tagung *Bauelemente der Leistungselektronik und ihre Anwendungen* statt. Diese Tagung wird regelmäßig im Abstand von 5 – 6 Jahren vom Q1-Fachbereich organisiert und gestaltet. Sie findet traditionell in Bad Nauheim statt. Diese somit traditionsreiche Fachtagung gibt einen Überblick über die in den letzten 6 Jahren erreichten Fortschritte auf dem Gebiet der Leistungselektronik, und einen Ausblick auf die kommenden Innovationen. Die Beschränkung auf eingeladene Übersichtsvorträge verleiht der deutschsprachigen Tagung einen eigenen Charakter; Teilnehmer schätzen sie wegen ihrer hohen Qualität und ihrem großen Informationsgehalt.

Anstelle des bisherigen Industriearbeitskreises Mittelspannungs-Leistungselektronik wurde vom Fachbereich Q1 gemeinsam mit dem European Center for Power Electronics e.V. (ECPE) ein Seminar *Megawatt-Laden – Ladeinfrastruktur für schwere Nutzfahrzeuge* angeboten. Diese Veranstaltung widmete sich der leistungselektronischen Systemtechnik zum Megawatt-Laden (MCS) von Nutzfahrzeugen. Im Fokus stehen dabei Ladeparks, also moderne Tankstellen an Autobahnen in der Stadt oder auf Gewerbeflächen. Neben den systemtechnischen Herausforderungen

für die MCS – Ladetechnik und das Fahrzeug selbst, stand auch die Bereitstellung der elektrischen Energie im Zentrum der Betrachtung. Die Veranstaltung richtete sich an Experten aber auch Führungskräfte aus dem Bereich der Leistungselektronik, Netze, Anlagen- und Stadtplanung.

Die im Jahr 2023 durchgeführten Veranstaltungen fanden in Präsenz statt und wurden von den Teilnehmern sehr gut angenommen. Auch die Arbeitstreffen des Fachbereichs wurden gut besucht. Der Fachbereich Q1 arbeitet bereits an den im kommenden Jahr – 2024 – geplanten Terminen.

So wird vom 12. bis zum 14. März 2024 die 13. International Conference on Integrated Power Electronics Systems (CIPS) in Düsseldorf stattfinden. Diese Konferenz wird alle 2 Jahre gemeinsam von Q1 und European Center for Power Electronics e.V. (ECPE) veranstaltet. Das Programm umfasst i. d. R. ca. 100 eingereichte und eingeladene Beiträge aus der internationalen Fachwelt. Es wird dabei über Bauelemente der Leistungselektronik, Aspekte von Gehäusen bis hin zu ihrer Montage in mechatronischen Systemen, über Aspekte der Zuverlässigkeit sowie der elektromagnetischen Verträglichkeit von leistungselektronischen Systemen referiert und diskutiert. Da die Leistungselektronik ein für die Umgestaltung der elektrischen Energieversorgung und Mobilität grundlegend relevanten Fachgebiet darstellt, haben die durch die CIPS adressierten Themen einen hohen Stellenwert für die ETG.

Mit dem Energy Conversion Congress & Expo (ECCE) Europe findet in 2024 wieder eine große internationale vom IEEE unterstützte Leistungselektronik-Konferenz in Deutschland statt. Diese Veranstaltung ist für den Zeitraum 2. bis zum 6. September 2024 in Darmstadt geplant und bietet eine Austausch-Plattform zwischen Leistungselektronikspezialisten aus Industrie und Akademia zu leistungselektronischen Systemen und ihren

Komponenten. Bei dieser Konferenz handelt es sich um eine der größten europäischen Fachkonferenzen mit einem weiten Spektrum an Themen der Leistungselektronik. Der Fachbereich Q1 unterstützt bei dieser ECCE 2024 in Vorbereitung sowie Durchführung.

Auch die Mitglieder des Fachausschusses Q1.1 Kontaktlose Energie- und Datenübertragung tauschten sich intensiv aus, z. B. während gemeinsamer Aktivitäten wie z. B. im Rahmen vom GAK 353.1 und gemeinsamen Projektaktivitäten. Aktuelle Themen der Normung IEC 61980, die Entwicklung der EMV-Normungsaktivitäten CISPR 11 sowie die aktuelle Entwicklungen und Projektergebnisse auf dem Gebiet der induktiven Energie- und Datenübertragung, insbesondere Prüf- und Messbedingungen für die Bewertung der EMV von kontaktlosen Energieübertragungssystemen in verschiedenen Anwendungsbereichen, waren Themen angeregter Diskussionen.

Der Fachbereich Q1 „Leistungselektronik und Systemintegration“ freut sich in diesem Jahr wieder über einen ETG Literaturpreisträger. Herr Dr.-Ing. Daniel Dinkel (Universität der Bundeswehr München) wurde für seinen Beitrag „Direct Multivariable Control for Modular Multilevel Converters“, erschienen in *IEEE Transactions on Power Electronics* (Volume: 37, Issue: 7, July 2022), ausgezeichnet. Herzlichen Glückwunsch!



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

ETG Fachbereich Q2

E4 Werkstoffe, Isoliersysteme, Diagnostik

Der Fachbereich Q2 arbeitete im Jahr 2023 schwerpunktmäßig an der Veranstaltung „High Voltage Goes Green“ und der Task Force „Betriebsmittel im Netz der Energiewende“. In Präsenz getroffen haben sich die Mitglieder in Braunschweig und Berlin. Das Treffen in Braunschweig wurde am 22.06.2023 in den Räumlichkeiten des elenia Institut für Hochspannungstechnik und Energiesysteme durchgeführt. An diesem Treffen nahm auch Regine Mallwitz, Leiterin des Q1 Leistungselektronische Systeme, teil. Fokusthemen waren gemeinsame Aktivitäten im Bereich Nachhaltigkeit und die Gewinnung von Nachwuchs-Fachkräften. Am Vorabend fand eine eindrucksvolle Führung durch die Physikalisch-Technische Bundesanstalt mit anschließender Diskussion zu aktuellen Herausforderungen in der elektrischen Energiemesstechnik statt, z. B. der Messung hoher Gleichspannungen mit Genauigkeiten im ppm-Bereich.

Für das Treffen am 22.06.2023 hat sich gezeigt, dass ein Treffen nur mit einem hybriden Format durchführbar ist. Der Reiseaufwand ist für viele Teilnehmer zu hoch.

Am 26. Oktober 2023 fand der Workshop "High Voltage goes Green" in der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften statt. Der Workshop befasste sich mit Lösungen für eine nachhaltige und CO₂-neutrale Energieversorgung.

In der ersten Veranstaltung haben 40 Teilnehmer und Teilnehmerinnen intensiv über verschiedene Lösungen mit einem geringeren ökologischen Fußabdruck im Bereich Schaltanlagen, Transformatoren und Kabelsysteme diskutiert. Besonderes Augenmerk lag dabei auf dem Einfluss der europäischen Regelung. Die durchweg sehr guten Vorträge wurden auf äußerst konstruktive und offene Weise kommentiert und geschätzt. Eine Wiederholung der Veranstaltung ist in Planung.

Im Jahr 2023 konnte die *Task Force "Betriebsmittel im Netz der Energiewende"* bereits erste Ergebnisse veröffentlichen. Die Poster, präsentiert während der Fachtagung "Transformer Life Management" und des "CIRED D-A-CH Workshops", stießen bei den Teilnehmenden auf außerordentliches Interesse. Im Rahmen des Workshops "High Voltage Goes Green" wurde zudem ein Vortrag gehalten.

Die gezielte, statische und dynamische Überlastung von Betriebsmitteln betrifft sowohl Netzbetreiber als auch Errichter gleichermaßen. Durch eine gezielte Auslastung können Engpässe im Netz teilweise kompensiert werden und neu errichtete Anlagen weisen einen geringeren ökologischen Fußabdruck auf. Weitere Veröffentlichungen sind für das Jahr 2024 geplant. Die abschließende Studie soll im Frühjahr 2024 auf den Webseiten der ETG zum Download zur Verfügung stehen.

Die organisatorischen und inhaltlichen Vorbereitungen für die *VDE Fachtagung Hochspannungstechnik* am 11.–13. November 2024 in Berlin laufen. Es können gerne noch Beiträge eingereicht werden.



Der FB Q2 hat aktuell 21 Mitglieder aus der Gruppe der Hersteller, Netzbetreiber und Wissenschaftler. Es konnten 3 neue Mitglieder gewonnen werden.



Prof. Dr.-Ing. Michael Kurat,
Technische Universität Braunschweig,
Vorsitzender ETG FB Q2



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

ETG Fachbereich Q3

E5 Kontaktverhalten und Schalten

Der Fachbereich setzt sich derzeit aus elf aktiven Mitgliedern zusammen und bearbeitete im vergangenen Jahr folgende Schwerpunktthemen:

- Schalten und Unterbrechung von Niederspannungsgleichstromsystemen (z. B. Photovoltaik, Bordsysteme, Industriernetze...)
- Kontaktmaterialien
- Simulation in der Schaltgeräte- und Anlagentechnik (Lichtbogensimulation)
- Prüfverfahren für elektrische Kontakte und Geräte
- Aluminium als Leiterwerkstoff und dessen Anschlusstechnik
- Steckverbindertechnik
- Schleifringssysteme
- Umweltaspekte

Vom 27. – 29. September 2023 organisierte der Fachbereich in Kooperation mit dem VDE Mittelbaden am KIT Karlsruhe das 27. Albert-Keil-Kontaktseminar „Kontaktverhalten und Schalten“ (Fotos siehe unten). Mit über 160 Teilnehmern aus Industrie und Wissenschaft war die Veranstaltung gut besucht, und ein reger Austausch der Teilnehmer in den Diskussionen und Pausen trug zum Erfolg der Veranstaltung bei. Schwerpunktthemen waren DC-Systeme und Schutztechnik, Hybridschaltkonzepte, aktuelle Themen aus Prüfung und Normung sowie Steckverbinder- und Anschlusstechnik. Einführungsvorträge in die Themengebiete „Ruhende Kontakte und Verbindungen“, „Schaltende Kontakte und deren Werkstoffe“ und „Lichtbogen in Schaltgeräten“ wurden durch Mitglieder des Fachbereichs vor den jeweiligen Fachbeiträgen präsentiert und rundeten die Veranstaltung erfolgreich ab. Im Rahmen des Seminars wurde der diesjährige Albert-Keil Preis an Herrn Prof. Mücklich (Universität des Saarlandes) für seine Ergebnisse auf dem Gebiet der Laserinterferenzstrukturierung von Kontaktflächen vergeben.

Zur Vorbereitung des Kontaktseminars fanden neben zwei Onlinemeetings auch zwei physische Fachbereichstreffen statt. Das Erste im Dezember 2022 am IEEH der TU Dresden inkl. Vorstellung der Arbeitsgebiete am IEEH durch Herrn Dr. Schlegel und das Zweite im September 2023 am KIT bei dem auch die ETG Strategie 2023-2025 intensiv diskutiert wurde.

Weiterhin führten Mitglieder des Fachbereichs Seminare zu „Schaltkontakten der elektrischen Energietechnik“, „Elektrische Kontakte, Werkstoffe, Gestaltungen und Anwendungen“ und „Steckverbinder“ an den Technischen Akademien Wuppertal und Esslingen, sowie im Haus der Technik durch.

Die Diskussion zur Zukunftsausrichtung des Fachbereiches auch mit Bezug zu Themen der ETG Strategie soll beim nächsten Treffen im Dezember 2023 weitergeführt werden.

Seitens des Fachbereichs sind in Kooperation mit dem VDE Mittelbaden bereits eine Diskussionsveranstaltung auf der Buhlschen Mühle in Ettlingen im September/Oktober 2024 und das Albert-Keil-Kontaktseminar „Kontaktverhalten und Schalten“ 2025, am KIT Karlsruhe, in Planung bzw. Vorbereitung.

Unter Mitwirkung des Fachbereichs ist eine Neuauflage des Buchs „Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Anwendungen“, Springer Verlag, in Arbeit und die Publikation für Ende 2024 vorgesehen.



*Dr.-Ing. Timo Mützel,
DODUCO Contacts and Refining GmbH,
Vorsitzender ETG FB Q3*



© Klaus-Peter Schmidt, VDE Bezirksverein Mittelbaden e.V.



ETG Fachbereich V1

E6 Erzeugung, Verbrauch und Speicherung im elektrischen Energieversorgungssystem

Die Arbeiten zu dem Themenkomplex „Erzeugung und Speicherung elektrischer Energie“ wurden unter dem Vorsitz von Herrn Dr. Martin Kleimaier und dessen Stellvertreter, Herrn Prof. Dr. Hendrik Lens (Universität Stuttgart) fortgeführt. Darüber hinaus wurde der Scope des Fachbereichs um die zunehmend wichtiger werdenden Aspekte des Verbrauchs elektrischer Energie erweitert. Die Bezeichnung des Fachbereichs V1 wurde daher in Abstimmung mit dem ETG Vorstand in „Erzeugung, Verbrauch und Speicherung im elektrischen Energieversorgungssystem“ abgeändert. Insbesondere durch die vielfältigen Optionen für eine Sektorenkopplung wird in Zukunft ein stark ansteigender Bedarf an elektrischer Energie erwartet, der vor allem durch einen Zubau von erneuerbarer Stromerzeugung abgedeckt werden muss. Dabei wird erwartet, dass diese zusätzlichen Lasten möglichst flexibel abgerufen werden und sich nach Möglichkeit dem Dargebot der fluktuierend einspeisenden erneuerbaren Energien anpassen, damit der Bedarf an flexibel einsetzbaren neuen Gaskraftwerken (H₂ ready) in Grenzen gehalten werden kann.

Die Arbeitsbeschreibung des FB wurde aktualisiert und an der aktuellen ETG Strategie gespiegelt. Neben den bisherigen Themen wurde das Spektrum um die Themen „Multienergiesysteme für die Energietransformation“ sowie „Nachhaltiges Multienergiesystem“ erweitert.

Abweichend von der bei ETG Fachbereichen üblichen Sitzungsfrequenz von zwei Sitzungen pro Jahr wurde auch in diesem Jahr wieder an kürzeren Zeitabständen zwischen den Sitzungen festgehalten. Im Berichtsjahr wurden insgesamt vier halbtägige Online-Meetings abgehalten. Zusätzlich konnte erstmalig auch wieder ein Treffen in Präsenz durchgeführt werden. Obwohl das Online-Format die höhere Sitzungsfrequenz erleichtert,

sollten aus Sicht des Fachbereichs zukünftig nach Möglichkeit zusätzlich zwei Präsenz-Meetings pro Jahr abgehalten werden. Einige neue Mitglieder konnten auch wieder hinzugewonnen werden, die die Arbeit mit wertvollen Impulsen bereichert haben. Weitere engagierte Mitglieder sind im Fachbereich V1 gerne willkommen. Bei Interesse melden Sie sich bitte bei der ETG Geschäftsstelle.

In Ergänzung zu unserem Positionspapier wurde im Berichtsjahr auch an weiteren Hintergrundpapieren gearbeitet, welche die im Positionspapier getroffenen Aussagen mit Fakten und zusätzlichen Informationen untermauern sollen. Das Hintergrundpapier zu Brennstoffzellen konnte verabschiedet werden und ist nun auf der [V1-Webseite](#)¹ eingestellt.

Die Hintergrundpapiere zu den Erzeugungstechnologien PV, Windenergie, Wasserkraft, Biomasse sowie Gasturbinen und Gasmotoren sind aktuell noch im finalen Abstimmungsprozess.

Am 7.3.2023 wurden die Ergebnisse der Taskforce „Zukunftsbild Energie“ im Rahmen eines Webinars mit 350 Teilnehmern vorgestellt. Im Rahmen dieses Webinars wurden auch viele Fragen zur Energiespeicherung gestellt. Daher soll nun auch ein Webinar zu dem Themenkomplex „Energiespeicherung“ organisiert werden. Leider konnte dieses nicht mehr in dem aktuellen Berichtsjahr durchgeführt werden. Es wird nun für das 1. Quartal 2024 geplant.

Zu dem Thema Netzstabilität in der Stromversorgung wurde ebenfalls ein Webinar organisiert. Dieses hat mit fast 300 Teilnehmern (bei über 400 Anmeldungen) trotz des sehr anspruchsvollen Themas ein unerwartet hohes Interesse gefunden. Das einein-

halbstündige Webinar wurde von den Herren Professoren Hendrik Lens und Holger Wrede am 17.10.2023 abgehalten, siehe Bericht auf S. 53.

Am 19.10.2023 konnte im Rahmen eines parlamentarischen Online-Frühstücks, das von „Energiedialog 2050“ organisiert wurde, das im letzten Jahr erstellte Hintergrundpapier zum Thema Energiespeicher vorgestellt werden. Unsere ETG Vorstandsvorsitzende Frau Dr. Britta Buchholz hat freundlicherweise die Präsentation übernommen.

Am 21.-22. November 2022 konnte die V1-Fachtagung im Kongress-Palais in Kassel wieder als Präsenzveranstaltung mit großem Erfolg durchgeführt werden. Auch in 2023 wurde daher wieder eine Fachtagung in Präsenz geplant. Nachdem im vergangenen Jahr die vom FA „Zellulare Energiesysteme“ in Bayreuth geplante Fachtagung ausfallen musste und zudem die Taskforce „Enerflex“ ihre Arbeiten mit der Veröffentlichung der Studie „Flexibilisierung des Energiesystems“ abschließen konnte, gab es Konsens, eine gemeinsame Fachtagung zu den drei verwandten Themenkomplexen zu organisieren. Die Fachtagung stand unter dem Motto „Flexible Erzeuger, Verbraucher und Speicher – Organisation unseres zukünftigen Energiesystems“ und hat am 7.–8. November 2023 in Nürnberg stattgefunden. Der Programmausschuss hatte wieder ein interessantes und anspruchsvolles Tagungsprogramm mit Referenten aus den genannten ETG Gremien, ergänzt durch eingeladene externe Referenten, zusammengestellt. Die zwei Tage waren mit anspruchsvollen Beiträgen prall gefüllt. In den Pausen und bei der Abendveranstaltung nutzten die Teilnehmer die Gelegenheit der Präsenztagung zu einem angeregten Gedankenaustausch. Das Feedback vor Ort war sehr positiv, auch wenn wir uns mehr Teilnehmende erhofft hatten.

¹ <https://www.vde.com/de/etg/arbeitsgebiete/v1>

Die Abstimmung mit anderen Fachbereichen und Task Forces wird durch die gleichzeitige Mitarbeit einzelner Mitglieder gewährleistet, z. B. beim Fachbereich V2, beim Fachausschuss V2.1 "Netzregelung und Systemführung" sowie bei den Task Forces „Zukunftsbild Energie“ und „Flexibilisierung des Energiesystems“ (EnerFlex). Insbesondere an Letzterer arbeiteten mehrere V1-Mitglieder aktiv mit. Auch mit dem ETG/ITG Fachausschuss V2.4 „Zellulare Energiesysteme“ erfolgt ein regelmäßiger Informationsaustausch.

Aktive Fachausschüsse im Fachbereich V1:

FA V1.1: „Wasserstoff und Brennstoffzellen“ (zusammen mit VDI-GEU)

Der bisherige Vorsitzende Martin Pokojski hat die Leitung abgegeben.

Die Mitglieder des FA danken Herrn Pokojski für sein langjähriges Engagement. Als Nachfolger wurde Herr Dr. Thomas Grube (FZ Jülich) gewählt, Stellvertreter bleibt Dr. Martin Kleimaier.

Nachdem in 2022 die VDI/VDE Studien „Klimafreundliche Nutzfahrzeuge“ (Januar 2022) und „Wasserstoff für den Schienenverkehr“ (September 2022) fertiggestellt und veröffentlicht wurden, plant der FA aktuell die Ausrichtung eines „Expertenforums“ zu diesen Studien, das am 1. Februar 2024 in Frankfurt stattfinden soll.

Zum Thema Power-to-Heat soll ein neuer FA V1.2 gegründet werden. Hierzu soll es in Kürze einen Call for Experts geben. Der detaillierte Scope dieses FA ist aktuell noch in Abstimmung. In diesem FA sollen zukünftig auch die Aktivitäten zu der Veranstaltungsreihe „Dialogplattform Power-to-Heat“ gebündelt werden, die in diesem Jahr zum neunten Mal mit großem Er-

folg in Kooperation mit dem Energieforschungszentrum Niedersachsen (EFZN) – diesmal in Form von drei Webinaren an verschiedenen Tagen – stattfinden wird.



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



Univ.-Prof. Dr.-Ing.
Hendrik Lens
Universität Stuttgart,
stv. Vorsitzender
ETG FB V1

ETG Fachbereich V2

E7 Übertragung und Verteilung elektrischer Energie

2023 war das Jahr, in dem unser Fachbereich V2 „Übertragung und Verteilung elektrischer Energie“ erstmals wieder beide turnusmäßigen Sitzungen – die Frühjahrssitzung am 16. März 2023 und die Herbstsitzung am 20. September 2023 – in Präsenz in Frankfurt abhalten konnten, wobei wir in kleinerem Umfang Mitglieder und Referenten online hinzuschalteten.

Die Frühjahrssitzung wies in ihrem Vortragsteil eine Vielzahl von Fachthemen mit ganz verschiedenen Schwerpunkten auf:

- „Überblick zum Ad-hoc-Anschluss des ukrainischen Netzes“ – Referent: Dr. René Suchantke, 50Hz Transmission, Berlin (Online-Vortrag)
- Ergebnisvorstellung BMWK-Forschungsprojekt „ZellNetz 2050“ – Referenten: Felix Flatter, Rheinland-Pfälzische Technische Universität; Aiko Schinke-Nendza, Universität Duisburg-Essen und Björn Uhlemeyer, Bergische Universität Wuppertal
- Bericht über zentrale Ergebnisse unserer Taskforce „Enerflex“ (Flexibilisierung des Energiesystems) – Referent: Prof. Dr.-Ing. habil Martin Wolter, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
- Erkenntnisse des Fachbereichs V1 zum Umgang mit ‚Kalten Dunkelflauten‘ in einem zukünftigen regenerativen Stromsystem – Referent: Dr. Martin Kleimaier für den FB V1

Bei der Herbstsitzung haben wir dagegen fokussiert und mit viel Tiefgang die neue ETG Strategie 2023-25 diskutiert. Dabei wurde von den Mitgliedern des Fachbereichs eine Vielzahl spannender Ideen entwickelt, die sich insbesondere aus der Verzahnung von „Osterpaket“ des BMWK und Strategie im umfassenden Diskurs ergaben.

Ein herzliches Dankeschön des Fachbereichs geht für die Herbstsitzung an Dr. Karsten Viereck, der sich als Vorstandsmitglied die Zeit nahm, zu uns nach Frankfurt zu kommen, die Strategie vorzustellen und das Thema mit uns ausführlich zu diskutieren.

Fortwährend sind im Rahmen der Arbeit des Fachbereichs V2 folgende vier Fachausschüsse aktiv:

- V2.1 Netzregelung und Systemführung (Prof. Dr.-Ing. Jutta Hanson)
- V2.2 Arbeiten unter Spannung (Mathias Diedrich)
- V2.3 Schutz- und Automatisierungstechnik (Dr.-Ing. Sönke Loitz)
- V2.4 Zellulare Energiesysteme (Dr.-Ing. Theresa Noll und Dr.-Ing. Björn Uhlemeyer)

Über die laufende Arbeit des Fachbereichs und der Fachausschüsse sowie unserer Mitwirkung im DK CIGRE, DK CIRED und im Koordinierungskreis Strom-Gas hinaus gab es in diesem Jahr aber weitere Highlights, von denen einige, insbesondere unsere Veröffentlichungen, kurz genannt werden sollen:

- Seit dem 5. Januar 2023 ist das Taskforce-Ergebnis „Zukunftsbild Energie – Expertinnen und Experten von VDE ETG zeichnen ihre Vision vom Energiesystem 2050 und geben Handlungsempfehlungen“ online. Anbei der zugehörige Link: <https://www.vde.com/de/etg/arbeitsgebiete/v2/zukunftsbild-energie>
- Vom 25. bis zum 26. Mai waren wir beim ETG Kongress in Kassel mit einer Reihe von Inhalten und natürlich als interessierte Teilnehmende vertreten.
- Seit dem 25. September 2023 steht das Ergebnis der Taskforce „Hochautomatisierung von Nieder- und Mittelspannungsnetzen“ zum Download zur Verfügung: <https://www.vde.com/de/etg/arbeitsgebiete/v2/hochautomatisierung-von-nieder--und-mittelspannungsnetzen>
- Am 26. Oktober 2023 ging die Pressemeldung zu unserer neuen, von der Taskforce „EnerFlex“ erarbeiteten Studie „Flexibilisierung des Energiesystems“ heraus, die bereits in der Frühjahrssitzung vorgestellt worden war. Die Studie ist hier zu finden: <https://www.vde.com/de/etg/arbeitsgebiete/v2/flexibilisierung-des-energie-systems>
- Vom 7. bis zum 8. November 2023 fand die zugehörige Fachtagung „Flexible Erzeuger, Verbraucher und

Speicher“ in Nürnberg statt, wo die EnerFlex-Themen umfassend und mit einem breiten Fachpublikum diskutiert werden konnten. Für beides geht ein besonderes Dankeschön an unser Fachbereichsmitglied Prof. Dr.-Ing. habil Martin Wolter, der Taskforce und gemeinsam mit Prof. Dr.-Ing. Hendrik Lens, stv. Vorsitzender des Fachbereichs V1, die Fachtagung geleitet hat.

