

ETG *journal*

Energetische
Gesellschaft im VDE (ETG)



CIPS 2022

12th International Conference on
Integrated Power Electronic Systems



SICHERN SIE SICH DIE NEUESTE VERSION DER WELTWEIT FÜHRENDEN NETZBERECHNUNGS SOFTWARE

POWERFACTORY

DIE VERSION 2022 IST JETZT VERFÜGBAR!

- Ein neues **Künstliche Intelligenz** Modul ermöglicht das Training von neuronalen Netzen für extrem schnelle Ergebnisabschätzungen bei Quasi-Dynamischen Simulationen
- Generische **RMS- und EMT-Co-Simulation** mit anderen Simulationsprogrammen, basierend auf dem weitverbreiteten FMI Standard, mit optionaler Verschlüsselung
- Unterstützung von Modelica als Modellierungssprache für zeitdiskrete Modelle mit digitalen Reglern und Berechnungsalgorithmen
- Eine neue Funktion zur optimalen Platzierung von AWE innerhalb des Moduls **Zuverlässigkeitsanalyse** – mit entsprechend ausgewählten Zielfunktionen werden verbesserte Zuverlässigkeitskennzahlen erreicht
- Erweiterung des **Schutzkoordinationsassistenten**, der nun sowohl Distanz- als auch Überstromschutz unterstützt
- Neue Ansichten für den **Varianten Manager** mit zusätzlichen Filteroptionen, die Vergleiche und Änderungen auf Objekt- und Attributbasis ermöglichen

Neugierig geworden? Weitere Informationen zu PowerFactory 2022 finden Sie im Dokument "What's New in PowerFactory 2022".



Für weitere Informationen besuchen Sie:
www.digsilent.de/2022pf
In mehr als 160 Ländern tätig.

POWER SYSTEM SOLUTIONS
MADE IN GERMANY

Liebe ETG Mitglieder,



herzlich willkommen zur zweiten Ausgabe des ETG *journals* in diesem Jahr! Wie üblich finden Sie in den Beiträgen Highlights und Beispiele aus unserem fachlichen Spektrum – und, ebenfalls wie üblich, finde ich die Breite des Spektrums, und die Tiefe immer wieder erstaunlich. Vielen Dank an alle Autorinnen und Autoren, sowie alle engagierten Mitglieder in unseren Gremien! Aller Unbill der jüngeren Vergangenheit zum Trotz, konnten wir die fachliche Arbeit kontinuierlich weiterführen, was sich zum Beispiel in den Berichten aus den Fachbereichen und Task Forces, und auch in dem ein oder anderen Fachartikel konkret zeigt.

Und unsere Arbeitserfolge zeigen sich auch daran, dass wir die aktuelle Diskussion zur Sicherstellung und Nachhaltigkeit der Energieversorgung in Deutschland, die sich nach dem russischen Angriff auf die Ukraine mit Macht auf die politische und gesellschaftliche Tagesordnung gedrängt hat, mit fachlichen Positionen und Hintergründen unterstützen können. Etliche Positionspapiere und Empfehlungen aus unserer ETG Arbeit wurden im VDE Politikbrief 1/2022 aufgegriffen und referenziert – weil eben die fachlichen Antworten, zumindest auf der übergeordneten Systemebene, im Wesentlichen bekannt und fachlich abgesichert sind. Was sich in der aktuellen Lage ändert, sind die Priorisierung der verschiedenen Aspekte und Maßnahmen, und vor allem die Anforderung an die Geschwindigkeit der Umsetzung. Seien es Wind- und PV-Ausbau, die Import-Terminals für Flüssiggas und perspektivisch flüssigen Wasserstoff, oder natürlich der Ausbau der Stromnetze – heute ist es offensichtlich, dass Deutschland besser aufgestellt wäre, wenn der tatsächliche Fortschritt in den letzten Jahren signifikanter gewesen wäre.

Wobei jetzt über gänzlich neue Geschwindigkeiten diskutiert wird – was in den nächsten Jahren erforderlich sein wird, ist in den verschiedenen Bereichen ein Mehrfaches der historisch erreichten Spitzenwerte. Der PV-Ausbau zum Beispiel, müsste mehr als das Doppelte der Zubau-Spitzen von ca. 7,5 GW in den Jahren 2011 und 2012 erreichen – nach ca. 5 GW, die wir in den letzten beiden Jahren immerhin erreicht haben, mit langsamen, aber kontinuierlichen Steigerungen vom Tiefpunkt mit nur ca. 1,5 GW in 2015.

Geschwindigkeit ist wichtig, das war auch schon ein Ergebnis unseres ETG Kongresses 2021: „Wandel und Geschwindigkeit“ war ein Schlagwort in der Zusammenfassung. Jetzt sind wir schon in der Vorbereitung des nächsten ETG Kongresses – zu dem ich hiermit herzlich nach Wuppertal einladen möchte, in das schöne Ambiente der historischen Stadthalle, vom **3. bis 4. Mai 2023**. Und in damals ungeahnter Aktualität und Relevanz des Schlagwortes „Wandel und Geschwindigkeit“ ist das Motto des ETG Kongresses 2023: **Die Energiewende beschleunigen**. Hier sind dann, natürlich, die technischen Innovationen und die möglichen Hochlauf-Szenarien von Interesse – aber auch nicht-technische Aspekte wie Prozess- und Verfahrensfragen und letztlich gesellschaftliche Akzeptanz. Wir sind sehr gespannt auf die Beitragseinreichungen!

Und noch ein Aspekt von Geschwindigkeit – die Zeit vergeht ja bekanntlich immer schneller. Wir nähern uns schon wieder dem Ende einer Vorstandsperiode in unserer ETG, und in diesem ETG *journal* finden Sie die Informationen zur bevorstehenden Wahl des neuen ETG Vorstandes. Vor allem natürlich die Liste der Kandidatinnen und Kandidaten. Hier sind wir sehr froh, eine hochkarätig besetzte Liste, mit vier Kandidierenden je Gruppe Energieversorgung / Industrie / Wissenschaft präsentieren zu können. Schon einmal vielen Dank an alle Kandidierenden für ihre Bereitschaft, sich für die ETG zu engagieren!

Jetzt ist es also an Ihnen, den Mitgliedern der ETG, von Ihrem Wahlrecht Gebrauch zu machen!

Eine möglichst hohe Wahlbeteiligung ist ein starkes Zeichen für eine aktive Fachgesellschaft, eine starke Legitimation und auch Motivation für den neuen Vorstand – wir zählen auf Sie!

Im Voraus vielen Dank für Ihre Unterstützung,
viel Spaß beim Lesen,

Ihr

Dr.-Ing. Michael Schwan
ETG Vorsitzender

Editorial 3

T TECHNIK UND TRENDS 6

- T1** Towards AI-assisted Long-term Maintenance in Power Electronics 6
- T2** Review of Electric Field Reduction Methods for Medium-Voltage Power Modules 12
- T3** Wer startet das Netz der Zukunft nach einem Blackout? 18
- T4** A Miniature Replica of an Electrical Power System 22
- T5** VDE Arbeitsmarktstudie 2022 – Elektroingenieurinnen und Elektroingenieure 25

E ETG AKTUELL 26

ETG Fachbereich A2

- E1** Wabenstruktur zur Elektromobilität (Teil 5) 26

Call for Papers

- E2** Rail.S / VDE-Symposium: Elektrische Fahrzeugantriebe und -ausrüstungen 30

ETG Vorstandswahl

- E3** Wahl des ETG Vorstands für die Amtszeit 2023 – 2025 31

ETG Task Forces

- E4** Aktiver Netzbetrieb – Ein Zwischenbericht der ETG Task Force „Hochautomatisierung von Nieder- und Mittelspannungsnetzen“ 33
- E5** Unkonventioneller Ansatz für die neue Task Force „Entwicklung eines Zielbilds für ein klimaneutrales und nachhaltiges Energiesystem“ 35
- E6** Aktueller Stand Task Force „Digitaler Zwilling in der Elektrizitäts- und Netzwirtschaft“ 37

ETG Literaturpreis 38

Herbert-Kind-Preis 40

ETG Veranstaltungen

- Vorschau 2022 44

Vorschau ETG Veranstaltungen

- E7** ETG Kongress 2023 – Call for Papers 47

Rückblick ETG Veranstaltungen

- E8** CIPS 2022 – 12. Internationale Konferenz zur Systemintegration in der Leistungselektronik . . . 48

Y	<u>VDE YOUNG NET</u>	50	H	<u>HISTORIE DER ELEKTROTECHNIK</u>	63
VDE Young Net – Geschäftsstelle					
Y1	„Irgendwas mit Strom“ – Imageproblem der Elektrotechnik	50	H1	Influenzmaschinen – eine elementare Theorie der Effizienz dieser über- und unterschätzten frühen Energiewandler	63
			H2	Die Entwicklung des Bahnstromnetzes in Deutschland	68
I	<u>INTERNATIONALES</u>	54	L	<u>LESERFORUM</u>	76
I1	Aktuelle Informationen aus CIRED	54	L1	Leserbrief von Prof. Dr. Hartmut Grabinski, Prof. Dr. Erhart Kunze und Prof. Dr. Fred Wiznerowicz	76
I2	Aktuelle Informationen aus dem Deutschen Komitee der CIGRE	55			
S	<u>ENERGIEWENDE-SPLITTER</u>	56		<u>Veranstaltungskalender</u>	79
S1	Neues aus Politik und Regulierung	56			
S2	Aus Industrie und Forschung	57			
S3	International	57			
F	<u>FNN AKTUELL</u>	58			
F1	Aktuelles aus dem Forum Netztechnik / Netzbetrieb (VDE FNN)	58			

T1 Towards AI-assisted Long-term Maintenance in Power Electronics

Abstract

This paper presents the applications of artificial intelligence (AI) in the long-term maintenance of power electronics. Long-term system performance depends on two major factors including intrinsic material strength and extrinsic stressors. To fulfill the reliability and safety requirements, various life-cycle maintenance approaches can be employed to either reinforce the strength of components or control the stressors. This paper presents the AI-assisted methods for these purposes, including the basics of AI tools, maintenance applications, and implementation hardware of AI for maintenance in power converters. Finally, a perspective on challenges and outlooks in the synergy of AI in power electronics is provided.

1 Introduction

Power electronics play an underpinning role in green transition in a wide range of applications [1, 2]. It is the main energy processing unit in e-transportation, renewable energies, power to gas systems, electric power grid applications, motor drives, etc., and is becoming the key element of green transition [3]. However, integrated energy systems with high uptake of power electronics devices become more and more complicated in terms of design, planning, and operation. Therefore, the high penetration of power electronics in energy systems requires smart asset management approaches [4]. Thus, digitalization [5] is a solution to facilitate the optimal, reliable, and efficient operation of future energy systems.

Power electronics asset management can be performed in the short- and long-term in order to guarantee proper performance during real-time as well as long-term operation. The short-term performance is subjected to the operation of converters, which can be measured by power quality indices such as total harmonic distortion (THD), noise emission, power factor, and control performance related to the stability of power electronics systems. Meanwhile, the long-term performance deals with the reliability and energy efficiency of the converters where asset management aims for lifecycle management within a specified period.

Various approaches have been presented for life cycle management in power electronics systems. These approaches can be divided into active and reactive methods. The active methods aim to prevent the failure of a converter and/or expand its lifetime by implementing real-time solutions. Moreover, the reactive approaches are mainly classified as corrective maintenance where the device will be replaced/repaired once a failure occurs. The reactive approaches are not cost-effective solutions since they may pose lower availability and higher unexpected operational and maintenance costs. Today, active solutions are gaining more and more attention in the industry – in particular, the ones relying on predictive techniques. This is because the real health condition of a device

can be monitored and an appropriate and cost-effective remedial action is taken whenever it is required, i.e., once the system performance goes beyond a specified boundary.

On the other hand, state of health monitoring in power electronics-dominated systems, such as wind farms, for operation and maintenance purposes requires collecting and analyzing a huge amount of data from any power electronics devices and systems. In a large-scale view, looking at smart energy systems, it is not practical and even cost-effective. This creates a demand for new approaches to model, optimize, and simplify the life cycle management of power electronics systems. Thus, Artificial Intelligence (AI) have recently emerged and become integrated into power electronics systems to facilitate the efficient and reliable operation of these systems [4, 6]. Recent advances in data science, digital twin, edge computing, and big data analysis provide a comprehensive set of data for power electronics systems within their life cycle. This paper aims to present the applications of AI in the long-term maintenance applications of power electronics systems.

The remainder of the paper is organized as follows. In Section 2, an overview of the AI methods in power electronics will be presented, focusing on the maintenance-related applications. Section 3 will explain the implementation of AI algorithms on edge/cloud for power electronics systems. Moreover, Section 4 will discuss the existing challenges and opportunities of AI application in these systems. Finally, the summary of the paper will be presented in Section 5.

2 AI Methods and Functions

A review article [4] indicates that AI tools have been continuously applied in power electronic systems (PES) since the 1990s for design, control, and maintenance applications. In essence, these applications are dealing with optimization, classification, regression, and data structure exploration. AI tools can be categorized as Expert Systems (ES), Fuzzy Logic (FL), metaheuristic methods, and Machine Learning (ML). Figure 1 summarizes the detailed categories. As for data-driven applications in PES, any specific tasks can be completed by one or more AI tools. For example, the metaheuristic methods, e.g., genetic algorithm, can be applied to support vector machines in ML methods for hyperparameter estimation in the model training stage. Notably, various improved variants of AI tools are developed to improve the performance of computation speed, robustness, noise-immunity, and dataset size.

Expert system is essentially a Boolean logic database that integrates system principles, operational rules, expert experience, and knowledge, where the entries are organized as an IF-THEN format emulating human inference. The database can be continuously updated when new evidence and rules appear. Since it is highly based on system principles and expert knowledge, the generality is limited and human experi-

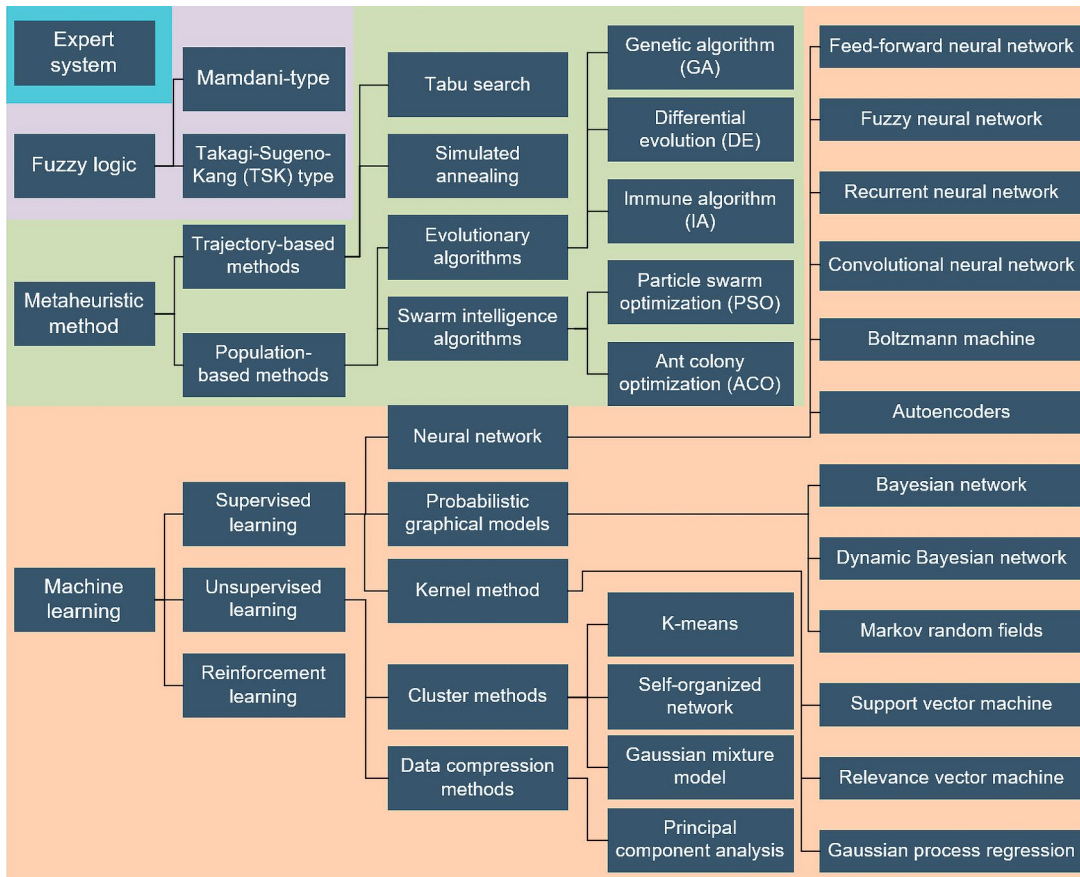


Figure 1: The categorization of AI tools to be applied in power electronics [4]. The four types of AI methods are highlighted with different background colors.

ence is extensively involved during the method development. The expert system is computationally efficient and can be implemented on regular platforms. Notably, it is considered one of the earliest AI techniques applied to PES.

Fuzzy logic extends the Boolean logic inference scheme of the expert system to a multivalued rule-based system. The inference consists of three main steps, including fuzzification, rule inference with a knowledge base, and defuzzification. Note that the fuzzification can suppress the noises in the inputs, which can increase the robustness of the rule inference. Thus, fuzzy logic is superior in dealing with system uncertainties. According to the type of membership functions in the fuzzification, fuzzy logic can be categorized as Mamdani-type method where a function is a shape-based form (e.g., triangular), and Takagi-Sugeno-Kang (TSK) method where the function is singleton as several constant values. Typically, TSK-type is more powerful and with better modeling capability. The research activities in ES and FL are less prevalent than before 2010 when computation hardware was not as powerful as it is today [4].

Regarding the optimization tasks, most of the objective functions in the data-driven domain are non-differentiable. Therefore, it is challenging to derive the gradient-related information for supporting deterministic optimization methods (e.g., quadratic programming). It calls for the metaheuristic methods where gradients would be unnecessary when performing optimization. By using the heuristic searching scheme, metaheuristic methods [7] are developed with different biological inspirations. It can be categorized as trajectory-based

methods where only one candidate solution is involved during the searching, and population-based methods where a batch of candidate solutions are involved during the searching. Generally, the population-based methods are superior in convergence speed and global searching capability. However, the computational burden of population-based methods is more intensive. It is worth mentioning that the genetic algorithm and particle swarm optimization are the two most prevalent methods on PES and their total usage percentage is up to 91 % [4]. Metaheuristic methods can be applied separately or as an optimization tool combined with other AI methods.

The most active area of AI applications on PES is machine learning, whose percentage is up to 45.8 % according to an investigation in [4]. Considering data set properties, machine learning includes supervised learning, unsupervised learning, and reinforcement learning. Notably, 91 % of machine learning applications are dealing with supervised learning tasks. In supervised learning, each data entry comprises input vectors with the corresponding target outputs. The goal of supervised learning is to establish functional relationships between the input-output pairs. Supervised learning covers the neural network method, probabilistic graphical method, and kernel method. The neural network attempts [8, 9] to establish functional relationships by using multilayers of neurons connected with weights. Numerous research efforts have been devoted to this field since the structure of the neural network is flexible, which can be combined with other AI methods to improve the method's performance. For example, the neural network can be combined with fuzzy logic as the fuzzy neural

network to enhance the method's robustness in the presence of noisy inputs. Also, the rapid development of deep learning further strengthens this dominance due to the hardware revolution that supports computationally demanding algorithms. Compared to the connectionism in the neural network, probabilistic graphical methods learn the functional relationships through constructing the diagrammatic representation between inputs and outputs. Bayesian network is a typical method in this category, which is superior in analyzing the variable dependence and model interpretability. The kernel methods establish functional relationships by directly modeling the distance between data points in the training set. The method is superior with small data size and better for uncertainty quantification. However, the training data set are still involved in the model inference, which indicates higher memory requirements. For supervised learning, note that the generalization capability on unknown cases is a key performance. In contrast to supervised learning, there is no target output in the data set for unsupervised learning tasks. The goals of unsupervised learning include data clustering and data compression. The data clustering aims to discover the similarities and partition the data into different groups, to make that the data in the same cluster are with similar characteristics while keeping different from other clusters as much as possible. The data compression eliminates excessive features in the data set while keeping data integrity and maintaining the main information in the dataset. Reinforcement learning [10] is the latest frontier of machine learning applications on PES. Compared to supervised or unsupervised learning, there is no training data set for reinforcement learning. Its training is progressively completed by interacting with the system in a trial-and-error manner. Essentially, it is a dynamic programming task that searches for an optimal policy maximizing future rewards. As a result, a Q-table will be formulated that records the policy to be executed in the presence of input variables.

With the implementation of monitoring techniques, the accumulated data provide a new perspective for maintenance implementation, i. e., data-driven solutions [11]. The maintenance applications in PES have been drastically evolved in the last decade with recent advancements in AI [12], industrial Internet-of-Things, and data analytics. AI-assisted data-driven maintenance solutions have been emerging in a promising direction and show significant potential and merits, e. g., flexibility, lower requirements on hardware circuitry and system physical principles, etc. The typical workflow is given in Figure 2. It is summarized as six core tasks:

1. Data acquisition: it involves the acquisition of raw physical signal/data from PES. It includes sensor hardware/software, sensor configuration, data transmission, data storage, and data retrieval.
2. Data mining: it is concerned with data preprocessing, data compression, and feature extraction. It prepares the data foundation to improve the data suitability and ease the application complexity in terms of the succeeding functional tasks, i. e., anomaly detection, fault diagnostics, and remaining useful life (RUL) prediction. As an example, data mining for fault diagnosis aims to develop features that make different failure modes classifiable as much as possible.
3. Anomaly detection: it aims to determine the off-normal conditions of PES that deviate from the expected system behavior. Essentially, a binary decision needs to be made in this case. For example, an emulator that characterizes the system's normal behavior can be established for a PES. The field system outputs can be compared in real-time with this emulator, which is not subjected to degradation and failure, to determine the abnormal state.
4. Fault diagnosis: it is a process of deciding the possible fault causes/modes, locations, and severity. Compared to the binary tasks in anomaly detection, the fault diagnosis is essentially dealing with a multi-class classification task.
5. Remaining useful life (RUL) prediction: it aims to quantify the length of the remaining time that the system can safely operate in the future. It is concerned with the degradation modeling in terms of operational time. The RUL evaluation considers uncertainty sources comprehensively, including the current system state, historical workload, system heterogeneity, and expected future mission profiles.
6. Decision-making: it formulates corrective or preventive maintenance actions or operation optimization schemes. One example of decision-making for operation optimization in PES is a power routing concept discussed in [13, 14]. The workloads are balanced among components with different degradation levels to extend the converter lifetime.