Die Leitung des Fachbereichs dankt auf diesem Wege allen Mitgliedern herzlich für ihr umfassendes Engagement, insbesondere aber auch Dr.-Ing. Thomas Benz als unserem Geschäftsführer in der ETG, der unsere Aktivitäten stets kräftig unterstützt.



*Dr.-Ing. Johannes Schmiesing
Avacon Netz GmbH,
Vorsitzender ETG FB V2*

ETG Fachbereich V3

E8 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 Lösungen zu entwickeln, die den teilweise konkurrierenden energiepolitischen Zielen einer sicheren, effizienten und umweltfreundlichen Energieversorgung gleichermaßen gerecht werden.

Im Jahr 2023 haben wir fokussiert, an welchen Stellen der aktuelle energiewirtschaftliche Rahmen angepasst werden sollte, um eine effiziente Integration des geplanten umfangreichen EE-Zubaus zu ermöglichen, der weit über das hinausgeht, was in bisherigen Planungen vorgesehen war.

Dabei haben wir vier Schwerpunkte herausgearbeitet:

- **Richtige Preisanreize müssen gegeben sein**
Richtige Preisanreize sind wichtig, wenn zukünftig extrem hohe Leistungsspitzen von bis zu 300 GW und damit weit oberhalb des derzeitigen Niveaus insbesondere zur Integration der Einspeisespitzen der Photovoltaik entstehen.
- **Standortwahl für Elektrolyseure ist wichtig**
Offsite-Elektrolyseure¹ sollten an systemisch optimierten Standorten errichtet werden, um unnötige Zusatzkosten zu vermeiden. Damit das im Markt effizient

erfolgen kann, sind die richtigen Preisanreize (siehe vorheriger Punkt) und klare politische Aussagen zum Infrastrukturausbau erforderlich. Ist das – wie derzeit – nicht gegeben, sind andere Instrumente erforderlich, die das Problem fokussieren.

- **Verteilnetz sollten erheblich ausgebaut werden**
Neben dem mittlerweile recht klar umrissenen Ausbau des Übertragungsnetzes ist auch ein erheblicher Ausbau der Verteilnetze erforderlich, so dass dem System auch dezentrale Flexibilität zur Verfügung gestellt werden kann. Da der Verteilnetzausbau nicht beliebig schnell erfolgen kann, sind kurzfristig Instrumente erforderlich, die die begrenzte Netzkapazität effizient auf die Netzkunden verteilen. Langfristig ist es erforderlich, geeignete Instrumente zu entwickeln, die den Verteilnetzausbau auf ein effizientes Maß begrenzen.
- **Flexibilitätshemmnisse müssen beseitigt werden**
Aktuell ergeben sich u. a. durch die Struktur der Netzentgelte Hemmnisse, die beseitigt werden sollten. Zeitvariable Netzentgelte können gerade im Hochlauf unterstützend für die Entwicklung von Flexibilitäten wirken und ggf. auch im Zielzustand dazu beitragen, Netzausbau im Verteilnetz auf ein effizientes Maß zu begrenzen.

Im kommende Jahr planen wir, uns mit diesen Schwerpunkten weiter zu beschäftigen.



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

¹ Unter Offsite-Elektrolyseuren werden hier Elektrolyseure verstanden, die nicht u. a. aufgrund fehlender Infrastruktur in unmittelbarer räumlicher Nähe zum H₂-Verbrauch errichtet werden

Erfahrungsbericht von Christian Gerdon *(Preisträger des Herbert-Kind-Preises 2023)*

Anyeonghaseyo! Ich heiße Christian und habe das Sommersemester 2023 in Südkorea verbracht. Dort habe ich im Rahmen des RWTHweltweit Asia-Programms an der Seoul National University (SNU) ein Auslandssemester absolviert. Mein Aufenthalt wurde durch die ETG in Form des Herbert-Kind-Preises unterstützt und in diesem Bericht darf ich meine Erfahrungen während dieser aufregenden Zeit teilen.

Ich studiere Elektrotechnik im Master an der RWTH Aachen mit Schwerpunkt Energietechnik und konnte bereits durch verschiedene Jobs und Praktika Einblicke in energietechnische Themen erlangen. Dabei habe ich immer wieder erkannt, dass neben einem umfassenden Wissen in der Energietechnik auch die Weiterentwicklung meiner Programmier- und Softwarekenntnisse für meine berufliche Zukunft von großem Nutzen sein wird. Deshalb war es für mich ein Anspruch, mein Profil als angehende(r) Energietechnik-Ingenieur(in) in Hinblick auf aktuelle Trends in der Digitalisierung während meines Auslandssemesters zu schärfen.

Mein Interesse an Südkorea wurde erstmals durch das BeBuddy-Programm der RWTH geweckt. In diesem war ich mehrere Semester als Mentor für internationale Studierende in ihrem ersten Semester aktiv und durfte 2021 zwei koreanische Studenten aus Seoul betreuen, mit denen ich mich schnell angefreundet habe und die mir einiges über ihr Heimatland erzählt haben. Am Ende ihres Auslandssemesters in Aachen scherzten sie und meinten: "Als nächstes bist du an der Reihe, uns in Seoul zu besuchen!". Da meine ursprünglichen Pläne für einen Auslandsaufenthalt 2020 aufgrund der Pandemie ins Wasser fielen, war ich zu der Zeit sowieso dabei, einen neuen Versuch für ein Auslandssemester zu starten, das ich während meiner Studienzeit unbedingt absolvieren wollte und ich nahm Südkorea in die Liste meiner favorisierten Länder auf. Als ich herausfand, dass es ein passendes Partnerprogramm zwischen der RWTH und der Seoul National University in Südkorea gibt und dort viele englischsprachige Kurse angeboten werden, die meinen Vorstellungen entsprachen, konkretisierten sich meine Pläne und ich bewarb mich um einen der wenigen Plätze für ein Auslandssemester in Seoul.

Seoul bedeutet übersetzt "Hauptstadt" und ist mit mehr als 10 Millionen Einwohnern die größte Stadt Südkoreas. Sie ist Zentrum der Wirtschaft, Geschichte und Kultur der koreanischen Halbinsel. Rund um die Stadt befindet sich mit der Metropolregion *Sudogwon* der größte Ballungsraum Koreas, der zusammen mit Seoul rund 25 Millionen Menschen umfasst, welche die Hälfte der gesamten südkoreanischen Bevölkerung ausmachen. Die riesige Dimension von Seoul habe ich durch die langen Metrofahrten zu spüren bekommen, die Menschenmassen auf den Straßen in der Innenstadt und beim Besuch des Lotte World Tower, der mit 555m das vierthöchste Gebäude der Welt ist und ein gigantisches Panorama bietet. Egal in welche Richtung man



Bild 1: Traditionelle koreanische Tracht "Hanbok"



Bild 2: Blick auf den Han-River vom Lotte World Tower

blickt, in der Ferne sieht man immer noch die gedrängten Hochhäuser.

Nachdem ich meine Zusage für das Auslandssemester sowohl von der RWTH als auch der SNU erhalten habe, startete ich direkt mit den weiteren Vorbereitungen. Bei der koreanischen Botschaft konnte ich das Visum und den koreanischen Ausländerausweis beantragen, der witzigerweise "Alien Registration Card" heißt. Zum Glück habe ich einen der beliebten Plätze im Studentenwohnheim bekommen, das direkt auf dem Campus der Uni liegt und einige Zimmer an internationale Studierende verlost.

Da ich zum Zeitpunkt meiner Bewerbung keine koreanischen Sprachkenntnisse besaß, habe ich drei Monate vor dem Flug angefangen, mit einer bekannten Sprachen-Lern-App koreanisch zu lernen und ich habe mich für den Sprachkurs des Department of Engineering der SNU angemeldet, um auch während meines Aufenthalts meine Sprachkenntnisse auszubauen. Es überraschte mich, dass die koreanische Schrift genial einfach ist. Im Gegensatz zu anderen asiatischen Sprachen besteht das koreanische Alphabet aus lediglich 24 Grundbuchstaben. Natürlich muss man trotzdem fleißig Vokabeln lernen, da es nicht viel nützt, wenn man die Schrift zwar richtig lesen und aussprechen kann, aber nicht den Inhalt versteht. Letztendlich war es ei-

gentlich gar nicht erforderlich, koreanisch zu beherrschen. Schließlich sprechen die meisten Koreaner gut Englisch und die Arbeitssprache an der Universität war in meinem Fall auch ausschließlich Englisch. Das Zurechtfinden in der Metro und das Verstehen von Speisekarten war auch kein Problem, da alle Angaben meistens zusätzlich in Englisch gemacht werden.

Die Seoul National University (SNU) liegt im Süden von Seoul und hat einen großen Campus, der nahe dem Gwanaksan-Mountain liegt und sich wie eine kleine Stadt anfühlt. Mit rund 28.000 Studierenden ist sie eine der größten Unis in Korea und sie gilt als die führende Universität im Land. Alle Koreaner kennen die Uni und sind sehr beeindruckt, wenn man erzählt, dass man dort studiert. Das liegt daran, dass es für die koreanischen Schüler sehr schwierig ist, an der SNU einen Studienplatz zu bekommen, weil das Schulsystem in Korea sehr kompetitiv ist. Ich habe oft Sätze gehört wie "Die top 1 % der besten Schüler in Korea landen dann hier". Rückblickend würde ich sagen, wer das Studium an einer technischen Uni in Deutschland wie der RWTH gewohnt ist, wird sich auch an der SNU gut zurechtfinden.

Das Studieren an der SNU unterscheidet sich dennoch in vielen Bereichen zum Studium an der RWTH. Die Kursgrößen umfassen nur 20-30 Studierende, sodass das ganze Studieren persönlicher, verschulter und nicht so anonym ist. Als Graduate Student bzw. Masterstudent in Korea ist es fest im Lehrplan vorgesehen, dass rund die Hälfte der Studienleistungen durch das Arbeiten als wissenschaftliche Hilfskraft an einem Institut der Universität erbracht werden und die andere Hälfte durch das Absolvieren von Kursen. Viele der Anwesenden in meinen Kursen waren Ph.D. students, da diese in Korea auch Kurse absolvieren müssen. Es wurde generell viel Wert auf das Aneignen von praktischen Fähigkeiten und das Einarbeiten in den aktuellen Stand der Wissenschaft gelegt. Zusätzlich zu den Klausuren gab es zum Beispiel viele Programmieraufgaben und jede Woche hat ein Kursteilnehmer ein wissenschaftliches Paper vorgestellt. Die Anwesenheit zu den Vorlesungen wurde automatisch über eine App getrackt.

Neben meinem Koreanisch-Sprachkurs habe ich drei weitere Kurse belegt, die ich mir auch alle für mein Energie-

technikstudium an der RWTH anerkennen ließ. Der erste Kurs hieß "Materials and Devices for Solar Energy Utilization". Nach einer Auffrischung des fundamentalen Halbleiter-Wissens ging es um das Kennenlernen und Verstehen von verschiedenen Solarzellen-Technologien und Methoden, wie die theoretische Effizienzhürde von Single-Junction Solarzellen, das "Shockley-Queisser Limit" (ca. 33 %), überwunden werden kann.

Der zweite Kurs hieß "Autonomous Driving and Parking Systems". Es ging um autonomes Fahren und speziell um die Path Planning und Path Tracking Algorithmen, durch welche ein Auto von selbst einparken kann. Das Highlight war die Autonomous Parking Competition am Ende des Semesters, als wir am echten autonomen Test-Auto des Instituts, das mit Lidar-Sensor und vielen Kameras ausgestattet ist, auf einem öffentlichen Parkplatz unsere implementierten Algorithmen testen durften. Ein Student aus Frankreich, eine Studentin aus Norwegen und Ich bildeten das Team mit dem Namen "Santé, Prost, Skål!". Da das Auto mit unserem Code am schnellsten einparkte, erreichten wir viele Punkte.

Der dritte Kurs "Advanced Software Development" war sehr programmierlastig. Unter anderem gab es die Aufgabe, eine Fluid-Simulation zu entwickeln und nach dem Kennenlernen verschiedener Machine Learning Konzepte haben wir virtuellen Menschen und Tieren das Laufen beigebracht. In einem Semesterprojekt habe ich für ein kleines Stromnetzmodell ein neuronales Netz trainiert, das einen qualitativ akzeptablen Lastfluss in $O(1)$ rechnen kann.

Im Rahmen des SNU Buddy Programms wurde mir ein koreanischer Elektrotechnik-Student als Mentor zur Seite gestellt, der mir den Start in Südkorea und ins Studium an



Bild 3: SNU Emblem-Veritas Lux Mea-Truth is my light



Bild 5: Testen der Autonomous Parking Algorithmen



Bild 4: Die Bibliothek der SNU



Bild 6: SNU-Buddy - mehr als 10 Nationen an einem Tisch



Bild 7: Strahlendes Nachtleben im Stadtviertel Hongdae

der SNU erleichtert hat. Außerdem wurden von den koreanischen Buddies viele Events und Ausflüge organisiert. Dabei haben Sie sich sehr engagiert und viel Zeit in die Planung gesteckt, sodass es wirklich nie langweilig wurde!

Unter anderem besuchten wir den berühmten Seoul Namsan Tower, absolvierten einen Taekwondo-Einführungskurs und einen Kalligrafie-Kurs, besuchten den Fischmarkt in Seoul und ein Baseballmatch, gingen zusammen wandern, picknickten am Han-River, verbrachten einen Tag in einem koreanischen Badehaus und trafen uns für ein Fotoshooting im traditionellen koreanischen Gewand am Gyeongbokgung Palast (siehe allererstes Bild).

Ein weiteres Highlight war ein dreitägiger Temple-Stay im Guinsa-Tempel, bei dem wir viel über Buddhismus gelernt haben und das Food-Festival der SNU, bei dem die



Bild 8: Wachablösung am Gyeongbokgung Palast



Bild 9: Gipfel des Bukhansan

internationalen Studierenden auf dem Campus Speisen aus ihrem Heimatland zubereitet und verkauft haben. Zusammen mit einem Schwaben habe ich Maultaschen angeboten, die erstaunlich gut angekommen sind. Durch das SNU Buddy Programm fand ich nicht nur sehr einfach Anschluss zu den koreanischen Studierenden, sondern auch automatisch Freunde aus quasi der ganzen Welt!

Um dem Großstadtrubel in Seoul zu entkommen, bin ich mit ein paar Freunden im nicht allzu weit entfernten Nationalpark wandern gegangen. Hierbei war es bei der Planung jedoch wichtig, neben Temperatur und Regenwahrscheinlichkeit auch die Prognose für die Luftverschmutzung zu checken. An manchen Tagen ist diese so hoch, dass es ratsam ist, eine Gesichtsmaske zu tragen und keinen Sport zu treiben. Die Luftverschmutzung wird laut einer Studie der NASA von 2017 zur Hälfte von Textilfabriken an der chinesischen Küste verursacht und erreicht je nach Windbedingungen mehr oder weniger stark Südkorea.

Die koreanische Küche ist ein faszinierendes Zusammenspiel aus reichen Aromen, frischen Zutaten und einer jahrhundertealten kulinarischen Tradition. Gleichzeitig war sie verantwortlich für einige der heftigsten "Kulturschocks", die ich erlebt habe. Stichpunkte sind: sehr scharfes Essen, warmes Frühstück, standardmäßig kalter Kaffee, viele exotische Meeresfrüchte und zu jeder Mahlzeit Reis mit fermentiertem Gemüse.

Mein koreanisches Lieblingsgericht wurde Bibimbap, was übersetzt "gemischter Reis" bedeutet. Hierbei wird eine Schüssel mit warmem Reis gefüllt und mit einer Vielzahl von Gemüse, oft auch Fleisch oder Tofu und einer leicht würzigen Gochujang-Sauce serviert. Die Zutaten werden nicht gemischt, bis es Zeit ist, zu essen. Dann wird die Schüssel liebevoll umgerührt, um die verschiedenen Aromen zu vereinen.

Die bekannteste Beilage in Korea, die in nahezu jeder Mahlzeit präsent ist, ist Kimchi (siehe rechts im Bild). Dieses fermentierte Gemüse, meist aus Chinakohl und Gewürzen wie Knoblauch, Ingwer und Chilipulver, ist ein wichtiger Bestandteil der koreanischen Esskultur. Es wird in vielen Variationen hergestellt und ist fester Bestandteil jeder traditionellen koreanischen Mahlzeit.

Mit seiner langen Küstenlinie bietet das Land eine Fülle von frischem Fisch, Tintenfisch, Muscheln und anderen Köstlichkeiten aus dem Meer. Es gibt viele Straßen in Seoul



Bild 10: Bibimbap mit Kimchi, Suppe und kalten Nudeln



Bild 11: Seafood ist sehr beliebt in Korea

voller Restaurants, vor denen sehr große Aquarien stehen mit einer großen Auswahl an Meeresfrüchten.

Obwohl die koreanische Küche als sehr vielfältig und reichhaltig gilt, wird in vielen Haushalten selten selbst gekocht. Stattdessen isst man in einem der vielen Restaurants, die oft eher an eine Kantine erinnern oder man holt sich einen Snack in einem der Convenience-Stores, die an nahezu jeder Ecke in der Stadt zu finden sind. Die vegetarische oder vegane Ernährungsweise ist in Korea eher unbekannt.

Die exotischste Erfahrung, was koreanisches Essen angeht, hatte ich beim Besuch des *Noryangjin* Fischmarkts in Seoul mit meiner Buddy-Gruppe, bestehend aus vielen Europäern und Koreanern. Unsere koreanischen Buddies luden uns zu *Sannakji* ein, was übersetzt "lebendiger Oktopus" heißt. Nachdem der kleine Oktopus vor unseren Augen aus dem Aquarium gezogen wurde, wurde er zerkleinert und zusammen mit einer Schale Sesamöl serviert. Die sich bewegenden Tentakel wurden von unseren koreanischen Freunden zügig in das Öl getaucht und genüsslich verpeist. Nach längerer Bedenkzeit bestellte ich mit einer Gruppe internationaler Studenten auch Einen. Letztendlich haben unsere koreanischen Freunde den Großteil gegessen.

Korea ist technologiebegeistert und offen für Innovation. Das macht sich an vielen Stellen im Alltag bemerkbar. Es gibt wirklich überall extrem schnelles Internet, in den meisten Restaurants und Geschäften Terminals zum Bezahlen, das praktische Bezahlsystem für den öffentlichen Nahverkehr mit der T-Money Card, überall Türschlösser mit Zahlencode oder sogar Venenscannern und in manchen Restaurants sind Roboter anstatt Kellner anzutreffen. Allerdings gibt es auch an jeder Ecke von Seoul Überwachungskameras.

In Korea wird viel Wert auf guten Service gelegt, was mir sehr positiv aufgefallen ist und ich nach meiner Rückreise oft vermisse. Der öffentliche Nahverkehr in Korea ist immer pünktlich und zuverlässig. Wenn man online etwas bestellt, wird es entweder am gleichen Tag oder spätestens am nächsten Tag geliefert. Auf Mails erhält man in der Regel am gleichen Tag eine Antwort und es gibt keine nervigen Telefonwarteschleifen. Im Restaurant werden in der Regel eine Minute nach dem Setzen bereits die ersten Vorspeisen auf den Tisch gestellt und Nachschläge sind meistens umsonst. Es gibt auch keine tipping culture.



Bild 12: Bezahlen für die Metro mit der T-Money Card

In Südkorea gibt es einen enormen gesellschaftlichen Leistungsdruck, der sich in sehr hohen Arbeitszeiten äußert und auch Schüler und Studierende betrifft, da Bildung einen sehr hohen Stellenwert hat. Es kam regelmäßig vor, dass koreanische Studierende die Nacht im Lab oder der Bibliothek verbracht haben und man sie dann morgens vor der Vorlesung beim Zähneputzen auf der Toilette sah. Während meines Aufenthaltes plante die Regierung die gesetzliche Höchstarbeitszeit von 52 auf 69 Stunden pro Woche zu erhöhen. Der soziale Druck in Korea ist vermutlich eine der Ursachen für die weltweit niedrigste Geburtenrate von nur 0,78 (Stand August 2023) und einer hohen Rate an psychischen Krankheiten wie Depressionen, die allerdings in Korea noch ein Tabuthema sind. Die weltweit erfolgreiche Serie "*Squid Game*" aus Südkorea ist eine Anklageschrift gegen Ungleichheit und wirtschaftliche Ausbeutung im heutigen Korea. Der demografische Wandel ist schon weiter fortgeschritten als in Deutschland, was sich mir dadurch bemerkbar machte, dass viele Beschäftigte im Service oder auf Baustellen im Rentenalter sind. Mit einem Ausländeranteil von 3,2 % ist die koreanische Gesellschaft sehr homogen.

Der anhaltende Konflikt zwischen Nord- und Südkorea wurde beim Besuch des National Museum und der Demilitarisierten Zone (DMZ), der Grenze zu Nordkorea, deutlich. Nach dem Koreakrieg wurde Südkorea zu einer liberalen parlamentarischen Demokratie mit einer erfolgreichen Marktwirtschaft, während Nordkorea eine totalitäre kommunistische Diktatur im Dauerproblemzustand wurde. Beide Staaten sehen sich selbst als einzig legitime Vertretung



Bild 13: Kirschblütenzeit im April



Bild 14: Jeongbang-Wasserfall auf der Insel Jeju-do

des koreanischen Volks. Am 31.05.2023 wurde ich um 6:41 Uhr von einer Alarm-SMS geweckt, die zur Evakuierung von Seoul aufforderte und in der Innenstadt ertönten kurze Zeit später Luftalarm-Sirenen. 15 Minuten später gab es dann eine Entwarnungs-SMS. Nordkoreas Regime hatte versucht, einen Satelliten ins All zu schießen und die Rakete flog über Seoul. Nordkoreas Mission war erfolglos – die Rakete stürzte in der Nähe der japanischen Küste ins Meer.

Während des Semesters habe ich mit einer Freundesgruppe die Insel Jeju-do und die Stadt Busan besucht. Auf der Insel Jeju-do war die Natur sehr beeindruckend und neben dem Erkunden der Vulkanhöhlen waren die vielen Wasserfälle ein Highlight. *"Erst wenn man auf Jeju-do den Hallasan (den höchsten Berg Koreas) bestiegen hat, ist man ein echter Koreaner!"*. Dieses Sprichwort hat uns auf den letzten Höhenmetern der insgesamt zwölfstündigen Wanderung die nötige Motivation verliehen, den Gipfel zu erreichen.

Busan ist die zweitgrößte Stadt Koreas und bekannt für ihre traumhaften Strände und die köstliche lokale Küche.

Insgesamt war mein Auslandssemester an der SNU in Südkorea eine unvergessliche und bereichernde Erfahrung, die mein Leben nachhaltig beeinflusst. Es war nicht nur interessant, ein neues Land und eine neue Kultur kennenzulernen, sondern auch ein anderes Bildungssystem zu erleben und viele neue Freundschaften zu schließen. Die Zeit in diesem faszinierenden Land hat mir nicht nur akademische, sondern auch persönliche und kulturelle Einblicke gewährt, die ich sonst nie erhalten hätte. Es benötigte zwar eine Menge an Organisation im Vorfeld, die man nicht unterschätzen sollte, aber es lohnte sich am Ende definitiv!

Abschließend möchte ich mich herzlich bei der ETG bedanken, die mir durch den Herbert-Kind-Preis 2023 diese unvergesslichen Erfahrungen ermöglicht hat!



Bild 15: Drohnen-Show am Strand in Busan



Bild 16: Das in Korea berühmte Main Gate der SNU

Bilder: Christian Gerdon

ETG Literaturpreis – Preisaufruf 2024

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

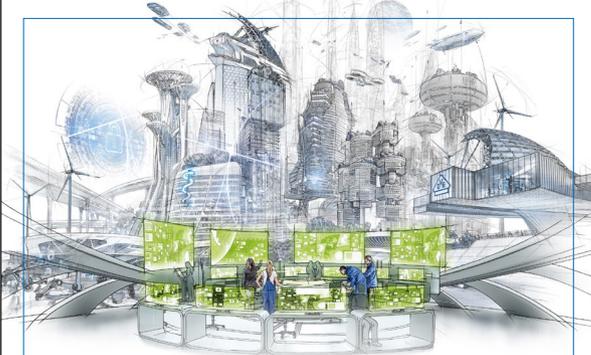
Auch in 2024 wird der ETG Literaturpreis für hervorragende Veröffentlichungen aus dem Jahr 2023 (Abweichungen von +/- 3 Monaten werden toleriert) auf dem Gebiet der Elektrischen Energietechnik ausgeschrieben.

Der Autor bzw. die Autorin 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 14. Februar 2024.**

Weitere Informationen sind auf der ETG Homepage unter www.vde.com/etg-literaturpreis verfügbar. Dort ist auch die Eingabemaske zur Online-Bewerbung zu finden.

Für Fragen steht Ihnen die ETG Geschäftsstelle unter etg@vde.com gerne zur Verfügung.



ETG Literaturpreis 2024

Für herausragende wissenschaftliche Veröffentlichungen junger Autorinnen bzw. Autoren (Alter bis 40 Jahre) aus dem Jahr 2023 (± ¼ Jahr).

Preis: 3.000 €
Themen: Alle Fachgebiete der elektrischen Energietechnik
Kriterien: Bedeutung der Arbeit, Originalität, Kompetenz, Darstellung, Form
Termin: bis 14. Februar 2024 (auch Vorschlag von möglichen Kandidaten)

Bitte senden Sie Ihre Bewerbung an:
etg@vde.com

Detaillierte Informationen / Bewerbungsformular:
www.vde.com/etg-literaturpreis

VDE ETG

Herbert-Kind-Preis – Preisaufruf 2024

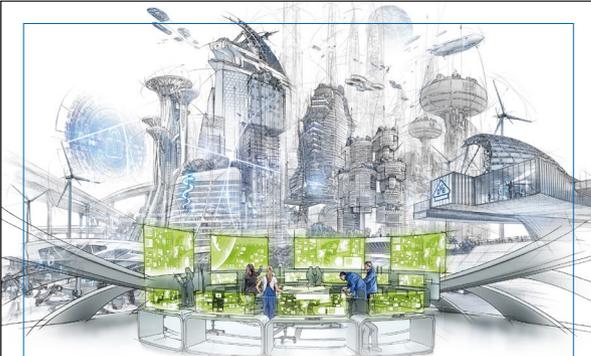
Mit dem Herbert-Kind-Preis würdigt die ETG überdurchschnittliche Studienleistungen auf dem Gebiet der Elektrischen Energietechnik.

Zur Förderung der internationalen Weiterbildung von jungen Studierenden 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 14. Februar 2024.**

Weitere Informationen sind auf der ETG Homepage unter www.vde.com/herbert-kind-preis verfügbar.

Bitte senden Sie nur elektronische Bewerbungen an die ETG Geschäftsstelle unter etg@vde.com.



Herbert-Kind-Preis 2024

Mit dem Herbert-Kind-Preis wird die internationale Weiterbildung von jungen Studierenden auf dem Gebiet der elektrischen Energietechnik gefördert.

Preis: 5.000 € Stipendium für ein Studium im Ausland
Themen: Alle Fachgebiete der elektrischen Energietechnik
Kriterien: überdurchschnittliche Studienleistungen
Termin: bis 14. Februar 2024 (auch Vorschlag von möglichen Kandidaten)

Bitte senden Sie Ihre Bewerbung an:
etg@vde.com

Detaillierte Informationen:
www.vde.com/herbert-kind-preis

VDE ETG

ETG Task Forces

E9 Aktueller Stand der ETG Task Force „Betriebsmittel im Netz der Energiewende“

Die Task Force hat erste Ergebnisse veröffentlicht, die zeigen, wie eine höhere Auslastung vorhandener Betriebsmittel ermöglicht und überwacht wird. Das Interesse von Netzbetreibern und Errichtern ist beträchtlich. Gleichzeitig werden konkrete, mitunter auch kritische Fragen aufgeworfen.

Die Task Force "Betriebsmittel im Netz der Energiewende" wurde im Juni 2022 ins Leben gerufen, um drängende Fragen zu klären: Wie können Jahrzehnte alte Betriebsmittel den neuen Anforderungen der Energiewende gerecht werden? Wie lassen sich die Leistungsflüsse der erneuerbaren Energien übertragen, obwohl der längst notwendige Netzausbau noch aussteht? Ist es möglich, die Strombelastbarkeit alter Betriebsmittel zumindest kurzfristig weiter zu erhöhen? Welche Diagnoseverfahren eignen sich besonders, um hohe Belastungen zu erkennen? Wie gestaltet sich effektives Asset Management in einem stark ausgelasteten Netz?

Im Jahr 2023 veröffentlichte die Task Force bereits erste Ergebnisse. Die Poster, präsentiert während der Fachtagung "Transformer Life Management" und des "CIRED D-A-CH Workshops", stießen auf außerordentliches Interesse bei den Teilnehmern. Im Rahmen des Workshops "High Voltage

Goes Green" wurde zudem ein Vortrag gehalten. Die gezielte, statische und dynamische Überlastung von Betriebsmitteln bietet sowohl Netzbetreibern als auch Errichter gleichermaßen neue Potentiale. Durch eine gezielte Auslastung können Engpässe im Netz teilweise kompensiert werden. Dies betrifft auch die politischen Anforderungen, wie sie im Paragraphen 49b des Energiewirtschaftsgesetzes als "temporäre Höherauslastung des Höchstspannungsnetzes" beschrieben werden.

Auch neu errichtete Anlagen zeigen mit gezielter Höherauslastung und Überlast einen reduzierten ökologischen Fußabdruck, was gleichzeitig zu Kosteneinsparungen führt. Erneuerbare Erzeuger sind durch die hohe Volatilität ihrer Einspeisung bekannt, was aus der Perspektive der sicheren Energieversorgung ein ernsthaftes, aber auch hinreichend bekanntes Problem ist. Bei der Planung und Errichtung bringt die zeitliche Volatilität aber einen großen Vorteil mit sich: die zeitlich kurzen Erzeugungsspitzen können durch die langen Zeitkonstanten der Betriebsmittel hervorragend ausgeglichen werden.

Bild 1 veranschaulicht eindrucksvoll die Reserven großer Hochspannungsbetriebsmittel anhand eines Transformators. Dieser Transformator, mit einer Nennleistung von

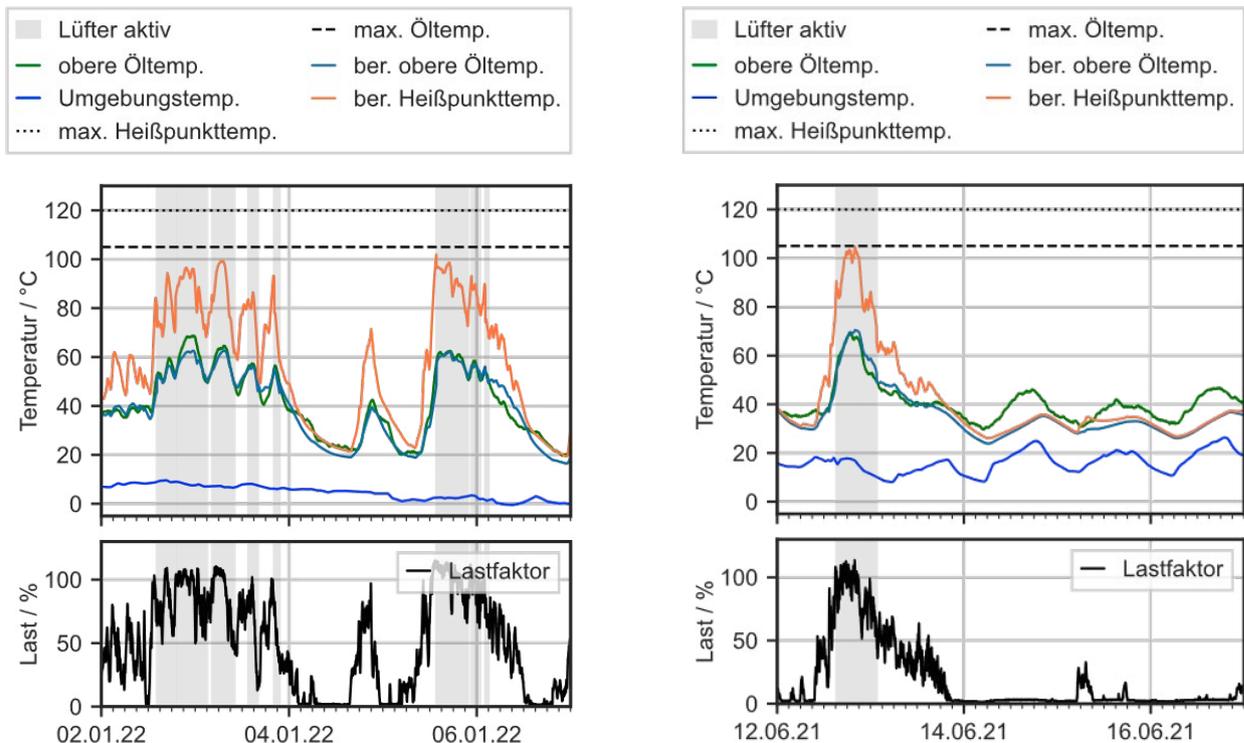


Bild 1: Lastfaktor und Temperaturen in einem „unterdimensionierten“ Windpark-Transformator im Winter (links) und Sommer (rechts)

80 MVA, ist in Bezug auf einen Windpark mit 98 MVA Nennleistung unterdimensioniert, wenn man die klassische Auslegung als Referenz heranzieht. In der Praxis treten jedoch sogar bei Überlast Temperaturen auf, die deutlich unterhalb der in Normen wie der IEC 60076-7, "Transformer Loading Guide", festgelegten Grenzwerte liegen. Dort wird eine obere Öltemperatur von 105 °C als Grenze genannt, während bei diesem Transformator selbst im Überlastbetrieb nur 70 °C erreicht werden. Es zeigen sich also erhebliche Reserven, die sowohl bei den Erzeugeranlagen als auch im Übertragungs- und Verteilnetz genutzt werden sollten!

Die Überlastung, oder genauer gesagt, die gezielte Auslastung, sollte ausschließlich kontrolliert erfolgen. Daher empfehlen wir für jedes Betriebsmittel individuell angepasste Monitoring- und Diagnosesysteme, idealerweise in Echtzeit (online), aber auch in der Offline-Anwendung.

Bei bisherigen Veröffentlichungen erhielten wir ermutigendes Feedback, z. B. „Ihre Ausführung zur Überlastung von Betriebsmitteln hat meinen eingefahrenen Netzbetreiberkopf ziemlich durcheinandergewirbelt. Im Hinblick auf die in 2024 anstehenden Ergebnisse zum Netzausbauplan finde ich es spannend zu prüfen, ob solche Netzfahrweisen auch uns ... in der Zukunft entlasten könnten. Wann werden die Studienergebnisse veröffentlicht?“

Wir erhalten auch kritische Anfragen, insbesondere bezüglich der Haftung und der möglichen beschleunigten Alterung. Entsprechende Antworten wurden in die Broschüre integriert.

Das endgültige Dokument soll im Frühjahr 2024 auf den Webseiten der ETG verfügbar sein. Zusätzliche Veröffentlichungen auf Fachkonferenzen sind für das Jahr 2024 geplant.



*Prof. Dr.-Ing. Maik Koch,
Hochschule Magdeburg-Stendal,
Leiter der Task Force*



© entegra eyrtch + appel gmbh

ETG Veröffentlichungen

E10 VDE ETG Studie „Der Digitale Zwilling in der Netz- und Elektrizitätswirtschaft“

Die Netz- und Elektrizitätswirtschaft steht vor großen Herausforderungen. Tempo und Volumen des EE-Zubaus treibt den klassischen Netzausbau an seine Grenzen. Lange Planungs- und Bauzeiten, bürokratische und regulatorische Hürden und nicht zuletzt der Fachkräftemangel erfordern neue Herangehensweisen und Technologien. Wie schon im ETG Journal mehrfach berichtet, hat sich eine VDE ETG Task Force damit beschäftigt, inwieweit das aus dem Bereich Industrie 4.0 (I4.0) stammende Konzept des Digitalen Zwillings hier Abhilfe schaffen könnte. Mit der vorgelegten Studie „Der Digitale Zwilling in der Netz- und Elektrizitätswirtschaft (DZiNE)“ zeigen die Expertinnen und Experten von VDE ETG: Der Digitale Zwilling wird in der Netz- und Elektrizitätswirtschaft ein sehr wichtiger Baustein sein für mehr Effizienz und Produktivität sowie eine höhere Datenqualität und bessere Steuerungsmöglichkeiten der Netze und Prozesse.

Denn die gestiegenen und neuen Anforderungen an die Stromnetze brauchen intelligente und miteinander vernetzte Lösungen, um vorhandene Reserven aufzudecken und sicher nutzen zu können. Dem stehen heute oft-

mals nicht vorhandene oder veraltete Anlagendokumentationen, manuelle Prozesse, Datensilos und redundante Datenbanken, unzureichende Daten in mangelnder Qualität sowie eine Vielzahl von Systemen und Schnittstellen, die nicht aufeinander abgestimmt sind, gegenüber. Das Arbeiten nach Methoden der Industrie 4.0 mit Lösungsansätzen wie der hier vorgestellte Digitale Zwilling in der Netz- und Elektrizitätswirtschaft (DZiNE) setzt genau an dieser Stelle an. Dieses nach I4.0 Methodik vernetzte digitale Modell eines realen Objekts bildet die Datenbasis für durchgängige, datengetriebene Prozesse von der Planung über den Betrieb bis zum Rückbau.

In der Studie wird zunächst das oftmals sehr abstrakte Konzept des Digitalen Zwillings konkretisiert. Hierzu wird eine Referenzarchitektur für die Netz- und Elektrizitätswirtschaft sowie verschiedene praktische Anwendungsfälle und Beispiele vorgestellt. Letztere werden hinsichtlich der über den Lebenszyklus von elektrischen Betriebsmitteln und Anlagen hinweg entstehenden Mehrwerte analysiert und bezüglich Kosten, Qualität, Dauer, Risiko und Herausforderungen qualitativ bewertet.

Großer Wert wird in der Studie auf die Handlungsempfehlungen gelegt, wie Netzbetreiber, Energieversorger und Hersteller die Innovationen in diesem Bereich zielführend umsetzen können. Kernaufgabe wird dabei sein, Datensilos aufzubrechen, Daten zu validieren und zusammenzuführen sowie erste digitale Zwillinge für spezielle Anwendungsfälle umzusetzen.

Die Studie „Der Digitale Zwilling in der Netz- und Elektrizitätswirtschaft“ steht auf der Webseite <https://www.vde.com/de/etg/digitalisierung> kostenlos zum Download zur Verfügung.



ETG Veröffentlichungen

E11 VDE ETG Studie „Flexibilisierung des Energiesystems“

Die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien führt zu immer größeren Einspeiseschwankungen. Mit konventionellen Kraftwerken können Ungleichgewichte zwischen Stromerzeugung und Strombedarf heute gut ausgeglichen werden, weil sie flexibel einsetzbar sind. Um die Klimaziele zu erreichen, muss jedoch langfristig die gesamte Stromerzeugung dekarbonisiert werden. Nach den Plänen der Bundesregierung soll das letzte Kohlekraftwerk in Deutschland spätestens 2038 vom Netz gehen. Mit dem Wegfall dieser Reserve steigt die Wahrscheinlichkeit von Netzengpässen.

Eine vielversprechende Lösung für das elektrische Energieversorgungssystem ist eine stärkere Flexibilisierung des Verbrauchs, aber auch der Erzeugung sowie der Einsatz von Speichern. Wie schon mehrfach im ETG Journal berichtet, hat die VDE ETG Task Force „Flexibilisierung des Energiesystems (EnerFlex)“ in einer gleichnamigen Studie untersucht, wie unser Stromversorgungssystem besser auf dieses Szenario vorbereitet werden kann.

Die Task Force hat zunächst abgeschätzt, wie groß das Potenzial für mehr Flexibilität ist. Dieses ergibt sich

zum einen auf der Erzeugungsseite durch den Ausbau der erneuerbaren Energien. Es wird erwartet, dass die flexibel einsetzbare Erzeugungsleistung bis zum Jahr 2030 von 110 GW auf 130 GW steigt. Allerdings mit dem Nachteil, dass die Stromerzeugung häufiger als heute nur dann beeinflusst werden kann, wenn zu viel produziert wird. Dann wird abgeregelt, denn Sonne oder Wind lassen sich nicht beliebig an- und ausschalten wie ein konventionelles Kraftwerk. Zum anderen steigt das Flexibilitätspotential auch bei den Verbrauchern. Hier wird mit einem Zuwachs von knapp 30 GW Flexibilität gerechnet, der im Wesentlichen durch die Netzintegration von Elektroautos, Power-to-Heat- (zum Beispiel Wärmepumpen) und Power-to-Gas-Einrichtungen entsteht. Zusätzlich wird bis 2030 ein massiver Ausbau von Batteriespeichern vor allem im Heimbereich erwartet.

Dabei ist zu beachten, dass Flexibilität eine knappe Ressource ist, die koordiniert werden muss und Geld kostet. Die VDE ETG Task Force hat eine Heatmap erstellt, um den volkswirtschaftlich sinnvollsten Einsatz von Flexibilität je nach Nutzungszweck zu bestimmen. Besonders intensiv hat

sich die Task Force mit der Frage beschäftigt, inwieweit der regulatorische Rahmen angepasst werden muss. Insbesondere die Schaffung von Steuerbarkeit und Beobachtbarkeit, die Standardisierung kommunikations-technischer Schnittstellen sowie der Rollout intelligenter Messsysteme sind hier von zentraler Bedeutung. Darüber hinaus können Hemmnisse in der Netzentgelt- und Umlagesystematik abgebaut werden, die sich beispielsweise aus zu starren oder nicht mehr zeitgemäßen Vorgaben ergeben.

Die Studie „Flexibilisierung des Energiesystems“ steht auf der Webseite <https://www.vde.com/de/etg/arbeitsgebiete/v2/flexibilisierung-des-energiesystems> kostenlos zum Download zur Verfügung.

ETG Veröffentlichungen

E12 VDE ETG Hintergrund „Brennstoffzellen“

Brennstoffzellen sind Geräte, die gasförmige Brennstoffe, meistens Wasserstoff, in elektrische Energie umwandeln. Sofern Wasserstoff nicht zur Verfügung steht, können Brennstoffe mit sogenannten „Reformern“ zu einem geeigneten Brenngas aufbereitet werden.

Die wichtigsten Vorteile der Brennstoffzellentechnik sind die hohen Wirkungsgrade der Stromerzeugung (auch bei Teillast), die geringen Emissionen (CO_2 , NO_x , CO und CH_4), Geräuscharmheit und Vibrationsfreiheit sowie schnelle Regelbarkeit der elektrischen Ausgangsleistung (Dynamik). Ein Betrieb der Brennstoffzellen mit Wasserstoff bietet darüber hinaus den Vorteil, dass als „Abgas“ nur Wasserdampf entsteht. Der Wasserstoff kann nachhaltig mittels Elektrolyse mit Strom aus erneuerbaren Energien erzeugt werden („grüner“ Wasserstoff). Damit bilden „grüner“ Wasserstoff und Brennstoffzellen einen Energiepfad, der in einem klimaneutralen Energiesystem eine wichtige Rolle spielen wird.

Der Leistungsbereich von Brennstoffzellen reicht von wenigen Milliwatt für portable Anwendungen bis hin zu mehreren Megawatt zur Versorgung von Industriebetrieben mit Strom und Wärme. Einsatzmöglichkeiten für Brennstoffzellen bieten sich sowohl im stationären Bereich als Anlage zur Kraft-Wärme-Kopplung (KWK), im mobilen Bereich (Fahrzeuge, Schiffe, Flugzeuge), als auch für portable Anwendungen.

Die Geschichte der Brennstoffzellen reicht bis in das 19. Jahrhundert zurück. Dennoch sind bis heute kommerzielle Anwendungen in größeren Stückzahlen noch selten. Technische Herausforderungen in Bezug auf geeignete Materialien, Medienführung, Wasserstoffbereitstellung sowie Herstellungskosten sind hierfür verantwortlich.

Das neue VDE ETG Hintergrundpapier „Brennstoffzellen“ beschreibt den aktuellen Entwicklungsstand, die Eigenschaften, Anwendungsbereiche

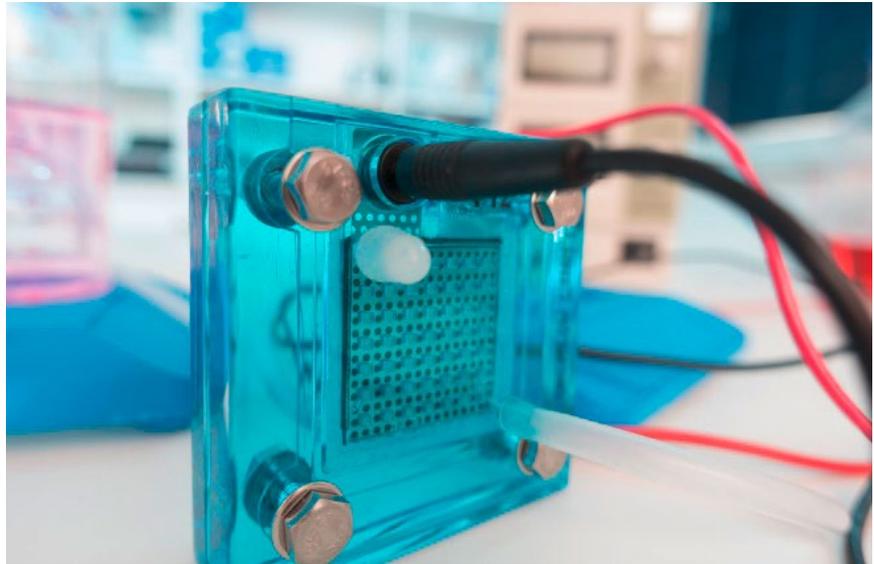


Bild 1: Protonenaustauschmembran (Proton Exchange Membrane, PEM) einer reversiblen Brennstoffzelle

und Marktentwicklung sowie technische Optionen verschiedener Brennstoffzellentechnologien.

Aktuell stehen fünf Technologien zur Diskussion: Alkaline Fuel Cell (AFC), Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC), Proton Exchange Membrane-Fuel Cell (PEMFC), Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC) sowie Solid Oxide Fuel Cell (SOFC). Die wesentlichen Unterscheidungsmerkmale sind die Eigenschaft des Elektrolyten, die Betriebstemperatur sowie die hieraus abzuleitenden betrieblichen Eigenschaften. Die Vermarktung ist technologieabhängig. Relevante Faktoren sind hierbei der Entwicklungsstand, die Betriebseigenschaften sowie die Herstellungskosten. Die Eigenschaften der verschiedenen Brennstoffzellentechnologien sind relevant für die jeweiligen Anwendungen. Durch die Kombination mit Energiespeichern oder z.B. durch Kopplung mit Gas- und Dampfturbinen lassen sich die Effizienz von Strom- und Wärmeerzeugungsprozessen verbessern.

Der VDE ETG Hintergrund „Brennstoffzellen“ sowie weitere Hintergrundpapiere zu den Themen „Energiespeicher“, „EE-Ausbau und Residuallast“

und „Systemstabilität“ stehen auf der Webseite des VDE ETG Fachbereichs „Erzeugung, Verbrauch und Speicherung im elektrischen Energieversorgungssystem“¹ kostenfrei zum Download zur Verfügung. Die VDE ETG Hintergrundpapiere ergänzen die „Kernaussagen zur Erzeugung Entwicklung der Erzeugung und des Speicherbedarfs elektrischer Energie unter dem Aspekt des Ausstiegs aus Kernenergie und Kohleverstromung“ des Fachbereichs.

Mit dem Thema Brennstoffzellen beschäftigt sich auch der Gemeinschaftsausschuss von VDE ETG und VDI GEU „Wasserstoff und Brennstoffzellen“², der gerne zur Mitarbeit einlädt.

1 <https://www.vde.com/de/etg/arbeitsgebiete/v1>

2 <https://www.vde.com/de/etg/arbeitsgebiete/v1-1-brennstoffzellen>



© chombosan / Adobe

ETG Veröffentlichungen

E13 VDE ETG Studie „Hochautomatisierung von Nieder- und Mittelspannungsnetzen“

Die Diskussion über den Ausbau des Stromnetzes konzentriert sich bisher vor allem auf den langwierigen und aufwändigen Bau von neuen Trassen und Leitungen. Der massive und beschleunigte Ausbau der erneuerbaren Energien auf der Erzeugerseite sowie der Elektromobilität und von Wärmepumpen auf der Verbraucherseite führen zunehmend zu einem Betrieb der Verteilnetze an den Kapazitätsgrenzen. Damit drohen Engpässe in den Verteilnetzen und die Netzbetriebsführung wird immer komplexer. Die Energie-technische Gesellschaft im VDE (VDE ETG) kommt jetzt in einer neuen Studie zu dem Schluss, dass die zunehmende Komplexität und die wachsenden Herausforderungen nur mit einem aktiven Netzbetrieb und über Automatisierung bewältigt werden können.

Der Betrieb von Nieder- und Mittelspannungsnetzen folgt gegenwärtig meist einem passiv-reaktiven Ansatz. In der Studie „Hochautomatisierung von Nieder- und Mittelspannungsnetzen“ zeigen die Expertinnen und Experten von VDE ETG auch anhand vieler Beispiele, wie mit Automatisierung vorhandene Netzkapazitäten besser

ausgenutzt und die Effizienz des Netzbetriebs gesteigert werden können. Etwa indem die Versorgung automatisch wiederhergestellt wird, wenn es in einem Gebiet zum Beispiel wegen einer extremen Wetterlage zu einem Stromausfall kommt. Oder wie durch einen aktiven Netzbetrieb schneller mehr Photovoltaikanlagen oder Elektroautos ins Netz integriert werden können, weil der Leistungsfluss bei Bedarf beeinflusst werden kann, wenn Engpässe drohen. Ein weiteres Beispiel sind Systemdienstleistungen wie Frequenz- oder Spannungshaltung, die einfacher bereit gestellt werden können mit neuen Softwarelösungen oder besserem Datenaustausch.