Although there are numerous studies in this field, from the algorithm perspective, the above six core tasks essentially deal with one or more of the four functions as shown in Figure 2, i. e., optimization, regression, classification, and data structure exploration, according to the comprehensive analysis in [4]. Optimization attempts to find optimal solutions that minimize or maximize an objective function from available alternatives given constraints, equalities, and inequalities. It is an essential step to identify unknown model parameters that properly characterize the data or system behavior. It can be completed deterministically with gradient-related methods or heuristically with metaheuristic methods (e. g., genetic algorithm). Regression establishes mapping relationships between the input and output variables in the training data set. The mapping relationships characterize the static or dynamic (e. g., time-series data) linkage and system functional behavior. Given new input variables, the objective of the regression task is to predict the corresponding output variables. Classification assigns a discrete label for input variables to indicate the associated category as the outputs, which identify the categorical relationships and decision boundaries among the data set. Notably, the outputs of classification are discrete quantities compared to that of continuous quantities in regression tasks. Data structure exploration includes data clustering and data compression, where the input variables are categorized into different clusters considering their similarities. The irrelevant information is to be eliminated for feature reduction through data compression. It is an essential step to make the data set well prepared for the subsequent functional tasks and ease algorithm complexity.

3 AI Implementation on edge/cloud

The hardware implementation is mainly based on the Internet of Things (IoT) computation platform. The IoT term has been in use for over twenty years and depicts a framework in which many different devices – dubbed things – are connected to the internet. It has been used to describe the integration of a massive number of devices and new technologies beyond what is currently supported by the predominant data sharing structure – the internet. The IoT concept seeks to enable data transmission among all such devices by facilitating their interconnection, which translates to a more cohesive architecture and protocols across different devices. In other words, the data-sharing infrastructure of different applications (e.g., HVAC, manufacturing devices, pump systems, refrigerators, lighting sensors, electrical vehicles) have traditionally been kept apart in individual systems, but with the rise of the IoT, they are encouraged to share the same infrastructure, which brings many benefits to their individual and collective use [15].

In the industry, the growing complexity of systems and the requirements for interoperability and interconnectivity give rise to Industry 4.0, which is enabled by the IoT. The term refers to a fourth industrial revolution, envisioned by the increasing automation and data exchange enabled by the IoT. Moreover, the term Industrial IoT (IIoT) is used in such context, as an enabler of Industry 4.0. In this new framework, a plethora of interconnected sensors and automated devices both require and facilitate more complex systems to be developed and implemented [16]. In practical terms, the IIoT is the architecture that enables the large-scale deployment of intelligent methods, upon which edge devices and cloud platforms will be the actual agents to carry out these advanced AI algorithms. A representation of both, within an IIoT context applied to electrical engineering applications, is depicted in Figure 3.

The term edge device refers to devices capable of (i) sensing, computing, or executing commands and (ii) communication with another device or layer in a higher level of the hierarchy, and are located at the edge of a system – most frequently, along with the end-application itself. In power electronics sys-

tems (PES), an edge device configuration often translates to either an intelligent converter equipped with communication capabilities in combination with local microprocessors, or an additional device that can communicate both with the local PES via local protocols and the higher-level layer or device. In that regard, Raspberry Pis are highly flexible, single-board computers known to combine processing capabilities, data storage, a variety of local communication hardware interfaces, and can easily establish a connection with the internet and other communication networks. It is a cheap yet powerful solution, which is adequate for interfacing different applications also in electrical engineering [17].

By using edge devices, the local parameters and operation variables are accessible for higher-layer AI applications via embedded sensors or local communication protocols. This is a key step to, e.g., bridge the limited observability in low voltage distribution grids and PES applications and unlocks the much sought-after data required for many data-hungry AI applications – such as machine learning. Such algorithms can process the data in near real-time settings, according to the desired application, and define clear outcomes translated to control parameters back to the PES or other actions to be taken by different decision-making agents, whether a physical person or a virtual entity. Without the edge device connectivity, local controllers are required to operate isolated from one another, statically, and only within a predefined set of actions.

A natural step forward is to execute such AI algorithms in cloud platforms. They offer a virtual infrastructure able to connect to, store, access, and use the data generated by edge devices connected within the IIoT structure. Hence, they are another key technology that brings computation robustness and flexibility to interface with multiple deployed technologies. Most available commercial cloud platforms are highly compatible with the key technologies in industrial engineering computing.

While cloud platforms can handle massive amounts of data and scalable algorithms, the latency involved in information processing is above the millisecond threshold – even by making use of 5G technologies. As such, there is no use to em-

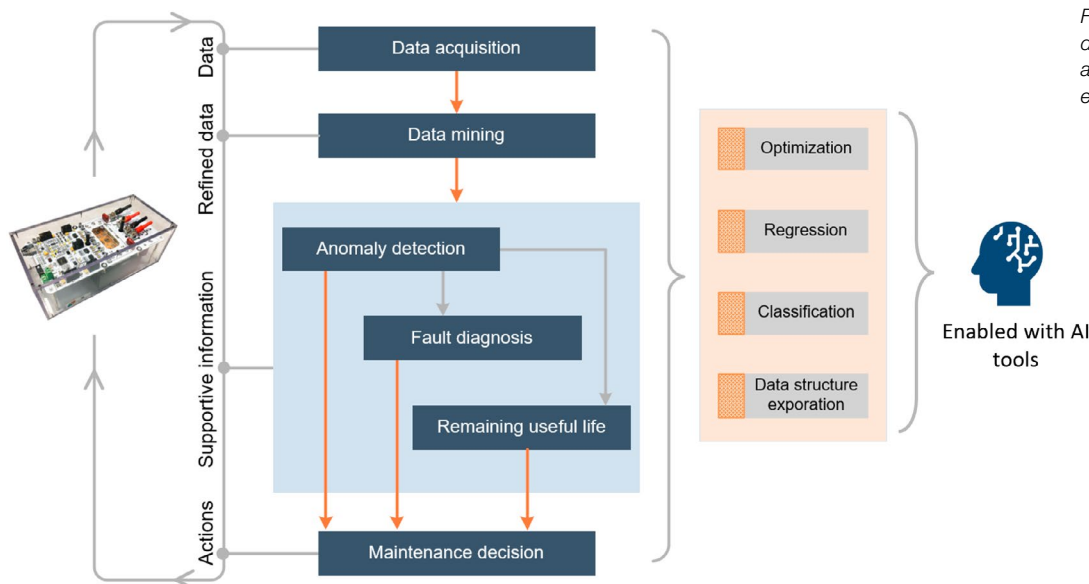


Figure 2: The flowchart of data-driven maintenance applications for power electronic systems.

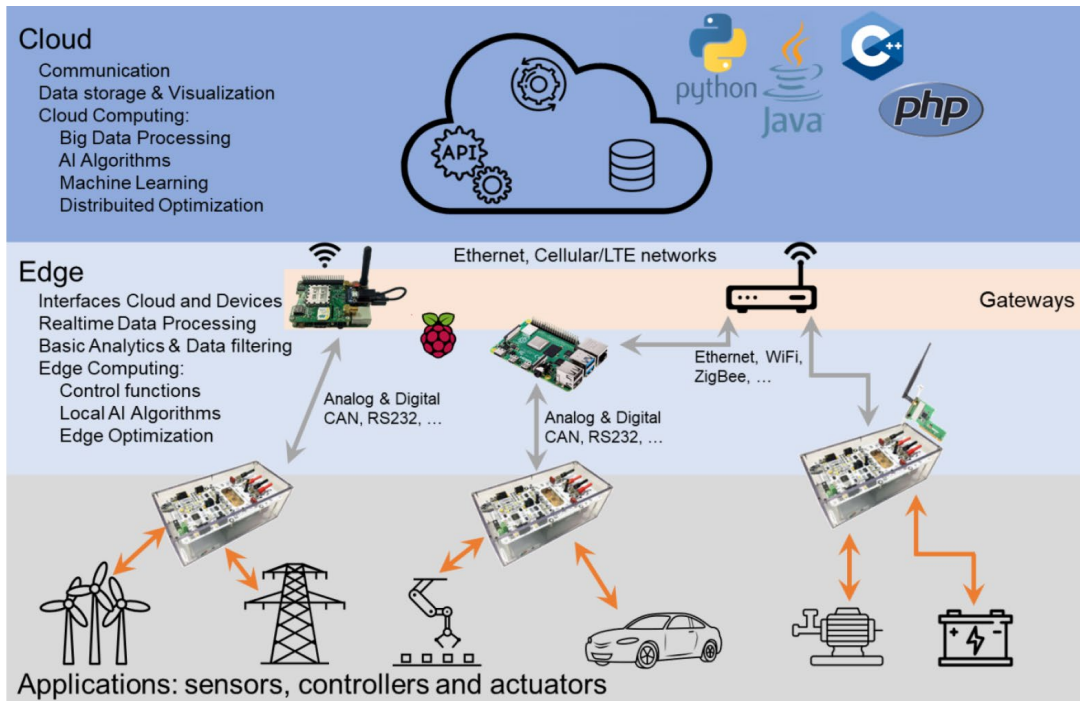


Figure 3: An example diagram showing a general structure of arrangement across different edge devices and the cloud platform within power electronics systems applications.

ploy dynamic measurements of local devices, to cloud platforms since these events are much faster than the latency across agents. Hence, there lies a clear distinction between (i) automated devices on the edge, able to perform advanced algorithms beyond standard PES control functions, also based on dynamic and high-frequency measurements; and (ii) more complex AI methods deployed on the cloud, which in general account for RMS and steady-state values instead. Still, the aggregation of countless devices through the cloud allows for a much more diverse ambient, unlocking the power of AI methods in large-scale applications.

Another powerful aspect of cloud platforms is their flexibility with regard to executing algorithms: they can be formulated and implemented in most modern programming languages (e. g., Python, C++, Java, PHP, Ruby, etc.) which allows for quick customization regardless of the desired end-application. Moreover, the interfacing via Application Programming Interfaces (APIs) allows for easy and quick communication access across a plethora of edge devices, regardless of application. Finally, the execution of algorithms in parallel greatly benefits many AI implementations, which often require high computing power and also parallel computation capability – both of which are offered in cloud platforms overall.

The framework established across edge devices and cloud platforms via the IIoT provides a scalable approach to a multitude of PES across the industry. Moreover, this framework also allows for a solid research and development foundation to be established in real-time prototypes, which enables the quick development of new technologies that are tested and validated across multiple layers of the system. This minimizes development and deployment timeframes. Moreover, the flexibility provided by both edge devices and cloud platforms allows for a continuous development and deployment of updated solutions to end-devices, without the necessity of physical access for implementation.

4 Challenges and opportunities

Artificial Intelligence is a versatile tool to obtain models to solve optimization, classification, or regression tasks in power electronics applications. It holds potentials to be applied to almost any applications in principle. Therefore, the question may not be whether AI can be used for a specific problem in designing, controlling, and monitoring power electronic components and systems. Instead, to a large extent, it is about whether AI is a better or the best method to address the problem by considering performance metrics and system-level constraints. Other engineering fields with relatively higher mature levels in applying AI can inspire power electronics. The relevant challenges and opportunities have been presented in [4, 12]. In addition, the following aspects are specific to power electronics applications:

Challenges – 1) It demands a high accuracy in control applications that use AI-based methods to generate digital gate signals for semiconductor switches. In [4], it reports that 78 % of the papers on AI-based methods for power electronics are related to control, published in five journals in the field of power electronics between 1990 and 2020. Nevertheless, there is still a lack of study on the risk associated with the inaccuracy under a wide range of operation conditions, relatively long-term operation, and enough testing samples. This could be one barrier to bring those research outcomes into large-scale industry applications. 2) In computer science, “garbage in, garbage out” refers to a concept that flawed or nonsense input data produces nonsense output. It is still challenging to obtain realistic and sufficient training data in a cost- and time-efficient way in power electronics applications.

Opportunities – Power electronics research in the last half-century has already developed various deterministic physical models, uncertainty analysis methods, and control

approaches with a high level of simplicity in use. With the increasing system complexity and performance demand, AI can do better in part of the problems. A combination of existing physical models and data-driven AI approaches, i. e., physics-informed AI [18], is an opportunity to leverage the advancements in both power electronics and AI. It would be a natural direction for power electronics researchers and engineers who can make unique contributions. It helps to use less data, instead of more, and increases interpretability and transparency. Therefore, it enables an opportunity to address data constraints and it might reduce the energy consumption from running AI algorithms.

5 Summary

This paper has presented the application of AI in the long-term performance and life cycle management of power electronics. The AI methods used in power electronics systems for different purposes have been discussed. Moreover, the implementation of AI algorithms on edge/cloud for power electronics systems has been explained. Finally, some challenges and opportunities in the integration of AI into power electronic systems have been discussed.

References

- [1] F. Blaabjerg and K. Ma, "Future on Power Electronics for Wind Turbine Systems," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 1, no. 3, pp. 139–152, 2013.
- [2] F. Blaabjerg, Y. Yang, D. Yang, and X. Wang, "Distributed Power-Generation Systems and Protection," *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, no. 7, pp. 1311–1331, 2017.
- [3] J. H. Enslin, S. G. Whisenant, and R. Hadidi, "Third eGrid Workshop Maps the Grid of the Future: Attendees Engage to Examine the Role of Power Electronic Applications in Modern Electric Power Systems," *IEEE Power Electronics Magazine*, vol. 6, no. 1, pp. 48–55, 2019.
- [4] S. Zhao, F. Blaabjerg, and H. Wang, "An Overview of Artificial Intelligence Applications for Power Electronics," (in English), *Ieee Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 4, pp. 4633–4658, Apr 2021.
- [5] "Power Electronics and Digitalisation (Smart-Inverter)," 2021.
- [6] B. K. Bose, "Artificial Intelligence Techniques: How Can it Solve Problems in Power Electronics?: An Advancing Frontier," *IEEE Power Electronics Magazine*, vol. 7, no. 4, pp. 19–27, 2020.
- [7] S. E. D. León-Aldaco, H. Calleja, and J. A. Alquicira, "Metaheuristic Optimization Methods Applied to Power Converters: A Review," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 12, pp. 6791–6803, 2015.
- [8] M. R. G. Meireles, P. E. M. Almeida, and M. G. Simoes, "A comprehensive review for industrial applicability of artificial neural networks," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 50, no. 3, pp. 585–601, 2003.
- [9] B. K. Bose, "Neural Network Applications in Power Electronics and Motor Drives—An Introduction and Perspective," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 54, no. 1, pp. 14–33, 2007.
- [10] D. Cao et al., "Reinforcement Learning and Its Applications in Modern Power and Energy Systems: A Review," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 8, no. 6, pp. 1029–1042, 2020.
- [11] O. H. Abu-Rub, A. Y. Fard, M. F. Umar, M. Hosseinzadehtaher, and M. B. J. I. P. E. M. Shadmands, "Towards intelligent power electronics-dominated grid via machine learning techniques," vol. 8, no. 1, pp. 28–38, 2021.
- [12] S. Zhao and H. Wang, "Enabling Data-Driven Condition Monitoring of Power Electronic Systems With Artificial Intelligence: Concepts, Tools, and Developments," (in English), *Ieee Power Electronics Magazine*, vol. 8, no. 1, pp. 18–27, Mar 2021.
- [13] M. Liserre et al., "Power routing: A new paradigm for maintenance scheduling," vol. 14, no. 3, pp. 33–45, 2020.
- [14] S. Peyghami, T. Dragicevic, and F. J. S. R. Blaabjerg, "Intelligent long-term performance analysis in power electronics systems," vol. 11, no. 1, pp. 1–18, 2021.
- [15] E. J. C. C. Borgia, "The Internet of Things vision: Key features, applications and open issues," vol. 54, pp. 1–31, 2014.
- [16] M. Wollschlaeger, T. Sauter, and J. J. I. i. e. m. Jasperneite, "The future of industrial communication: Automation networks in the era of the internet of things and industry 4.0," vol. 11, no. 1, pp. 17–27, 2017.
- [17] D. Gebbran, S. Mhanna, A. C. Chapman, W. Hardjawana, B. Vucetic, and G. Verbič, "Practical considerations of DER coordination with distributed optimal power flow," in *2020 International Conference on Smart Grids and Energy Systems (SGES)*, 2020, pp. 209–214: IEEE.
- [18] G. E. Karniadakis, I. G. Kevrekidis, L. Lu, P. Perdikaris, S. Wang, and L. Yang, "Physics-informed machine learning," *Nature Reviews Physics*, 2021/05/24 2021.



Shuai Zhao,
Department of Energy, Aalborg University,
Aalborg, Denmark

Additional authors:

- Saeed Peyghami, Department of Energy, Aalborg University, Aalborg, Denmark
- Daniel Gebbran, Department of Electrical Engineering, Technical University of Denmark, Kgs. Lyngby, Denmark
- Tomislav Dragicevic, Department of Electrical Engineering, Technical University of Denmark, Kgs. Lyngby, Denmark
- Huai Wang, Department of Energy, Aalborg University, Aalborg, Denmark
- Frede Blaabjerg, Department of Energy, Aalborg University, Aalborg, Denmark

T2 Review of Electric Field Reduction Methods for Medium-Voltage Power Modules

Abstract

Growing interest in medium voltage (MV) wide bandgap (WBG) devices for renewable energy, dc microgrids, and electric vehicles, has generated an increased need for high-density, MV packaging technology. The desire to create a high-density package for MV devices means the electric field strength within the module will be increased. If the electric field strength exceeds the electrical breakdown strength of the dielectric materials, then partial discharge (PD) can occur, potentially causing permanent damage to the package. Many of these failures occur at the insulating substrate, making it the focus of many studies which aim to improve the PD performance. Techniques for improving PD performance in power modules can be achieved through geometric modification and material modification. While there are other techniques, such as voltage grading, these techniques are less common within the power module. This work will provide an overview of the state-of-the-art geometric and material alteration techniques for mitigating partial discharge risks both inside the package.

1 Introduction

Growing interest in medium voltage (MV) wide bandgap (WBG) devices for renewable energy, dc microgrids, and electric vehicles, has generated a need for high-density, MV packaging technology [1]. Higher density is desired to reduce the converter size, weight, and costs, and lower stray inductances, enabling designers to fully utilize the benefits of MV WBG devices [2].

The desire to create a high-density package for MV devices means the electric field strength within the module will be increased [3]. If the electric field strength exceeds the electrical breakdown strength of the dielectric materials, then partial discharge (PD) can occur, potentially causing permanent damage to the insulating materials, such as the encapsulant and the insulating ceramic substrate. Accordingly, the electric fields, both within the power module and at the external terminations to the rest of the converter, must be carefully controlled. Recently, there has been focus on reducing the electric field strength near the insulating substrate, as this is typically where the PD occurs inside the power module [4].

Proposed solutions to reduce the electric field strength at this critical location include increasing the ceramic thickness and the permittivity of the encapsulation material; adding a dielectric coating with high permittivity or high breakdown field strength; applying a high resistivity coating along the ceramic surface; using high permittivity non-linear dielectrics or nonlinear resistive materials; stacking multiple substrates; and varying the metal-ceramic interface geometry. This paper will review these methods and their impacts on the power module performance.

The electric field outside of the power module is also critical due to the low dielectric strength of air [5]. To date, little work has been published on the analysis of the electric field outside of the power module, such as near the module terminals and its connection to the busbar as presented in [6], and more work is required in this area.

This paper will provide an in-depth overview of state-of-the-art strategies for mitigating PD risk inside the package via reduction or manipulation of the high-intensity electric field around the package substrate. The techniques that will be reviewed are divided into two categories: geometric alterations and material alterations. Each category will be discussed and concluded with a table that summarizes the relative benefits and drawbacks of each technique.

2 Review of Geometric Alterations

The first of two primary classes of PD mitigation techniques is geometric alteration. The alterations consist of slight deviations from traditional substrate design which help to alleviate electric field crowding in key areas, most notably triple points at the interface of the ceramic, metallization, and encapsulant.

2.1 Ceramic Thickness and Metallization Offsets

The thickness of the ceramic substrate and the offset of the substrate metallization from the edge of the ceramic (Figure 1) are two parameters available to designers to help alleviate electric field crowding on the peripheral of the substrate. Increasing the ceramic thickness will reduce the electric field crowding around critical triple points by increasing the spacing between the opposing metallization layers; however, there are diminishing returns on the PD performance beyond a certain point.

A study performed in [7] shows experimental data for the partial discharge inception voltage (PDIV) of the structure shown in Figure 1 for both aluminium nitride (AlN) and aluminium oxide (Al_2O_3) of various thicknesses. It was found that increasing the substrate thickness from 0.384 mm to 0.630 mm resulted in a 50 % improvement in PDIV, from 8 kV to 12 kV. However, when the substrate thickness is increased to 1 mm, only a 16 % improvement in PDIV was achieved, from 13.9 kV to 12 kV. This trend of diminishing improvement in PDIV occurs as a result of the non-linear scaling of the non-uniform electric field around the triple point, which does not decrease linearly with distance as in the case of uniform electric field distributions. This trend was also confirmed with electric field simulations [7] and observed in other works as well [8].

In addition to the diminishing returns, increasing the substrate thickness also incurs a cost and thermal performance penalty. Thicker substrates are more expensive and difficult

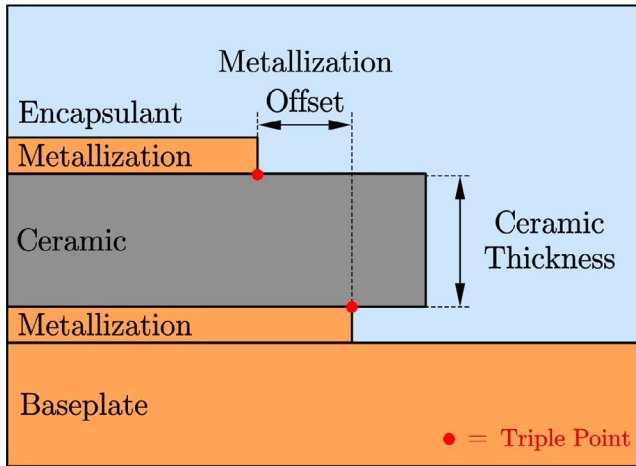


Figure 1: Representation of a cross-section of a typical substrate for a power electronics module showing the ceramic thickness and the metallization offset.

to obtain, and usually come with limited metallization options when compared to thinner substrates. The larger ceramic thickness also increases the thermal resistance between the die and baseplate when it is used as the primary heat path, adversely affecting the power rating of the package. Therefore, increasing the ceramic thickness beyond 1 mm is not preferred for further improvement in PDIV.

In [7] and [9], the effect of the offset (Figure 1) of the metallization layers on PDIV was also investigated and it was found that the best PDIV is achieved with no offset, with the performance degrading as the offset increases. The authors used simulation and experimental techniques to study both AlN and Al_2O_3 substrates ranging from 0.384 mm to 1 mm in thickness. On a 0.384 mm Al_2O_3 sample, the authors observed a 30 % decrease in PDIV when increasing the offset from 0 mm to 2 mm. These findings have given rise to substrate designs for MV and HV packages that use identical metallization patterns on the top and bottom of the substrate, as opposed to patterning only one side of the substrate while leaving a common ground pad on the opposing side [14]. By patterning both sides of the substrate, all offsets are effectively eliminated. This approach has two implications: first, the potential of each pad on the opposing face must be tied to a controlled potential and second, the substrate must be fully encapsulated, so that none of the triple points are exposed to the air. If either of these conditions is not met, then this approach can result in a lower PDIV.