Derzeit sind unsere Mittel- und Niederspannungsnetze üblicherweise nur in geringem Maße beobachtbar oder steuerbar. Die Zustandserfassung, also die Herstellung der Beobachtbarkeit der Netze unter Wahrung aller notwendigen Maßnahmen zur Sicherstellung der Cyber-Sicherheit, ist ein wesentlicher Bestandteil der Automatisierung. Darüber hinaus ist vor dem Hintergrund der Elektrifizierung des Wärme- und Mobilitätssektors sowie

der Integration von elektrischen Speichern die Steuerbarkeit von Betriebsmitteln, wie etwa das Schalten aus der Ferne, zur Realisierung von Automatisierungslösungen unabdingbar.

Insbesondere wenn in den Nieder- und Mittelspannungsnetzen verstärkt eine aktive Netzführung angestrebt wird, ist aufgrund der großen Zahl an Nieder- und Mittelspannungsnetzen eine bedarfsorientierte Automatisierung erforderlich. Die VDE Studie zeigt einen praxisnahen Handlungspfad hin zu einem hochautomatisiertem Verteilnetz auf und identifiziert gleichzeitig weitere Anforderungen und Forschungsbedarf. Zusätzlich zu dem Ermöglichen eines aktiven Netzbetriebs durch entsprechende Änderungen der regulatorischen Rahmenbedingungen ist es auch notwendig, diese Art des Netzausbaus dem konventionellen Netzausbau finanziell nicht schlechter zu stellen. Gleichzeitig sind Rahmenbedingungen zu schaffen, in denen zum Beispiel Software-Updates aus der Ferne zulässig sind, ohne die Funktionen der Anlagen vor Ort erneut prüfen zu müssen. Auch Betriebsprozesse müssen automatisiert werden, um so z. B. die Datenlage und Datenqualität zu verbessern. Und nicht zuletzt sind bei der Transformation der Nieder- und Mittelspannungsnetze auch die Beschäftigten, etwa durch entsprechende Qualifikationsmaßnahmen mit einzubeziehen.

Die Studie „Hochautomatisierung von Nieder- und Mittelspannungsnetzen“ steht auf der Webseite <https://www.vde.com/de/etg/arbeitsgebiete/v2/hochautomatisierung-von-nieder-und-mittelspannungsnetzen> kostenlos zum Download zur Verfügung.



© Metamorworks / stock.adobe.com

ETG Veröffentlichungen

E14 VDE Impulspapier „Mehr Resilienz für die Strom- und Kommunikationsnetze in Deutschland“

Elektrischer Strom und digitale Kommunikation sind bekanntermaßen unabdingbare Voraussetzungen für unser heutiges Leben. Nahezu permanent verfügbare Strom- und Kommunikationsnetze sind zwingend notwendig für die „All Electric Society“, und ihre Bedeutung wird in den nächsten Jahren weiter steigen.

Angesichts eines zunehmend breiter werdenden Spektrums von Fehlerfällen und Bedrohungen wie Naturkatastrophen und Cyberangriffen, muss die Sicherheit und Zuverlässigkeit dieser Infrastrukturen für Bevölkerung und Wirtschaft aufrechterhalten werden. Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, wie resilient unsere Strom- und Kommunikationsnetze in ihrer zunehmenden wechselseitigen Abhängigkeit gegen die heutigen und vor allem künftigen Gefahren sind. Können sie Veränderungen und Störungen auch in der jeweils anderen Infrastruktur angemessen auffangen und sich erholen, oder müssen wir im Gegenteil mit einer Fehlerfortpflanzung vom Stromnetz ins Kommunikationsnetz und umgekehrt rechnen?

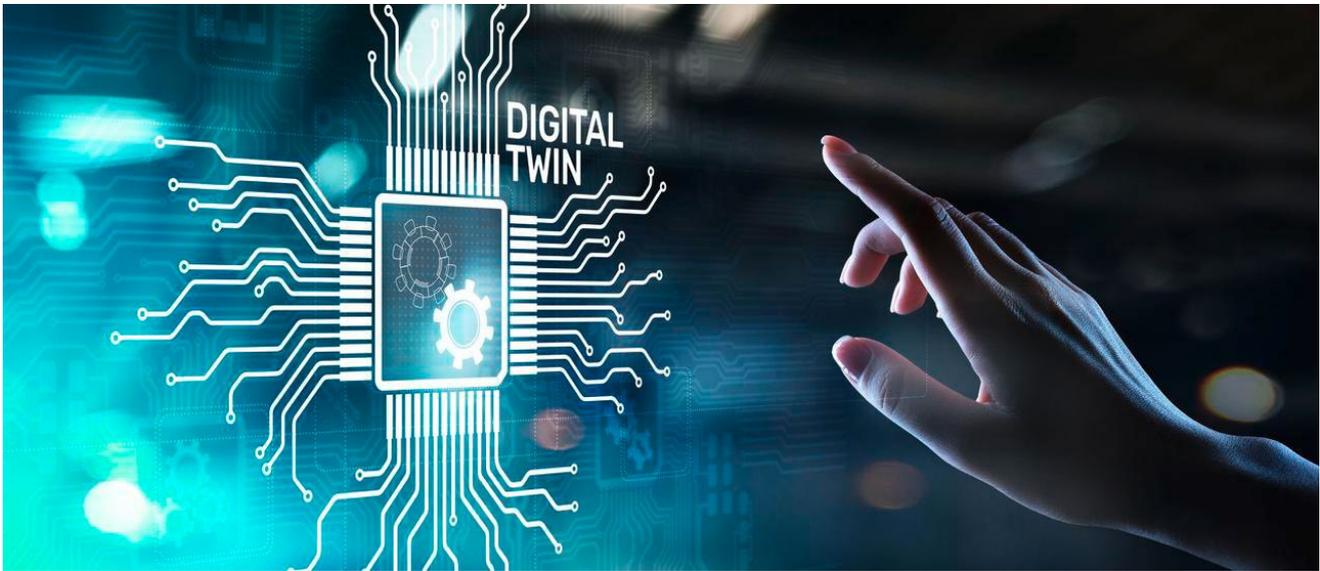
VDE ETG und VDE ITG sind dieser Frage mit einer interdisziplinären Expertinnen- und Expertengruppe nachgegangen. In dem nun vorliegenden VDE Impulspapier werden dazu die aktuellen und erwarteten technischen Entwicklungen der Strom- und Kommunikationsnetze zugrunde gelegt und typische Betriebsszenarien im Normalbetrieb und in Störfällen analysiert. Daraus werden Gefährdungen der jeweiligen Netzinfrastruktur und damit die Resilienz dieser als auch andere Fragestellungen abgeleitet und erste Lösungsansätze skizziert. Unter Resilienz verstehen wir die Fähigkeit eines Systems, Veränderungen und Störungen zu bewältigen, mit ihnen umzugehen, sich anzupassen, und sich zu erholen.

Die Ergebnisse und Empfehlungen dieser Analyse richten sich an Fachleute in Industrie, Behörden und Politik, um zum Verständnis der sektorenübergreifenden Zusammenhänge und damit zur Resilienz unserer zukünftigen Strom- und Kommunikationsnetze im Normalbetrieb und bei Katastrophenfällen beizutragen.

Das VDE Impulspapier „Mehr Resilienz für die Strom- und Kommunikationsnetze in Deutschland“ steht auf den Webseiten von VDE ETG¹ und VDE ITG² kostenlos zum Download zur Verfügung.

1 <https://www.vde.com/de/etg>

2 <https://www.vde.com/de/itg>



© WrightStudio / stock.adobe.com

Neuer ETG Arbeitskreis

E15 Digitale Zwillinge in elektrischen Energiesystemen

Motivation und Bedarf

Digitale Zwillinge sind im Industriesektor etabliert und steigern nachweislich die Effizienz. Die VDE ETG Task Force „Digitaler Zwilling“ hat Potenziale und Anwendungsfälle in der Netz- und Elektrizitätswirtschaft analysiert und die Ergebnisse im Mai 2023 im Rahmen einer [VDE Studie](#)¹ vorgestellt. Kernaufgabe für Unternehmen ist es, die über Jahre entstandenen Datensilos aufzubrechen, die Daten zu validieren und zusammenzuführen. Anschließend sind erste digitale Zwillinge für bestimmte Anwendungsfälle umzusetzen. An dieser Stelle setzt der neue VDE ETG Arbeitskreis „Digitale Zwillinge in elektrischen Energiesystemen“ an. Er will eine Plattform bieten für den Austausch von Erfahrungen bei der Implementierung digitaler Zwillinge in elektrischen Energiesystemen.

Zielgruppe

Angesprochen und zur Mitarbeit motiviert werden sollen Expertinnen und Experten von Übertragungs- und Verteilnetzbetreibern, Stadtwerken, Herstellern von Netzkomponenten, Software, IKT-Lösungen und Leittechnik für die Netz- und Elektrizitätswirtschaft und Dienstleistern, Digitalisierungsfachleute aus Normung und Regulierung sowie Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus den Bereichen Energiesystemtechnik.

Um dem Fachkräftemangel in der Branche entgegenzuwirken, ist der Arbeitskreis explizit auch offen für Nachwuchskräfte. Interessierte aus dem VDE Young Net sind daher herzlich willkommen.

Ziele und geplante Ergebnisse

Der neue Arbeitskreis verfolgt folgende Ziele:

- Vorstellung laufender Projekte zur praktischen Umsetzung digitaler Zwillinge
- Vorstellung aktueller Forschungsprojekte zu Digitalen Zwillingen
- Identifikation von Herausforderungen bei der Implementierung von digitalen Zwillingen
- Initiierung von Forschungsprojekten zur Realisierung von Lösungsansätzen zu den identifizierten Herausforderungen
- Erstellung einer Projektübersicht mit unterschiedlichen Use Cases
- Austausch über Best Practices
- Gestaltung eines öffentlichen Diskurses zum Thema Digitaler Zwilling

Leitung des Arbeitskreises

Der neue Arbeitskreis ist dem Fachbereich V2 „Übertragung und Verteilung elektrischer Energie“ angeschlossen. Den Arbeitskreis leitet Dr.-Ing. Ulf Häger, TU Dortmund, Stellvertreter ist Herr Wolfgang Eyrich, entegra eyrich + appel gmbh.

Mehr Informationen können Sie dem [Call for Experts](#)² entnehmen.

Falls Interesse an einer Mitarbeit besteht, melden Sie sich bitte bei der ETG Geschäftsstelle etg@vde.com.



Dr.-Ing. Ulf Häger,
TU Dortmund,
Leiter des AK Digitale Zwillinge

1 <https://www.vde.com/de/etg/digitalisierung>

2 <https://www.vde.com/de/etg/arbeitsgebiete/v2>

ETG Veranstaltungen

Vorschau

6./20. Februar 2024,
5./19. März 2024,
9. April 2024,
Online-Vortragsreihe
Zellulare Energiesysteme

[Weitere Informationen*](#)



Das zellulare Energiesystem ist ein Organisationsmodell, mit dem die Anforderungen an eine zukünftige Energieversorgung gelöst werden können. Mit dem zellularen Ansatz wird aufgezeigt, wie die vorhandene Netzstruktur optimal genutzt und an die neuen Anforderungen angepasst werden kann. Damit gelingt der Umbau in eine dezentrale, regenerative und wirtschaftliche Energieversorgung, mit der die Versorgungssicherheit noch weiter gesteigert werden kann.

In der fünfteiligen Online-Vortragsreihe werden sowohl die Theorie der zellularen Energieversorgung vorgestellt als auch praktische Themen dazu:

- Thema 1: Prosumer, 6. Februar 2024
- Thema 2: Industrie im ZES, 20. Februar 2024
- Thema 3 Quartiere, 5. März 2024
- Thema 4: City District / Kommunen / Stadtwerke, 19. März 2024
- Thema 5: Zellulares Energiesystem, 9. April 2024

Jeweils von 17–19 Uhr.

Ziel der Veranstaltung ist es, zur Nachahmung zu animieren. Die Teilnahme ist kostenfrei.

* <https://www.vde.com/de/etg/veranstaltungen>

5.–6. März 2024, Leipzig
Tutorial
ETG FNN Schutz- und Leittechnik Tutorial 2024

www.schutz-leittechnik.de



Auf dem ETG FNN Schutz- und Leittechnik Tutorial am 5. und 6. März 2024 in Leipzig diskutieren bis zu 600 nationale und internationale Expertinnen und Experten, welche Konsequenzen neue Technologien und der Umbau unserer Energienetze für die Schutz- und Leittechnik haben werden.

Schwerpunkte der Veranstaltung sind:

- Neue Technologien im Zusammenhang mit KI und Virtualisierung
- Herausforderungen und Lösungen in Mittel- und Niederspannungsnetzen
- Digitales Umspannwerk und Cybersecurity
- Schutz- und Leittechnik in Hoch- und Höchstspannung
- Erfahrungen aus Netzstörungen und Projekten

Außerdem erwartet Sie eine große Ausstellung mit vielen Dienstleistungsfirmen und Herstellern, interaktive Workshops sowie eine Poster-Session.

Das Tutorial richtet sich an Fachleute aus Fertigung, Qualitätssicherung, Werkserhaltung, Forschung und Entwicklung, Anwendungstechnik und technischem Vertrieb sowie Studierende der Elektrotechnik.

12.–14. März 2024, Düsseldorf
Fachtagung / Konferenz
CIPS – International Conference on Integrated Power Electronics Systems

www.cips.eu/en



In den kommenden Jahren wird die Entwicklung leistungselektronischer Systeme von Energieeinsparungen, intelligentem Energiemanagement, Spannungsqualität, Systemminiaturisierung und hoher Zuverlässigkeit bestimmt werden.

Die CIPS 2024 konzentriert sich auf folgende Hauptaspekte:

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

Basistechnologien für integrierte leistungselektronische Systeme sowie neue wichtige Anwendungen werden in interdisziplinären Beiträgen vorgestellt.

Zielgruppe sind Ingenieurinnen und Ingenieure aus Industrie und Hochschule, die sich mit Leistungselektronik im engeren und weiteren Sinn beschäftigen.

- Jetzt anmelden: <https://www.cips.eu/en>

© Sarah Rüggen + (center module) Semikron

12.–13. Juni 2024, Dortmund
Fachtagung
Hochautomatisierter
Netzbetrieb

[Weitere Informationen*](#)



Die Fachtagung bietet einen umfassenden Überblick über den aktuellen Stand der Technik und weist gleichzeitig den Weg für zukünftige Entwicklungen in der Hochautomatisierung des Netzbetriebs. Sie ist eine Plattform, auf der innovative Ideen entstehen und diskutiert werden. Themenschwerpunkte sind

- die nächste Generation modularer Leitsysteme,
- Automatisierung in Nieder- und Mittelspannungsnetzen (Smartifizierung und §14a),
- Redispatch-Kaskade und Systemdienstleistungsmärkte,
- Digitale Zwillinge und Datenschätze,
- Enabler: Künstliche Intelligenz,
- Sicherheit in der Netzführung,
- Resilienz und Stabilität,
- Roadmap der Netzautomatisierung.

Zielgruppe sind Expertinnen und Experten von Übertragungs- und Verteilnetzbetreibern, Herstellern von Leitsystemlösungen, Energieversorgern und Energiedienstleistern, Politik und Regelsetzern sowie aus Forschung und Lehre.

- Call for Pitches!

* <https://www.vde.com/de/etg/veranstaltungen>

17.–18. September 2024, München
Fachtagung
Netzregelung und
Systemführung

www.vde.com/netzregelung



Die Integration von umrichter-basierten Anlagen (PV, Wind, Speichersysteme) und die gleichzeitige Abschaltung von konventionellen Kraftwerken erfordern neue Ansätze, um die Systemstabilität auch unter diesen geänderten Randbedingungen aufrechtzuerhalten. Die Tagung gibt Einblick in aktuelle Entwicklungen, Projekte, Technologien und Forschungsarbeiten zur Netzregelung und Systemführung eines zukünftigen elektrischen Energieversorgungssystems. Tagungsthemen sind

- neue Ansätze der Netzregelung und Systemführung,
- Systemstabilität bei geänderten Randbedingungen,
- Netzbetrieb unter Berücksichtigung von Sektorenkopplung, Leistungsflussregelung, Speichern und neuen Verbrauchern,
- Analyseverfahren.

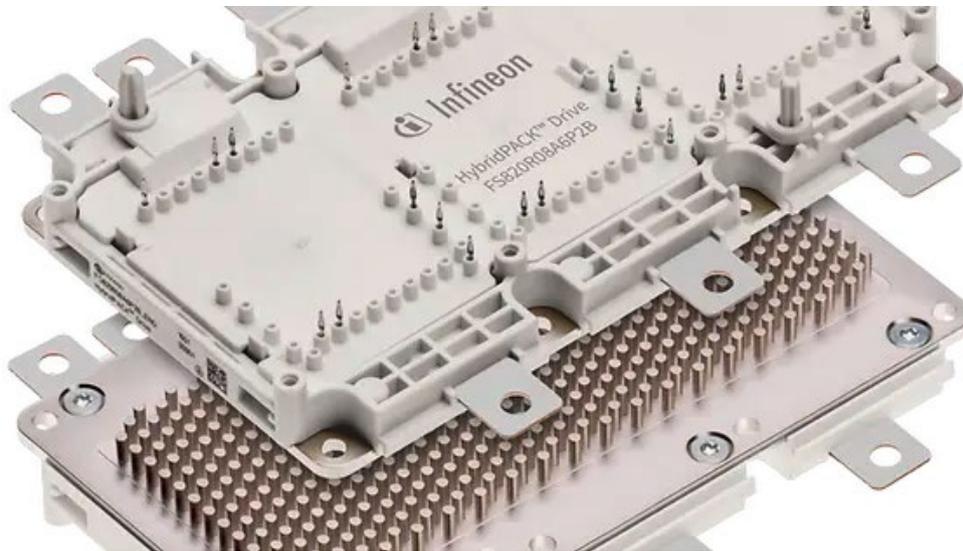
Die Tagung richtet sich an Expertinnen und Experten von Herstellern und Betreibern innovativer Systemkomponenten und Erzeugungsanlagen, Netzbetreibern, Universitäten, Hochschulen und Forschungseinrichtungen, Netzplanung und Netzbetrieb sowie Projektentwicklern.

Save the Date!

1. Oktober 2024, Ettlingen
Diskussionsveranstaltung
Albert-Keil-Kontaktseminar
www.vde.com/de/etg/veranstaltungen

11.–13. November 2024, Berlin
Fachtagung
Hochspannungstechnik
www.vde-hochspannungstechnik.de
 ■ Call for Papers: <https://www.vde-hochspannungstechnik.de/autorenhinweise>

21.–22. Mai 2025, Kassel
Kongress
ETG Kongress 2025
www.etg-kongress.com



© Infineon

Rückblick ETG Veranstaltungen

E16 VDE ETG Fachtagung: Bauelemente der Leistungselektronik und Ihre Anwendungen

Am 20. und 21. Juni 2023 fand in Bad Nauheim die VDE ETG Fachtagung „Bauelemente der Leistungselektronik und ihre Anwendungen“ statt, organisiert und gestaltet von den Mitgliedern des Fachbereichs Q1 „Leistungselektronik und Systemintegration“. Die Tagungsleitung lag bei Prof. Regine Mallwitz (TU Braunschweig) und Prof. Klaus Hoffmann (Helmut-Schmidt-Universität, Hamburg). Wie bei vielen anderen Veranstaltungen zu leistungselektronischen Themen arbeitete der Fachbereich auch bei dieser Tagung eng mit ECPE – European Center for Power Electronics e.V. – zusammen.

Die VDE ETG Fachtagung „Bauelemente der Leistungselektronik und Ihre Anwendungen“ wird im zeitlichen Abstand von 5 Jahren durchgeführt und hat durch ausschließlich eingeladene Übersichtsvorträge einen ganz besonderen Charakter. Ziel ist es, einen Überblick über die seit der vorherigen Tagung erreichten Fortschritte auf dem Gebiet der Leistungselektronik zu geben, über die kommenden Innovationen zu informieren und auch offene Fragestellungen anzusprechen und zu diskutieren. Die Tagung war mit rund 90 Teilnehmern wie in den vergangenen Jahren sehr gut besucht.

Der erste Tag der Veranstaltung beschäftigte sich traditionell mit den Bauelementen der Leistungselektronik. Die Weiterentwicklungen bei den Leistungshalbleitern bieten und bieten viel Potential für z. B. Effizienzsteigerung in den aktuellen Applikationen. So stellte Prof. Josef Lutz (TU Chemnitz) im einführenden Hauptvortrag dar, wie die Leistungselektronik getrieben durch die Leistungshalbleiterentwicklungen zu Verbesserungen bei der Energieeffizienz aber auch zu den Reduktionen von CO₂ Emissionen in den

letzten Jahren beitragen und beitragen werden. Die am ersten Tag folgenden Vorträge zeigten den aktuellen Entwicklungsstand und die Trends bei den Leistungshalbleitern auf, diskutieren aber auch die Weiterentwicklungspotentiale von passiven Bauelemente wie Kondensatoren oder magnetischen Bauelementen.

Derzeit finden Leistungshalbleiter auf Basis von Silizium (Si), Silizium-Karbid (SiC) und Gallium-Nitrid (GaN) ihre Einsatzbereiche. Das zunehmend schnellere Schalten insbesondere der SiC- und GaN-Halbleiter ist jedoch herausfordernd. Daher wurden angepasste Lösungen für die Aufbau- und Verbindungstechnik, aber auch Aspekte zur Zuverlässigkeit und Lebensdauer, zum elektrischen und thermischen Design sowie zu Integration und Kosten dieser Halbleiter in verschiedenen Beiträgen beleuchtet. Auch die Innovationen bei den passiven Bauelementen nehmen zu. In den entsprechenden Vorträgen wurde deutlich, wie an kompakten und verlustarmen Designs von Kondensatoren und magnetischen Komponenten gearbeitet wird. Verbesserungen z. B. in Bezug auf Kompaktheit von Kondensatoren sind durch Materialzusammensetzung und geometrischem Aufbau erreichbar. Die Größe magnetischer Bauelemente kann mit zunehmender Schaltfrequenz reduziert werden. Voraussetzung dafür sind vertiefte Erkenntnisse zur Verlustentstehung. Nichtlineare Eigenschaften der magnetischen Materialien bieten neue Einsatzpotentiale.

Am zweiten Tag wurde über die aktuellen Anwendungen der Leistungselektronik referiert. Die Umgestaltung der elektrischen Energieversorgung und der Mobilität erfordert zunehmend Leistungselektronik für die Mittelspannungsebene. Passend dazu legte Dirk Kranzer (Fraunhofer Insti-

tut für Solare Energieversorgung – ISE, Freiburg) im seinem Hauptvortrag dar, welche Chancen SiC-Leistungshalbleiter in Mittelspannungsanwendungen bieten, aber auch für welche Fragenstellungen noch Lösungen zu erarbeiten sind. Dies betrifft beispielsweise die Materialien für die Aufbautechnik hochsperrender, schnell schaltender SiC-Leistungshalbleiter.

Weitere Beiträge beschäftigten sich mit dem jeweils aktuellen Stand und den Trends bei den Stromrichtern für die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ), für energieeffizientere Industrieantriebe und Windenergieanlagen. Die funktionalen Anforderungen sind hier vielfältig und dominant, so dass nach wie vor Si-basierte Lösungen ihren Einsatz finden. Photovoltaik (PV)- und Batterie-Wechselrichter werden für einen sehr breiten Leistungsbereich angeboten. Im unteren und mittleren Leistungsbereich stehen vor allem die weitere Steigerung der Leistungsdichte z. B. durch SiC- oder GaN-Leistungshalbleiter aber auch Fragen der Lebensdauer im Vordergrund. Wechselrichter für die PV, die Batterieanbindung aber auch für die Elektrolyse werden bis in den MW-Bereich entwickelt. Der Beitrag über die Stromrichter für die Wasserelektrolyse wurde mit großem Interesse aufgenommen. Die zügige Bereitstellung zuverlässiger, kommerzieller Lösungen ist hier essentiell. Für die Netzanbindung bieten Thyristor-basierte Lösungen in Kombination mit steuerbaren IGBT-Stromrichtern Potential.

Die steigende Zahl Batterie-angetriebener Fahrzeuge steigt und erhöht den Bedarf an elektrischen Energiewandlern im und außerhalb des Fahrzeugs. Ressourcen-sparende Effizienz und Materialnutzung verbunden mit langer Lebensdauer und niedrigen Kostenaspekten sind damit zentrale Themen im Bereich der automotive-Anwendungen, die ebenfalls in 2 Beiträgen intensiv vorgestellt wurden.

Der abschließende Beitrag beschäftigte sich mit Schaltnetzteilen und gab einen umfassenden Überblick wie sowohl Weiterentwicklungen auf dem Gebiet der Schaltungstechnik als auch der Bauelemente über Jahre zu Fortschritten geführt wird.

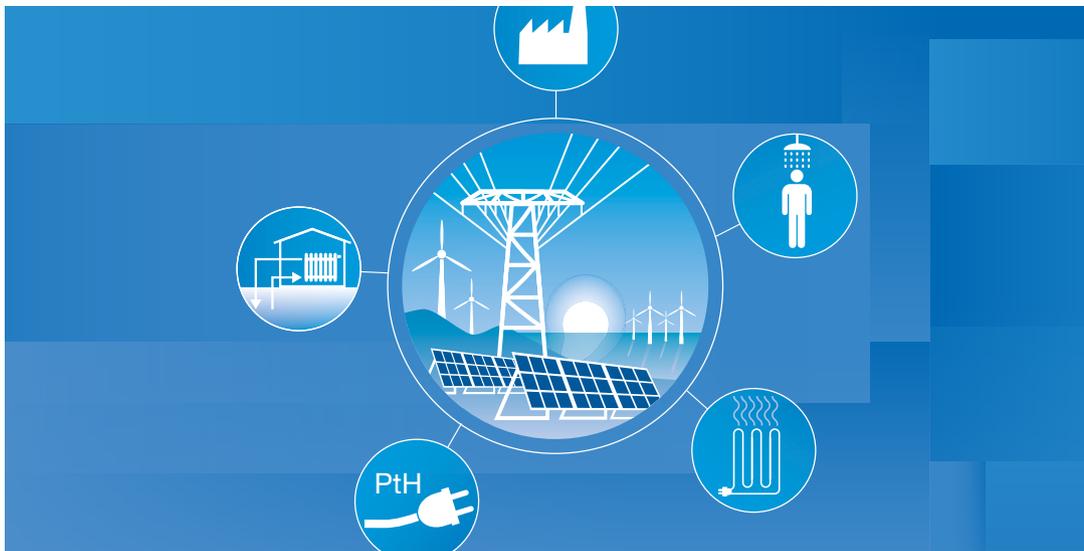
Im Rückblick auf die gesamte Tagung wird einmal mehr deutlich, dass die effiziente Energiewandlung für alle Leistungselektronikanwendungen ein Grundthema ist, flankiert von den applikationsspezifischen Anforderungen an Lebensdauer, Leistungsdichte und Kosten. Viele Leistungselektronik-Anwendungen profitieren von den Weiterentwicklungen der aktiven Bauelemente und fordern weitere Verbesserungen bei den passiven Bauelementen ein. Die Mittelspannungsanwendungen wird in den kommenden Jahren für grundlegende Weiterentwicklungen bei den Bauelemente sorgen.



*Prof. Dr.-Ing.
Regine Mallwitz,
Technische Universität Braunschweig*



*Prof. Dr.-Ing.
Klaus F. Hoffmann,
Helmut-Schmidt-Universität /
Universität der Bundeswehr Hamburg*



Rückblick ETG Veranstaltungen

E17 9. Dialogplattform Power-to-Heat

Die vom Energie-Forschungszentrum Niedersachsen (EFZN) in Kooperation mit VDE ETG organisierte *Dialogplattform Power-to-Heat* wurde in diesem Jahr zum neunten Mal durchgeführt. Diesmal stand die Veranstaltung unter dem Motto „*Optionen und Strategien zur Wärmewende*“. Aus organisatorischen Gründen war es leider auch in diesem Jahr nicht möglich, die Veranstaltung wie ursprünglich vorgesehen in der Niedersächsischen Landesvertretung beim Bund in Berlin durchzuführen. Daher wurde abweichend von der bisherigen Praxis diesmal auch auf einen Call for Papers verzichtet. Stattdessen hat der Programmausschuss (Dr.-Ing. Jens zum Hingst, CUTEC Forschungszentrum der TU Clausthal und Energie-Forschungszentrum Niedersachsen (EFZN), Frank Mattioli, EFZN und Dr.-Ing. Martin Kleimaier, VDE ETG) ein interessantes Programm mit eingeladenen Referenten zusammengestellt. Als Format für die diesjährige Veranstaltung wurden drei kürzere Webinare mit unterschiedlichen Aspekten gewählt, die am 30.11., 7.12. und 14.12.2023 jeweils zwischen 16:30 und 18:30 Uhr stattgefunden haben. Während der erste Abend dem Thema *Wärme im Gebäude* gewidmet war stand am zweiten Abend das Thema *Prozesswärme in der Industrie* im Vordergrund. Am dritten Abend konnte dann noch über *Erfahrungen realisierter Vorhaben* berichtet werden. Die Online-Veranstaltung konnte den Interessenten nach Anmeldung auch in diesem Jahr wieder kostenlos angeboten werden.

Etwa 150 Teilnehmerinnen und Teilnehmer hatten sich zu dieser Webinar-Reihe angemeldet. Erwartungsgemäß war dabei das Interesse an dem Thema Wärme im Gebäude aufgrund der in den letzten Wochen und Monaten geführten Diskussion um das Gebäudeenergiegesetz am größten. Zu diesem Thema konnte in einem Beitrag anschaulich gezeigt werden, dass elektrische Wärmepum-

pen auch in Bestandsgebäuden eine energetisch sinnvolle und wirtschaftliche Lösung darstellen können, wenn hierfür die entsprechenden Voraussetzungen vorhanden sind. In Deutschland werden dies üblicherweise Luft-Wasser oder Wasser-Wasser-Wärmepumpen sein. Einem verbreiteten Einsatz der im skandinavischen Raum häufig installierten Luft-Luft-Wärmepumpen (Split-Klima-Anlagen) werden in Deutschland aus verschiedenen Gründen nur geringe Chancen eingeräumt.

Da Strom aus erneuerbaren Quellen auf absehbare Zeit noch nicht permanent für eine elektrische Wärmeerzeugung zur Verfügung steht, müssen auch Lösungen für diese Übergangszeit gefunden werden. Dabei gilt es einerseits die zur Verfügung stehenden EE-Überschussstrommengen möglichst vollständig zu nutzen und Abregelungen so weit wie möglich zu vermeiden. Andererseits sollte dabei gleichzeitig die Nutzung fossiler Energieträger entsprechend zurückgefahren werden. Ermöglicht werden könnte dies mit hybriden (bivalenten) Wärmeerzeugungssystemen: dabei soll bei EE-Überschüssen eine dargebotsabhängigen Nutzung in Power-to-Heat-Systemen angestrebt werden, in Kombination mit den vorhandenen konventionell fossil-gefeuerten Wärmeerzeugern, die dann nur noch in Zeiten mit EE-Mangel zum Einsatz kommen. Derartige Hybrid-Systeme könnten sowohl im privaten Bereich als auch für eine Nutzung im Bereich industrieller Prozesswärme genutzt werden, da sich dort beide Systeme relativ einfach und kostengünstig kombinieren lassen. Bei Wärmepumpen ließen sich kostengünstigere Lösungen realisieren, wenn diese nicht für die kältesten Tage ausgelegt werden müssten. Aufgrund der i.d.R. sehr niedrigen Investitionskosten für PtH-Systeme mit Direktheizung (elektrische Widerstandsheizung) können diese selbst bei kurzen Einsatzdauern während der aktuell

noch sehr beschränkten Zeiten mit EE-Überschüssen zum Einsatz kommen. Solange allerdings Brennstoffkosten für die fossile Wärmeerzeugung noch günstiger sind als EE-Strom – selbst bei EE-Überschussituationen – werden keine wirtschaftlichen Anreize für derartige Systeme gesehen. Neben attraktiven Tarifsyste men für die Nutzung von EE-Überschüssen fehlen auch noch hierfür geeignete Informations- und Steuerungssysteme. Für Eigenheimbesitzer mit eigener PV-Anlage könnten sich jedoch bereits heute sinnvolle Lösungen realisieren lassen. Neben einer Trinkwassererwärmung könnten in den Sommermonaten Wärmepumpen auch für die Klimatisierung eingesetzt werden, wenn die Systeme hierfür ausgelegt sind. Auch ein netzdienlicher Betrieb wäre mit derartigen flexiblen hybriden PtH-Systemen möglich; wird dies aktuell allerdings noch nicht honoriert.

In einem weiteren Tagungs-Beitrag, wurden verschiedene Optionen zur Bereitstellung von elektrischer Prozesswärme mit Temperaturen bis etwa 270 °C mit Hilfe von Hochtemperatur-Wärmepumpen vorgestellt. Neben einem Einsatz in der Fernwärmeversorgung kommen derartige Systeme für die Versorgung mit Prozesswärme zum Einsatz. Unterschiedliche Einsatzfälle aus verschiedenen Bereichen wurden vorgestellt und die Randbedingungen für einen erfolgreichen Business-Case erläutert.

Neben der elektrischen Wärmeerzeugung wird auch die Wärmespeicherung eine zunehmend wichtiger werdende Rolle spielen. Dies wurde in mehreren Beiträgen verdeutlicht: für die Niedertemperatur-Wärmespeicherung wurden in einem Beitrag verschiedene Optionen für eine Erdbeckenspeicherung vorgestellt und die Herausforderungen anschaulich dargestellt. In einem anderen Beitrag wurden Systeme zur Eisspeicherung thematisiert. Die Nutzung der latenten Wärme kann dabei sowohl für Kühl- als auch für Heizzwecke zum Einsatz kommen. Neben den Grundlagen dieser Speichertechnologie wurden bereits realisierte bzw. geplante Einsatzfälle vorgestellt.

Auch im Bereich der Hochtemperatur-Wärmespeicherung gibt es sehr interessante Entwicklungen. Hier wurde ein modulares System vorgestellt, das für Speichertemperaturen bis etwa 1300 °C ausgelegt ist. Dabei wurden neben der langen Lebensdauer der Komponenten insbesondere auch die Kostenvorteile einer Wärmespeicherung im Vergleich zu einer elektrischen Speicherung, z. B. in Batterien, hervorgehoben. Interessante Einsatzfälle, die bereits realisiert wurden bzw. noch in Planung sind, wurden vorgestellt.

Bei nahezu allen Beiträgen wurde die in Deutschland in vielen Fällen fehlende Konkurrenzfähigkeit des Strompreises für Wärmeanwendungen im Vergleich zu den Preisen für fossile Brennstoffe hervorgehoben. Um den Herausforderungen zur Erreichung eines klimaneutralen Deutschlands gerecht zu werden, müssen dringend attraktive Rahmenbedingungen für die Nutzung von EE-Strom für eine klimaneutrale Wärmeerzeugung geschaffen werden.

Um dem Ursprungsgedanken einer „Dialogplattform“ gerecht zu werden, wurde auch bei diesem neuen Online-Format wieder darauf geachtet, dass für die Fragen und Diskussionsbeiträge der Teilnehmer ausreichend Zeit eingeplant wurde. Hiervon wurde sowohl im Chat als auch mit direkten Fragen an die Referenten reger Gebrauch gemacht.

Die 9. Dialogplattform wird damit - trotz des Online-Formats - sowohl von den Teilnehmern als auch von den Veranstaltern wieder als voller Erfolg gesehen. Daher soll es auch eine Neuauflage einer Veranstaltung zu diesem Themenkomplex geben. In welcher Form und zu welchem genauen Zeitpunkt die 10. Dialogplattform stattfinden wird soll Anfang 2024 entschieden werden. Rückblickend auf die sehr erfolgreichen früheren Veranstaltungen, wäre eine Präsenzveranstaltung in der Niedersächsischen Landesvertretung beim Bund in Berlin wünschenswert, um endlich auch wieder persönliche Gespräche und Diskussionen zu ermöglichen.

Die freigegebenen Präsentationsfolien zu den Vorträgen stehen auf der Internetseite des EFZN (www.efzn.de/de/home/) zum Download zur Verfügung.



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

Rückblick ETG Veranstaltungen

E18 VDE ETG Fachtagung Flexible Erzeuger, Verbraucher und Speicher: Organisation unseres zukünftigen Energiesystems

am 7. und 8. November 2023 in Nürnberg

Im Herbst 2022 fand in Kassel die vom Fachbereich V1 organisierte VDE ETG Fachtagung „Erzeugung und Speicherung elektrischer Energie“ statt, zu einer Zeit, in der wir uns in einer akut unsicheren Situation befanden, in der eine Gasmangellage drohte und wir alle zum Sparen von Energie aufgefordert waren. Das sind wir heute immer noch bzw. wieder, auch wenn die Situation heute weniger bedrohlich erscheint als vor einem Jahr.

Wir hatten damals auf der Tagung – trotz aller Aufmerksamkeit für die kurzfristige Versorgungssicherheit im Winter – entsprechend des Untertitels „Versorgungssicherheit im Energiesystem der Zukunft“ auch den Blick in die weitere Zukunft gewagt: „Welche Optionen haben wir, um mittel- bis langfristig die Versorgungssicherheit zu gewährleisten?“ Diese Frage begleitet uns seitdem weiterhin, weshalb sich der Fachbereich V1 dazu entschieden hatte, auch in 2023 eine Fachtagung zu systemischen Fragen und Lösungsansätzen für die Stromerzeugung auszurichten.

Ein Teil der Antwort auf die Frage nach der Versorgungssicherheit wird auch die Nutzung von Flexibilität aller Systemteilnehmer sein. Dabei geht es also nicht nur um Flexibilität der Erzeugung, sondern auch der Speicher und nicht zuletzt der Verbraucher, wie es auch der Titel deutlich macht.

Flexibilität wird jedoch nicht nur den verschiedenen Teilsystemen des elektrischen Energieversorgungssystems abverlangt, sondern auch allen beteiligten Personen. Das System wandelt sich schnell und es stellen sich immer wieder neue Fragen oder alte Fragen benötigen neue Antworten. Die erfolgreichen Fachtagungen in den vergangenen Jahren haben uns gezeigt, dass die wenigsten dieser Fragen mit Expertise aus einem einzigen Bereich beantwortet werden können, vor allem nicht die systemischen Fragen. Deshalb ist ein Austausch und eine Auseinandersetzung mit anderen Experten dringend geboten, insbesondere über das eigene Spezialisierungsgebiet hinaus.

Aus diesem Grund haben die folgenden drei Fachkreise der Energietechnischen Gesellschaft (ETG) des VDE für die Gestaltung des Programms dieser Tagung die Kräfte gebündelt und einen Programmausschuss für eine gemeinsame Fachtagung gebildet:

- VDE ETG Fachbereich V1 „Erzeugung, Verbrauch und Speicherung im elektrischen Energieversorgungssystem“
 - VDE ETG Task Force „Flexibilisierung des Energiesystems (EnerFlex)“
 - VDE ETG Fachausschuss V2.4 „Zellulare Energiesysteme“
- Hieraus ergab sich ein vielseitiges und interessantes Tagungsprogramm, das bewusst versuchte, auch Brücken zu schlagen zwischen den Bereichen Erzeugung, Übertra-



Bild 1: Panel-Diskussion zu zukünftigen Märkten und Instrumenten der Flexibilitätsnutzung

V.l.n.r.: Matthias Leuthold (Trianel), Wolfgang Fritz (Consentec), Martin Wolter (OVGU Magdeburg, Moderator), Dominik Schlipf (TransnetBW), Achim Zerres (Bundesnetzagentur) (Bild: M. Kleimaier)

gung, Verteilung und Verbrauch elektrischer Energie sowie möglicher Speicheroptionen.

Die Themen im Tagungsprogramm waren vielfältig, aber lassen sich unter folgender Leitfrage zusammenfassen: „Wie können wir das systemische Zusammenwirken der Vielzahl der Beteiligten erfolgreich und effizient so organisieren, dass weiterhin eine hohe Versorgungssicherheit und Stabilität gewährleistet ist?“

Das Tagungsprogramm umfasste insgesamt sieben Sektionen mit verschiedenen Aspekten dieser Frage. In der Eröffnungssektion mit dem Titel „Der steuerbare Kraftwerkspark als Grundlage für die Residuallastdeckung“ ging es um die eingangs erwähnte Frage nach der mittel- bis langfristigen Versorgungssicherheit. Dabei wurden Perspektiven der Betreiber von Übertragungsnetzen, von Gasnetzen sowie von Kraftwerken beleuchtet. Während die Übertragungsnetzbetreiber deutlich machten, dass für den Aufbau neuer Erzeugungskapazitäten auch deren Standort eine wichtige Rolle spielt und dieser deshalb bei der Entscheidung über Neubauprojekte Berücksichtigung finden sollte, wurde aus den Vorträgen der Kraftwerksbetreiber klarer, welche weiteren wesentlichen Randbedingungen bei Investitionsentscheidungen für Kraftwerke relevant sind.

Die nachfolgenden beiden Sektionen stellten Ergebnisse der Taskforce EnerFlex vor, wobei zunächst die Potentiale und danach mögliche Anwendungen betrachtet wurden.

Der zweite Tag begann mit der Keynote „Beitrag von zentraler und zellulärer Flexibilität zur zukünftigen Versorgungssicherheit“ von Achim Zerres (Bundesnetzagentur). Im Anschluss behandelten einige Vorträge die Möglichkeiten und Grenzen des regulatorischen Rahmens für die Er-

schließung von Flexibilität. Die verschiedenen Sichtweisen wurden in der Panel-Diskussion „Zukünftige Märkte und Instrumente der Flexibilitätsnutzung“ weiter vertieft und diskutiert.

Neben der Erschließung der benötigten Flexibilität ist auch die Organisation vieler kleiner Einheiten eine Herausforderung. Letzterem widmeten sich die Vorträge in einer Sektion zu zellularen Energiesystemen, während in der Abschlusssektion „Anwendungsbeispiele für die Erschließung von Endkundenflexibilität“ berichtet wurde, wie die Erschließung gelingen kann bzw. ob und wie sie heute teilweise schon gelingt.

Zwischen den Vorträgen und bei der Panel-Diskussion wurden viele Fragen gestellt und teilweise intensiv diskutiert. Nicht zuletzt ermöglichten großzügig geplante Pausen den Austausch unter den 62 Teilnehmerinnen und Teilnehmern, welche die Gelegenheit für das persönliche Gespräch und das Netzwerken intensiv nutzten.

Auch bei dem abendlichen Get-together wurde noch lange intensiv weiter diskutiert und Kontakte geknüpft. Erfreulich war auch der hohe Anteil jüngerer Teilnehmer, von denen die Organisatoren eine durchweg positive Rückmeldung erhalten haben und das Interesse an einer Mitarbeit in den o. g. Fachkreisen bekundet haben.

Literaturverweise

- [1] VDE ETG Studie „Flexibilisierung des Energiesystems (EnerFlex)“, Oktober 2023,
Online: <https://www.vde.com/de/etg/arbeitsgebiete/v2/flexibilisierung-des-energiesystems>



*Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hendrik Lens
Universität Stuttgart,
stv. Vorsitzender
ETG FB V1*



*Prof. Dr.-Ing. habil. Martin Wolter
Otto-von-Guericke Universität Magdeburg,
Leiter der TF EnerFlex*

Rückblick ETG Veranstaltungen

E19 Bericht zum Workshop „High Voltage Goes Green“

Der ETG Fachbereich Q2 organisierte einen Workshop mit dem Titel „High Voltage Goes Green“. Der Fokus lag auf konkreten technischen Lösungen der Hochspannungstechnik als Beitrag zum Klimaschutz im Rahmen der Energiewende.

Das hohe Interesse der Gesellschaft und auch der Jugendbewegung „Fridays for Future“ an Informationen über die Energiewende als wichtiger Teil des Klimaschutzes stellt an die Fachgesellschaften hohe Anforderungen an die Kommunikation. Nach dem Netzentwicklungsplan Strom 2037/2045, Version 2023, 1. Entwurf, belaufen sich die Investitionen für die Netzmaßnahmen des AC-Zubaunetzes auf rund 50 Mrd. EUR. Dazu gehören neben den Kosten für AC-Freileitungen auch die Kosten für Transformatoren, Schaltfelder, Kompensationsanlagen sowie Mehrkosten einer Teil-Erdverkabelung. Es ist daher höchste Zeit für eine aktuelle Übersicht zu den technischen Lösungen der Hochspannungstechnik.

Vor diesem Hintergrund entstand die Idee, mit der Expertise des Fachbereichs Q2 für die Netzkomponenten der Hochspannungstechnik zu diesem gesamtgesellschaftlichen Projekt beizutragen.

Da die mögliche mediale Wirkung eines Workshops, der von VDE ETG organisiert wurde, nicht absehbar war, entschied sich der Fachbereich Q2 für einen Workshop nach dem Prinzip „von Experten für Fachleute“. Das Ergebnis war der Workshop „High Voltage Goes Green“. Er fand am 26. Oktober 2024 in der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften statt, mit der Teilnahme von 40 Personen.

Das Thema Ersatzgase für Schwefelhexafluorid SF₆ nahm einen bedeutenden Teil der Veranstaltung ein, da hier der regulatorische Druck durch die neue F-Gase-Verordnung am größten ist. Im Bereich der Mittelspannungs-Schaltanlagen bieten alle großen Hersteller Alternativen zu SF₆ an, jedoch mit De-Rating der technischen

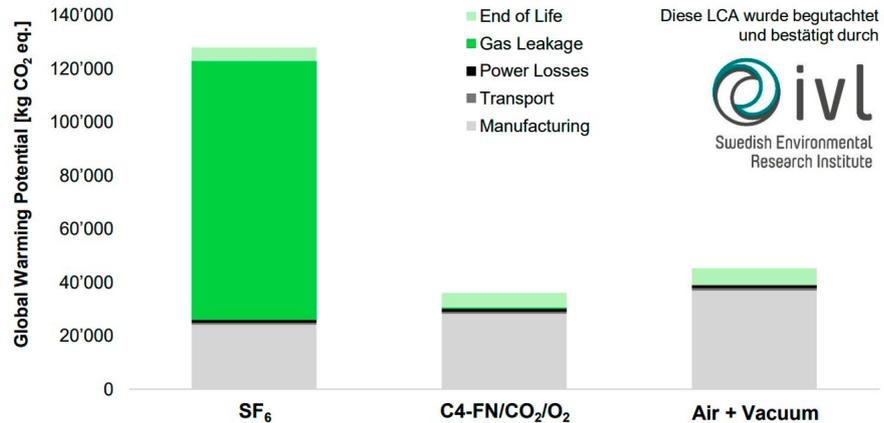


Bild 1: Erderwärmungspotenzial über 40 Jahre Laufzeit einer 145 kV Gas-isolierten Schaltanlage per Lebenszyklusanalyse LCA (Study Report Live Cycle Assessment of Different Concepts of SF₆-free Gas Insulated Switchgear, 202206-2665472)

Diese LCA wurde begutachtet und bestätigt durch

 Swedish Environmental Research Institute

Eigenschaften. Bei den Hochspannungs-Schaltanlagen jedoch ist das Angebot auf dem Markt noch eingeschränkt.

Während einige Hersteller auf Luft als Ersatzgas setzen, werden auch künstliche Gase wie Fluor-Nitrile, z. B. C₄-FN, angeboten. Die Teilnehmer waren sich einig, dass nicht nur das Isoliergas, sondern der gesamte Lebenszyklus über den Einfluss auf die Erderwärmung (GWP) entscheidet. Ein Beispiel für eine Life Cycle Analysis (LCA) ist in Bild 1 dargestellt. Welche Lösung sich letztendlich durchsetzt, wird nicht nur durch die technischen Eigenschaften, sondern auch durch die Gesetzgebung bestimmt.

Im Bereich der Energieübertragung wurde der aktuelle Stand der HVDC-Projekte in Deutschland präsentiert, wobei auch die Diskussion über den Isolierstoff Polypropylen als Ersatz für Polyethylen sowie eine generelle Erörterung der Vor- und Nachteile von Kabeln im Vergleich zu Freileitungen stattfand.

Als zentrale Elemente in den Umspannwerken wurden bei den Transformatoren Techniken vorgestellt, um Verluste und Geräusche zu reduzieren.

Abschließend präsentierte die ETG Task Force „Betriebsmittel im Netz der Energiewende“ ihre ersten Ergeb-

nisse, wofür ermutigendes Feedback einging: „Ihre Ausführungen zur Überlastung von Betriebsmitteln haben meinen gewohnten Blick als Netzbetreiber ziemlich durcheinandergewirbelt.“

Die durchweg herausragenden Vorträge wurden auf äußerst konstruktive und offene Weise kommentiert und geschätzt. Der ETG Fachbereich Q2 plant eine Wiederholung des Workshops.



Prof. Dr.-Ing. Maik Koch, Hochschule Magdeburg-Stendal, Leiter der Task Force



Prof. Dr.-Ing. Michael Kurrat, TU Braunschweig, Leiter ETG Fachbereich Q2



© Peter Adams / stock.adobe.com

Rückblick ETG Veranstaltungen

E20 VDE ETG Webinar: Systemstabilität der Stromversorgung

Was konkret ist die Systemstabilität der elektrischen Energieversorgung? Welchen Einfluss hat die Transformation der Energieversorgung auf die Stabilität? Ist eine stabile Stromversorgung technisch überhaupt möglich, wenn die Stromerzeugung fast nur noch aus Wind und PV erfolgt? Brauchen wir nicht auch weiterhin Großkraftwerke als Stabilitätsstützen? Welche Rolle spielen die leistungselektronischen Umrichter, über die PV- und Windenergieanlagen an das Stromnetz angeschlossen werden? Diese und viele weitere Fragen wurden bei dem VDE ETG Webinar „Systemstabilität der Stromversorgung“ am 17.10.2023 erklärt und diskutiert. Herr Prof. Dr.-Ing. Hendrik Lens, Leiter der Abteilung Stromerzeugung und Automatisierungstechnik an der Universität Stuttgart, und Prof. Dr.-Ing. Holger Wrede, Leiter der Forschungsgruppe für Leistungselektronische Energiesysteme an der Hochschule Düsseldorf, vermittelten den Teilnehmerinnen und Teilnehmern einen umfassenden Einblick in die aktuelle Entwicklung der Stromversorgung und ihre Folgen für die Systemstabilität. Dabei tauchten beide bewusst nicht sehr tief in die technischen Details ein, sondern sie strebten einen Kompromiss zwischen technischer Korrektheit und Verständlichkeit an.