2.2 Metallization Pads and Corner Radii

In addition to the ceramic thickness and offset, the size and shape of the metallization pad (Figure 2) has been shown to be an additional degree of freedom when mitigating PD risk. A study in [10] demonstrated that decreasing the pad size from $47 \times 47 \text{ mm}^2$ to $5 \times 5 \text{ mm}^2$, an 88-times decrease, can improve the PDIV by up to 50 %. A study in [7] showed that there is negligible improvement for smaller changes in pad size. In the work, it was shown that the improvement between an $25 \times 25 \text{ mm}^2$ and a $18 \times 18 \text{ mm}^2$ pad was imperceptible. From these works, it is apparent that dramatically decreasing

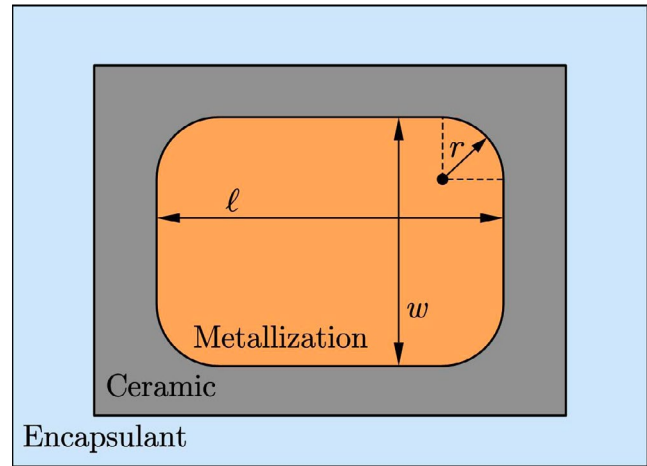


Figure 2: Representation of a top view of a typical substrate for a power electronics module showing the metallization pad size and the corner radius.

the size of the metallization pad may result in a PDIV reduction. However, such dramatic decreases in pad size may not be feasible, especially in high-power and multi-chip packages where large pads are required to handle the high currents and parallel larger dies.

When varying the corner radius of the metallization pad, both [7] and [10] observed no change in the PDIV; however, the frequency of the PD events decreased significantly with increasing radius. When sweeping the radius from 0 mm to 20 mm, with the number of observed PD events decreasing by 96 % [10]. From the existing literature, it appears that the PDIV monotonically decreases with increasing radius and thus the pad radius should always be maximized. However, as in the case of decreasing the pad size, maximizing pad radius may not always be feasible for packages with small pads and thus a trade-off becomes apparent between the size of the pad radius and the density of the package. More work is needed to determine the minimum radius to achieve a specific PDIV for a given combination of substrate and encapsulant.

2.3 Metal-Ceramic Interface

Several attempts have been made in the literature to change the shape of the metal-ceramic interface to reduce the electric field at the critical triple point, thus enabling further improvement in PDIV. Some of the new structures proposed in the literature are summarized in Figure 3 as compared to a traditional metal-ceramic interface.

An embedded structure is proposed in [11] where the top-side metallization is embedded into the ceramic and the outer edge of the metallization is rounded to alleviate field crowding as shown in Figure 3b. In simulation, the structure demonstrated a 77 % lower peak electric field than the baseline design shown in Figure 3a. The structure was never built or experimentally verified due to the complicated and expensive manufacturing procedure.

A trenching technique is proposed in [4] in which a trench is cut into the substrate changing the geometry of the triple point as shown in Figure 3d. In simulation, the structure achieved a 57 % decrease in peak electric field strength when compared

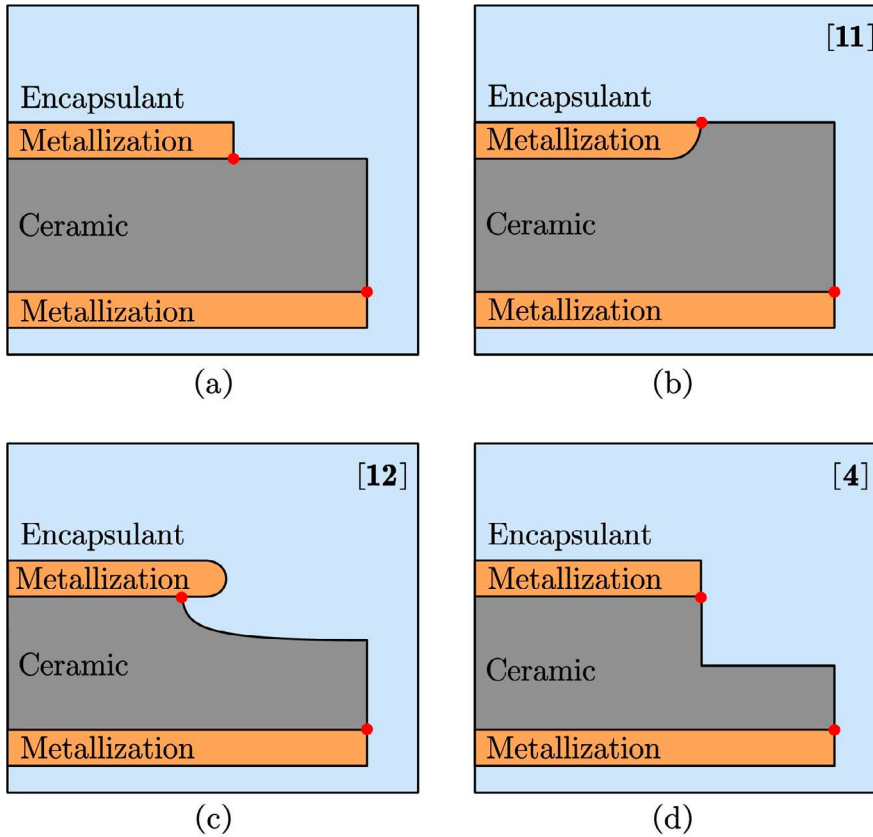


Figure 3:
a) Typical substrate with top- and bottom-side metallization;
b) embedded metallization;
c) overhang metallization; and
d) trenching.
Red dots indicate location of peak electric field.

to the conventional structure in Figure 3a. The disadvantage of the technique is it requires thicker substrates, and thus yields lower thermal performance than the other methods discussed.

2.4 Stacking Substrates

Stacking multiple substrates (Figure 4) is proposed in [13] and [14] to reduce the voltage level across the substrate, rather than increase the voltage a single substrate can tolerate. In [13], the authors demonstrated a 94 % higher PDIV when using two stacked 0.384 mm Al_2O_3 substrates as opposed to a single 0.630 mm substrate. Diminishing returns were observed when more than two substrates were used. [14] demonstrated that the diminishing returns were due to uneven voltage sharing between the substrates and that the PDIV could be further improved by using a voltage divider to ensure uniform voltage sharing. In [14], a PDIV improvement of 53 % was demonstrated when using two 1 mm AlN substrates.

An advantage of this approach is the negligible increase in thermal resistance as the total thickness of the ceramic is approximately the same when using two thinner substrates as opposed to one thick substrate. The approach, while more complicated to implement than a single substrate, is less complicated than some of the proposed modifications to the metal-ceramic interface in [4], [11], [12]. A summary of all the benefits and challenges of the discussed geometric alteration techniques is provided in Table 1.

3 Review of Material Alterations

Several key material alterations have been proposed in the literature to assist in mitigating PD risk. These techniques comprise primarily of modifying the permittivity and conductivity of the materials either globally or locally.

	Ceramic Thickness	Metal Offset	Pad Size	Pad Corner Radius	Embedded Metal	Overhang Metal	Trench	Stacked Substrates
PDIV	Moderate	Low	Low	Moderate	Moderate	Moderate	Moderate	High
Complexity	Low	Low	Low	Low	High	High	High	Moderate
Cost	Moderate	Low	Moderate	Low	High	High	High	High
Power Density	High	High	Low	Moderate	High	High	High	High
Thermal Resistance	High	Low	Low	Low	Moderate	Moderate	Moderate	Moderate

Table 1: Summary of Benefits and Challenges of Geometric PD Mitigation Techniques

3.1 High-Permittivity Encapsulants

Two techniques exist for implementing high-permittivity encapsulants: homogeneous and non-homogeneous. Homogeneous encapsulants exhibit high permittivity uniformly throughout the material, such as 3M™ Novec™ as proposed in [15]. In this study, the authors compared different versions of the liquid encapsulant with different permittivities and found that by increasing the permittivity by a factor of four, the PDIV could be increased by as much as 22 %; however, this effect also showed diminishing returns. More work is needed to determine the physical relationship between permittivity and non-linear electric field formation, and the extent to which the relationship can be exploited to increase PDIV. Experimentally observing the relationship between non-uniform field formation and permittivity is challenging as modifying the permittivity of the material via additives or other techniques can vary other material properties as well, such as bulk conductivity and dielectric withstand voltage, that also play a role in non-uniform field formation.

The other approach is to increase the permittivity of the encapsulant via an additive (such as barium titanate BaTiO_3 or strontium titanate SrTiO_3) resulting in a non-homogeneous permittivity, where the permittivity varies throughout the material, as demonstrated in [16]. In [16], it was observed that the adding 10 % BaTiO_3 to an encapsulant with a baseline relative permittivity of 6.8, increased the permittivity to 34.9; however, this reduced the breakdown strength of the encapsulant by 66 %, demonstrating that higher permittivity does not always correlate to improved PD performance.

3.2 High-Permittivity Coatings

High permittivity coatings can be used to coat critical triple points as shown in Figure 5. A study conducted in [17] utilized epoxide resin (EP) coatings with relative permittivities ranging from 1 – 100 to alleviate the electric field intensity. It was found that steadily increasing the permittivity improved the PDIV on an upward trend, with a relative permittivity of 20 delivering 42 % higher PDIV when compared to a relative

permittivity of 1. However, the trend begins to drop off as the relative permittivity increases to 100 as the viscosity of the coating becomes too high and voids form around the triple point during the application of the coating.

3.3 Non-Linear Permittivity Coatings

Non-linear permittivity coatings have also been demonstrated where the relative permittivity of the material varies as a function of electric field intensity [18]. In this study, 15 % BaTiO_3 was added to silicone gel, similar to [16], and the gel was applied locally to the triple points as opposed to being used as an encapsulant in [16]. It is important to note that the BaTiO_3 additive only enables a non-linear permittivity under an alternating field stress. At dc, the behaviour is identical to a fixed permittivity coating. The study showed that the 15 % BaTiO_3 additive increased the PDIV by 60 % under ac excitation while also improving the thermal conductivity of the coating by 37 % which helps to reduce heating caused by dielectric losses in the coating.

The dielectric loss is one of the key limiting factors of the approach as it was found that the additive caused 18 times higher dielectric losses (279 W) when compared to the baseline silicone gel with no additive (15 W). The added loss can cause localized heating in the coating which may adversely affect long term reliability.

3.4 Non-Linear Resistive Coatings

Non-linear resistive coatings take another approach to the electric field problem by allowing the electric field to induce a current in the dielectric coating. If the electric field alternates, the induced current, and in turn, the induced magnetic field alternates as well, resulting in an orthogonal electric field that destructively interferes with the incident electric field. This effect causes a reduction in the peak field intensity at the expense of ohmic losses in the coating due to the induced current [19]. This principle has been used extensively in MV cable terminations [20] and has more recently been applied to mitigate PD in MV packages.

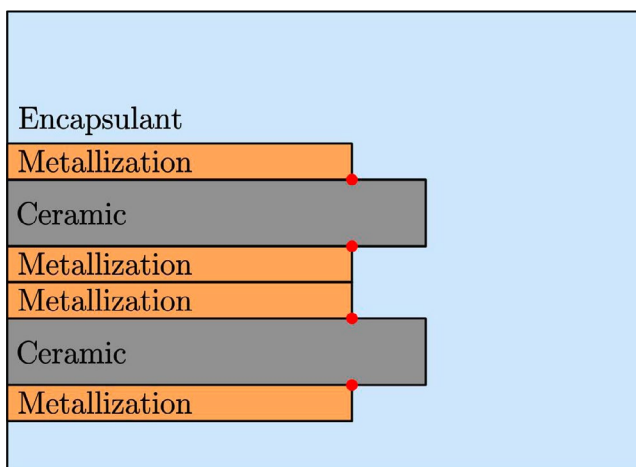


Figure 4: Representation of a stacked substrate topology as proposed in [13] and [14]. Red dots indicate location of peak electric field.

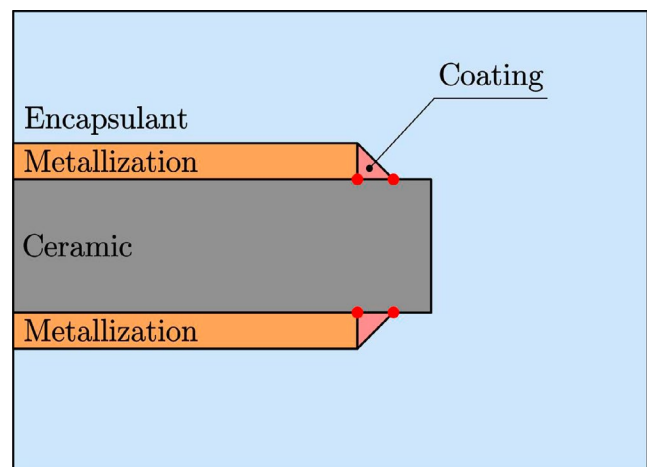


Figure 5: Representation of a coating applied to critical triple points on the package to alleviate electric field crowding. Red dots indicate location of peak electric field.

	High-Permittivity Encapsulant	High-Permittivity Coating	Non-Linear Permittivity Coating	Non-Linear Resistive Coating
PDIV	Moderate	Low	Moderate	High
Complexity	Low	Moderate	Moderate	Moderate
Cost	Moderate	Low	Moderate	Moderate
Limiting Factor	Limited Material Options	High-Viscosity Causes Voiding	Dielectric Loss Causes Local Heating	Ohmic Loss Causes Local Heating

Table 2: Summary of Benefits and Challenges of Geometric PD Mitigation Techniques

In [21], hydrogenated amorphous silicon (a-Si:H) was used as a non-linear resistive field grading coating on substrate triple points and achieved over 100 % increase in PDIV. However, the manufacturing process proved difficult. The coating was applied via a chemical vapor deposition process (CVD), after which the conductivity was modulated using silane (SiH_4) and diborane (B_2H_6). The material properties proved difficult to control throughout the package fabrication process, with the harsh temperature shocks from soldering altering the properties of the coating. In the end, the authors achieved a yield of 23 % on their sample size of 27 substrates.

Simpler coating technologies have also been employed as in [22], where the authors used a coating based on epoxy resin. The authors experimentally demonstrated an 85 % increase in PDIV when compared to an uncoated substrate encapsulated in silicone gel. The makeup of the coating allows it to be applied via CNC extrusion system in normal atmospheric conditions, as opposed to the more expensive CVD process used in [21]. Some details of the material properties are included in the work; however, a more detailed analysis on incurred ohmic loss and the reliability implication are yet to come. A summary of benefits and challenges of the discussed material alteration techniques is shown in Table 2.

4 Conclusion

This work provides an overview of PD mitigation strategies for power module with the motivation of enabling denser packages to better take advantage of new MV WBG devices. In the literature, insulating substrates have been identified as the primary PD risk and the two main classes of techniques for mitigating this risk are geometric alterations and material alterations. Simple geometric alterations such as increasing pad size, corner radius, and metallization offset can have a significant impact on PD performance without causing additional manufacturing or design complexity. However, there are limitations on these techniques as maximizing pad size and radius can adversely affect the power density of small or complicated package with many small pads.

More sophisticated geometric techniques exist for reducing electric field intensity around the metal-ceramic interface such as embedded metal, trenching, overhangs, and stacked substrates. These techniques offer significantly improved PD performance without major impacts to power density. However, due to the added geometric complexity, these techniques can incur significant manufacturing costs and the long-term reliability from a thermomechanical standpoint has yet to be evaluated in the literature.

In addition to geometric alterations, the material properties of the encapsulants, as well as localized coatings, can be varied to improve PD performance. As a general trend, experimentally verifying PD improvement due to material properties is challenging as it can be difficult to independently vary a single material property while keeping others constant. For instance, varying the permittivity of an encapsulant via an additive may have the side effect of modifying the bulk conductivity or dielectric breakdown strength, both of which contribute to the PDIV.

That being said, much work has been done to study the effects of materials with increased and non-linear permittivities, and more recently, non-linear resistivity which has shown to be especially promising. Non-linear resistive coatings have the advantage of low cost and complexity when compared to geometric techniques, like trenching and overhangs, while delivering comparable improvement in PDIV. One major consideration for any resistive coating or encapsulant is the ohmic loss that occurs in the dielectric as a result of the higher conductivity. This loss can cause significant heating of the dielectric which may accelerate degradation and decrease lifetime if not properly managed. Comprehensive, long-term reliability studies of resistive dielectrics have yet to be conducted.

In conclusion, a broad range of techniques have been presented in the literature for mitigating PD risk in medium voltage power modules. Much of the existing literature has focused on the alleviation of electric field stress around the substrate inside the power module. More work is required to refine these technologies as well as explore potential application outside of the power module, such as near the module-busbar interface and around critical control circuitry. Successful mitigation of all PD risk, both inside and outside the power module, without compromising on thermal performance, manufacturing cost, power density, and long-term reliability is paramount to the widespread adoption and commercialization of MV WBG devices.

5 Literature

- [1] E. Van Brunt, D. Grider, V. Pala, S. -H. Ryu, J. Casady and J. Palmour, "Development of medium voltage SiC power technology for next generation power electronics," 2015 IEEE International Workshop on Integrated Power Packaging (IWIPP), 2015, pp. 72–74.
- [2] A. Q. Huang, X. Song and L. Zhang, "6.5 kV Si/SiC hybrid power module: An ideal next step?," 2015 IEEE International Workshop on Integrated Power Packaging (IWIPP), 2015, pp. 64–67.

- [3] J. H. Fabian, S. Hartmann and A. Hamidi, "Analysis of insulation failure modes in high power IGBT modules," Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference, 2005, pp. 799–805 Vol. 2.
- [4] H. Hourdequin, L. Laudebat, M. Locatelli and P. Bidan, "Design of packaging structures for high voltage power electronics devices: Electric field stress on insulation," 2016 IEEE International Conference on Dielectrics (ICD), 2016.
- [5] M. Cairnie and C. DiMarino, "Optimization of Electric-Field Grading Plates in a PCB-Integrated Bus Bar for a High-Density 10 kV SiC MOSFET Power Module," 2021 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2021, pp. 1464–1471.
- [6] M. Cairnie and C. DiMarino, "Bayesian Optimization of PCB-Integrated Field Grading for a High-Density 10 kV SiC Power Module Interface," in IE-EE Transactions on Power Electronics. Early Access.
- [7] C. F. Bayer, U. Waltrich, R. Schneider, A. Soueidan, E. Baer and A. Schletz, "Enhancing partial discharge inception voltage of DBCs by geometrical variations based on simulations of the electric field strength," CIPS 2016; 9th International Conference on Integrated Power Electronics Systems, 2016, pp. 1–5.
- [8] Z. Zhang et al., "Packaging of an 8-kV Silicon Carbide Diode Module with Double-Side Cooling and Sintered-Silver Joints," 2021 IEEE Electric Ship Technologies Symposium (ESTS), 2021, pp. 1–7.
- [9] C. F. Bayer, U. Waltrich, A. Soueidan, E. Baer and A. Schletz, "Partial discharges in ceramic substrates – correlation of electric field strength simulations with phase resolved partial discharge measurements," 2016 International Conference on Electronics Packaging (ICEP), 2016, pp. 530–535.
- [10] T. Ebke, D. Peier and K. Temmen nee Engel, "Influence of manufacturing parameters on the PD-behaviour of AlN-substrates," 1999 Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering, 1999, pp. 224–227 vol.5.
- [11] D. Frey, J. L. Schanen, J. L. Auge and O. Lesaint, "Electric field investigation in high voltage power modules using finite element simulations and partial discharge measurements," 38th IAS Annual Meeting on Conference Record of the Industry Applications Conference, 2003., 2003, pp. 1000–1005 vol.2.
- [12] H. Reynes, C. Buttay and H. Morel, "Protruding ceramic substrates for high voltage packaging of wide bandgap semiconductors," 2017 IEEE 5th Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications (WiPDA), 2017, pp. 404–410.
- [13] O. Hohlfeld, R. Bayerer, T. Hunger and H. Hartung, "Stacked substrates for high voltage applications," 2012 7th International Conference on Integrated Power Electronics Systems (CIPS), 2012, pp. 1–4.
- [14] C. M. DiMarino, B. Mouawad, C. M. Johnson, D. Boroyevich and R. Burgos, "10-kV SiC MOSFET Power Module With Reduced Common-Mode Noise and Electric Field," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 35, no. 6, pp. 6050–6060, 2020.
- [15] C. F. Bayer, U. Waltrich, A. Soueidan, R. Schneider, E. Baer and A. Schletz, "Enhancement of the partial discharge inception voltage of DBCs by adjusting the permittivity of the encapsulation," CIPS 2016; 9th International Conference on Integrated Power Electronics Systems, 2016, pp. 1–5.
- [16] L. L  v  que, S. Diah  m, Z. Valdez-Nava, L. Laudebat and T. Lebey, "Effects of filler content on dielectric properties of epoxy/SrTiO  3 and epoxy/BaTiO  3 composites," 2015 IEEE CEIDP, 2015.
- [17] U. Waltrich, C. F. Bayer, M. Reger, A. Meyer, X. Tang and A. Schletz, "Enhancement of the partial discharge inception voltage of ceramic substrates for power modules by trench coating," 2016 ICEP, 2016, pp. 536–541.
- [18] N. Wang, I. Cotton, J. Robertson, S. Follmann, K. Evans and D. Newcombe, "Partial discharge control in a power electronic module using high permittivity non-linear dielectrics," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 17, no. 4, pp. 1319–1326, August 2010.
- [19] T. Christen, L. Donzel and F. Greuter, "Nonlinear resistive electric field grading part 1: Theory and simulation," in IEEE Electrical Insulation Magazine, vol. 26, no. 6, pp. 47–59, November-December 2010.
- [20] S. Boucher, R. Chambard, M. Hassanzadeh, J. Castellon and R. Metz, "Study of the influence of non-linear parameters on the efficiency of a resistive field grading tube for cable termination," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 25, no. 6, pp. 2413–2420, Dec. 2018.
- [21] G. Mitic, T. Licht and G. Lefranc, "IGBT module technology with high partial discharge resistance," Conference Record of the 2001 IEEE Industry Applications Conference. 2001, pp. 1899–1904 vol.3.
- [22] Z. Zhang, K. Ngo and G.-Q. Lu, "Characterization of a Nonlinear Resistive Polymer-Nanoparticle Composite Coating for Electric Field Reduction in a Medium-Voltage Power Module," in IEEE Transactions on Power Electronics, 2022.



Mark Cairnie,
Graduate Research Assistant, Bradley
Department of Electrical and Computer
Engineering
Center for Power Electronics Systems (CPES),
Virginia Tech



Christina DiMarino,
Assistance Professor, Bradley Department of
Electrical and Computer Engineering
Center for Power Electronics Systems (CPES),
Virginia Tech

T3 Wer startet das Netz der Zukunft nach einem Blackout?

Die fortschreitende Transformation des Elektroenergiesystems erfordert auch Anpassungen in den Netzwiederaufbaukonzepten der Netzbetreiber. Vor diesem Hintergrund bündelt der Übertragungsnetzbetreiber 50Hertz Transmission seine Anstrengungen mit wissenschaftlicher Unterstützung im internen Scientific Advisory Project Board (SAPB). Ein aktuelles Forschungsprojekt widmete sich dem Thema, wie die geplante marktliche Beschaffung von Schwarzstartfähigkeit den Anforderungen der Zukunft gerecht werden kann. Ergebnisoffen wurde evaluiert, wie sich neue Lösungsansätze und Technologien zum Netzwiederaufbau im Rahmen einer transparenten und diskriminierungsfreien Ausschreibung für Schwarzstartfähigkeit umsetzen lassen. Im Folgenden werden zentrale Ergebnisse vorgestellt.

Grundsätzliches Vorgehen beim Netzwiederaufbau

Der Netz- und Versorgungsaufbau nach einer überregionalen oder gar internationalen Störung des elektrischen Verbundsystems erfolgt weitestgehend mit den Kraftwerken und Erzeugungsanlagen, welche vor dem Ausfall in Betrieb waren.

Für den Netzwiederaufbau (NWA) nach einer großflächigen Versorgungsunterbrechung gibt es drei grundsätzliche Wege:

1. Top-Down: Sofern ein funktionsfähiges benachbartes Netz besteht, können von diesem ausgehend die spannungslosen Netzteile sukzessive zugeschaltet werden.
2. Sofern sich Kraftwerke im Eigenbedarf gefangen haben (die Kraftwerke laufen dann ohne Verbindung zum Netz und decken den Leistungsbedarf ihrer eigenen Hilfssysteme), kann von diesen ausgehend ein Netzwiederaufbau erfolgen.
3. Bottom-Up: Andernfalls muss ein Netzwiederaufbau aus eigener Kraft, ausgehend von schwarzstartfähigen Kraftwerken stattfinden.

Um einen NWA gesichert durchführen zu können, existieren aktuell Pläne für den nachfolgend betrachteten Bottom-Up Ansatz, und in diesen Plänen insbesondere Anforderungen an schwarzstartfähige Erzeugungsanlagen (sEZA). Da aus technischen Gründen das Verbundnetz nicht in Gänze unter Spannung gesetzt werden kann, geschieht dieses von den sEZA ausgehend in einzelnen Hochfahrnetzen. Sie werden für den Vorgang zuvor aus dem Verbundnetz isoliert, im Sinne des Blindleistungsbedarfes nahezu auskompensiert und beinhalten noch keinerlei Endkunden. Bei einer sogenannten Spannungsfahrt wird die Spannung ausgehend von einem niedrigen Startwert rampenförmig erhöht, um Inrush-Effekte beim Unterspannungsetzen induktiver Betriebsmittel (Transformatoren und Drosseln) zu vermeiden.

Gemäß aktuell existierender NWA-Pläne werden durch die sEZA große Kraftwerksblöcke in Betrieb versetzt (sog. Partnerkraftwerke), welche notwendige Systemdienstleistungen sowie steuerbare Erzeugungsleistung für den weiteren Vorgang bereitstellen. Derzeit werden überwiegend Pumpspeicherkraftwerke (PSW) als sEZA eingesetzt. Da diese über

einen endlichen Energievorrat verfügen, ist eine Ablösung durch Partnerkraftwerke zwingend erforderlich. Der politisch vorgegebene Ausstieg aus der Kernenergie und der Kohleverstromung führt zu einer Stilllegung nahezu aller heutiger Partnerkraftwerke, was eine grundlegende Überarbeitung vorherrschender NWA-Pläne mit ggf. geänderten technischen Anforderungen an die sEZA bedeutet.

Um die aktuellen EU-Vorgaben einer öffentlichen Ausschreibung und der marktlichen Beschaffung der Systemdienstleistung „Schwarzstartfähigkeit“ zu berücksichtigen, wurde in einem gemeinsamen Projekt ein entsprechendes Verfahren erarbeitet, bei dem neben den derzeitigen Anforderungen an sEZA aus deutschen NWA-Plänen auch internationale Erfahrungen sowie zu erwartende Trends im Technologiemix und in der Erzeugungslandschaft berücksichtigt wurden.

Internationale Entwicklungen und Empfehlungen für die marktlichen Beschaffung

Im internationalen Vergleich haben bereits einige europäische Länder die marktliche Beschaffung eingeführt, z.B. Irland, Belgien und Großbritannien. Im Rahmen des Beschaffungsverfahrens sind die zweistufigen Konzepte, die Großbritannien und Belgien umsetzen, sinnvoll. Anhand der bereitgestellten Informationen der Anbieter prüfen die Übertragungsnetzbetreiber, ob die Angebote, die im Rahmen einer Interessensbekundung eingegangen sind, für ein NWA-Konzept geeignet sind. Anschließend werden die zuvor überprüften und für geeignet erklärten Anbieter offiziell eingeladen, an der Ausschreibung teilzunehmen. Die Beschaffung von sEZA muss immer sichergestellt sein. Daher werden im Einzelfall auch Angebote zugelassen, welche nicht alle technischen Anforderungen erfüllen. Wenn im Rahmen der Ausschreibung keine Anlage alle technischen Kriterien erfüllt, wird für jede angebotene Anlage eine detaillierte Eignungsprüfung vorgenommen. Des Weiteren ist eine parallele Ausschreibung mehrerer Beschaffungsregionen für Schwarzstartfähigkeit (im Folgenden Beschaffungsregionen) empfehlenswert. Das eröffnet die Möglichkeit sEZA auch aus Nachbarregionen zu nutzen, falls es in einer Beschaffungsregion keine geeigneten Anlagen gibt, in der Nachbarregion allerdings mehrere.

In einigen Ländern (z.B. Niederlande) sind die Ausschreibungsprozesse und Kriterien derart konzipiert, dass nur bestimmte Anlagen, normalerweise aus dem bestehenden Konzept z.B. PSW oder gasthermische Kraftwerke (GTKW), geeignet sind (z.B. eine Mindestwirkleistung von 200 MW). Diese Variante ist für die 50Hertz Regelzone nicht empfehlenswert, da neue Teilnehmer notwendig sind, um in allen Netzgebieten einen Netzwiederaufbau zu ermöglichen. Großbritannien, Irland und Belgien fordern keine Mindestwirkleistung und verfolgen einen technologieoffeneren Weg. Ein Überblick über die Kriterien mit beispielhaften Anforderungen an sEZA ist in *Bild 1* gegeben.



Bild 1: Kriterien mit beispielhaften Anforderungen an sEZA in unterschiedlichen Ländern

Trends in der Erzeugungslandschaft

Hinsichtlich der Erzeugungslandschaft sind folgende Trends für den Netz- und Versorgungsaufbau in Zukunft von Relevanz:

- Die Erzeugungsleistung verlagert sich aus dem Übertragungsnetz in die Verteilnetze bei gleichzeitigem Anstieg der Zahl der Anlagen.
- Die Anzahl der Anlagen mit wetterabhängig verfügbarer Erzeugungsleistung steigt, während die Anzahl der Anlagen mit dauerhaft gesicherter Erzeugungsleistung abnimmt.
- Erzeugungs- und Lastzentren entwickeln sich geographisch weiter auseinander.
- Regenerative Erzeugungsanlagen verfügen meist nicht über einen mit Personal besetzten Leitstand vor Ort.
- Die Anzahl umrichtergekoppelter Anlagen steigt, die Anzahl von Anlagen mit direkt gekoppelten Synchrongeneratoren nimmt ab.
- Die maximal verfügbare Erzeugungsleistung übersteigt die maximale Last um ein Vielfaches.
- Abhängig von der Wettersituation können unterschiedliche Transportanforderungen an das Übertragungsnetz auftreten.

Anforderungen an Schwarzstarteinheiten

Die wesentlichen Anforderungen an eine sEZA lassen sich aus bereits international laufenden Ausschreibungsverfahren, dem Beschaffungsverfahren Schwarzstartfähigkeit BNetzA BK6-21-023 und aus Anforderungsgewichtungen deutscher Übertragungsnetzbetreiber zusammenfassen. Zentrale Anforderungen an eine Schwarzstarteinheit sind unter anderem

- ein Netz mittels einer Spannungsfahrt unter Spannung zu setzen,
- Wirk- und Blindleistung in ausreichendem Maße in den jeweiligen Beschaffungsregionen für Schwarzstartfähigkeit zur Verfügung zu stellen,

- sprungartige Belastungsänderung von Wirk- und Blindleistung beim Zuschalten von Betriebsmitteln und Verbrauchern auszuregeln,
- Kurzschlussstrom zur Verfügung zu stellen, um eine sichere Fehlerklärung zu gewährleisten und
- das Vorhandensein schwarzfallfester Kommunikation.

Anforderungen, die für den Schwarzstart grundsätzlich von Nutzen sein können, wie bspw. zusätzliche Regelmodi für die Frequenz-/Leistungsregelung, sind nicht zwangsläufig relevant für die Ausschreibung, aber wertvolle Informationen für die Einschätzung verschiedener Technologiefelder. Zudem ist zu vermeiden, dass Technologiefelder trotz der grundsätzlichen Eignung für den Schwarzstart durch die in der Ausschreibung festgelegten und geforderten Mindestgrößen und Eigenschaften ausgeschlossen werden (Diskriminierungsfreiheit). Aufgrund dieser beiden Punkte ist es förderlich, vorab Informationen zu verschiedenen Technologiefeldern und ihrem Technologiereifegrad in Bezug verschiedenster Anforderungen einzuholen.

Eignung von Technologiefeldern als Schwarzstarteinheit

Die Änderung der Erzeugungslandschaft hat großen Einfluss auf die NWA-Strategie. Neben den marktüblichen, konventionellen Kraftwerken (wie etwa PSW oder GTKW), erlangen auch Großbatteriespeicher zunehmend an Bedeutung. Zudem werden potenzielle Anlagen, die zukünftig aus einer Kombination von Großbatteriespeichern und einem Wind-/PV-Park oder auch einer Biomasseanlage bestehen können (Hybridkraftwerke (HyKW)), bereits in die Betrachtungen miteinbezogen, ohne dass solche Anlagen im großtechnischen Maßstab im Übertragungsnetz bereits bestehen. Während für die marktüblichen Technologien eine Eignung als sEZA bereits erprobt ist, ist die Eignung von Großbatteriespeicher und HyKW erst noch zu bewerten.

Mit Hilfe einer Technologiemarkt werden verschiedene Technologiefelder auf die Erfüllung ausgewählter Anforderungen hin untersucht, um so einen Aufschluss über den Technologiereifegrad zu geben. Der Technologiereifegrad definiert sich hierbei, inwiefern das Technologiefeld grundsätzlich die Anforderungen an die Schwarzstartfähigkeit erfüllen kann und unterscheidet sich damit von der Eignung einer konkreten Anlage als sEZA. Diese Entscheidung muss im Einzelfall auf Grundlage von in der Ausschreibung konkret geforderter Größen resp. Funktionalitäten getroffen werden. Die Anforderungen können dabei unterschiedlich bewertet werden. So werden für numerische Größen, wie bspw. die gesicherte Leistung, der gängige Bereich für das Technologiefeld angegeben. Für andere Anforderungen, insbesondere in Bezug auf Regelmodi, wird nach der technischen Umsetzungsmöglichkeit gefragt. Die Technologiemarkt, deren Schema in *Bild 2* vereinfacht dargestellt ist, ist somit informativ und beabsichtigt einen Überblick zu den Möglichkeiten der Technologiefelder in Bezug auf die Schwarzstartfähigkeit.

Konventionelle Anlagentypen (PSW und GTKW) besitzen i. d. R. aufgrund ihres hohen Technologiereifegrads die meisten Eigenschaften, die für die Schwarzstartfähigkeit erforderlich sind. Hingegen gelten insbesondere für die potenziellen Anlagentypen (Großbatteriespeicher und HyKW) gewisse Einschränkungen und ein höherer Nachrüstungs-/Anpassungsbedarf für vorhandene und zukünftig zu errichtende Anlagen. Die Ausgestaltung und Bewertung der Anforderungen für das Technologiefeld HyKW gestaltet sich herausfordernd. Aufgrund fehlender praktischer Erfahrung liegen teils keine Konzepte vor, was die Bewertung zur Erfüllbarkeit betroffener Anforderungen beeinträchtigt. So gilt die Anforderung an die gesicherte Leistung für HyKW im Gegensatz zu den Großbatteriespeichern als nachrüstbar bzw. bei der Anlagenplanung zusätzlich zu berücksichtigen, weil zukünftig noch Konzepte diesbezüglich ausgearbeitet werden müssen. Da die poten-

ziellen Anlagentypen mit netzbildenden Umrichtern und den erforderlichen Regelmodi an das Netz angeschlossen und betrieben werden müssen, besitzen sie im Gegensatz zur Kopplung mittels Synchronmaschinen bspw. einen eingeschränkten Beitrag zum Kurzschlussstrom. Hier sind gegebenenfalls im Hinblick auf den Netzschutz im Schwarzstartfall gesonderte Konzepte zu entwickeln.

Abhängigkeit von den Gegebenheiten in der Beschaffungsregion

Die Anforderungen an sEZA sind untrennbar mit dem geplanten Vorgehen beim NWA verbunden. In der Realität variieren die technischen Möglichkeiten der einzelnen Beschaffungsregionen mit der lokal vorhandenen Erzeugungsleistung.

Insbesondere die Verfügbarkeit von Partnerkraftwerken ist entscheidend. Sie bestimmt die Möglichkeiten der Ablösung der Schwarzstarteinheit und damit die vorzuhaltende Energiemenge. Zugleich wirken sich die zum Anfahren notwendigen technischen Anforderungen auf die Mindestleistungsfähigkeit der sEZA (bezüglich Wirkleistung und Belastungssprünge beim Zuschalten von Verbrauchern) aus.

Hinsichtlich der Ablösefähigkeit der sEZA durch das Partnerkraftwerk sind dessen netzbildende Eigenschaft sowie dessen Energieverfügbarkeit von Relevanz. Ist das Partnerkraftwerk zur gesicherten Abgabe einer Mindestleistung in der Lage, wird von einer energetischen Ablösefähigkeit gesprochen. Sofern das Partnerkraftwerk außerdem netzbildende Eigenschaften besitzt und die benötigten Systemdienstleistungen bereitstellen kann, kann es die sEZA vollständig ablösen. Andernfalls müsste die sEZA so lange am Netz bleiben, bis Kraftwerke, Erzeugungsanlagen oder Speicher mit ausreichend netzbildenden Eigenschaften mit der Netzeinsel synchronisiert wurden. Sind die Partnerkraftwerke nicht (bzw.

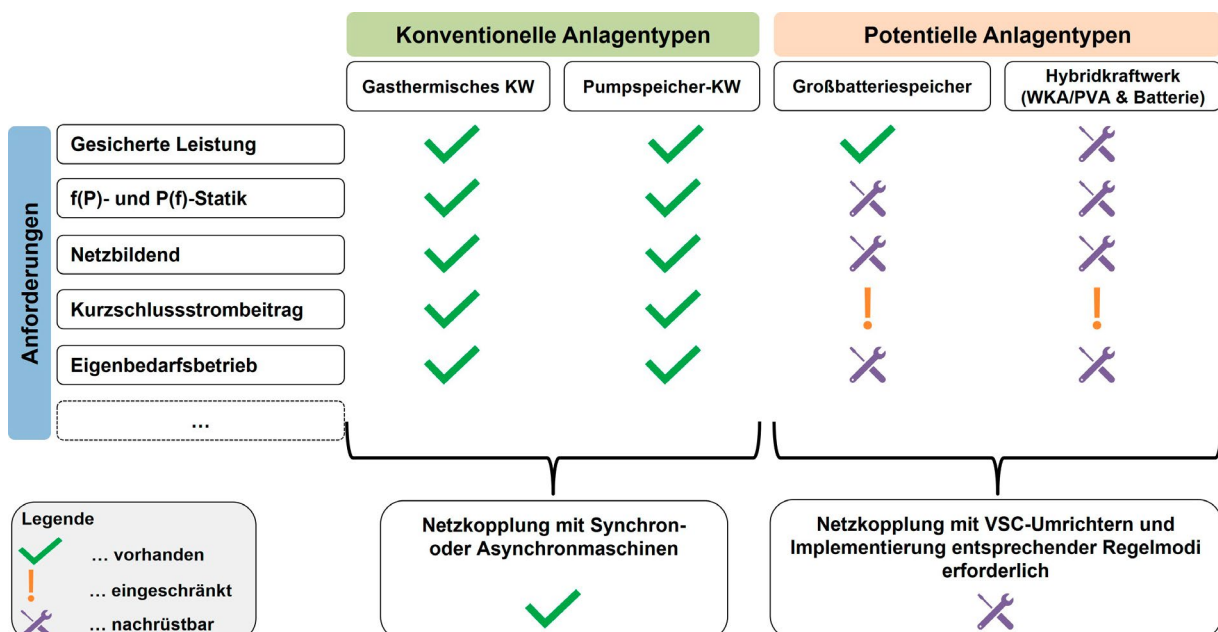


Bild 2: Schema der Technologiemarkt

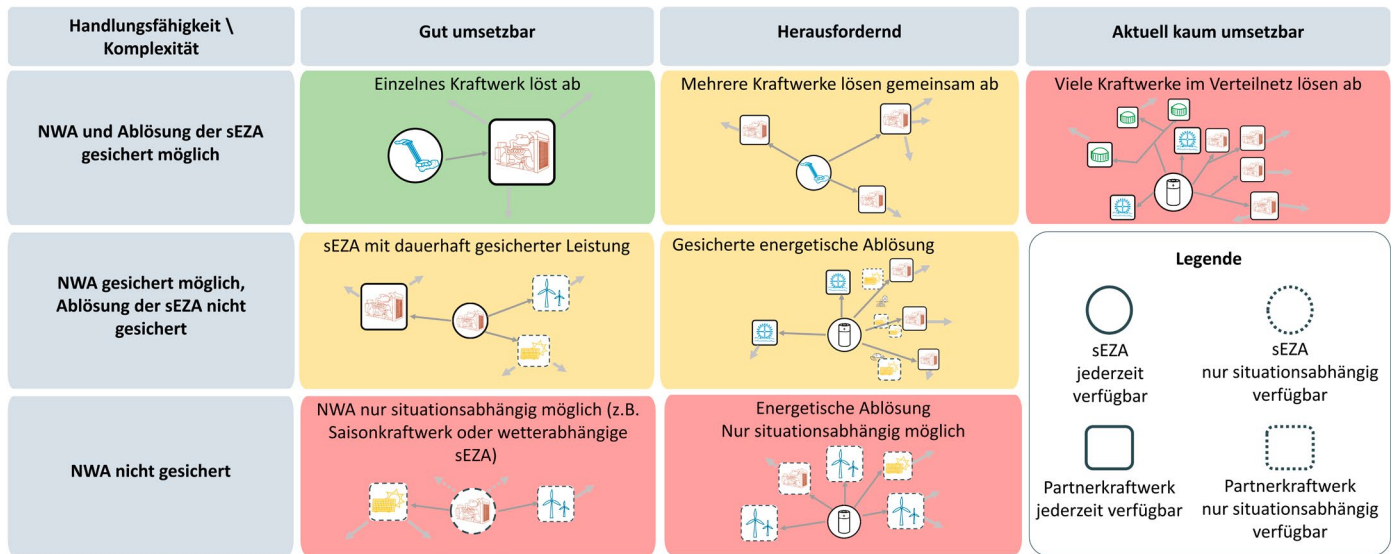


Bild 3: Einordnung von Netzwiederaufbau-Optionen nach Handlungsfähigkeit und Komplexität

nicht immer) in der Lage, die sEZA abzulösen, muss diese dauerhaft betrieben werden können. Ist zumindest eine energetische Ablösung möglich, kann eine solche sEZA auch ein Speicher mit begrenztem Energieinhalt sein. Andernfalls muss die sEZA dauerhaft bzw. sehr lange nennenswerte Leistung abgeben können. Um ein systematisches Vorgehen zu ermöglichen, wurden zunächst Anwendungsfälle (Use-Cases) herausgearbeitet, anhand derer die konkreten (Mindest-)Anforderungen an sEZA sowie weitere wünschenswerte Eigenschaften bestimmt werden können (siehe Bild 3).

Bei einem NWA-Plan kommt es insbesondere darauf an, dass er in jeder Situation (möglichst mit Redundanz) Handlungsfähigkeit gewährleistet und dass der Plan organisatorisch handhabbar ist, wofür insbesondere in der frühen NWA-Phase die Abhängigkeit von möglichst wenigen Partnern von Vorteil ist. Aus diesem Grund sind Partnerkraftwerke mit möglichst großer Bemessungsleistung sowie Anschluss an das Übertragungsnetz anzustreben. In Abhängigkeit der lokalen Verfügbarkeit wird dieses nicht immer möglich sein, weshalb auch Varianten mit kleineren Partnerkraftwerken mit Anschluss an die Verteilnetze berücksichtigt werden. Unter dem Gesichtspunkt der organisatorischen Handhabbarkeit ist ein Einbezug vieler Partnerkraftwerke, die ggf. über verschiedene Netzebenen und Anschlussnetzbetreiber verteilt sind, äußerst herausfordernd.

Fazit:

Die Ausschreibung der Schwarzstartfähigkeit sollte regions- und anwendungsfallspezifisch erfolgen und den verfügbaren Partnerkraftwerken Rechnung tragen. Insbesondere Anforderungen an erforderliche Energie, Blindleistungsbereich und auszuregelnde Laststöße ergeben sich direkt daraus.

Netzwiederaufbauzonen sollten zur Sicherstellung einer geeigneten Beschaffung parallel ausgeschrieben werden. Das eröffnet die Möglichkeit, schwarzstartfähige Erzeugungsanlagen (sEZA) auch aus Nachbarzonen zu nutzen, falls es in einer Zone

keine geeigneten Anlagen gibt, in der Nachbarzone allerdings Mehrere. Da die Beschaffung von sEZA sichergestellt sein muss, können in diesem Einzelfall auch Angebote zugelassen werden, welche nicht alle technischen Anforderungen erfüllen.

Großbatteriespeicher und HyKW können perspektivisch mit entsprechender Konzeption bzw. Nachrüstung, insbesondere netzbildender Regelung, den Anforderungen an Schwarzstartfähigkeit gerecht werden. Dazu ist jedoch jeweils noch eine Prüfung & Spezifikation erforderlich.

Autoren:

- Peter Merk, 50Hertz Transmission GmbH
- Stephan Schulz, 50Hertz Transmission GmbH
- Holger Becker, Fraunhofer Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik (IEE)
- Christian Hachmann, Fraunhofer Institut für Energiewirtschaft und Energiesystemtechnik (IEE)
- Ines Hauer, OVGU Magdeburg, Institut für Elektrische Energiesysteme (IESY)
- Sebastian Glaser, TU Ilmenau, Fachgebiet Elektrische Energieversorgung
- Nadja Isabelle Hiersemann, TU Ilmenau, Fachgebiet Elektrische Energieversorgung
- Sebastian Krahmer, TU Dresden, Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik (IEEH)
- Steffen Schlegel, TU Ilmenau, Fachgebiet Elektrische Energieversorgung
- Dirk Westermann, TU Ilmenau, Fachgebiet Elektrische Energieversorgung
- Peter Schegner, TU Dresden, Institut für Elektrische Energieversorgung und Hochspannungstechnik (IEEH)

T4 A Miniature Replica of an Electrical Power System

Abstract

In this paper, a system is showed, which can control-protect-measure a “power” transformer. The main software of this project runs on a Linux-Real-Time-Preempt-RT Workstation, and it is based on concurrent threads with condition variables as method for synchronisation. The acquisition of signals is performed by an Arduino Due Board with help of additional conditioning boards, these are transferred to the Workstation by USB port. The miniature replica contains one “power” transformer, two “power” circuit breakers, two protection current transformers, two measurement current transformers and one voltage divider. With this miniature replica, it is possible to observe and analyse the hysteresis, saturation and start-up transient currents of the “power” transformer, measure angle between current and voltage, measure the closing and opening time of the “power” circuit breakers, do tests of protection algorithms, quantify the active and reactive power, learn how to calibrate a power system, open or close circuit breakers from the workstation any time, and many others. This miniature replica may not be only useful for universities, institutes, colleges for learning and demonstrating, but also for industry to design and test new algorithms.