Die beiden Referenten erklärten zunächst sehr anschaulich, was Systemstabilität überhaupt ist. Danach erfolgte eine detaillierte Darstellung, wie sie heute über die noch vorhandenen Synchrongeneratoren der Kraftwerke zusammen mit den zugehörigen Dampf-, Gas- oder Wasserturbinen gewährleistet wird, während heutige Wind- und PV-Anlagen direkt der vorhandenen Netzspannung folgen und so nicht zur Stabilität beitragen. Zum Abschluss zeigten sie auf, was getan werden muss, damit die Systemstabilität auch in Zukunft erhalten bleibt.

Für die fast 300 Zuhörer, ob nun mit elektrotechnischem Fachwissen oder auch nicht, waren viele neue Erkenntnisse dabei. Eines stellten die beiden Referenten am Ende sehr deutlich heraus: Damit das Stromnetz auch ohne Großkraftwerke stabil sein kann, besteht Handlungsbedarf, und zwar über den dringend notwendigen Ausbau von Windkraftwerken und PV-Anlagen hinaus. Es bedarf zeitnah entsprechender Rahmenbedingungen und technischer Entwicklungen, damit zukünftige Wind-, PV- und Speichereanlagen im notwendigen Umfang netzbildend ausgelegt werden.

Das Ziel des Webinars, die interessierte Öffentlichkeit für das Thema Systemstabilität der Stromversorgung zu sensibilisieren, wurde zweifelsohne erreicht. Weiterführende Informationen zum Thema finden Sie im VDE Hintergrundpapier „Betrieb des Gesamtsystems und Systemstabilität“ auf der Webseite des VDE ETG Fachbereichs „Erzeugung, Verbrauch und Speicherung im elektrischen Energieversorgungssystem“¹.

1 <https://www.vde.com/de/etg/arbeitsgebiete/v1>



Elina Lenz
Studentische Mitarbeiterin des VDE e.V.

Rückblick ETG Veranstaltungen

E21 ETG CIRED D-A-CH Workshop 2023: Innovationen im Verteilernetz

Am 28. und 29.11. 2023 fand der dritte ETG CIRED D-A-CH Workshop mit dem Titel „Innovationen im Verteilernetz“ statt, der mit rund 100 Teilnehmern gut besucht war. Die Veranstaltung hat sich an das technische Management und Fachkräfte von Betreibern, Herstellern, Hochschulen und Regulierungsbehörden gewandt, die für die Verteilernetze in den Bereichen Netzplanung, Regulierung, Asset Management, Netzbetrieb und Schutz- und Leittechnik aktiv sind. Die Veranstaltung bestand aus drei Themenblöcken und einer Posterausstellung. Jeder Themenblock umfasste einen Impulsvortrag und eingeladene Fachvorträge. Die Themenblöcke wurden mit einer moderierten Diskussionsrunde abgeschlossen, in der sich alle Vortragenden einer intensiven Diskussion mit dem Publikum stellten. Die Poster wurden in geführten Postertouren vorgestellt und diskutiert.

Warum braucht es einen CIRED D-A-CH Workshop? Innerhalb der CIRED ist der D-A-CH-Raum der Sitz vieler weltweit wichtiger technologieorientierter Unternehmen und meinungsbildender Netzbetreiber. Wichtige Impulse der letzten Jahrzehnte konnten aus diesem geografischen Raum heraus gesetzt und Technologien erfolgreich entwickelt, verbessert und in die Planung und den Betrieb der Verteilernetze eingebracht werden. Andererseits ist der D-A-CH-Raum auch die Region mit der höchsten Dichte an Verteilernetzbetreibern weltweit. Um die Innovationskraft auf der einen Seite mit dem Bedarf an deutschsprachiger technischer Diskussion auf der anderen Seite zusammenzubringen, haben sich die nationalen Komitees der CIRED im D-A-CH-Raum entschlossen, ein deutschsprachiges Forum als regionale Plattform für den direkten Austausch zwischen Praxis, Wissenschaft und Regulierung zu etablieren. Ansätze für Innovationen und deren Umsetzung in den Ver-



teilernetzen konnten so mit einem breiten Fachpublikum offen und lebhaft diskutiert werden.

Im ersten Themenschwerpunkt wurden die neuesten Entwicklungen und Trends diskutiert, die auf der CIRED 2023 in Rom besonders aufgefallen sind. Jede der sechs CIRED Sessions wurde von hochkarätigen Referenten vorgestellt, die in den Session Advisory Groups der CIRED, als Session Rapporteur oder als Session Chairman engagiert waren. In der dazugehörigen Postersession konnten dann die Autoren ihre Publikationen nochmals in deutscher Sprache vorstellen. In Erwartung intensiver fachlicher Diskussionen war dieser Veranstaltungsteil an das Ende des ersten Tages gestellt worden, so dass die Diskussionen nicht durch andere Tageordnungspunkte unterbrochen werden sollten. Allerdings hatte ich als Veranstaltungsleiter den wahren Diskussionsbedarf unterschätzt, was zur Folge hatte, dass einige Diskutanten die Fachgespräche auf bis zu 2,5 Stunden gebracht haben, bei geplanten 1,5 Stunden.

Der zweite Tag wurde mit dem Themenschwerpunkt „Notfall-Maßnahmen bei einer Strommangellage“ eröffnet. Als Impulsgeber konnten wir Herrn Michael Gerold vom Fraunhofer SIRIOS gewinnen, der den Blick auf die gesellschaftlichen Zusammenhänge beim Eintreten einer Strommangellage und insbesondere die Auswirkungen auf die kritische Infrastruktur erläuterte. Grundsätzlich sind die D-A-CH-Länder auf Strommangellagen vorbereitet und haben entsprechende Notfallpläne. Mit dem Ukraine-Krieg und weiteren ungünstigen Faktoren ist eine Strommangellage in den Bereich des Möglichen und damit in das Blickfeld von Politik und Öffentlichkeit gerückt. In der Konsequenz haben die Länder und die Stromwirtschaft ihre Konzepte für eine allfällige Bewältigung einer Strommangellage aktualisiert. Um die Unterschiede in den Bedürfnissen, den technischen Konzepten und der regulatorischen Bedingungen der drei Länder herauszuarbeiten, konnten wir aus jedem Land jeweils einen Vertreter eines Netzbetreibers und des jeweiligen Regulators für die Fachvorträge gewinnen. Die Unterschiede zwischen den Ländern und die Auswirkungen einzelner Maßnahmen wurden dann im Roundtable ausführlich diskutiert. Das wichtigste Fazit aus dieser Runde war, dass der Austausch auf D-A-CH-Ebene für jeden Teilnehmer neue Aspekte aufgezeigt hat, seine eigenen Prozesse weiter zu hinterfragen und optimieren.

Der dritte Themenschwerpunkt fokussierte sich auf die Energiewende: „Verteilernetze für 100 % erneuerbare Erzeugung“. Die öffentliche Erwartungshaltung an die Zuver-



Die Vorsitzenden der nationalen CIRED Komitees: Lukas Küng (CH), Uwe Kaltenborn (DE) und Herwig Struber (AT)



Roundtable 100 % Erneuerbare: Lukas Küng (CH, Moderation), Wieland Hintz (Bundesamt für Energie, CH), Ursula Tauschek (ÖsterreichsEnergie, AT), Anke Weidenkaff (Fraunhofer IWKS, DE), Markus Zdrallek (Bergische Universität Wuppertal, DE)

lässigkeit und Stabilität der Netze aller Spannungsebenen ist sehr groß. Die nahezu vollkommene Versorgungssicherheit der letzten Jahrzehnte wird auch für die Zukunft bei 100 % erneuerbare Erzeugung vorausgesetzt. Auch wenn mit den großen DC-Kabel-Korridorprojekten wie SuedLink und SuedOstLink die Übertragungsnetze im medialen Fokus stehen, findet die Energiewende vor allem ohne großes Aufsehen im Verteilernetz statt. Den Impuls zur Diskussion setzt Frau Prof. Weidenkaff vom Fraunhofer IWKS, die über die Verfügbarkeit beziehungsweise Begrenzung der Verfügbarkeit von notwendigen Rohstoffen für die Energiewende sprach. Die Ziele der Energiewende können nicht mit den offensichtlich verfügbaren natürlichen Ressourcen erreicht werden, es müssen Wertstoffkreisläufe schnellstmöglich etabliert und industrialisiert werden, um ausreichend Kupfer, Silizium, seltene Erden, Lithium und weitere Rohstoffe bereitzustellen. Mit spezifischen Beiträgen aus Österreich, der Schweiz und Deutschland konnten die strategischen Herangehensweisen und die aktuellen Stände verglichen und diskutiert werden. In der Konsequenz ergab sich daraus ein kämpferischer Roundtable, in dem die Diskutanten sich sehr stark auf das noch zu Schaffende konzentrierten und im gemeinsamen Konsens formulierten, dass der Kampf der Energiewende im Verteilernetz gewonnen wird. Diskutiert wurde die Notwendigkeit der Regulierung, die Schaffung von nachhaltigen Marktanreizen und die Granularität, mit der Lastflüsse im sekundären Verteilernetz und in der Niederspannung sinnvoll zugänglich gemacht werden müssen.

Aus fachlicher Sicht war es ein sehr gelungener Workshop und ich möchte mich nochmals bei den Organisatoren im VDE, den Kollegen Küng, Stöckli, Struber, Schmaranz und Drewek im Programmausschuss und im Besonderen bei allen Referenten ganz herzlich bedanken. Für die im Jahre 2025 angedachte Neuauflage des ETG CIRED D-A-CH Workshop würde ich mich freuen, wenn dieses Angebot von noch mehr kleinen und mittleren Verteilernetzbetreibern angenommen und aktiv mitgestaltet wird.

Bilder: Marcel Stoeckli



Philippe Mahler (ECom; CH)



Lukas Küng (Primeo Energie; CH)



Robert Schmaranz (Kärnten Netz; AT)



Alexander Kabinger E-Control; AT)



Dennis Volk (BNetzA, DE)



Peter Schmitzer (Bayernwerk, DE)



Dr.-Ing. Uwe Kaltenborn
HIGHVOLT Prüftechnik Dresden GmbH

I1 Aktuelle Informationen aus CIRED



Liebe ETG Mitglieder,

ein erfolgreiches CIRED Jahr 2023 geht nahtlos in ein herausforderndes Jahr 2024 über. Die hauptsächliche Herausforderung wird durch die immer offensichtlichere Klimaerwärmung die weitere Beschleunigung der Energiewende sein. Die Großprojekte im Übertragungsnetz nehmen nun langsam Gestalt an. In der Konsequenz bedeutet dies die Notwendigkeit der Ertüchtigung der Verteilernetze. Die hierfür notwendigen Investitionen werden um ein Vielfaches höher sein als im Übertragungsnetz. Da wir dafür neben Geld auch Fachkräfte und Zeit brauchen, sind schnell verfügbare, robuste und innovative Lösungen gefragt.

Dass die CIRED solche innovativen Lösungen bieten und dass eine intensive internationale Zusammenarbeit diese Lösungen beschleunigt zur Marktreife bringen kann, hat die CIRED 2023 Konferenz in Rom bewiesen. Nach der virtuellen CIRED 2021 hat sich die Community der Verteilernetze zum ersten mal wieder im großen Stil in persona treffen können. Entgegen allen vorsichtigen Schätzungen konnte die CIRED 2023 mit einem Teilnehmerrekord und einem Rekord an Ausstellern aufwarten. Alle Sessions konnten sich über wachsenden Zulauf freuen, und insbesondere die Formate der Roundtables und des Research & Innovation Forums wurden besonders stark nachgefragt. Die deutsche Delegation war mit 194 Teilnehmern bei 132 Fachbeiträgen wieder die international stärkste Fraktion.

Besonders erfreulich ist die Tatsache, dass die Best Young Academic Awards in der Session 4 an Frau Veronika Barta von der Hochschule München und in der Session 6 an Frau Charlotte Wagner von der Universität Stuttgart ging.

Weiterhin fand in Rom auch die Generalversammlung der CIRED statt, die die strategische Ausrichtung der CIRED bestimmt. Im Rahmen der Neubesetzung des Board of Di-



Bild 2 und 3: Die Best Young Academic Award Preisträger Veronika Barta und Charlotte Wagner mit Markus Zdrallek (TC Chair), Carsten Böse (Chair Session 4) und Peter Söderström (Chair Session 6)

rectors hat die Generalversammlung Uwe Kaltenborn als einen der 8 Direktoren gewählt, die die Tagesgeschäfte der CIRED führen. Sein Fokusgebiet wird die Internationalisierung der CIRED sein, um hier Länder und Regionen mit nur losem Bezug zur CIRED Organisation besser einzubinden.

Die wichtigsten Erkenntnisse und Innovationen aus Rom wurden Ende November dieses Jahres nach München getragen. Hier fand wieder der ETG CIRED D-A-CH Workshop „Innovationen im Verteilernetz“ statt. Beginnend mit der Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse aus allen sechs Sessions hatten die Autoren von der Konferenz in Rom die Möglichkeit, ihre Beiträge als Poster dem deutschsprachigen Publikum vorzustellen. Die sich daraus entwickelnden Diskussionen waren so intensiv, dass für einige der Diskutanten nur noch wenige Reste vom Abendbuffet übriggeblieben waren. Das soll keine Kritik am Caterer sein, es zeigt eher, wie wichtig die technischen Diskussionen doch sind. Für den zweiten Tag waren die Themenblöcke „Notfallmaßnahmen bei Strommangellage“ und „Verteilernetze für 100% erneuerbare Erzeugung“ gesetzt. Hier konnten wir aus allen drei D-A-CH Ländern hochkaratige Vortragende gewinnen, so insbesondere aus den Regulierungsbehörden und Ministerien. Besonders hervorheben wollen wir auch die Impulsvorträge von Herrn Gerold (Fraunhofer SIRIOS) und Frau Prof. Weidenkaff (Fraunhofer IWKS). Beide haben sich der Herausforderung gestellt, als Außenstehende weitere Perspektiven zu unserer elektrischen Sichtweise auf die Themen zu bringen.

Das DK CIRED hat in seiner Herbstsitzung die Wahlfunktionen wie folgt bestätigt: Uwe Kaltenborn (Vorsitzender), Roland Drewek (stellv. Vorsitzender), sowie die Sessionverantwortlichen: Session 1: Uwe Kaltenborn, Session 2: Jan Meyer, Session 3: Ulf Häger, Session 4: Hendrik Venegerts, Session 5: Matthias Hable und Session 6: Roland Drewek

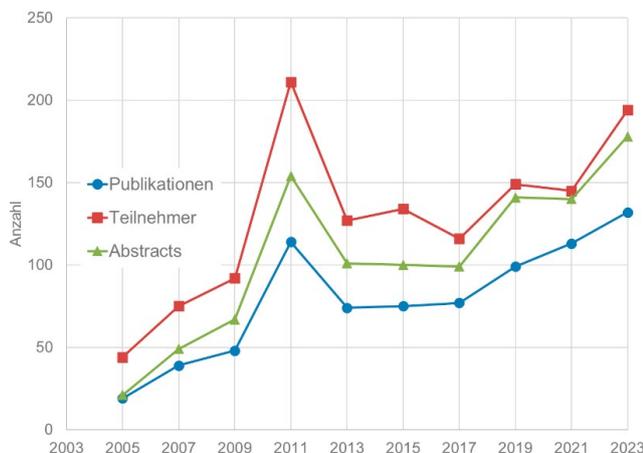


Bild 1: Teilnehmer, Abstracts und Publikationen aus Deutschland auf der CIRED

gewählt. Ein weiterer wichtiger Punkt war das Thema Nachwuchsgewinnung. Hier konnten wir die Erkenntnisse der VDE Studien zum Thema und unsere Möglichkeiten zur Mithilfe diskutieren.

Was erwartet uns aus CIREC Sicht im Jahre 2024? Am 19. und 20. Juni 2024 findet in Wien der europäische CIREC Workshop zum Thema „Increasing Distribution Network Hosting Capacity“ statt. Weiterhin wird das Thema “Resilience of Electric Distribution Systems” am 7. und 8. November 2024 im Workshop in Chicago diskutiert. Dazwischen liegt dann der Call for Papers für die CIREC 2025 in Genf. Es würde uns freuen, wenn Sie uns mit vielen Abstracts das Leben nicht ganz so einfach machen und dafür das Wissen um und die Möglichkeiten der Verteilernetze gemeinsam mit uns voranbringen.



Dr.-Ing. Uwe Kaltenborn
HIGHVOLT Prüftechnik Dresden GmbH



Dr. Roland Drewek
SW Kiel Netz GmbH

Dr. Uwe Kaltenborn & Dr. Roland Drewek
Vorsitzende des DK CIREC

12 Aktuelle Informationen aus dem Deutschen Komitee der CIGRE



Sehr geehrte Damen und Herren,

was hat sich in Sachen CIGRE seit der letzten Ausgabe alles getan? Gerne gebe ich Ihnen hier einen Überblick über die Aktivitäten. Im Vordergrund steht die Vorbereitung für die CIGRE Session 2024 in Paris.

Am 23. Juli 2023 haben wir im DK-CIGRE auf Basis der Empfehlungen der Lektoren aus den nationalen Arbeitskreisen über die eingereichten deutschen Synopsen beraten und entschieden. Nachdem von der CIGRE International die bis 2022 gültigen Limitierungen der Anzahl der Beiträge pro Land nunmehr für die Session 2024 aufgehoben wurde, obliegt der nationalen Ebene primär die Prüfung der Relevanz der Beitragsvorschläge zu den definierten Themenschwerpunkten (preferential subjects), Aktualität und Neuigkeitsgrad sowie Einhaltung der formalen Vorgaben.

In Summe haben wir in Deutschland beeindruckende 107 Beitragsvorschläge / Synopsen erhalten, von denen 105 an das internationale Technical Committee weitergeleitet wurden. Inzwischen haben wir die Rückmeldung und 82 deutsche Beiträge wurden akzeptiert und für die Einreichung der vollständigen Beiträge zugelassen und eingeladen. Wir freuen uns auf die vollständigen Beiträge, die jetzt von den Autoren bis zum 8. Januar 2024 beim Deutschen Komitee der CIGRE eingereicht werden. Die nationale Prüfung erfolgt in einem äußerst straffen Zeitrahmen von nur zehn Tagen bis zum 18. Januar 2024, was eine hohe Belastung der Lektoren darstellt. Das Deutsche Komitee der CIGRE berät und entscheidet dann in einer Sitzung am 23. Januar 2024.

Im Vergleich zur CIGRE Session 2022 mit 50 Beiträgen, haben wir für 2024 eine absolute Rekordanzahl von Beiträgen in der Vorbereitung, was eine erhebliche Belastung der



© Marc Wiegmann Fotografie



© Marc Wiegmann Fotografie

nationalen Reviewer in den Arbeitsgruppen darstellt. Meinen besonderen Dank an die freiwilligen Experten und Mitglieder, die diese Leistung erbringen bereits vorab an dieser Stelle.

Wir sind sehr zuversichtlich, dass wie in den Vorjahren, wir aus Deutschland wieder sehr hochwertige und innovative Beiträge zu CIGRE Session 2024 in Paris leisten werden www.cigre.org/GB/events/paris-session-2024. Zur Logistik der Session, sei auf die zeitliche Überschneidung mit den Paralympics in Paris hingewiesen, was zur Verknappung oder Verteuerung von Hotelzimmern und Anreiseoptionen führen kann.

Am 10. Oktober 2023 konnten wir an der Universität Stuttgart gleich zwei nationale Veranstaltungen erfolgreich durchführen: das Northsea Powerhouse (Teil 3) sowie die traditionelle CIGRE CIRED Infoveranstaltung, beide jeweils mit hochkarätigen Vorträgen. Der Tag war mit insgesamt 150 Zuhörern in Präsenz und weiteren 57 digitalen Teilnehmern ein voller Erfolg.

Neben den informativen Beiträgen bot die Veranstaltung vor Ort natürlich auch die schon traditionelle Möglichkeit der persönlichen Vernetzung. Gleichzeitig hoffen wir, durch diese Sichtbarkeit auch die Nachwuchsarbeit zu stärken. Parallel fand an der Universität Stuttgart die Erstsemesterwoche statt, und wir setzen darauf, neue Mitglieder für uns zu gewinnen. Die Vertreter der CIGRE Nachwuchsorganisation des Next Generation Network (NGN) waren mit einem eigenen Stand vor Ort vertreten.

Eine Gelegenheit sich zu vernetzen, bot auch das vom NGN organisierte Abendessen am Vorabend sowie der Besuch in der Hauptschaltleitung der TransnetBW in Wendlingen am Morgen des 10. Oktobers 2023. Das NGN ist mittlerweile in über 30 Ländern als Nachwuchsorganisation der CIGRE aktiv, mit dem Ziel die Arbeit der CIGRE den Studenten und Young Professionals näherzubringen und Ihnen den Einstieg in das Expertennetzwerk zu erleichtern. Zum Jahresende ist nun ein weiteres NGN-Event in Aachen geplant.

Dank nochmals an Professor Tenbohlen und die Universität Stuttgart wie auch an die Sponsoren, ohne deren großzügige Unterstützung die Durchführung solcher Formate ohne Erhebung von Teilnahmegebühren heute nicht mehr möglich sind.

Haben Sie die Veranstaltungen verpasst, dann finden Sie [hier](#)¹ die Vortragsfolien und Programme nochmals zur Nachlese.

Am Vortag, den 9. Oktober 2023 haben wir uns im Deutschen Komitee der CIGRE in Stuttgart getroffen. Neben anderen Tagesordnungspunkten stand besonders der schwindende Ingenieurwachstum im Fokus, welcher anhand der Erstsemesterzahlen an den führenden deutschen Hochschulen und Universitäten gemessen und intensiv diskutiert wurde.

Dr. Schanz vom VDE präsentierte während des Treffens detaillierte Studienergebnisse. Diese umfassten Befragungen von Schülern vor ihrer Entscheidung für ein Studium

oder einen Beruf sowie von Studienabbrechern, die ihre Gründe für die Abkehr von einem MINT-Abschluss erläuterten. Mehr zum Thema können Sie im [VDE dialog – VDE](#)² nachlesen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt unserer Betrachtung liegt auf der internationalen Arbeit innerhalb der CIGRE. Neben den großen CIGRE Sessions in Paris verdienen auch die Symposien in den Jahren dazwischen besondere Erwähnung. Ein herausragender Erfolg war das CIGRE Symposium, das vom 4. bis 7. September im australischen Cairns stattfand und die Beteiligung von 11 Studienkomitees verzeichnete.

Ebenso erfolgreich war das traditionelle Treffen der Gulf Grid Mitglieder in Abu Dhabi vom 13. bis 15. November 2023. Eine detaillierte Rückschau auf das Programm und die Schwerpunkte dieses Treffens finden Sie unter www.cigre-gccpower.com.

Das Cigre Administration Council, als [globales Steuerungsgremium der CIGRE](#)³, hat sich in Sarajevo, Bosnien-Herzegowina vom 25. bis 27. September getroffen. Als wesentliche, bedeutende Entscheidung, die getroffen wurde, war die Überarbeitung der strategischen Ausrichtung, Zielsetzung und Positionierung der CIGRE im globalen Kontext der Energiewende. Zudem wurde die Stärkung des digitalen Auftritts und der Vermarktung beschlossen.

Zu guter Letzt bleibt die Möglichkeit des digitalen Beitritts zur persönlichen Mitgliedschaft in Deutschland ein großer Erfolg. Bis dato konnten über diesen Kanal 266 neue Mitglieder gewonnen werden. Der Beitritt über <https://join.cigre.org> ist einfach und schnell möglich.

Seien Sie dabei!



*Dipl.-Ing. Wilfried Breuer
Maschinenfabrik Reinhausen GmbH,
Regensburg
Vorsitzender des DK CIGRE*

¹ www.vde.com/de/dk-cigre/veranstaltungen/veranstaltung?id=21860&type=vde%7Cvdb

² <https://dialog.vde.com/de>

³ www.cigre.org/GB/about/governing-bodies



DIG
SILENT

**DIE ENERGIEVERSORGUNG DER ZUKUNFT
ENTWICKELN SIE MIT!**

Die DigSILENT GmbH ist ein unabhängiges Beratungs- und Softwareunternehmen auf dem Gebiet der elektrischen Energieversorgung mit Sitz in Gomaringen und Dresden.

Als Global Player sorgen wir dafür, dass Stromnetze weltweit stabil laufen, effizient bleiben und die Integration von erneuerbaren Energien vorangetrieben wird.

Wir suchen Mitarbeiter (M/W/D) aus den Bereichen

Elektro-Ingenieurwesen, Ingenieurwesen/Messtechnik, Informatik, Mathematik und Physik

Das bieten wir:

- Eine attraktive Vergütung inklusive jährlicher Bonuszahlungen und betrieblicher Altersvorsorge
- Flexible Arbeitszeiten mit Gleitzeitkonto und 30 Tage Urlaub pro Jahr
- Betreuungszuschuss für Kita- und Kindergartenkinder
- Individuelle Weiterbildungsangebote
- Arbeiten in einem innovativen und zukunftssträchtigen Arbeitsumfeld
- Flache Hierarchien mit den Vorzügen eines international vernetzten, mittelständischen Unternehmens

SIND SIE BEREIT FÜR EINE NEUE HERAUSFORDERUNG?