Index Terms: real time, power transformer, miniature replica, Linux, measure, control, protect, current transformer, circuit breaker, threads, condition Variable, Arduino, C language.

I. Introduction

Miniature replica techniques are very powerful, as these predict behaviour of large and expensive systems by only investing a small budget.

Systems to control, measure and protect power transformers are very important. Power transformers can cost million dollars. A failure in the power network could cause a high current that could damage the transformer. The protection device guarantees that this asset will not be lost after an electric failure. One important feature of electric protection is the quick response in a given time, little later after the failure started and before the transformer gets burned.

Since the amount of energy that the transformers deliver to the clients is huge, a precise measurement will guarantee the correct billing, technical losses or energy theft detection. Measurement must be performed in a precise manner respecting the timing, in order to accumulate the energy. The only energy that is billed is the active energy, but the reactive energy subtracts capacity. A correct angle measurement, between voltage and current, allows to quantify these energies.

In emergency outage or during scheduled maintenance, the operator should be able to open or close the circuit breakers, but from far away or remotely, because it is very danger-

ous to operate next to the power equipment due to the risk of electric arc or explosion.

The lines explained above have a common requirement: Real Time.

In this project, a miniature replica system was built, that operates in very precise times, guaranteeing the correct operation of the measurement, protection and control of a “power” system.

The second section describes about the selected operating system. A general description of the system is given in the third section. The fourth section contains some tests. Finally, the fifth section lists the conclusions.

II. Selecting The Right Operating System

Since control, protection and measurement require real time features, Microsoft Windows and generic Linux do not qualify for this project, because these are not real time operating systems [9]. We decided to use Linux with Real-Time Kernel-`PREEMPT_RT`, we tested its performance.

The Linux with generic kernel has error of several milliseconds, while the Linux with real time kernel has errors of microseconds or below 1 ms. The following graph shows this timing performance:

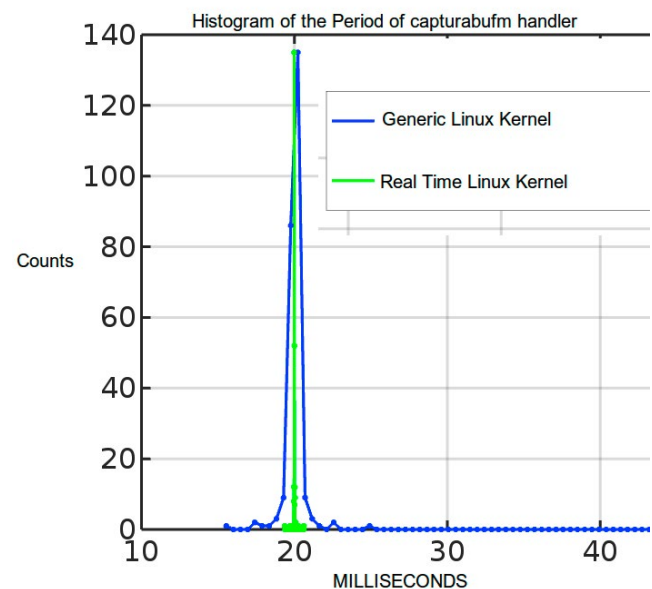


Fig. 1

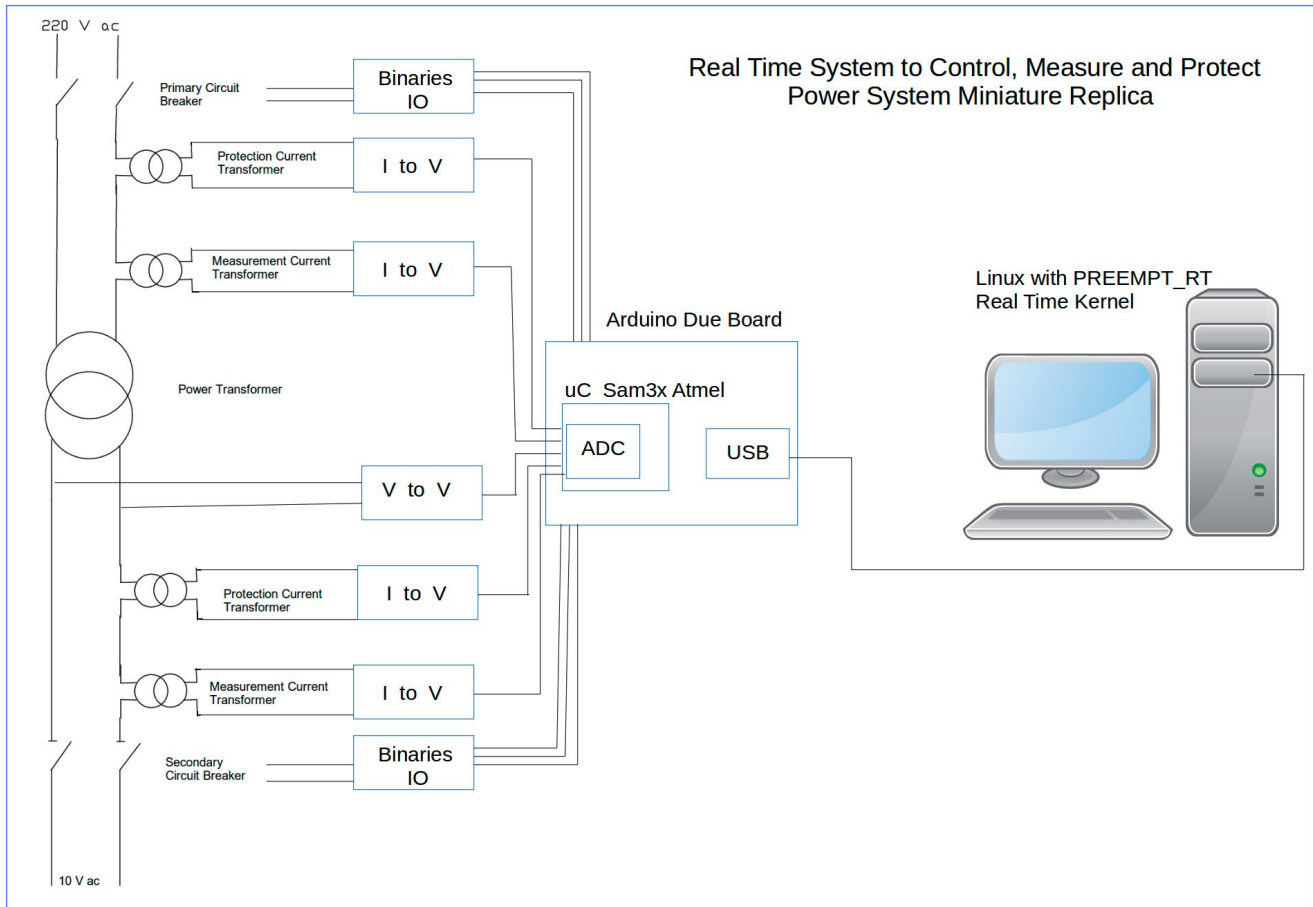


Fig. 2

III. General Description

The main software of this system, based on parallel threads, runs on a workstation and exchanges data every 20.8 milliseconds with the Arduino Board by USB Port.

The acquisition of signals is performed in real time without losing any sample, and with the ability to send commands. The Arduino Board [10] is based on Atmel SAM3X microcontroller, it has a single 12-bit ADC with a multiplexer that switch among 5 analog signals in cyclic way at high frequencies.

Before the analog signals go to the ADC, these are prepared by conditioning boards to ensure safe voltage range and a centered voltage. The sampling frequency is approximately 4663 Hz for each signal. This means around 77 samples per cycle of a 60 Hz sine wave, for each signal.

The binary signals are conditioned in specific boards in order to activate or deactivate the coil of the “power” circuit breakers.

The figure 2 describes the architecture of the system and the figure 3 is the actual photo of the system.

The program running in the Workstation was written in C language, it is based on threads, with high degree of parallelism. The threads use structures as input/output arguments, which allow to use identical code for each type of thread. The primary and secondary side implement fully parallel threads. Extensive use of condition variables for synchronisation and protection of critical section using mutex can be found [1][8].

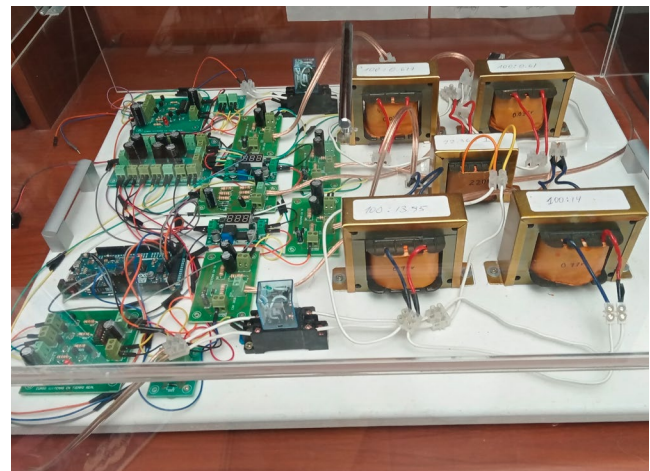


Fig. 3

IV. Tests

These curves show the primary currents (protection and measurement) during the start-up of the “power” transformer with no load at the secondary. The magnetizing current of the transformer lasts around 0.5 seconds.

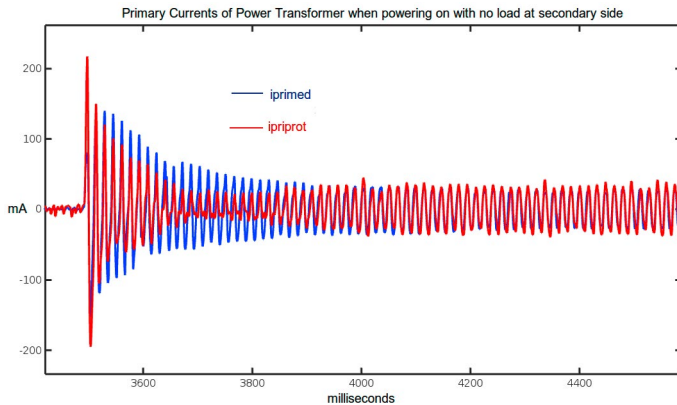


Fig. 4

The next curve shows the hysteresis between primary voltage and current of the “power” transformer:

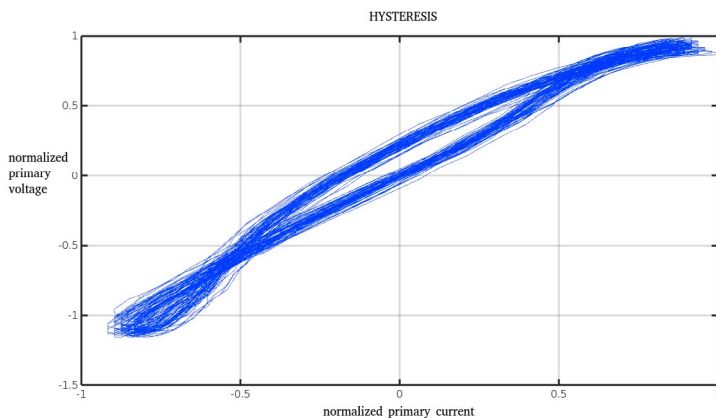


Fig. 5

V. Conclusions

- This research shows the benefits of real-time operating systems over traditional operating systems.
- A real-time system was designed, built and tested to control-protect-measure a “power” system miniature replica. This system opens the door to do many research activities and analysis of electrical power circuits by investing a small budget. Future applications such as voltage regulation, reactive power compensation, differential transformer protection, directional overcurrent protection are some examples, but there should be many others.

- The USB port satisfies the real time requirements of this project.
- With the proposed system, it is possible to record 5 analog channels in parallel and do operations in real time with success.
- The Arduino Due Board with ATMELE SAM3X microcontroller is able to acquire electrical “power” signals with success, specifically fundamental frequency signals.

VI. References

- [1] Eddie Sobrado Malpartida. Class notes. Course: Real Time Systems. PUCP 2018.
- [2] Mark Borgerding. C Libraries of Kiss_fft Fast Fourier Transform. 2010.
- [3] Philip E. Margolis, Peter Darnell. C: a software engineering approach
- [4] Phillip A. Laplante. Real-time systems design and analysis: an engineer's handbook
- [5] Clocks and Timers. Universität Hamburg. https://www3.physnet.uni-hamburg.de/physnet/Tru64-Unix/HTML/APS33DTE/DOCU_007.HTM
- [6] Setting serial port interruption in linux. <https://stackoverflow.com/questions/15119412/setting-serial-port-interruption-in-linux>
- [7] Arduino Due ADC->DMA->USB 1MSPS by stimmer <http://forum.arduino.cc/index.php?topic=137635.msg1136315#msg1136315>
- [8] Butenhof, D. R., 1997. Programming with POSIX Threads. ISBN-10: 0201633922
- [9] Green Hills Website. Real-Time Operating Systems. <https://www.ghs.com/RTOSLeader.html>
- [10] Arduino Due Board <https://store-usa.arduino.cc/products/arduino-due?selectedStore=us>



Claudio San Roman Denegri



Eddie Sobrado Malpartida

The complete version of this paper can be found at https://sudamericaciencia.org/replica_sc.html



T5 VDE Arbeitsmarktstudie 2022 – Elektroingenieurinnen und Elektroingenieure

Der VDE schlägt Alarm: Schon in der Vergangenheit waren Elektroingenieurinnen und -ingenieure ein knappes Gut und hatten bereits durchgehend seit Ende der 1990er Jahre hervorragende Möglichkeiten auf dem Arbeitsmarkt in Deutschland. Doch die aktuellen Herausforderungen wie eine erfolgreiche Energiewende, zunehmende Digitalisierung, Wandel zur Industrie 4.0, Elektromobilität und autonomes Fahren, aber auch die Autarkie Europas in Schlüsseltechnologien wie z. B. Mikroelektronik können nur mit Hilfe dieser immer begehrter werdende Berufsgruppe gemeistert werden. Der Report zeigt, dass Demografie, zunehmende Elektrifizierung / Digitalisierung einerseits zu einem wachsenden Bedarf führen. Andererseits ist das Studienfach *Elektrotechnik und Informationstechnik* bei der nachwachsenden Generation augenscheinlich mit einem

falschen oder gar schlechten Image belegt, so dass dieses Fach seit Jahren immer unbeliebter bei der Studienwahl ist. Hiervon sind insbesondere die deutschen Universitäten betroffen. Von vielen unbemerkt konstatiert der VDE eine seit Jahren linear anwachsende Schwundquote in den Studiengängen *Elektrotechnik und Informationstechnik*, was insbesondere an Hochschulen für angewandte Wissenschaften ein zunehmendes Problem ist. Schlechtes Image und wachsender Schwund führen zu immer weniger Absolvierenden der betreffenden Studiengänge. Der VDE gibt hierzu Evidenzen mittels Auswertung von verfügbarem Zahlenmaterial, aber auch aus eigenen Befragungen. Der Report zeigt aber auch Potenziale zur Verbesserung der Nachwuchssicherung. Entsprechende Maßnahmen sind jedoch nicht zum Nulltarif zu bekommen.

<https://shop.vde.com/de/arbeitsmarkt-studie-2022>

ETG Fachbereich A2

E1 Wabenstruktur zur Elektromobilität (Teil 5)

Im ETG journal 02/2020 wurde diese Artikelserie begonnen. Im Rahmen derer wird der Ansatz des ETG Fachbereich A2 vorgestellt, mit Hilfe einer Wabenstruktur die vernetzten Fragen und Terminologien der E-Mobilität in einem konformen System darzustellen und inhaltlich agil weiterentwickeln zu können. Die Artikelserie ist in 5 Teilen angelegt, in dieser Ausgabe erscheint nun der 5. und letzte Teil.

Der Fachbereich A2 „Bahnen mit elektrischen Antrieben“ der ETG im VDE beschäftigt sich mit dem Gesamtsystem „Elektrische Bahn“ und deckt damit naturgemäß bereits viele Sachgebiete ab, die seit kurzem im Rahmen der Offensive der Elektromobilität (kurz: E-Mobilität) neu diskutiert werden.

Das Gesamtwissen der Elektromobilität ist aber bereits in langer Tradition – seit Vorstellung des ersten elektrischen Schienenfahrzeuges 1879 – sukzessive gewachsen und hat mit der Einführung der Leistungs- und Mikroelektronik in den letzten Jahrzehnten neue, bedeutende Impulse erhalten, die nun für Straßenfahrzeuge im Rahmen der E-Mobilitäts-Offensive ebenfalls breite Anwendung finden.

Viele technische Grundlagen werden durch die sehr zu begrüßende rasante Entwicklung bei den elektrischen Straßenfahrzeugen derzeit im Zuge der Initiativgestaltung neu herausgearbeitet und mit zum Teil abweichender Terminologie in einen neuen Kontext gestellt, so dass eine schlüssige und kohärente Darstellung der Zusammenhänge zuweilen leidet.

Daher hat sich der FB A2 der ETG zur Aufgabe gemacht, die Fragen der E-Mobilität ganzheitlich zu betrachten und zu strukturieren, um die Zusammenhänge und Wechselwirkungen zwischen Technik und Betriebsweisen aufzuzeigen, sowie Gemeinsamkeiten aller elektrisch betriebenen Verkehrsmittel herauszustellen.

Der nachfolgend vorgestellte Ansatz verfolgt dabei das Ziel, eine Art wachsendes „Nachschlagewerk“ zu schaffen,

das zunächst die relevanten Begriffe definiert und erläutert, sodann in einen allgemeingültigen Gesamtzusammenhang stellt und mit entsprechenden Quellen belegen will.

Um dieses Ziel zu erreichen, werden die Zusammenhänge in Form einer Wabenstruktur wiedergegeben. Hierbei lässt sich durch das Hexagonal-Prinzip die Evidenz der Zusammenhänge rein optisch sehr gut darstellen. Die Themen lassen sich darüber hinaus selbst bei mehrfachen thematischen Beziehungen leicht miteinander vernetzen. Ferner können die einzelnen Themenfelder agil entwickelt werden, wenn das „Wissen“ jeder Wabe zudem über das Web bereitgestellt und mit den Anwendern sogar interaktiv fortentwickelt wird. Denn mit jeder Wabe lassen sich im Sinne einer Wissensdatenbank wichtige Quellen aus der Fachliteratur verlinken, so dass nach und nach ein wertvolles und omnipotentes Nachschlagewerk entsteht.

Die Abbildung zeigt die Vorteile der gewählten Strukturierung. Die Anzahl der Satelliten kann bei Erfordernis erweitert werden. Um jede Wabe im Zentrum eines Satelliten, also um jeden Kernaspekt, können weitere Waben für Subthemen, die sich im Laufe der Entwicklung zusätzlich ergeben, angeordnet werden. Die Kernaspekte entsprechen den Hauptkapiteln der Artikelreihe, die Subthemen den Unterkapiteln.

Alle Waben können interaktiv vernetzt und verlinkt werden, so dass die Beziehungen nicht statisch auf Dauer aneinander fixiert sind. Außerdem können bei denjenigen Fällen, in denen sich Subthemen unter verschiedenen Aspekten in mehreren Satelliten wiederfinden sollten, Subthemen natürlich auch mehrfach mit Satelliten (Kernaspekten) verknüpft werden.

Die Wabenstruktur und die hier in Teilen vorgestellten Erläuterungen sind in der Gesamtdarstellung auf der ETG Webseite www.vde.com/etg zu finden.

Mit diesem 5. Teil ist damit die im ETG journal 02/2020 begonnene und sukzessive fortgesetzte Artikelserie abgeschlossen.

8 Energieerzeugung

Im allgemeinen Sprachgebrauch bezeichnet der Begriff Energieerzeugung die Umwandlung der Energie aus verschiedenen primären Energieträgern in Elektroenergie. Aktuell ist ein Übergang von der konventionellen Erzeugung zur Erzeugung aus erneuerbaren Energien zu beobachten. Damit im Zusammenhang steht auch der Übergang von einer zentralen Energieversorgung mit Großkraftwerken zu einem Nebeneinander mit zusätzlichen dezentralen Erzeugern. Diese dezentralen Erzeuger nutzen bereits häufig regenerative Energien.

8.1 Konventionell

In konventionellen Kraftwerken wird der eingesetzte Energieträger – meist Kohle oder Erdgas – zur Erzeugung von Strom beziehungsweise Wärme genutzt. Die Technologien für Gasturbinenkraftwerke, Kohlekraftwerke, Heizkraftwerke und Kernkraftwerke gelten als weitgehend ausgereift. Die Nutzung der Kernenergie wird in Europa und weltweit unterschiedlich gewertet – der Ausstieg aus der Kernenergie in Deutschland ist beschlossen. Mit Blick auf den rasanten Ausbau der erneuerbaren Energien spielen fossil befeuerte Kraftwerke eine zentrale Rolle für eine sichere und witterungsunabhängige Versorgung mit elektrischer Energie solange die Energiespeicherung nicht massiv erweitert wird.

8.2 Regenerativ

Die Erzeugung von Energie aus erneuerbaren Quellen ist eine zentrale Säule der Energiewende. Ihr Ausbau schreitet stetig voran. Wasserkraft ist zurzeit weltweit die wichtigste Quelle für Strom aus erneuerbaren Energien. Die Windenergie ist eine kostengünstige regenerative Energie, die jedoch hinsichtlich der Akzeptanz in der Bevölkerung zuweilen umstritten ist. Solarenergie, Biomasse und Geothermie sind Energiequellen mit großem Wachstumspotenzial.

8.3 Planbar

Die bedarfsgerechte Bereitstellung von Elektroenergie ist eine maßgebliche Prämisse bei der Gestaltung der Energieversorgung. Dementsprechend wurden neben der Grundlastversorgung durch

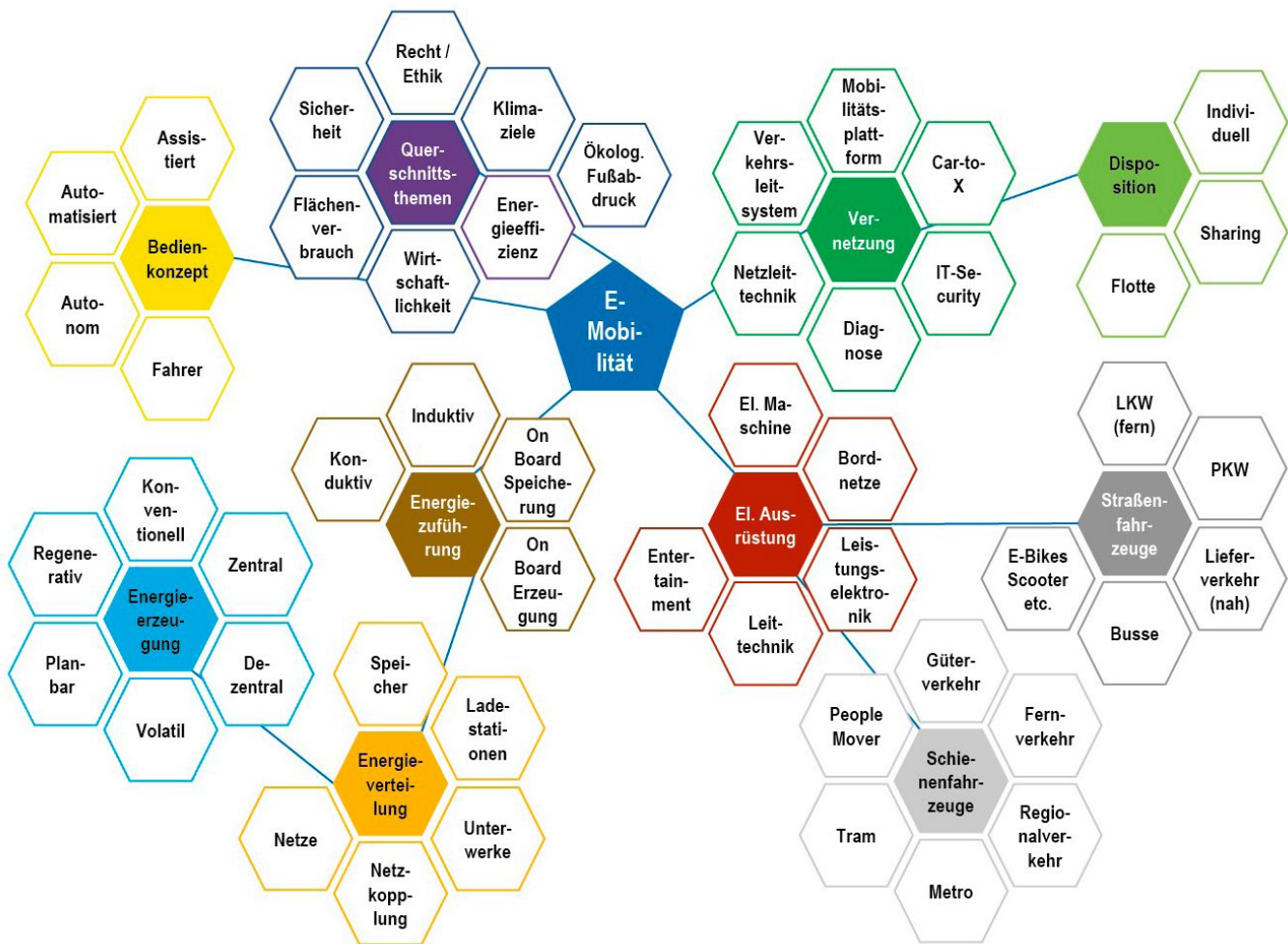


Bild 1: Wabenstruktur zur Elektromobilität

Kohle- und Kernkraftwerke die Spitzenlasten durch Gasturbinenkraftwerke und Wasserkraftwerke gedeckt. Der regenerative Anteil durch die Wasserkraft ist in Deutschland bisher mit etwa 20 % relativ gering. Künftig könnten die Nutzung von Biomasse und Geothermie zu einer bedarfsgerechten Energiebereitstellung beitragen.

8.4 Volatil

Die Ausweitung der Nutzung regenerativer Energien führt zu einer gesteigerten Volatilität in der Energieerzeugung. Die Witterungsabhängigkeit der Windenergie und der Sonnenenergie erfordert einen verstärkten Ausgleich zwischen Erzeugung und Bedarf, z. B. durch leistungsfähige Verteilnetze, die bidirektionale und multilaterale Energieflüsse ermöglichen, und die Nutzung von Energiespeichern.

8.5 Zentral

Die Energieversorgung ist bisher gekennzeichnet durch zentrale Großkraftwerke. Dementsprechend ist die Energieverteilungsstruktur aufgebaut.

8.6 Dezentral

Die Nutzung aller regenerativen Energiequellen erfolgt dezentral. Daher muss die bestehende Energieverteilungsstruktur an die neuen Bedingungen angepasst werden. Sofern der Netzausbau nicht umsetzbar ist, kann durch den Einsatz von Energiespeichern auf der Erzeugerseite und auf der Verbraucherseite nur bedingt ein Ausgleich geschaffen werden.

9 Bedienkonzept

Das Führen von Fahrzeugen bedarf einer Schnittstelle (Man-Machine-Interface „MMI“) zwischen dem Bediener (hier: Fahrer) und dem angetriebenen Fahrzeug (siehe auch Kap. 2.2, 2.3, 2.4 und 2.7).

Die Ausgestaltung dieser Schnittstelle hängt stark vom Einsatzzweck und vom Grad der Automatisierung ab. Je nach dem Grad der Automatisierung wird es möglich, gewisse Aufgaben vom Bediener (Fahrer) auf die Steuerung des Fahrzeuges zu übertragen.

Der Bedienumfang im MMI ist im Individualverkehr naturgemäß geringer als im Öffentlichen Verkehr, weil – neben dem reinen Führen von Fahrzeugen – die Bedienung und Abfertigung der Fahrgäste berücksichtigt werden muss.

Typisch für den spurgebundenen Verkehr ist das Führen von mehreren

Fahrzeugen im Zugverband, weswegen die MMI im führenden, mit dem Bediener (Fahrer) besetzten Fahrzeug, übergeordnete Steuer- und Kontrollfunktionen für den gesamten Zugverband besitzen muss.

Die Automatisierung kann graduell abgestuft sein und dabei auf dem Fahrzeug und streckenseitig lokalisiert sein. Die Lokalisierung der für die Automatisierung wesentlichen Systeme bestimmt die Architektur des Automatisierungssystems und damit letztendlich auch die Betriebsweise:

- Automatisches Fahren (Automatisierung zentral streckenseitig)
- Autonomes Fahren (Automatisierung dezentral in den Fahrzeugen)

Das automatische Fahren hat sich im spurgebundenen Verkehr weitgehend durchgesetzt, weil diese Verkehrssysteme (klassischerweise Bahnen) meist unabhängig geführt sind und durch das vorhandene Zugsicherungssystem bereits gewisse Grundvoraussetzungen bereitstellen. Strecken mit Zugsicherung lassen den Betrieb nur auf begrenzten Fahrstraßen mit definierten Raumabständen zu, die gegen Flankenfahrten bei Abzweigen und Kollisionen anderer Fahrzeuge auf der eigenen Fahrstraße geschützt werden. Zudem sind die Fahrzeuge so beeinflussbar, dass davon abweichende Fahr- und Betriebsweisen unterbunden werden. Der gesamte Betrieb ist also einer zentralen Automatisierung bzw. einem Fahrdienstleiter hierarchisch untergeordnet. Die höchste Automatisierungsstufe, die ohne Fahr- und Abfertigungspersonal auskommt, stellt „AGT“ (Automatic Guided Transport) dar.

Demgegenüber funktioniert das autonome Fahren nach dem umgekehrten Prinzip, der Multi-Master-Steuerung. Viele Fahrzeuge sind gleich berechtigt und in Bezug auf Fahrweg und -ziel selbstbestimmt. Deren Fahrweise wird durch die integrierte, dezentrale Automatisierung dadurch bestimmt, dass um das Fahrzeug ein „Schutzraum“ eingehalten wird. Dieses Prinzip kann auf eine übergeordnete Steuerung verzichten, benötigt jedoch eine komplexe Sensorik an Bord und für eine hohe Performanz eine sehr leistungsfähige, multilateral ausgerichtete Kommunikation mit den jeweils lokal vorhandenen „Partner“-Fahrzeugen.

Bei automatischem Fahren müssen die Steuerungs- und Kontrollfunktionen sehr weitgehend an ein zentrales Dispositions- und Kontrollzentrum übertragen werden. Bei rein manuellem, oder autonomen Betrieb reicht es aus, wenn dieses Zentrum nur dispositive Aufgaben zur Unterstützung einer hohen Betriebsqualität übernimmt.

Die Wahl zwischen einem Betrieb mit autonomen Fahrzeugen und AGT-Fahrzeugen ist aufgrund der spezifischen grundsätzlichen technischen Vor- und Nachteile bestimmt durch:

- die Art der transportierten Personen und der Transportgüter
 - stehende oder sitzende Fahrgäste
 - Fahrgäste mit Kinderwagen, Rollatoren, etc.
 - Güterzüge mit Flüssigkeiten (Aufschaukeln in langen Tankwagen-Zügen?!)
- die Reaktionsfähigkeit der Fahrzeuge
 - zulässige bzw. technisch mögliche Beschleunigungen und Verzögerungen (zwischen PKW und Güterzügen liegen Größenordnungen!)
 - Betriebsregime (Fahren auf Sicht ⇔ Fahren mit technischer Sicherung)
 - Art der technischen Sicherung (Fahren auf flexiblen Abstand ⇔ starre Fahrabstandsregelungen)
- die Transportkapazität der Fahrwege
 - Hochausgelastete Strecken ⇔ geringbelastete Nebenstrecken

- hochleistungsfähige, aber abgegrenzte Trassen
- Staueffekte zulässig ⇔ exakt terminierbare Fahrten erfordert
- die spezifischen vorhandenen und von den Nutzern maßgeblich erwarteten Systemeigenschaften
 - individuelle Gestaltbarkeit von Fahrt-Mission und Fahrweg
 - Planbarkeit der Fahrt (Fahrplan)
 - spezifischer Platzbedarf (auch ruhender Verkehr: Parken und Abstellen)
 - Wahrnehmbarkeit und Priorität im Umfeld verschiedener Verkehrsmode (unabhängige Trassen)

Beide Automatisierungsphilosophien, „AGT“ und „Autonomes Fahren“, haben ihre Daseinsberechtigung und spezifischen Vorteile, aber grundsätzlich unterschiedliche Architekturansätze. Perspektivisch werden Fahrzeuge, die heute auf Sicht fahren, in (ferner) Zukunft sehr wahrscheinlich autonom fahren; Fahrzeuge mit sehr langen Bremswegen und langen, aber variierenden Zuglängen werden automatisch, aber nicht autonom fahren.

In *Tabelle 1* und den nachfolgenden Unterkapiteln 9.1–9.3 wird bei der Untergliederung die Skalierbarkeit der Automatisierung betont – und zwar in der Bandbreite von Assistenzsystemen bis hin zu Systemen für Autonomen bzw. Automatischem Betrieb:

Autonomes Fahren skaliert mit den nachfolgenden Modi	Automatischer Betrieb, skaliert nach GoA – Grade of Automation (DIN EN 62290)
Fahrer-Betrieb auf Sicht	GoA 0: Fahren auf Sicht
Fahren mit Assistenz-Systemen (Abstandsregelung, Kollisions-/Signalwarnungen, etc.)	GoA 1: Nicht automatischer Fahrbetrieb Fahren mit Zugsicherung
	GoA 2: halbautomatischer Fahrbetrieb, Automatisches Fahren/Bremsen
Autonomes Fahren	GoA 3: fahrerloser Fahrbetrieb, Automatisches Fahren/Bremsen + Hinderniserkennung
Autonomes Fahren bei ÖV-Fahrzeugen	GoA 4: unbegleiteter Fahrbetrieb, Automatisches Fahren/Bremsen + Hinderniserkennung + Fahrgastabfertigung (Türen)

Tabelle 1

GoA – Grade of Automation	Strecke	Fahrzeug
GoA 0: Fahren auf Sicht	Keine erforderlich	Keine erforderlich
GoA 1: Nicht automatischer Fahrbetrieb Fahren mit Zugsicherung	Fahrsperre, GÜ	Fahrsperre
GoA 2: halbautomatischer Fahrbetrieb Automatisches Fahren/Bremsen	ATC, Fahrsperre, GÜ	ATO, ATP
GoA 3: fahrerloser Fahrbetrieb Automatisches Fahren/Bremsen + Hinderniserkennung	ATC Hinderniserkennung (Eindringüberwachung, Bahnsteiggleis-Überwachung)	ATO, ATP
GoA 4: unbegleiteter Fahrbetrieb Automatisches Fahren/Bremsen + Hinderniserkennung + Fahrgastabfertigung (Türen)	ATC Hinderniserkennung (Eindringüberwachung, Bahnsteiggleis-Überwachung)	ATO, ATP, Erweiterte Tür- Sicherheitsfunktionen

Tabelle 2 *Legende: ATC = Automatic Train Control (Steuerung für automatischen Bahnverkehr); ATO = Automatic Train Operation (System zum automatischen Fahren und Bremsen); ATP = Automatic Train Protection (erweiterte Form der Fahrsperre: Zugsicherungseingriff auf Fahrzeugbremse); GÜ = Geschwindigkeitsüberwachung mit Zugsicherungseingriff auf Fahrzeugbremse*

9.1 Fahrer

Den geringsten Grad der Automatisierung stellt der klassische Betrieb mit Fahrer dar. Dem Fahrer obliegt die Ausübung aller erforderlichen Fahr- und Steuertätigkeiten; er trägt die volle Verantwortung für alle in diesem Rahmen sicherheitsrelevanten Steuerfunktionen. Für eine Betriebsqualität und -stabilität setzt dies beim Fahrer im Falle fehlender Assistenz- und Automatisierung entsprechende Kenntnisse und eine hohe Erfahrung voraus.

Der Fahrerbetrieb ist außerdem die einfachste und üblichste Rückfallebene bei Ausfall aller nachfolgend beschriebenen Automatisierungsgrade.

9.2 Assistiert

Assistenzsysteme sind als niedrigste Automatisierungsstufe sowohl vor dem Hintergrund von Autonomen bzw. Automatischem Betrieb denkbar. Dieser Grad der Automatisierung erfordert zwingend einen manuellen Betrieb, bei dem der Fahrer die volle Verantwortung für alle sicherheitsrelevanten Steuerfunktionen inne hat.

Die Assistenzsysteme ermöglichen ihm eine entspanntere Ausübung der Fahr- und Steuertätigkeit, oder eine Verbesserung der Betriebsqualität und -stabilität. Typische Applikationen in diesem Kontext sind beispielsweise:

- Bei Fahrten mit Zugsicherung bzw. zentraler Automatisierung → Tendenz automatischer Betrieb:

- Vorgabe der Richtgeschwindigkeit, u. a. in Abhängigkeit von Fahrplan und Streckenbelastung
- Vorgabe der Bremspunkte, oder der Zugkraft-Abschaltpunkte
- Vorgaben für eine energieoptimale Fahrweise
- Automatische Koordination der verschiedenen Bremssysteme
- Bei Fahrten ohne Zugsicherung bzw. zentrale Automatisierung → Tendenz autonomer Betrieb:
 - Signalvorhersagen durch die MMI in Abhängigkeit von Fahrplan und Streckenbelastung
 - Abstandswarnung, u. a. bei Rückwärtsfahrten
 - Kollisionswarnung
 - Vorgaben für eine energieoptimale Fahrweise
 - Vorgaben für eine komfortable Fahrweise (Beschleunigungs- und Ruckbegrenzung, geringe Querbeschleunigung)
 - Assistenz für besondere Fahrsituationen, z. B. Einparkhilfe

Fahrerassistenzsysteme sind als Vorstufe des autonomen Fahrens zu sehen, kommen nach Definition der DIN EN 62290 eher einer Art „GoA 0a“, oder „GoA 1a“ gleich

9.3 Automatisiert

Unter dieser Überschrift und zur Abgrenzung vom folgenden Kap. 9.4 wird hier ein Automatisches Fahren verstan-

den – also ein selbstständiges, *aber durch eine zentrale Steuerung / Regelung geführtes Fahren. Fahrzeuge (Slaves) werden von 1 zentralen Master angesteuert.*

Im Extremfall korreliert dies mit einem Betrieb mit einem verbindlichen Angebot, das zu festgelegter Zeit auf spurgeführter Strecke über eine zentrale technische Instanz bereitgestellt wird. Dieser Betrieb benötigt im Extremfall keinerlei Personal und ist unter dem Begriff „AGT – Automatic Guided Transport“ und in der der DIN EN 62290 als GoA 4 definiert.

Spezifische Vorteile dieser Betriebsweise ergeben sich in hochverdichteten Ballungsräumen, klassisch in Stadtzentren oder im Werksverkehr, wo die zentrale Lenkung und Bereitstellung hochgebündelter Verkehrsströme sinnvoll ist. Diese Betriebsweise ist bei Beförderung von Fahrgästen als klassischer öffentlicher Nahverkehr (ÖPNV) bekannt.

Für Fahrzeuge des Bahnverkehrs, die mit einer (skalierbaren) Automatisierung auf Basis der zentralen Instanz einer Zugsicherung verkehren, wurde mit der Norm DIN EN 62290 und durch die UITP (Weltverband der öffentlichen Verkehrsbetriebe) der GoA – Grade of Automation definiert. *Tabelle 2* liefert eine Betrachtung der GoA-Stufen mit Fokus auf die mindestens erforderliche Automatisierungs-Ausrüstung für Fahrzeuge und Strecke.

9.4 Autonom

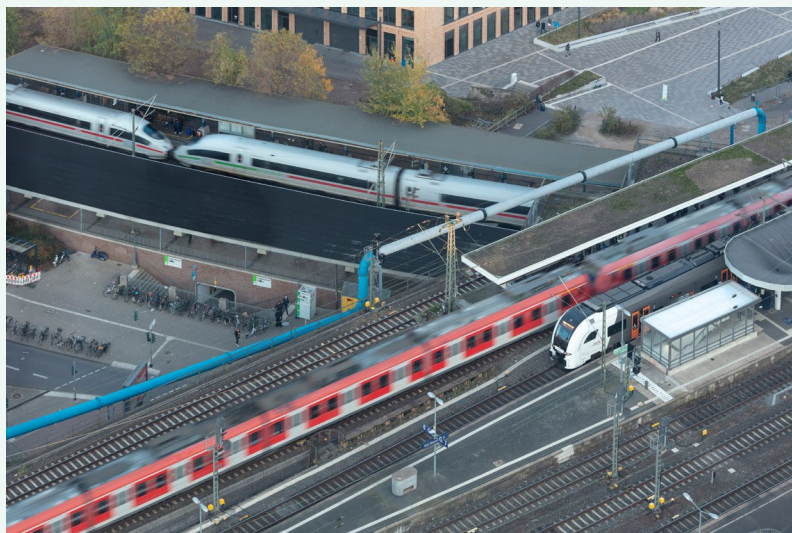
Der Begriff kommt aus dem Griechischen: *αὐτο-νομοσ* = nach eigenem Gesetz, selbstständig, unabhängig. Diese Betriebsweise ist *dadurch gekennzeichnet*, dass die Intelligenz der Automatisierung und die *komplette Steuerung/Regelung dezentral im Fahrzeug* verortet ist. Autonom geführte Fahrzeuge müssen sich mit anderen Fahrzeugen arrangieren und operieren nach einem Multi-Master-Prinzip.

Im Extremfall korreliert dies mit einem Betrieb, der vollkommen selbstbestimmt, zu beliebiger Zeit auf beliebiger Strecke stattfinden kann – auf Wunsch eines *einzelnen* Bedarfsträgers, der aber im Extremfall zudem mit Fahr- und Steuerungstätigkeiten nicht mehr betraut sein muss. Um die heutige Performanz von Fahrer-gesteuerten Systemen zu erreichen, ist eine sehr effektive dezentrale Sensorik und Regelung, aber auch eine hocheffektive Multi-Master-Kommunikation mit geringsten Latenzen erforderlich. Um einen diskriminierungs-freien und – last but not least – sicheren Betrieb aller autonom verkehrenden Verkehrsteilnehmer sicherzustellen, bedarf es einheitlicher, multilateraler Kommunikationsmodelle und -schnittstellen.

Spezifische Vorteile dieser Betriebsweise ergeben sich für ländliche Räume, am Stadtrand, bei geringen Verkehrsdichten oder stark divergierenden Zielen der Bedarfsträger von volatilen Fahrmissionen (quasi „individuelle spontane Fahrgäste“); diese Betriebsweise ist im Extremfall als klassischer Individualverkehr definiert, aber bereits fahrerlos.

Autoren:

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



© Deutsche Bahn AG / Axel Hartmann

Call for Papers

E2 Rail.S/VDE-Symposium: Elektrische Fahrzeugantriebe und -ausrüstungen

1.–2. Dezember 2022 | Dresden

Elektrische Bahnen sind angesagter denn je: Neben fortschreitender Elektrifizierung haben seit der letzten Fachtagung „Elektrische Fahrzeugantriebe und -ausrüstungen“ verschiedene Fahrzeugserien mit alternativen Antrieben die Validierungsphase abgeschlossen oder sind bereits in Betrieb. Daraus ergeben sich zwangsläufig komplexere Gesamtsysteme in Wechselwirkung mit den Antriebssystemen

Im Sinne der Nachhaltigkeit stellen sich Fragen, wie man notwendige Modernisierungen vereinfacht, und mittels intelligenter Instandhaltung die Lebenszykluskosten gesenkt werden können.

Mit diesen Schwerpunkten soll das Themenfeld des Symposiums über die Antriebstechnik hinaus erweitert werden.

Aufruf zu Vorträgen

Der Programmausschuss bittet alle Fachkolleginnen und -kollegen um aktive Teilnahme und Einreichung von Vorträgen, die folgende Schwerpunkte beinhalten:

- Betriebserfahrung mit alternativen Antrieben
- Komplexe Gesamtsysteme in Wechselwirkung mit den Antriebssystemen
- Digitale Schiene und elektrische Fahrzeugkomponenten
- Intelligente Instandhaltung zur Senkung der Lebenszykluskosten
- Aktuelle Entwicklungen bei Komponenten und Subsysteme

Interessenten werden gebeten, die Kurzfassung bis zum **17. Juni 2022** unter www.vde.com/antriebe-2022 einzureichen.



© contrastwerkstatt / stock.adobe.com

E3 Wahl des ETG Vorstands für die Amtszeit 2023–2025

Sehr geehrtes ETG Mitglied,

wir freuen uns sehr, dass wir für die Wahl des ETG Vorstands für die Amtsperiode 2023 bis 2025 neben zwei Vorständen aus der aktuellen Amtsperiode, zehn weitere hervorragende Expertinnen und Experten der Energietechnik für eine Kandidatur gewinnen konnten.

Informieren Sie sich über die Kandidatinnen und Kandidaten unter www.vde.com/etg-vorstandswahl-vorschlagsliste. Die Vorschlagsliste ist exklusiv für ETG Mitglieder sichtbar (bitte anmelden, s. unten).

*Die Wahl wird online durchgeführt. Ihre Stimmabgabe ist ab sofort **bis zum 15. Juli 2022, 18:00 Uhr** möglich: www.vde.com/etgwahl. Pro Gruppe können Sie maximal zwei Stimmen abgeben.*

Bei Klick auf den Link „Zum Wahlformular“, werden Sie aufgefordert, den Nutzernamen und das Kennwort Ihres VDE Accounts einzugeben. Bitte verwenden Sie als Nutzernamen Ihre E-Mail-Adresse. Informationen zum VDE Account (Nutzernamen, Kennwort, persönliche E-Mail-Adresse) finden Sie unter www.vde.com/login

Für den Fall, dass Sie eine **Briefwahl** bevorzugen, fordern Sie jetzt Ihre Wahlunterlagen bei der ETG Geschäftsstelle an. Bitte senden Sie Ihre Briefwahlstimme rechtzeitig ab; **Einsendeschluss ist der 15. Juli 2022** (Posteingang Geschäftsstelle). Wir freuen uns auf Ihre Stimmabgabe.