Werden auch Sie Teil unseres Teams!



Für weitere Informationen besuchen Sie:

www.digsilent.de/karriere

In mehr als 170 Ländern tätig.

POWER SYSTEM SOLUTIONS

MADE IN GERMANY



Bild 1: Studierende aus VDE Hochschulgruppen beim Hochschulgruppen Get-together 2023 in Kaiserslautern; Foto von Tobias Dostert

Y1 Veranstaltungen für junge Elektroingenieur*innen: Rückblick 2023 – Ausblick 2024

Ein tolles Jahr mit vielen VDE Veranstaltungen für die nächste Generation e-technischer Fach- und Führungskräfte geht zu Ende. Auch 2024 sind einige Veranstaltungen geplant. Das Programm richtet sich an Studierende und Young Professionals der Elektrotechnik und verwandten technischen Wissenschaften. VDE Mitglieder profitieren bei den Veranstaltungen natürlich von besonders günstigen Preisen.

Rückblick 2023

April: Die Hannover Messe ist DER Branchentreffpunkt. Einige junge VDE Mitglieder machten 2023 mit ihren VDE Hochschulgruppen Exkursionen nach Hannover und informierten sich über Themen und Trends. Alle VDE Mitglieder erhalten ein Freiticket zum Besuch der Hannover Messe (Bild 6).

Mai: Das VDE Bayern Zukunftsforum fand unter dem Motto „E-Mobility – Chancen und Herausforderungen für die Mobilitätswende“ an der Hochschule Landshut statt. Studierenden und Young Professionals diskutierten dazu mit Vertreter*innen von u. a. BMW, Siemens Mobility, MAN Truck & Bus und Würth sowie mit Christian Bernreiter, bayerischer Staatsminister für Wohnen, Bau und Verkehr (Bild 3 und 5).

Juni: Einmal jährlich treffen sich Vertreter*innen der VDE Hochschulgruppen auf dem Hochschulgruppen Get-together (Bild 1). Gastgeber 2023 war die VDE Hochschulgruppe ETK Kaiserslautern der RPTU Kaiserslautern.

August/September: EUREL ist ein Zusammenschluss von 12 europäischen Verbänden, darunter der VDE, mit dem Ziel der europäischen Vernetzung von (jungen) Elektroingenieur*innen. Dazu fand in Brüssel der dreitägige European Future Technology Summit zum Thema „Digital Trust“ und „Artificial Intelligence“ statt (Bild 7). Jedes Jahr im Sommer lädt außerdem ein Mitgliedsland die jungen Mitglieder der Verbände zum Field Trip in das Heimatland ein, 2023 ging es nach Rumänien.

September: Die Nachwuchsveranstaltung der VDE Fachgesellschaft DGBMT (Deutsche Gesellschaft für Biomedizinische Technik): Das Junge Forum BMT vernetzt Studierende und Young Professionals der Biomedizintechnik am Vortag zum BMT Kongress (Bild 2).

Oktober: Die Nachwuchsveranstaltung der VDE Fachgesellschaft GMM (Gesellschaft für Mikroelektronik, Mikrosystem- und Feinwerktechnik): Das Junge Forum MST vernetzt Studierende und Young Professionals der Mikrosystemtechnik (Bild 4).



Bild 2: Junge VDE Mitglieder mit Interesse für Medizintechnik beim „Jungen Forum BMT“ in Duisburg; Foto von Hannibal / VDE



Bild 3: Vorträge für Studierende und Young Professionals beim VDE Bayern Zukunftsforum; Foto von Rita Modl / VDE



Bild 4: Junge VDE Mitglieder mit Interesse für Mikrosystemtechnik beim „Jungen Forum MST“ in Dresden; Foto von Christian Thiel / VDE



Bild 5: Die Teilnehmenden am VDE Bayern Zukunftsforum in Landshut; Foto von Rita Modl / VDE



Bild 6: Wiedersehen auf der Hannover Messe; Foto von David Heitz



Bild 7: Studierende und Young Professionals aus Europa in Brüssel auf dem „European Future Technology Summit“; Foto von Markus B. Jaeger / EUREL

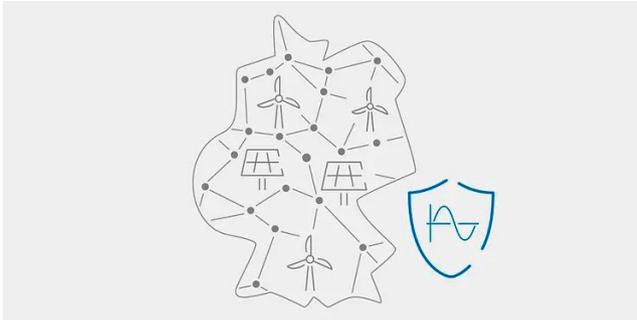
Save the Date für die ersten Veranstaltungen 2024

- **April:** Hannover Messe 22. bis 26. 04. 2024, VDE Young Net After Party am 24. 04. 2024
- **Mai:** VDE Bayern Zukunftsforum zum Thema „Künstliche Intelligenz“ in Bayreuth vom 10. bis 11. 05. 2024
- **Juni:** Hochschulgruppen Get-together in Erlangen; Gastgeber ist die VDE Hochschulgruppe ETG Kurzschluss Erlangen

- **September:** European Future Technology Summit vom 02. bis 04. 09. 2024 in Brüssel
- **September:** Junges Forum BMT in Stuttgart vsl. am 17. 09. 2024

Weitere Informationen zu Veranstaltungen für junge Elektroingenieur*innen auf der VDE Young Net Website!

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



Korrekte Abschaltfrequenzen überprüfen

Die Einstellung der Abschaltfrequenzen von Erzeugungsanlagen ist für die Systemsicherheit essenziell. Ein neuer VDE FNN Hinweis unterstützt Anlagenbetreiber bei der Überprüfung¹.

Zur Gewährleistung der Systemsicherheit in Deutschland ist 2012 die Systemstabilitätsverordnung (SysStabV) in Kraft getreten. Damit ergab sich für eine Vielzahl von Erzeugungsanlagen die Pflicht zur Nachrüstung. Bei der technischen Qualitätskontrolle der Nachrüstung gemäß der 2015 novellierten SysStabV hat sich gezeigt, dass über 10 Prozent der umgerüsteten Erzeugungsanlagen wieder auf ihre ursprünglichen kritischen Frequenzeinstellungen (Default-Werte) zurückgefallen waren. Dafür gibt es unterschiedliche Gründe:

- Installation von Firmware-Updates
- Austausch einzelner Komponenten der Anlage beziehungsweise der Anlagenperipherie
- Manuelle (Fehl-)Konfigurationen der Anlage oder Anlagensteuerung

Deshalb wurde im neuen VDE FNN Hinweis „Hinweis zur Sicherstellung der Abschaltfrequenzen gemäß SysStabV“ ein Prüfprotokoll für die Frequenzschutzeinstellungen definiert. Dieses dient einer einheitlichen Umsetzung sowie der Dokumentation der Frequenzschutzeinstellungen der gemäß Kapitel 11.5.5 der Technische Anschlussregel Mittelspannung (VDE-AR-N 4110), Technische Anschlussregeln Hochspannung (VDE-AR-N 4120) und Technische Anschlussregel Höchstspannung (VDE-AR-N 4130) regelmäßig durchzuführenden Prüfungen für die der SysStabV unterliegenden Erzeugungsanlagen.



Versorgungszuverlässigkeit

Deutschland verfügt über eines der zuverlässigsten Stromnetze in Europa. VDE FNN veröffentlicht dazu jährlich eine eigene Störungs- und Verfügbarkeitsstatistik². Aktuell liegt eine Vorab-Veröffentlichung der wichtigsten Kennzahlen für das Jahr 2022 vor. Die ausführliche Statistik zum Berichtsjahr 2022 wird im Dezember 2023 erhältlich sein.

- Sehr hohe Versorgungszuverlässigkeit: Nur 10,6 Minuten betrug 2022 die durchschnittliche Strom-Unterbrechungsdauer pro Kunde. Diese lag nur knapp über dem Allzeit-Bestwert von 10,2 Minuten im Jahr 2020.
- Die durch den Ukraine-Krieg bedingte Angebotsverknappung bei Gas im Jahre 2022 bewirkte neben anderen Faktoren im Strom-Erstabsatzmarkt ein knapperes Stromangebot. Die vom Gesetzgeber vorgesehene Rückkehr in den Markt bzw. Verlängerung der Laufzeiten von Kohle- und Kernkraftwerken im Jahr 2022 hat dem entgegengewirkt. Zudem hat VDE FNN vor allem Netzbetreiber beim Umgang mit der drohenden Be- und Überlastung der Verteilnetze bei einer Gasmangellage unterstützt. Beides hat die Versorgungszuverlässigkeit unterstützt.
- Die Stromversorgung in Deutschland ist auch 2022 weltweit eine der zuverlässigsten gewesen.
- Die zunehmende Differenz zwischen installierter EEG-Leistung und Jahreshöchstlast erfordert bei Netzbetreibern noch mehr Maßnahmen zur Aufrechterhaltung der Netz- und Systemsicherheit. Abhilfe können ein Netzausbau sowie mehr Intelligenz in den angeschlossenen Anlagen, zum Beispiel in Form von steuerbaren Verbrauchseinrichtungen in der Niederspannung, leisten.

Im internationalen Vergleich belegt Deutschland einen Spitzenplatz bei der durchschnittlichen Unterbrechungsdauer je Stromkunde (*Bild 1*). Vergleichsgrundlage ist der sogenannte SAIDI-Wert (System Average Interruption Duration Index). Er zeigt an, wie zuverlässig die Stromnetze sind.

¹ <https://www.vde.com/de/fnn/aktuelles/korrekte-abschaltfrequenzen-ueberpruefen>

² <https://www.vde.com/de/fnn/arbeitsgebiete/versorgungsqualitaet>



Technische Anschlussregel Mittelspannung

Die VDE Anwendungsregel TAR Mittelspannung (VDE-AR-N 4110) legt technische Anforderungen an Planung, Errichtung, Betrieb und Änderung von Kundenanlagen fest, die am Netzanschlusspunkt an das Mittelspannungsnetz eines Netzbetreibers angeschlossen werden³. Kundenanlagen umfassen Bezugs- und Erzeugungsanlagen, Speicher sowie Mischanlagen.

Die TAR Mittelspannung gestaltet die Anforderungen des 2016 in Kraft getretenen europäischen Network Codes „Requirements for Generators“ (RfG) für Anlagen an der Mittelspannung in Deutschland aus. Die VDE Anwendungsregel fordert vor diesem Hintergrund für neu errichtete dezentrale Erzeugungsanlagen erweiterte Fähigkeiten für das Durchfahren von kurzen Spannungseinbrüchen sowie für die Bereitstellung von Blindleistung. Diese Anforderungen verbessern die Netzstabilität.

³ <https://www.vde.com/de/fnn/themen/tar/tar-mittelspannung-vde-ar-n-4110>

Eine Neuerung gibt es mit der VDE-AR-N 4110:2023-09 hinsichtlich des Einzelnachweisverfahrens für Erzeugungsanlagen mit einer installierten Leistung zwischen 135 kW und 950 kW. Das Einzelnachweisverfahren beschreibt den Nachweisprozess zur Einhaltung der Mindestanforderungen für den Anschluss von Erzeugungsanlagen in der Mittelspannung, für die eine Einheitenzertifizierung, die anschließende Anlagenzertifizierung und die abschließende Erzeugungsanlagen-Konformitätserklärung nicht angewendet werden kann. Stattdessen wird für diese Anlagen nach dem Einheitenverfahren das Anlagenzertifikat C ausgestellt. Das vereinfachte Anlagenzertifikat C trägt nun zu einem wirtschaftlicheren und beschleunigten Netzanschluss für die betroffenen Erzeugungsanlagen bei.

In Deutschland gewinnen die Mittelspannungsnetze im Zuge der Energiewende durch den Zubau erneuerbarer Energien massiv an Bedeutung. So werden hier neben großen Windparks, Photovoltaik-Freiflächenanlagen und Biogasanlagen künftig auch immer mehr Speicher angeschlossen.

Die neue Anwendungsregel ist Teil der Aktivitäten von VDE FNN, das System auf die zunehmende Einspeisung erneuerbarer Energien im Sinne der Energiewende vorzubereiten.

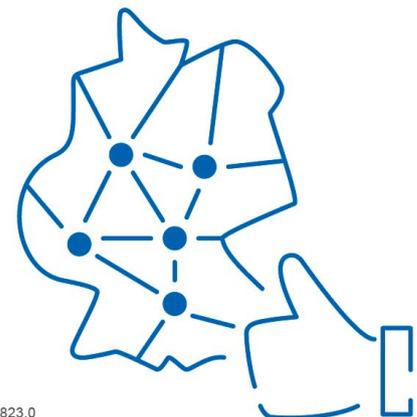
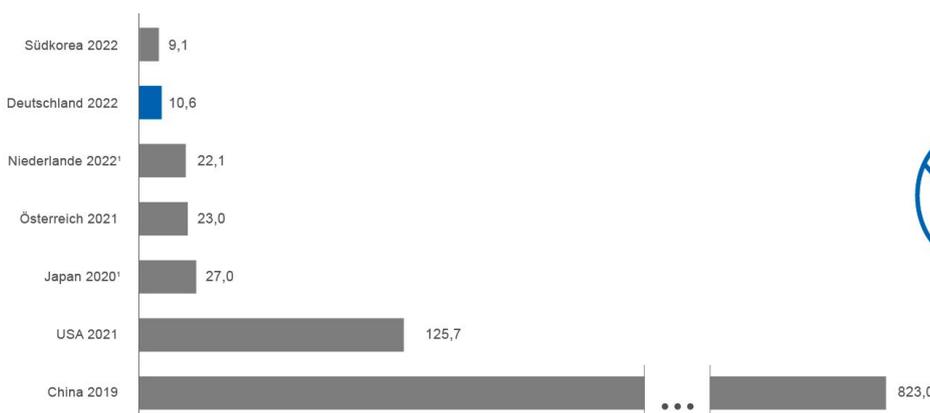
Bilder: VDE FNN



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

Die Stromversorgung in Deutschland ist weltweit eine der zuverlässigsten

Durchschnittliche Strom-Unterbrechungsdauer in Minuten im Ländervergleich



¹ Mit höherer Gewalt
Quelle: e-Control (Österreich), The Federation of Electric Power Companies of Japan (FEPC), "Infobase 2021" (2021), KEPCO (Südkorea), Movares: Betrouwbaarheid van elektriciteitsnetten in Nederland Resultaten 2022 (Niederlande), U.S. Energy Information Administration eia (USA), VDE FNN (Deutschland), Energy Policy Volume 155, August 2021, 112366 (China)

Bild 1: Deutschland im internationalen Vergleich

H1 Geschichte des Stromwandlers, Teil 2

Anforderungen an Stromwandler

Um den Messfehler möglichst gering zu halten kamen 1907 bereits 1-%-Wandler und um 1912 sogar schon 0,5-%-Wandler auf den Markt, allerdings mit recht erheblichem Materialaufwand. 1915 erließ die PTR ihre „Bestimmungen für die Beglaubigung von Meßwandlern“ in denen sogenannte Beglaubigungsfehlergrenzen für die Übersetzungsfehler und Fehlwinkel bereits $\pm 0,5\%$ bzw. ± 40 oder ± 20 min festgelegt sind.

Die VDE Kommission für Messinstrumente legte 1921 „Regeln für die Bewertung und Prüfung von Meßwandlern“ vor. Hierin wird u. a. vereinbart:

- Sekundäre Nennstromstärke beträgt in der Regel 5 A; bei großer Leitungslänge im Sekundärkreis ist vorzugsweise 1 A zu wählen.
- Die Anschlüsse sind gleichsinnig zu bezeichnen. Stromwandlerwicklungen primär $L_1 - L_2$, sekundär $I_1 - I_2$.

In der 1938 herausgegebenen VDE 0570 wird K-L für die Primär- und k-l für die Sekundärwicklung (nach IEC später P1-P2 und S1-S2) festgelegt. [6]

Um eine merkbare Einbauregel zu schaffen, wurde in der Praxis oftmals zur Sammelschiene K (wie Kraftwerk) und zum Abgang L (wie Leitung) verwandt.

In den 20er Jahren ist in den deutschen amtlichen Beglaubigungsvorschriften angeführt: „Die Nennbürde eines Stromwandlers muß mindestens $0,6\ \Omega$ bei einer sekundären Nennstromstärke 5 Amp. sein. Für Stromstärken vom Nennwert bis zu dessen fünften Teil darf der Stromfehler $\pm 0,5\%$, der Fehlwinkel ± 40 Minuten nicht überschreiten. Für Stromstärken unter $1/5$ bis $1/10$ des Nennwertes darf der Stromfehler $\pm 1\%$, der Fehlwinkel ± 60 Minuten nicht überschreiten.“ [13]

Die „Regeln für die Bewertung und Prüfung von Meßwandlern“ des VDE von 1922 fordern bei Stromwandlern mit Klasse H, dass bei Bürden zwischen Null und Nenn-

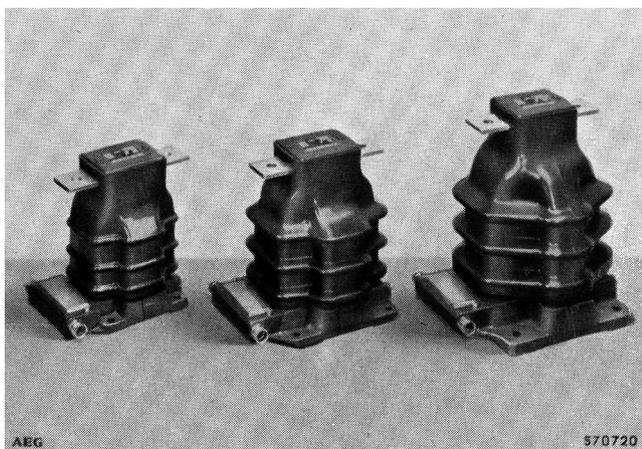


Bild 1: Gießharzisierte Stromwandler, AEG

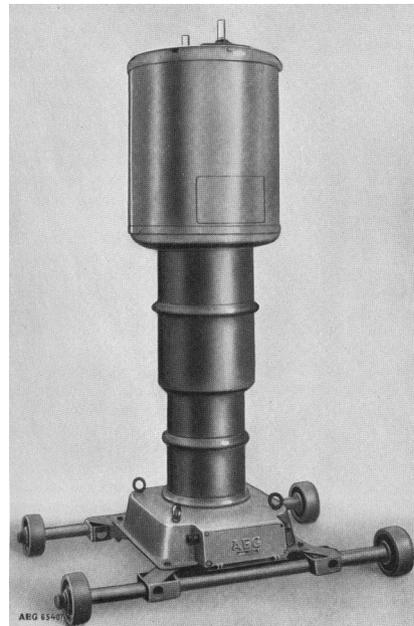


Bild 2: Gießharzstromwandler AY110, AEG

bürde und einem sekundären Leistungsfaktor von 1,0 der Stromfehler bei primärseitigen Nennstrom den Betrag von $\pm 5\%$ nicht überschreiten, vom 10 fachen Nennstrom ab soll der Sekundärstrom gegenüber dem aus der Übersetzung errechneten stark abfallen. Dagegen darf der Stromfehler zusätzlich bei 40 fachem Nennstrom $\pm 10\%$ nicht überschreiten. [7] Die Begriffe „Überstromziffer“ und „Nennüberstromziffer“ wurden zum ersten Mal in den VDE Wandlerregeln von 1932 gebraucht. Aus der Überstromkennziffer n wurde dann der Bemessungs-Genauigkeits-Grenzfaktor K_{lr} und jetzt Genauigkeitsgrenzfaktor ALF (Accuracy Limit Factor).

Bürde und Nennbürde waren dagegen schon in den VDE Wandlerregeln von 1922 enthalten. Sie wurden in Anlehnung an einen amerikanischen Ausdruck gewählt. [14]

Für den durch unterschiedliches Wandlerverhalten und ungleicher Bürde entstehenden Nullstrom prägt A. v. Schaubert 1927 den Begriff „Falschstrom“ [15]

In den 50er Jahren werden nach einer Absprache mit den Herstellern Wandler der Reihen 10 bis 30 innerhalb einer Spannungsreihe mit gleichen Anschluss- und Befestigungsmaßen ausgestattet. [16]

Im Jahre 1909 verfasst G. Keinath die erste Doktorarbeit auf dem Gebiet der Messwandler. [15]

Fertigung von Gießharzwandlern für die Mittel- und Hochspannung

Nachdem in den Kriegs- und Nachkriegsjahren die Entwicklungsarbeiten zum Stillstand gekommen waren, wurde 1953 bei AEG mit Hilfe neuer synthetischer Isolierstoffe, dem so-

genannten Gießharz auf Äthoxylinbasis, ein- und zweipolige Spannungswandler bis Reihe 30 geschaffen. Die Gießharz-isolierung wurde auch für Stromwandler bald angewandt (Bild 1).

1957 liefert AEG für 110 kV den gießharzisierten Stromwandler AY110. [1]

Der Vorteil der Gießharzausführung gegenüber der bewährten Porzellanausführung liegt hauptsächlich darin, dass sich infolge der hohen mechanischen Festigkeit des Harzes ein höherer dynamischer Grenzstrom ergibt. Dies war deshalb so wertvoll, weil die durch neue Schutzrelais ermöglichten kurzen Fehlerklärungszeiten die thermische Beanspruchung gegenüber der dynamischen etwas zurücktreten lassen. [5] 1947 fertigt Pfiffner erste kunstharz-vergossene Wandler. [17]

Gleichstromwandler

Koch & Sterzel bringt 1935 den sogenannten „Gleichstrom-Meßwandler“ für hohe Ströme (5...100 kA) auf den Markt (Bild 3). In einer Aussparung des Kernes ist der Gleichstromanker *A* (Bild 4) gelagert, der in der Regel von einem Drehstrommotor *M* angetrieben wird. Die Sekundärwicklung *W2* des Wandlers ist mit der Ankerwicklung *A* und dem Messgerät *B* in Reihe geschaltet. Der Primärstrom im Leiter *L* erregt den Eisenkern *E* so, dass an den Kollektorbürsten des Ankers *A* eine EMK auftritt. Diese ruft in der Sekundärwicklung *W2* einen Strom hervor, der das vom Primärstrom herrührende Feld aufzuheben trachtet. Das sich selbständig einstellende Gleichgewicht der beiden Felder bewirkt dass der Sekundärstrom dem Primärstrom proportional folgt. Als Sekundärnennstrom wurde 5 A gewählt.