Das Wahlergebnis wird auf der ETG Homepage, im ETG journal, im VDE dialog und in der etz veröffentlicht.

Nehmen Sie Ihr Wahlrecht wahr und gestalten Sie die Zukunft der ETG mit!

Mit freundlichen Grüßen



Dr.-Ing. Michael Schwan
Siemens AG
Vorsitzender des Wahlausschusses

Die Kandidaten und Kandidatinnen

Gruppe Elektrizitätsversorgung (öffentliche und industrielle)



Dr. Andreas Hoffknecht (51)
Geschäftsführer Technik
DB Energie GmbH



Thomas Murche (48)
Mitglied des Vorstandes
WEMAG AG



Dr.-Ing. Stefan Küppers (59)
CTO – Vorstand Technik
Westenergie AG



**Dipl.-Ing. (FH)
Richard Tretter (54)**
Leiter Energie- und Netz-
wirtschaft, Stadtwerke München
GmbH, München

© Christoph Meyer,
paperheroes

© Privat

Gruppe Industrie



**Dr.-Ing. Dipl. Wirtschaftsing.
Britta Buchholz (51)**
VP Aktive Verteilnetze,
Global Market Innovation
Hitachi Energy



Prof. Dr.-Ing. Jutta Hanson (54)
Leiterin des Fachgebiets
Elektrische Energieversorgung
unter Einsatz Erneuerbarer Ener-
gien (E5), Technische Universität
Darmstadt



Ben Gemsjäger (37)
Direktor Business Development
Europe Siemens AG (Nürnberg),
Siemens Grid Software, NextGen
Grid Management



Prof. Dr. Marco Jung (38)
Professur für Elektromobilität und
elektrische Infrastruktur,
Schwerpunkt: Leistungselektronik
Hochschule Bonn-Rhein-Sieg
Fraunhofer Institut für Energiewirt-
schaft und Energiesystemtechnik



Dr.-Ing. Karsten Viereck (63)
Director Technology Automation
Maschinenfabrik Reinhausen
GmbH, Regensburg



Prof. Dr. sc. Andreas Ulbig (40)
Institutsleitung am Institut für
Elektrische Anlagen und Netze,
Digitalisierung und Energiewirt-
schaft (IAEW) RWTH Aachen



Dr.-Ing. Thomas Weber (58)
Leiter Netzplanung DACH
Schneider Electric GmbH



**Prof. Dr.-Ing.
Hendrik Vennegeerts (48)**
Leiter des Fachgebiets elektri-
sche Energiesysteme (eES)
Universität Duisburg-Essen

© Privat

© Privat

© IAEW

© Universität Duisburg-Essen

© Privat

© Carina Kircher

© Siemens AG

© Maschinenfabrik Reinhausen

© Privat

ETG Task Forces

E4 Aktiver Netzbetrieb — Ein Zwischenbericht der ETG Task Force „Hochautomatisierung von Nieder- und Mittelspannungsnetzen“

Einleitung

Im letzten Jahrzehnt wurden zahlreiche Arbeiten und Studien zu den kommenden Herausforderungen im Nieder- und Mittelspannungsverteilnetz veröffentlicht [1] [2] [3] [4]. Der VDE Beitrag „Systematisierung der Autonomiestufen in der Netzbetriebsführung“ [5] nennt vier Kernziele von Automatisierung:

1. Beherrschbarkeit der zunehmenden Komplexität des Netzbetriebes bedingt durch die steigende Anzahl aktiver Netzelemente
2. Vermeidung und Verzögerung von Netzausbau durch Steigerung der Übertragungsfähigkeit bestehender Netze
3. Effizienter Personaleinsatz für Tätigkeiten, die nicht automatisiert werden können
4. Umsetzung regulatorischer Anforderungen und Minimierung von Markteingriffen

Abhängig vom Fokus der jeweiligen Veröffentlichungen werden in den vorangegangenen Studien ebenso diese Kernziele genannt. Sie alle vereint die Aussage, dass Digitalisierung und Automatisierung im Verteilnetz unabdingbar sind, um die o.g. Ziele zu erreichen.

Gleichzeitig stellen wir fest, dass die überwiegende Anzahl an Verteilnetzen in Deutschland in der Autonomiestufe 0 zu verorten sind. Das heißt, dass „die Systemführung auf Basis von Melde-/Messinformationen Entscheidungen über Sollwerte [trifft] und setzt diese manuell, ferngesteuert um“. Die Stufen 0a „Observability“, d.h. Beobachtbarkeit und Ob „Controlability“, d.h. Steuerbarkeit sind nur in geringem Umfang realisiert. Ein höherer Automatisierungsgrad ist bisher lediglich in Form von Pilotanlagen, jedoch nicht flächendeckend umgesetzt.

Die ETG Task Force hat sich zur Aufgabe gemacht, die Ursachen für diese Diskrepanz herauszuarbeiten und Handlungsempfehlungen zur Umsetzung höherer Automatisierungsgrade in Nieder- und Mittelspannungsnetzen abzuleiten. Darauf aufbauend wird eine Vision für hochautomatisierte Netze entwickelt. Es soll eine Roadmap erarbeitet, sowie mögliche Forschungs- und Entwicklungsfelder identifiziert werden.

Erweiterte Beobachtbarkeit und Steuerbarkeit als Voraussetzung

Automatisierung im Allgemeinen benötigt Eingangsdaten, also Sensordaten sowie Aktuatorik, also regelbare oder (fern-) steuerbare Betriebsmittel. Ersteres wird als Zustandserfassung oder Observability, letzteres als Controlability bezeichnet. Beide Themen werden von der Task Force als notwendige Voraussetzungen für Automatisierung bezeichnet. Sie sind also erste Schritte, ohne die weitergehende Automatisierung nicht möglich sein wird.

Bei Automatisierung steht darüber hinaus immer der Prozess im Fokus, den es zu automatisieren gilt. Dieses können bestehende Prozesse sein, die derzeit mit hohem manuellem Aufwand durchgeführt werden, oder zukünftige Prozesse. Bei zukünftigen Prozessen liegt das Augenmerk auf der grundsätzlichen Beherrschbarkeit mit Hilfe von Automatisierung. Die betrachteten Prozesse werden auch Anwendungsfälle von Automatisierungstechnologie oder kurz Use Cases genannt. Die zur Automatisierung notwendige Technologie folgt in dieser Logik dem Bedarf der Prozessautomatisierung.

Zustandserfassung

Observability, oder Zustandserfassung ist in der oben beschriebenen Logik kein Use Case. Sie bildet die Grundlage, um Eingangsdaten für Prozesse zur Verfügung zu stellen. Natürlich wäre es auch möglich die notwendige Zustandserfassung für jeden einzelnen Prozess zu beschreiben. Da viele Anwendungsfälle allerdings auf die gleichen Messwerte und Steuerparameter zugreifen, ist es sinnvoll, das Thema Zustandserfassung ganzheitlich über alle Anwendungsfälle zu betrachten. Hierdurch werden die Fragestellungen allerdings komplex. Auf einer Engineering-Ebene kommt man „vom Hundertsten zum Tausendsten“.

Die Task Force hat sich zum Ziel gesetzt, die Komplexität des Themas zu verringern. Den Lesern und Leserinnen soll ein Handlungsleitfaden an die Hand gegeben werden, welcher sie in die Lage versetzen soll, sich den Anforderungen schrittweise zu nähern. Abhängig von den Anwendungsfällen und einer Qualitätsstufe soll ein Handlungskorridor aufgezeigt werden, siehe Bild 1.

Dieser Handlungskorridor beschreibt möglichst konkret mögliche Technologien, Voraussetzungen und Kernelemente, um die für einen Anwendungsfall notwendige Observability herzustellen.

Controlability

Die Controlability beschäftigt sich wie bereits oben erwähnt mit der Möglichkeit, Betriebsmittel zu regeln oder zu steuern. Hierbei steht vor allem die sogenannte digitale Netzstation im Fokus. Neben der Möglichkeit regelbare Transformatoren einzusetzen, sind es fernschaltbare Schalter, die diese Controlability ermöglichen. Betrachtet werden zunächst die Anwendungsfälle „Betriebliches Schalten“ und „Schalten im Fehlerfall“. Sie gelten als Enabler-Prozesse, die bereits aus heutiger, auch kaufmännischer Sicht zu automatisieren sind. Sowohl die Automatisierung betrieblicher Schalthandlungen als auch die Automatisierung von Teil-Wiederzuschaltungen nach einem Fehler bedingen fernschaltbare Betriebsmittel. Ziel der Task Force ist es, aufzuzeigen, dass eine Automati-

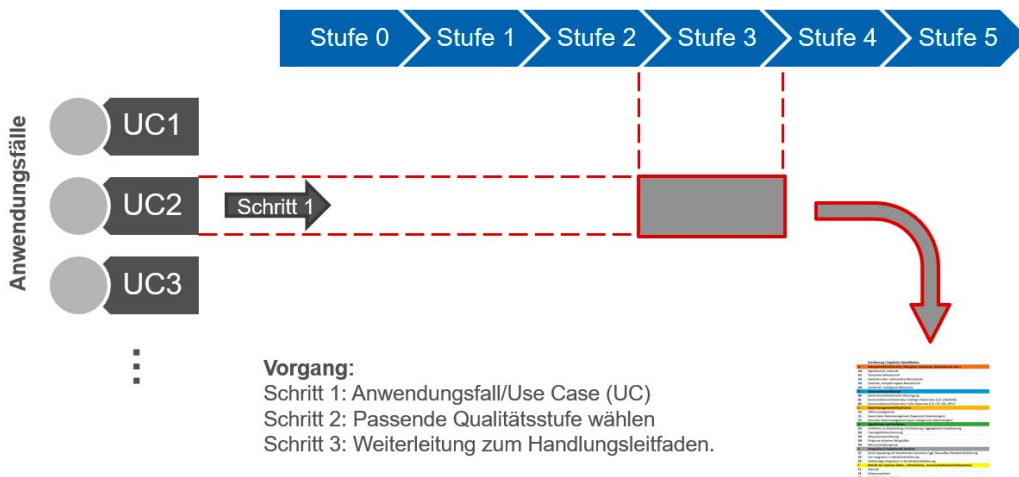


Bild 1: Definition von Qualitätsstufen der Zustandserfassung

sierung beider Anwendungsfälle möglich und auch betriebswirtschaftlich sinnvoll ist. Die Controlability des Netzes ist allerdings erst gegeben, wenn möglichst viele Trennstellen und Mehrfachkupplungen auch von der Ferne oder automatisiert schaltbar sind. Dies ist gleichzeitig auch die Grundlage für weitergehende Automatisierung.

In diesem Zuge werden auch die Anforderungen an eine digitale Netzstation definiert. Diese gilt es, im Vorfeld zu einem Rollout festzulegen, da es sich zum einen um eine hohe Anzahl gleichartiger Stationen handelt und zum anderen diese Stationen über 20 Jahre im Einsatz sind. Insbesondere in der Leittechnikarchitektur dieser Stationen gilt es sicherzustellen, dass zukünftige Anforderungen in bestehende Systeme integrierbar sind. In der Literatur wird häufig auch die Terminologie „Smart Grid Ready“ verwendet.

Aktiver (Verteil-)Netzbetrieb

Auf der Basis der Observability und Controlability können nun die Anforderungen, die sich u.a. aus dem Zubau von Erneuerbaren Energien, E-Mobility und Wärmepumpen ergeben besser beherrscht werden.

Ein aktiver Netzbetrieb zeichnet sich dadurch aus, dass eine kritische Netzsituation durch möglichst wenig manuelle Eingriffe gelöst werden kann. Am Beispiel von Engpassmanagement kann dies verdeutlicht werden. Im ersten Schritt muss der Engpass möglichst frühzeitig erfasst werden. Diesem wird dann durch ausgewählte Maßnahmen entgegen gewirkt. Dies können Topologieänderungen sein, aber auch Redispatchmaßnahmen oder andere Markteingriffe. Zum Schluss muss auch das Ende der Maßnahme bestimmt werden, also der Weg zurück in den Ursprungszustand. All diese Maßnahmen sind im Übertragungsnetz bereits tägliche Realität. Im Nieder- und Mittelspannungsnetz sind die Maßnahmen durch die räumlichen Grenzen des Netzes viel lokaler. Ziel der Task Force ist es, hier Wege aufzuzeigen, wie es möglich ist, solche kritischen Netzsituationen ohne manuelle Eingriffe automatisiert zu lösen.

Dabei ist zu berücksichtigen, dass verschiedene Maßnahmen auch miteinander wechselwirken. So können Re-

dispatchanforderungen aus dem überlagerten Netz möglichen lokalen Maßnahmen entgegenwirken. Diese Interdependenzen will die Task Force aufzeigen.

Zusammenfassung

Die Task Force Hochautomatisierung von Nieder- und Mittelspannungsnetzen beschäftigt sich sowohl mit aktuellen als auch mit strategischen Fragestellungen zum Thema Automatisierung von Verteilnetzen. Hierfür sollen Empfehlungen für Anwender und Industrie erarbeitet werden und mögliche Forschungs- und Entwicklungsfelder identifiziert werden.

Der Abschlussbericht der Task Force wird voraussichtlich im vierten Quartal 2022 veröffentlicht.



Dr.-Ing. Sönke Loitz,
 Netze BW GmbH,
 Leiter der TF Netzautomatisierung

ETG Task Forces

E5 Unkonventioneller Ansatz für die neue Task Force „Entwicklung eines Zielbilds für ein klimaneutrales und nachhaltiges Energiesystem“

Im ETG Vorstand bestand Einigkeit, dass mit dieser Task Force neue Wege beschritten werden sollen. Agile Arbeitsmethoden, eine kurze Bearbeitungsdauer und neue Ergebnisformate unterscheiden die Task Force bereits formal von ihren Vorgängern. Inhaltlich widmet sie sich der Frage, wie das Zielbild für ein klimaneutrales und nachhaltiges Energiesystem aussehen kann. Dazu löst sich die Gruppe zunächst von der Frage „*Wie entwickelt man den Status Quo weiter?*“ und betrachtet unter der Prämisse der Entwicklung eines eigenen Energiesystems, abseits von heutigen Standards, Normen und Beschränkungen, auch Technologien, die heute noch nicht reif sind.

Neben der inhaltlichen Arbeit spielt auch die Nachwuchsförderung eine wichtige Rolle. So wurde bereits statt dem üblichen **Call for Experts** in diesem Fall ein **Call for Young Entusiasts** vor allem in den sozialen Medien veröffentlicht. Zur Teilnahme aufgerufen wurden insbesondere Student*innen, Junge Wissenschaftler*innen und Berufsanfänger*innen. Ziel war es somit auch Personen zu erreichen und zur Mitarbeit zu motivieren, die bislang nur wenig Kontakt mit dem VDE und/oder der ETG hatten. Ebenso waren verdiente ETG Mitglieder aufgerufen junge Nachwuchskräfte aus ihren jeweiligen Unternehmen zu entsenden. Da Bildung – allgemein und fachspezifisch – wichtig für den Aspekt der Nachhaltigkeit ist, wird die Nachwuchsförderung auch inhaltlich als wichtiges Schnittstellenthema beleuchtet.

Die neue ETG Task Force „Entwicklung eines Zielbilds für ein klimaneutrales und nachhaltiges Energiesystem“ hat zum Februar 2022 die Arbeit aufgenommen. Beim Kickoff haben 40 Personen aus der gesamten D-A-CH-Region teilgenommen. Die Expertise ist Dank Teilnehmenden von Hochschulen, Herstellern, Anlagen- und Netzbetreibern breit aufgestellt.

Die Leitung der Task Force übernimmt Juliane Selle. Als Mentoren aus dem ETG Vorstand unterstützen Dr. Stefan Küppers und Prof. Dr. Bernd Engel die Arbeit der jungen Entusiast*innen.

Arbeitsweise

Aufgrund der Größe der Task Force war es möglich vier Teilgruppen (TG) mit verschiedenen inhaltlichen Schwerpunkten zu bilden. Die parallele Bearbeitung erlaubt es der Task Force trotz der kurzen Laufzeit viele Teilaspekte hinsichtlich der Kriterien Klimaneutralität und Nachhaltigkeit zu analysieren.

Die Teilarbeitsgruppen arbeiten zwischen den monatlichen Task Force Meetings weitestgehend unabhängig voneinander. Sie organisieren sich selbst, tauschen sich untereinander bezüglich inhaltlicher Überschneidung aus und definieren so fortlaufend die geeigneten Schnittstellen bzw. Betrachtungsgrenzen. Dies gewährleistet eine möglichst breite Abdeckung aller Teilaspekte des zu entwickelnden Zielbildes.

Die agile Arbeitsweise und digitalen Meetings erleichtert jungen Arbeitnehmer*innen, welche häufig weniger frei in der Gestaltung ihrer Arbeitszeiten und Reisetätigkeiten sind, die Mitarbeit in der Task Force im Vergleich zu früheren ETG Formaten.

Aktueller Stand der Arbeit

Zunächst haben die Teilnehmenden gemeinsam Kriterien für Klimaneutralität und Nachhaltigkeit diskutiert. Diese werden herangezogen, um Technologien auf ihre Eignung für das Zielbild zu prüfen. Das Energiesystem der Zukunft soll nicht nur aus momentan vorhandenen Technologien entwickelt werden, sondern auch aktuelle Forschungsthemen und ideale Systemvorstellungen einbeziehen. Dazu tragen die vier Teilgruppen aktuell geeignete Technologien und Maßnahmen zusammen.

TG Dezentrale Energiesysteme

Die Teilgruppe *Dezentrale Energiesysteme* betrachtet die Energiesysteme als zelluläre Systeme, die sich in Szenarien für Dörfer, Quartiere, Landwirtschaft, Gewerbe, Handel und Dienstleistungen (GHD) und Industrie aufteilen.

Dabei legt sie einen besonderen Wert auf eine nachhaltige Erzeugung der Energie und auf zelluläre Systeme, die sich weitgehend autark und autonom mit Energie (Strom, Wärme, Mobilität) versorgen. Dazu sind verschiedene Technologien nötig, die mittels Sektorenkopplung und intelligentem Management kombiniert werden. Die Hauptziele sind dabei die regionale Energieerzeugung, -speicherung und -verbrauch.

Insbesondere für kleine und dezentrale Systeme gibt es viele technologische Ansätze abseits der heute verbreiteten Erneuerbaren Energien. Diese können unter den einzelnen Szenarien auf ihren jeweiligen Nutzen geprüft und so auch regional innerhalb des Zielbildes zugeordnet werden. Eine aktive Partizipation von Prosumern an der zukünftigen Energieversorgung führt außerdem zur langfristigen Schaffung lokaler Wertschöpfungsketten.

TG Groß-skalige Energiesysteme

Die Gruppe *groß-skalige Energiesysteme* hat die Aufgabe, innovative Technologien für eine großflächige Energieversorgung zu identifizieren. Sie untersucht dazu verschiedene Schwerpunkte wie die Energieübertragung, die Energiespeicherung sowie die Energiebereitstellung. Dabei werden zunächst auch bislang unentdeckte Technologien oder solche mit bisher nicht ausgeschöpften Potentialen kategorisiert und

bewertet. Diese Übersicht soll der Teilgruppe *Systemführung und Systemorganisation* ermöglichen, ein Gesamtbild für ein nachhaltiges und klimaneutrales Energiesystem zu erzeugen.

Aktuell befindet sich die Teilgruppe *groß-skalige Energiesysteme* in der Phase des Technologie Scans, in welcher verschiedenste Technologien beleuchtet und hinterfragt werden. Die Betrachtung erfolgt dabei zunächst auf technischer Ebene, aber auch vor dem Hintergrund gesellschaftlicher und wirtschaftlicher Effekte.

TG Systemführung und Systemorganisation

Die Gruppe *Systemführung und Systemorganisation* sieht sich als koordinierende Kraft der operativen Arbeit im klimaneutralen und nachhaltigen Energiesystem. Im Unterschied zur vorherrschenden Definition in der Literatur soll die Systemführung über die Grenzen des elektrischen Energiesystems in die anderen Sektoren hinaus verstanden werden.

Basis der Systemführung ist die Zuarbeit der anderen Teilgruppen der Task Force hinsichtlich der verfügbaren Erzeugungsanlagen, Speicher und Lasten sowie der regulatorischen Rahmenbedingungen. Die Gruppe betrachtet das Tätigkeitsfeld der Systemführung auch im „klimaneutralen und nachhaltigen Energiesystem“ erst dann, wenn der Markt die physikalischen Vorgaben des Systems nicht mehr erfüllt. In diesem Fall soll die Systemführung nach physikalischen und technischen Prinzipien agieren, um die Sicherstellung der Balance zwischen Erzeugung und Last zu gewährleisten.

TG Schnittstellen

Während sich die anderen drei Teilgruppen mit den technologischen Aspekten des Zielbilds befassen, betrachtet die Teilgruppe *Schnittstellen* die Systemgrenzen und Schnittstellen des Energiesystems zu anderen Lebensbereichen. Dabei kommt z.B. der Frage nach der Sozialverträglichkeit eine wichtige Rolle zu. Als Startpunkt dienen u. a. die 17 Ziele für nachhaltige Entwicklung der vereinten Nationen.¹ Auch ein Austausch mit dem VDE Young Net ist speziell in Hinblick auf die Themen Bildung und Nachwuchsförderung eingeleitet.

Ergebnisse

Die Task Force erarbeitet eine Vision eines idealen, flächen-deckenden Energiesystems und begünstigt dabei innovative und unkonventionelle Lösungsvorschläge. Die Ergebnisse werden voraussichtlich Ende 2022 vorgelegt. Diese sollen insbesondere Handlungsbedarfe aufzeigen, damit die Weiterentwicklung des Energiesystems zielführend umgesetzt werden kann.

An dieser Stelle schon einmal meinen persönlichen Dank an die Mitglieder der Task Force für eure engagierte Arbeit und euer Mitwirken bei diesem Artikel.

Bei Fragen und Anregungen wenden Sie sich gerne an juliane.selle@energiekontor.com



Juliane Selle, M.Sc.
Betriebsführung, Energiekontor AG

¹ Quelle: [Start - Ziele für Nachhaltige Entwicklung - Agenda 2030 der UN \(17ziele.de\)](https://www.17ziele.de)

ETG Task Forces

E6 Aktueller Stand Task Force

„Digitaler Zwilling in der Elektrizitäts- und Netzwirtschaft“

In der im Juli 2021 gestarteten ETG Task Force "Digitaler Zwilling in der Elektrizitäts- und Netzwirtschaft" geht es darum den aktuell vielfach genutzten Begriff des Digitalen Zwillings im Rahmen unserer Branche einzuordnen und darauf basierend eine Definition abzuleiten, die Architektur zu beschreiben, sowie Mehrwerte und Herausforderungen beim Einsatz von Digitalen Zwillingen abzuleiten. Wir berichteten bereits in der letzten Ausgabe des ETG Journals von dieser Task Force.