Die AEG, entwickelt 1936 einen „Gleichstrom-Meßwandler“, der nach dem von *Werner Krämer* angegebenen Prinzip (Bild 5) aus einer von dem zu messenden Gleichstrom weit in den Sättigungsbereich vormagnetisierten Drossel mit zwei Teilkernen besteht, die von einer Hilfswechselspannung erregt werden (Bild 5). Bereits ein Jahr später

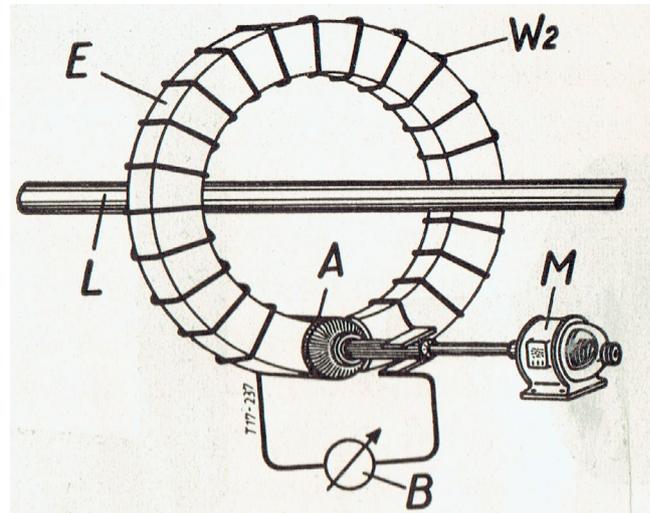


Bild 4: Prinzip Gleichstrom-Meßwandler, Koch & Sterzel

werden für Elektrolyseanlagen Gleichstrom-Messwandler zur Strommessung bis 30 kA gefertigt. [11] Später werden sie bei der Hochspannungs-Gleichstromübertragung eingesetzt. So fertigte RITZ 1976 den ersten Gleichstromwandler für 500 kV (Bild 6). Bei einem Kriechweg von 24.000 mm haben solche Wandler ein einteiliges Porzellan mit einer Höhe von 8 m. [10]

Stromwandler im Höchstspannungsnetz

1953 lieferte RITZ neun 380-kV-Stromwandler (Bild 7) mit kapazitivem Spannungswanderteil an die Königliche Wasserfallgesellschaft nach Nordschweden für das erste Höchstspannungsnetz der Welt mit 380 kV, Stützer-Stromwandler in Kreuzringbauweise, mit hermetischem Luftabschluss, dimensioniert für Betriebstemperaturen von -50°C bis $+60^{\circ}\text{C}$, mit einteiligem, 4 m langen Isolator, mit 4,5 m Gesamthöhe geeignet für stehenden Eisenbahntransport. [2]

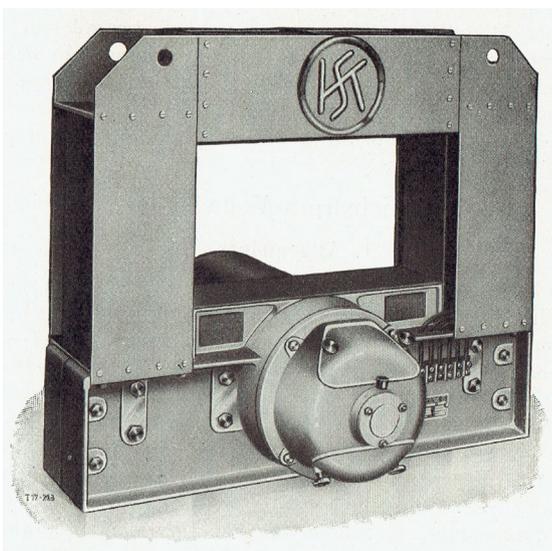


Bild 3: Gleichstrom-Meßwandler mit Motor, Koch & Sterzel

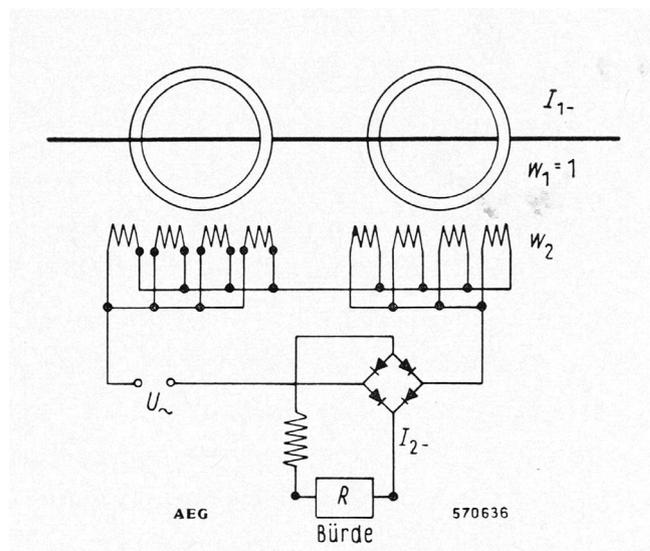


Bild 5: Grundsätzliche Schaltung Gleichstromwandler, Krämer, AEG

1957 erfolgte durch RITZ eine Lieferung an das RWE (Rheinisch Westfälisches Elektrizitätswerk) über 3 Stück 380-kV-Kombiwandler (mit kapazitivem Spannungswanderteil), Die Wandler gehörten zum ersten Teilstück (von Rommerskirchen nach Hoheneck) der zunächst deutschen und später europäischen 420-kV-Verbundleitung. Weitere je 3 gleiche Wandler lieferten Siemens und AEG. [2]

Für das erste 735-kV-Netz in Kanada entwickelte Sprecher & Schuh den in *Bild 8* gezeigten Stromwandler, Übersetzung 2000/5/5/5 A, 3 Relaiskerne, Klasse 10 L 400 bei $10 \times I_n$ (das entspricht etwa 3 Kernen zu je 200 VA, $n > 10$). [8]

Nichtkonventionelle Stromwandler

In *Bild 9* sind die Messprinzipien konventioneller und nicht-konventioneller Stromwandler [18] zusammengestellt. *Bild 9a* zeigt den konventionellen induktive Stromwandler, wie er auch heute noch als Standardlösung in 50- bzw. 60-Hz-Elektroenergieübertragungs- und Verteilungsanlagen sowie 16 $\frac{2}{3}$ -Hz-Bahnanlagen gilt. Ein Messprinzip, welches auch die Gleichstrommessung gestattet, benutzt den Hall-Effekt (*Bild 9b*). Auch hier wird die magnetische Flussdichte um den stromdurchflossenen Primärleiter analog dem konventionellen Wandler in einem Ringkern konzentriert, aber dieser weist einen Luftspalt auf. In den darin angeordneten Hallsensor übt ein Magnetfeld auf die Ladungsträger eine Kraft aus und erzeugt eine ihm proportionale Spannung, die wiederum einen entsprechenden Sekundärstrom treibt. Der Arbeitsbereich reicht von 0 Hz bis einige kHz. Insbesondere zur Überwachung schneller Vorgänge bei Schalthandlungen oder Störungen eignen sich Spulen ohne Eisenkern, wie z. B. die Rogowski-Spule (*Bild 9c*) – nach einer Erfindung von Rogowski und Steinhaus im Jahre 1912.

Der große Spannungsunterschied zwischen Primär- und Sekundärseite erfordert eine hohe und teurere Isolation. Daher lag es nahe, einen Niederspannungswandler auf Hochspannungspotenzial zu installieren und den Sekundärwert auf nicht-elektrischem Wege zum Erdpotential zu übertragen. Das analoge Ausgangssignal eines konventionellen Stromwandlers wird digitalisiert und dann über einen Lichtwellenleiter (LWL) zum Erdpotential gebracht, dekodiert und dann digital oder analog angezeigt (*Bild 9d*). Anstelle des Stromwandlers können auch Stromsen-

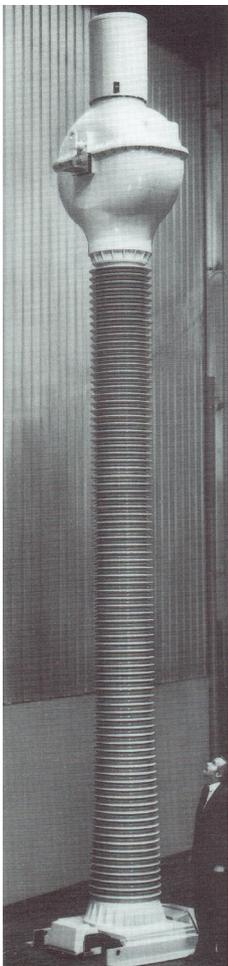


Bild 6: Gleichstromwandler, 500 kV, RITZ

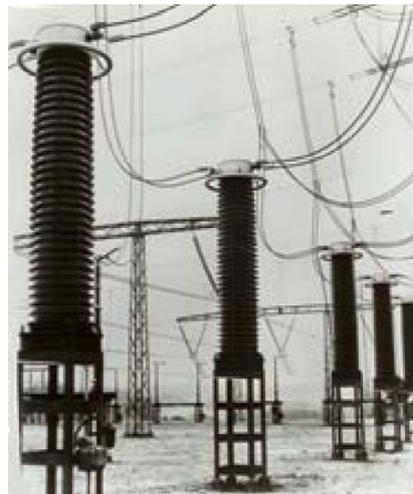


Bild 7: 380-kV-Stromwandler OSWF 380, RITZ

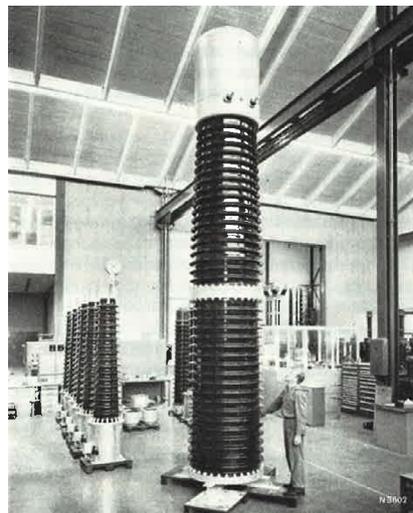


Bild 8: Montage des 735-kV-Stromwandlers, S&S, 1964

soren verwendet werden. Die auf Hochspannungspotenzial befindlichen A/D-Wandler benötigen eine auch bei Netzfehlern vorhandene Hilfsenergie. Es handelt sich also um sogenannte aktive Wandler. In der ersten Entwicklungsphase wurden hierzu kleine Strom- und Spannungswandler auf Hochspannungspotenzial vorgesehen. Der geringer werdende Energiebedarf der elektronischen Bauteile ermöglichte die Hilfsenergie auf optischen Wege über LWL vom Erdpotential auf das Hochspannungspotenzial zu leiten. Die nicht mehr elektrische sondern optische Übertragung der Messwerte führte zu der Überlegung die Information selbst auf optischem Wege zu gewinnen. Beim magneto-optischen Messprinzip (*Bild 9e*) dient der LWL nicht nur als Übertragungsmedium, sondern auch als Stromsensor. Beim Faraday-Effekt erfährt die Polarisationssebene durch ein Magnetfeld in Ausbreitungsrichtung der Lichtwelle eine Drehung. aus der vom Magnetfeld abhängigen Lagedifferenz der Polarisationssebenen von Aus- und Eingang kann die Primärstromstärke ermittelt werden. Die Vorstellung magneto-optischen Stromwandlers mit Faradaysensor erfolgte 1966. [19, 20]

Bereits im Jahre 1956 wurde aus der UdSSR und 1962 aus den USA über den Einsatz magneto-optischer Verfahren bei der Strommessung in Hochspannungsanlagen be-

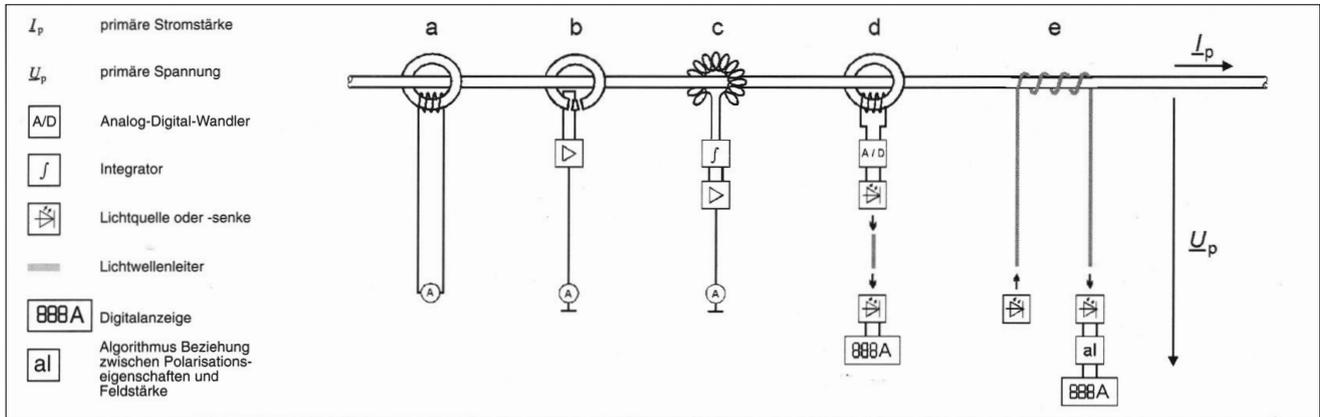


Bild 9: Messprinzipien konventioneller und nichtkonventioneller Stromwandler
 a) induktiver Stromwandler, b) Hall-Sonde, c) Rogowski-Spule, d) induktiver Stromwandler mit digitaler, optischer Schnittstelle, e) magnetooptischer Stromwandler (Faraday-Effekt)

richtet. Der erste Prototyp eines unkonventionellen Stromwandlers für Freiluftanlagen war jedoch im Jahre 1965 ein Gerät mit Pulsfrequenzmodulation und Lichtimpulsübertragung, der Traser. [20]

Die ersten aktiven Stromwandler wurden bereits in den sechziger und siebziger Jahren entwickelt. Beim „Traser“-Wandler (Bild 10) wird als Messwertempfänger ein gewöhnlicher Stromwandlerkern mit verringerter Isolation verwendet. Das Wandlersignal wird in ein optisches Signal umgewandelt (E/O-Wandlung) und einen Lichtwellenleiter bzw. ein Faserbündel an die Auswerteeinheit übertragen, wo das Signal in ein elektrisches Signal umgewandelt wird. (O/E-Wandlung).

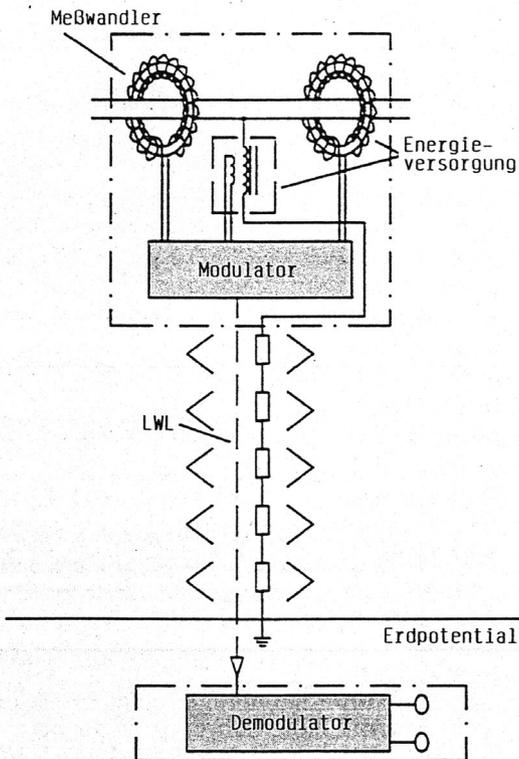


Bild 10: Traser-Stromwandler

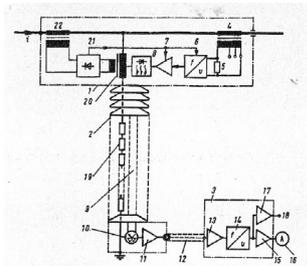


Bild 1 Prinzipschaltbild eines elektronischen Stromwandlers (1965)
 1 Kopfgewinde, 2 Stützerisolator, 3 Decodierglied, 4 Meßstromwandler, 5 Bürdenwiderstand, 6 Spannungs/Frequenz-Umsetzer, 7 Impulsverstärker, 8 LED, 9 Glasstab-Lichtleiter, 10 Fototransistor, 11 Signalverstärker, 12 Koaxialkabel, 13 Eingangsverstärker, 14 Frequenz/Spannungs-Umsetzer, 15 Spannungs/Strom-Verstärker, 16 Meßausgang, 17 Spannungsverstärker, 18 Schutz-ausgang, 19 Widerstandsnetz, 20 Versorgungstransformator, 21 Gleichrichter, 22 Sättigungsstromwandler

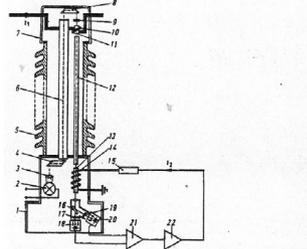


Bild 2 Magneto-optischer Stromwandler mit Faradaysensor (1966)
 1 Fußgehäuse, 2 Lichtquelle, 3 Linsensystem, 4 Umlenkensystem, 5 Stützerisolator, 6 u. 12 Kunststoffrohr, 7 Kopfgewinde, 8 Umlenkensystem, 9, 17 u. 19 Polarisationsfilter, 10 Primärschleife, 11 u. 13 Schwerflintglasstab, 14 Kompensationschleife, 15 Bürde, 16 Strahlteiler, 18 u. 20 Fotodiode, 21 Differenzverstärker, 22 Leistungsverstärker

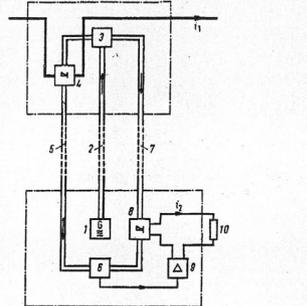


Bild 3 Stromwandler mit Mikrowellenleitern (1971)
 1 Mikrowellengenerator, 2, 5 u. 7 dielektrischer Wellenleiter, 3 T-Wellenleiter, 4 u. 8 Modulator, 6 Vergleichsglied, 9 Leistungsverstärker, 10 Bürde

Bild 11: Stromwandler 1965–1995 [3]

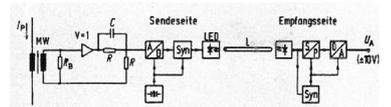


Bild 5 Optoelektronischer Stromwandler mit A/D-D/A-Wandlung (1975)
 MW Meßstromwandler, R_B Bürdenwiderstand, C u. R Phasenkorrekturschaltung, Syn Synchronisationsschaltung, L Lichtwellenleiter, S/P Serien/Parallel-Wandlung

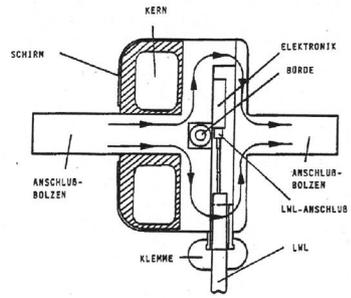


Bild 8 Sensor eines aktiven optischen Stromwandlers mit Rogowskispule (1992)

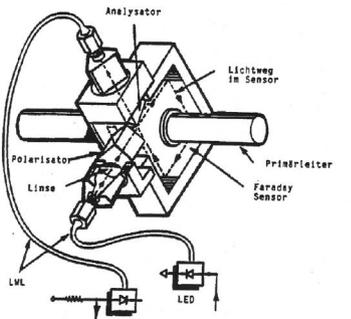


Bild 9 Sensor eines passiven optischen Stromwandlers mit Faradaysensor (1992)



Bild 12: Vergleich klassischer Wandler und Sensoren, ABB

Die Sendeelektronik wird sowohl mit elektrischer Energie durch die Hochspannung als auch durch den zu messenden Strom selbst gespeist, damit eine sichere Funktion auch in Schwachlastzeiten oder bei Störfällen gewährleistet ist. [9]

Die Fortschritte bei der Herstellung von Lichtleitern ermöglichte auf einfache Weise eine Messbereichsanpassung an nahezu beliebige Nennströme. Dazu wird der Lichtwellenleiter mehrmals um den stromführenden Hauptleiter gewunden, wobei eine Empfindlichkeitsanpassung über die Windungszahl erreicht wird. Der erste Prototyp eines faseroptischen Stromwandlers wurde 1979 in der Fawley-Station eingesetzt. Mit diesem System wurden Ströme von 10 A bis 14 kA bei einer Messabweichung von 2 % registriert [9]

Einen Rückblick auf die unkonventionellen Messwandler 1965 bis 1995 (Bild 11) gewährt *Andreas Braun*, BPT, in [3].

Ende der 90er Jahre suchte man nach Lösungen, die Abmessungen der Wandler für die in der Entwicklung befindlichen Mittelspannungsschaltzellen. Man erinnerte sich des 1912 erfundenen Prinzips der Rogowskispule der Erfassung des Magnetfeldes eines stromdurchflossenen Leiters mit einer eisenlosen Spule. Die klassischen elektromechanischen Schutzrelais werden durch digitale Geräte ersetzt und somit eine neue Umsetzung von Messgrößen im Mikroenergiebereich geschaffen. Bild 12 zeigt eine Gegenüberstellung eines klassischen Stromwandlers und eines Sensors, wie er bei der gasisolierten Mittelspannungsschaltzelle ZX1, ABB, zum Einsatz gelangte. [4]

Die Inbetriebnahme der ersten optischen Stromwandler (aktiver Typ) von ABB fand Mai 1992 statt. Ein passiver optischer Stromwandler wurde Anfang 1993 beim Badenwerk im Umspannwerk Daxlanden (Bild 13) installiert und unter realen Bedingungen erfolgreich getestet.

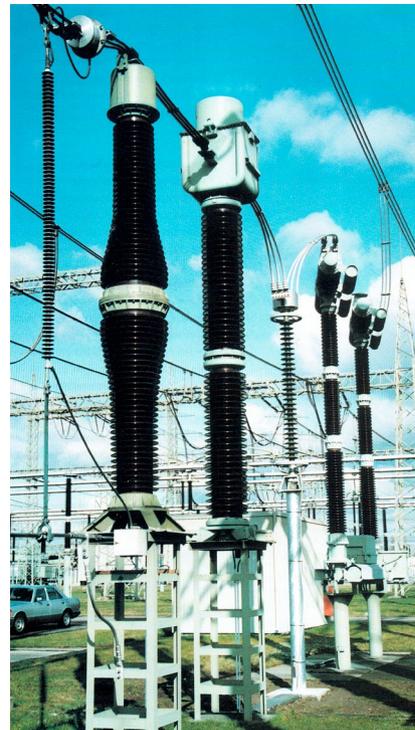


Bild 13: 380-kV-Versuchsfeld, UW Daxlanden, Badenwerk

li nach re:

- aktiver optischer Stromwandler
- konventioneller Spannungswandler
- konventioneller Stromwandler
- passiver optischer Stromwandler
- Leistungsschalter

Quellen

- [1] Allmendinger, K., Zahorka, R.: Gießharzisierte Strom- und Spannungswandler für 110 kV. AEG-Mitteilungen 55 (1965) 1, 12–16
- [2] Chronik der technischen Entwicklung. Hochspannung. Ritz. 10 S.
- [3] Braun, A.: 30 Jahre unkonventionelle Messwandler: 1965 bis 1995. PTB-Mitteilungen 106 (1996) 3, 193–199
- [4] Voß, G.: Sensoren zur Strom- und Spannungsmessung in Schaltanlagen. ew 100 (2001) 19, 34–37
- [5] Schweder, B.: Forschen und Schaffen. Beiträge der AEG zur Entwicklung der Elektrotechnik bis zum Wiederaufbau nach dem zweiten Weltkrieg. Band 1, 472 S.; Band 2, 472 S. u. Band 3, 520 S., Hrsg. AEG, Berlin 1965
- [6] Regeln für Klemmenbezeichnungen. ETZ 60 (1939) 17, 511–512
- [7] Vorschriftenbuch des Verbandes Deutscher Elektrotechniker. Hrsg. Generalsekretariat des VDE, Dreizehnte Auflage, Stand: 31. Dezember 1925, Verlag von Julius Springer, Berlin: 1926
- [8] Erhart, L.: Stromwandler für 750 kV. Bulletin SEV 55 (1964) 9, 439–442
- [9] Gimber, B.; Kunz, H.; Hirsch, H.: Nichtkonventionelle Wandler, Schlüsselkomponenten für die digitale Stationsleittechnik. Elektrizitätswirtschaft 90 (1991) 6, 250–254
- [10] 50 Jahre RITZ. Erfahrungen und Qualität. Ritz Messwandler Hamburg.
- [11] Zahorka, R.: Die Gleichstromwandler der AEG. AEG-Mitteilungen 55 (1965) 1, 45–52

- [12] Schwarz, H.; Hudasch, M.: Optische Stromwandler – erster Feldversuch im 380-kN-Netz erfolgreich. ABB Technik (1994) 3, 12 – 18
- [13] Goldstein, I.: Die Meßwandler ihre Theorie und Praxis. Verlag von Julius Springer, Berlin 1928
- [14] Walter, M.: Die Entwicklung der Strom- und Spannungswandler (Messwandler). Elektrizitätswirtschaft 65 (1966) 23, 710–717
- [15] Walter, M.: Strom- und Spannungswandler. Verlag von R. Oldenburg, München und Berlin 1937
- [16] Krauß, H.: Beiträge des Meßwandlerbaus zur Vereinheitlichung der Schaltanlagen. AEG-Mitteilungen 49 (1959)
- [17] Meilensteine. PFIFFNER Messwandler AG
- [18] Seifert, H.; Latzel, H.-G.; Braun, A.: Nichtkonventionelle Strom- und Spannungswandler. PTB –Mitteilungen 112(2002), S. 44–50, September 2002, S. 3–7, Sonderdruck aus H. 1 und 3
- [19] Braun, A.: 30 Jahre unkonventionelle Messwandler: 1965 bis 1995. PTB-Mitteilungen 106 (1996) 3, 193–199
- [20] Marx, E.: Hochspannungs-Praktikum. Verlag von Julius Springer, Berlin 1941
- [21] Balzer, G.: Aufgaben und Entwicklung der Schutztechnik. Schutztechnik – heute und morgen. S. 9–30, VDE Bezirksverein Frankfurt am Main, Arbeitsgemeinschaft vom 4.11. bis 25.11.1996



Dipl.-Ing. Walter Schossig
VDE Thüringen
VDE AK07 „Relais- und Schutztechnik“ und
Mitarbeit Ausschuss „Geschichte der
Elektrotechnik“
info@walter-schossig.de
www.walter-schossig.de

■ 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

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 ETG 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, 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.

Ihre ETG Geschäftsstelle

Der Schutz Ihrer Daten ist uns wichtig. Unsere Datenschutzerklärung finden Sie unter www.vde.com/de/datenschutz

ETG Veranstaltungskalender 2024 / 25

2024

6./20. Februar,
5./19. März,
9. April,
Online-Vortragsreihe
[Zellulare Energiesysteme](#)

5.–6. März, Leipzig
Tutorial
[ETG FNN Schutz- und
Leittechnik Tutorial 2024](#)

12.–14. März, Düsseldorf
Fachtagung / Konferenz
[CIPS – International Conference
on Integrated Power Electronics
Systems](#)

12.–13. Juni, Dortmund
Fachtagung
[Hochautomatisierter
Netzbetrieb](#)

17.–18. September, München
Fachtagung
[Netzregelung und
Systemführung](#)

1. Oktober, Ettlingen
Diskussionsveranstaltung
[Albert-Keil-Kontaktseminar](#)

11.–13. November, Berlin
Fachtagung
[Hochspannungstechnik](#)

2025

21.–22. Mai, Kassel
Kongress
[ETG Kongress 2025](#)

www.vde.com/de/etg/veranstaltungen

Herausgeber

VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik
Informationstechnik e.V.
Energietechnische Gesellschaft (ETG)
Merianstraße 28
63069 Offenbach am Main

Tel. 0 69 / 63 08-346
etg@vde.com
www.vde.com/etg