Laut Literatur handelt es sich beim Digitalen Zwilling um eine virtuelle Repräsentanz eines existierenden oder zu erschaffenden realen oder virtuellen Objekts und setzt sich aus der Beschreibung seiner Attribute sowie seiner funktionalen Eigenschaften zusammen.

Im Vergleich zu klassischen Modellen bildet der Digitale Zwilling in der Elektrizitäts- und Netzwirtschaft (DZiEN) eine Verknüpfung von mindestens zwei Domänen ab. Bsp.: Neben den primärtechnischen Komponenten einer Schaltanlage findet ebenfalls eine Betrachtung der sekundärtechnischen Komponenten mit jeweils unterschiedlichen Beschreibungssprachen statt. Ein DZiEN kann eine Kombination aus mehreren Digitalen Zwillingen darstellen.

Das Modell auf dem der DZiEN basiert, sollte hierbei ein dem Anwendungsfall entsprechend hinreichend genaues und hinreichend plausibles Verhalten des realen Objekts nachbilden. Die wesentliche Eigenschaft des DZiEN besteht darin, dass er eine genaue Beschreibung von Objekten liefert, welche über den Lebenszyklus des Objekts aktualisiert bzw. adaptiert werden kann und dabei das Konzept der Single Source of Truth umsetzt. Im Allgemeinen sollte ein Modell für einen DZiEN die folgenden Eigenschaften besitzen:

- Anpassungsfähigkeit: Eine Aktualisierung der Parameter innerhalb des Modells auf der Grundlage von Messdaten ist möglich und sinnvoll.
- Abbildungsgenauigkeit: Es muss hinreichend genau sein, damit die aktualisierten Parameterwerte für die betreffende Anwendung von Interesse und nutzbar sind.
- Reaktionszeit (im Rahmen der funktionalen Beschreibung): Entscheidungen können innerhalb des für den Anwendungsfall erforderlichen Zeitrahmens getroffen werden.

Im Rahmen der ETG Fachtagung Hochautomatisierter Netzbetrieb wurde im Mai 2022 in Dortmund eine Session zum DZiEN mit vier Vorträgen aus dem Kreise der Task Force gehalten. Die Session wurde von den Teilnehmer*innen der Tagung sehr gut angenommen und es wurde unter anderem über den wechselseitigen Informationsaustausch zwischen realem Objekt und Digitalem Zwilling diskutiert. Es hat sich herausgestellt, dass dieser nicht bestimmten allgemeinen Regeln unterworfen werden kann, sondern vielmehr immer anwendungsfallbezogen ausgelegt werden muss. Ein weiterer Erfahrungsaustausch mit unserer Fachcommunity ist im Rahmen der Hannover Messe 2022 geplant.

Die inhaltlichen Arbeiten der Task Force sind inzwischen schon weiter fortgeschritten und die Verfassung des Berichtes wurde begonnen. Eine Veröffentlichung der finalen Ergebnisse wird für Ende 2022 oder Anfang 2023 anvisiert. Diese sollen insbesondere auch Handlungsempfehlungen zur nutzbringenden Umsetzung eines DZiEN beinhalten.

Bei Fragen wenden Sie sich gerne an
ulf.haeger@tu-dortmund.de.



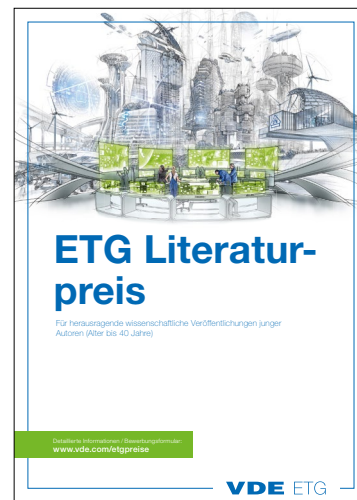
Dr.-Ing. Ulf Häger,
TU Dortmund,
Institut für Energiesysteme,
Energieeffizienz und Energiewirtschaft (ie³),
Leiter der TF Digitaler Zwilling

ETG Literaturpreis

Die ETG verleiht jährlich für herausragende Publikationen auf dem Gebiet der Elektrischen Energietechnik den ETG Literaturpreis. Mit der Auszeichnung ist eine Prämie von 3.000 € pro Publikation verbunden.

Dieses Jahr wurden drei Veröffentlichungen prämiert. Die Preisverleihung erfolgt durch Dr.-Ing. Michael Schwan, ETG Vorstandsvorsitzender im Rahmen der CIGRE/CIRED Informationsveranstaltung am 11. Oktober 2022 in Mannheim.

Die Preisträger sind:



Dr.-Ing. Daniel Dietz

in Würdigung der Arbeit

Eddy current influence on the control behavior of bearingless PM synchronous machines

erschienen in: IEEE Trans. On Ind. Appl. 57 (6), p. 6944 ff.

Laudatio

Sogenannte lagerlose elektrische Maschinen zeichnen sich durch eine dreiphasige Magnetlagerung aus, die räumlich mit dem dreiphasigen Antriebssystem verbunden ist. Diese Konzepte realisieren eine radiale Magnetlagerkraft aus einem Tragfeld zusätzlich zu der in Umfangsrichtung wirkenden elektromagnetischen Antriebskraft aus dem Antriebsfeld, beides über die Speisung dreiphasiger Umrichter. Dazu hat Herr Dietz die Beeinflussung der Magnetlagerung durch das bzgl. dem Läufer asynchron rotierende Tragmagnetfeld dahingehend untersucht, dass im elektrisch leitfähigen Rotor z.B. einer PM-Synchronmaschine unerwünschte Wirbelströme durch dieses Tragfeld induziert werden. Sie bewirken als „Wirbelstromeffekt“ zusätzliche Rotorverluste und eine zusätzliche unerwünschte Kraftwirkung, die die Tragkraftvektoramplitude vermindert und den Vektor in seiner zeitlichen Phasenlage nachteilig verschiebt. Es tritt eine Querkraft auf. Auch die Wechselwirkung zwischen dem Antriebsfeld und dem Tragfeld erzeugt über die Eisensättigung als „Wechselwirkungseffekt“ eine zusätzliche unerwünschte radial wirkende Störquerkraft. Beide Effekte bewirken eine Veränderung der Tragkraft, die vor allem bei größeren lagerlosen Maschinen ab ca. 40 ... 100 kW bei der Tragkraftregelung berücksichtigt werden muss. Deshalb untersucht Hr. Dietz beide Effekte bei einer kleinen PM-Synchronmaschine 1 kW, 60.000/min und einer größeren 40 kW, 40.000/min, jeweils mit Sm2Co17-PM-Schalen-Erregung, die wegen ihrer höheren el. Leitfähigkeit wirbelstromkritischer sind als mit NdFeB-PM-Schalen-Erregung.

Störende Wirbelstrom- und Wechselwirkungseffekte, wie sie vor allem bei größeren lagerlosen PM-Synchronmaschinen auftreten, werden über Feldberechnungen modelliert und als Frequenzgänge in ein Antriebssystemmodell eingefügt. Die Neigung zu Instabilität vor allem bei größeren lagerlosen Maschinen wird bei der Systemsimulation und bei der Messung vor allem beim raschen Übergang vom Antreiben zum generatorischen Bremsen sichtbar. Die beiden störenden Effekte werden quantifiziert und zulässige Stabilitätsgrenzwerte genannt. Daraus abgeleitete gestalterische Abhilfemaßnahmen zur Verringerung des Wirbelstromeffekts und Verbesserungen bei der Reglerauslegung zur Verringerung des Wechselwirkungseffekts werden angegeben.

Die ausführliche Laudatio finden Sie demnächst auf der ETG Webseite www.vde.com/etg



Dipl.-Ing. Daniel Bernet

in Würdigung der Veröffentlichung

Integrating Voltage-Source Active Filters into Grid-Connected Power Converters – Modeling, Control, and Experimental Verification

erschienen in: IEEE Transactions on Power Electronics (Vol. 36, No. 11, Nov. 2021)



Laudatio

Zukünftig wird das Stromnetz von einer dezentralisierten Energieerzeugung, höheren Distanzen zwischen den Erzeugern und Lasten, und einer verteilten, von der Last entkoppelten Energieerzeugung geprägt sein. Diese Dezentralisierung der Energieerzeugung erfordert vermaschte Netze, bei denen die Erzeugung, Umwandlung und Speicherung elektrischer Energie direkt über Leistungselektronik in die Nieder-, Mittel- und Hochspannungsnetze integriert wird. Herr Bernet behandelt in seiner Veröffentlichung das immer relevanter werdende Thema der Oberschwingungsreduktion von netzseitigen Stromrichtern mit aktiven Filtern, deren Ziel eine Verringerung des passiven Filteraufwands darstellt. Aktive Filter werden in kommerziellen Anwendungen bisher insbesondere zur Kompensation von Strom Oberschwingungen bis zur 50. Harmonischen eingesetzt. Den Schaltfrequenzbereich von aktiven Netzstromrichtern decken kommerziell verfügbare aktive Filter in der Regel damit jedoch nicht ausreichend ab, weshalb diese Anwendung noch Gegenstand von Forschung und Entwicklung ist.

Herr Bernet konzentriert sich in seiner Veröffentlichung auf die Entwicklung einer neuartigen Regelstrategie für aktive Netzstromrichter mit integrierten spannungseinprägenden aktiven Filtern, die eine Kompensation von Strom Oberschwingungen bis in den Kilohertz-Bereich bei gleichzeitig begrenzter Regelbandbreite ermöglicht. Dies umfasst eine ausführliche Modellierung des vorgeschlagenen hybriden Stromrichtersystems, den darauf aufbauenden Regelungsentwurf sowie die simulative und experimentelle Verifikation der entwickelten Strategie zur Oberschwingungsreduktion. Der herausragende, wissenschaftliche Beitrag der vorliegenden Arbeit liegt dabei in der ganzheitlichen systematischen Beschreibung des Zusammenwirkens von Stromrichter, aktivem Filter und Netz, die darauf basierende Ableitung eines neuartigen Betriebskonzepts zur Realisierung der vielversprechenden Eigenschaften und dessen Umsetzung in einem praktischen Aufbau. Die Veröffentlichung leistet damit einen wertvollen Beitrag zur Erweiterung des kompensierbaren Frequenzbereichs von aktiven Filtern und schafft damit wichtige Voraussetzungen, um deren Potential zur Oberschwingungskompensation von aktiven Netzstromrichtern weiter zu verbessern.

Dipl.-Ing. Georgios Mitrentsis

in Würdigung der Veröffentlichung

Data-Driven Dynamic Models of Active Distribution Networks Using Unsupervised Learning Techniques on Field Measurements

erschienen in: IEEE Transactions on Smart Grid (Vol. 12, No. 4, July 2021)



Laudatio

Im Rahmen der fortschreitenden Energiewende kommt den Verteilnetzen stetig steigende Bedeutung zu. Sie tragen nicht nur die Hauptlast bezüglich der Integration dezentraler, regenerativer Einspeisungen, sondern müssen in Zukunft auch verstärkt Systemdienstleistungen für das Gesamtsystem erbringen, wie zum Beispiel Regelleistung oder auch Blindleistungsbereitstellung. So wandeln sich vormals passive zunehmend zu aktiven, dynamischen Verteilnetzen. Dies wiederum bedeutet für die Betrachtungen im Übertragungsnetz, dass bisherige Modelle der unterla-

gerten Verteilnetze adaptiert und zu dynamischen Modellen erweitert werden müssen.

Hier setzt die prämierte Veröffentlichung von Herrn Georgios Mitrentsis an. Sie beschreibt ein dreistufiges Verfahren zur Ermittlung realitätsrechter dynamischer Modelle für Verteilnetze mit Hilfe von Clustering-Verfahren und Methoden der Künstlichen Intelligenz (KI). Die Basis stellen dabei umfangreiche Messungen an den Übergabespannungswerken zwischen Übertragungs- und Verteilnetz dar. In der ersten Stufe werden die Daten validiert, um

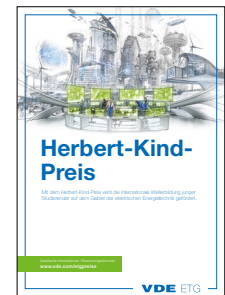
Datenfehler oder nicht plausible Daten von der weiteren Modellbildung auszuschließen. Stufe 2 clustert die vorliegenden Daten mit unterschiedlichen Verfahren in Gruppen mit gleichem oder ähnlichem dynamischen Verhalten, während in Stufe 3 für jede Gruppe ein nicht-lineares, dynamisches Verteilnetzmodell abgeleitet wird. Dabei zeigt sich, dass sich die große Vielfalt unterschiedlicher Verteilnetze dennoch in einer überschaubaren Anzahl standardisierter dynamischer Modelle abbilden lässt. Letztlich wird das vorgeschlagene Verfahren anhand realer Messungen aus sechs Übergabeumspannanlagen in Süddeutschland umfassen verifiziert.

Ebenso wie die eigentliche wissenschaftliche Leistung kann die schriftliche Fassung der englischsprachigen Veröffentlichung vollständig überzeugen. Sie ist mit der notwendigen Sorgfalt erstellt, gut strukturiert und systematisch aufgebaut. Der Schreibstil ist präzise, verständlich und wissenschaftlich korrekt.

Die prämierte Veröffentlichung stellt damit zweifelsfrei einen wichtigen und innovativen Beitrag zu einem hochaktuellen Thema der Energieversorgungsbranche im Bereich des Zusammenwirkens von Übertragungs- und Verteilnetzebene dar.

Herbert-Kind-Preis

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



Die Preisträger sind:

Armin Waffenschmidt



Armin Waffenschmidt kann herausragende Studienleistungen, erste Auslandserfahrung, sowie pädagogisches und soziales Engagement vorweisen. Das Gutachtergremium hält Herrn Waffenschmidt daher in fachlicher und in persönlicher Hinsicht für einen würdigen Preisträger des Herbert-Kind-Preises 2021.

Lebenslauf

Armin Waffenschmidt studierte seit dem Wintersemester 2016 den Bachelorstudiengang Wirtschaftsingenieurwesen (Fachrichtung Elektrische Energietechnik) an der RWTH Aachen und befindet sich seit Oktober 2020 im Masterstudiengang Elektrotechnik, Informationstechnik und Technische Informatik mit der Vertiefungsrichtung Electrical Power Engineering.

Neben dem Studium engagiert er sich bei der Grünen Jugend Aachen, in der Regionalgruppe des Evangelischen Studienwerks Villigst sowie beim BeBuddy-Programm der RWTH Aachen zur Unterstützung internationaler Studierender.

Das Wintersemester 2021/2022 hat er mit der Unterstützung des Herbert-Kind-Preises an der INSA Lyon in Frankreich verbracht.

Erfahrungsbericht

Salut!

Ich bin Armin, ich studiere an der RWTH Aachen und bin im Masterstudiengang Elektrotechnik, Informationstechnik und Technische Informatik mit der Vertiefung Elektrische Energietechnik. Im Wintersemester 2021/22 habe ich, unterstützt durch den Herbert-Kind-Preis, fünf Monate an der INSA Lyon in Frankreich verbracht.

Das Auslandssemester hat mir die Möglichkeit gegeben, in kurzer Zeit unglaublich viele nette Menschen kennenzulernen, in die Studienkultur einer französischen Hochschule einzutauchen, spannende Fächer zu belegen und meine Sprachkenntnisse zu verbessern. Sowohl auf der fachlichen als auch auf der persönlichen Ebene hat mich die Zeit im Ausland weitergebracht und ich berichte gerne von meinen Erfahrungen!

In den Semestern vor meinem Auslandsaufenthalt habe ich an der Uni in Aachen zwei Französisch-Sprachkurse gemacht, um meine Schulkenntnisse wieder etwas aufzufrischen. Die Vorbereitung war auch sinnvoll, denn meine Kurse an der INSA waren vollständig auf Französisch. Es werden zwar auch viele Kurse auf Englisch angeboten, allerdings sind ein paar Französisch-Kenntnisse für einen Auslandsaufenthalt auf jeden Fall empfehlenswert.

Ende August bin ich dann mit dem Zug in Aachen losgefahren. Obwohl einem die Entfernung sehr lang vorkommt, dauert die Zugfahrt nach Lyon mit fünfeinhalb Stunden nicht länger als nach München oder Berlin. Nach meiner Ankunft konnte ich zunächst sehr unkompliziert ein Zimmer in einem Wohnheim auf dem Campus beziehen, in dem auch viele andere internationale Studierende wohnten. Auf dem Campus der INSA gibt es neben mehreren Wohnheimen und den Instituten auch große Sportanlagen, verschiedene Räumlichkeiten für die über 150 studentischen Initiativen, mehrere Mensen und eine Bar. Im Gegensatz zur RWTH Aachen ist hier also alles nah beisammen, allerdings ist man auch etwas abgeschieden von der Innenstadt.

In den ersten beiden Wochen habe ich an einer Summerschool teilgenommen. Vormittags fand jeden Tag ein Französischsprachkurs statt und nachmittags hatte man Zeit zur freien Verfügung, um die anderen Leute und die Stadt kennenzulernen. Im Sprachkurs hatten wir trotz einer kleinen Gruppengröße Studierende aus zwölf verschiedenen Ländern. Besonders spannend waren deswegen die Abschlusspräsentationen über unsere jeweiligen Heimatstädte. In der freien Zeit hatte ich die Möglichkeit, gemeinsam mit den anderen erste Eindrücke von der Stadt zu gewinnen. Lyon liegt zwischen den zwei Flüssen Rhône und Saône und ein Teil der Innenstadt erstreckt sich über eine lange Halbinsel bis zur Flussmündung. Deswegen gibt es zahlreiche Brücken und schöne Promenaden, die neben vielen alten Gebäuden und Kirchen das Stadtbild prägen. Bei einer Stadtrallye durch die historische Altstadt „Vieux Lyon“ haben wir viele verwinkelte Gassen und Straßen, teilweise im italienischen Stil, entdeckt und bei dem guten Wetter hatte ich ein leichtes Urlaubsgefühl.



Blick auf die Saône in Lyon



Pont d'Arc am Fluss Ardèche

Nach der Summerschool haben die normalen Uni-Kurse begonnen. Glücklicherweise fanden alle meine Kurse an der INSA während des ganzen Semesters in Präsenz statt, so war es auch viel einfacher, Leute aus dem gleichen Studiengang kennenzulernen. Da in meinem Jahrgang nur wenige andere Erasmus-Studierende waren und viele der französischen Studierenden sehr offen und aufgeschlossen waren, war es für mich leicht, mit anderen in Kontakt zu kommen und eine Lerngruppe zu finden. Dabei hat bestimmt auch eine Rolle gespielt, dass im 5. Studienjahr – das entspricht dem letzten Jahr im Masterstudium – viele der INSA-Studierenden bereits selbst ein Auslandssemester oder Auslandspraktikum gemacht hatten und so eigene Erfahrungen aus einem internationalen Umfeld einbringen konnten. Bei meiner Fächerwahl habe ich neben Sprachkursen auch Kurse zu den Themen Netzwerk- und Kommunikationstechnik, Energieerzeugung und -speicherung sowie eine Praktikumsreihe mit verschiedenen Elektrotechnik-Themen belegt.

Im August und September, als das Wetter in Lyon noch sehr sonnig und warm war, habe ich an einigen Wochenenden



In der Werkstatt beim Bau eines Piggott-Windrades

als Abwechslung vom Unialltag gemeinsam mit anderen Studierenden Ausflüge in die Umgebung von Lyon gemacht. Die Alpen sind nicht weit entfernt und auch am Mittelmeer ist man mit dem Zug ziemlich schnell. So war ich z.B. östlich von Lyon rund um den Lac d'Annecy wandern und für kurze Wochenendtrips in Marseille und Montpellier. Besonders empfehlen kann ich auch die Region Ardèche südlich von Lyon, wo man in wunderschöner Natur großartige Wander- oder Kanutouren unternehmen kann!

Im 5. Studienjahr wählt man am Elektrotechnik-Département eine Vertiefungsrichtung aus, in meinem Fall war das „CEE – Conversion de l'Énergie Électrique“, also Umwandlung von elektrischer Energie. Dabei ging es vor allem um verschiedene Arten der Energieerzeugung, um Energiemärkte, Batteriespeichersysteme sowie zusätzlich um Piezoelektrizität. Diese Vertiefungsrichtung hat die meiste Studienzeit während des Semesters in Anspruch genommen und neben Vorlesungen und Übungen gab es auch Gruppenarbeiten und praktische Projekte. Mit insgesamt 16 Studierenden war die Gruppengröße angenehm klein und so war es oft möglich, mit den Dozenten ins Gespräch zu kommen oder gemeinsam zu diskutieren. Zudem kannten wir uns alle untereinander schnell, was vor allem bei Gruppenarbeiten von Vorteil war.

Ein besonders interessantes Projekt in der Vertiefungsrichtung war eine Woche, in der wir gemeinsam ein kleines Windrad selbst gebaut haben. Das Konzept eines sogenannten Piggott-Windrades, benannt nach dem Erfinder Hugh Piggott, basiert auf einfachen Do-it-yourself-Bauplänen mit geringen Materialkosten und im Prinzip kann so ein Windrad inklusive Generator und Mechanik in jeder gut ausgestatteten Werkstatt selbst gebaut werden. Unser Kurs hatte die Möglichkeit, in einer Projektwerkstatt am Stadtrand von Lyon beim Bau des Windrades von Anfang bis Ende dabei zu sein – vom Wickeln der Generatorspulen, über das Hobeln der Holzflügel bis zum Durchmessen des Generators auf einem Prüfstand im Labor. Das Windrad hat im Vergleich zu großen Windturbinen eine sehr geringe Leistung von wenigen hundert Watt, kann aber z.B. in entlegenen Gegenden zur autarken Energieversorgung verwendet werden. Für mich war es vor allem interessant, den ganzen Entstehungsprozess zu sehen und somit auch die grundlegende Funktionsweise zu verstehen. Das selbst gebaute Windrad wird dann in Zukunft zunächst im Rahmen einer Doktorarbeit für weitere Messungen und Analysen verwendet.



Lichtinstallation bei der Fête des Lumières in Lyon

Neben dem Studium habe ich in Lyon außerdem in einem Chor gesungen und im INSA-Orchester Kontrabass gespielt. Die wöchentlichen Proben waren eine tolle Möglichkeit, Leute aus anderen Studiengängen kennenzulernen und weiterhin regelmäßig Musik zu machen. Neben den Proben war ich sowohl im Chor als auch im Orchester bei Probenwochenenden dabei, die jeweils außerhalb von Lyon stattfanden und mindestens genau so viel Spaß gemacht haben wie Probenfahrten, die ich aus Deutschland kenne! Gegen Ende des Jahres gab es dann auch Konzerte mit Zuschauern, was nach der langen Corona-Pause ein großartiges Erlebnis war. Mit dem Orchester hatte ich dabei die Möglichkeit, in einer der ältesten und schönsten Kirchen der Lyoner Altstadt zu spielen.

Ein weiteres beeindruckendes Event, das in Lyon jedes Jahr Anfang Dezember stattfindet, war die Fête des Lumières, ein Lichterfest, das sich über die ganze Stadt erstreckt. Dabei gibt es vier Tage lang aufwendige Licht- und Soundinstallationen, Animationen oder bunte Beleuchtung auf Häuserfassaden, Monumenten oder in Parks. Die Veranstaltung zieht jährlich weit über eine Million Besucher an, die oft von weit her anreisen, dementsprechend voll waren abends auch die Straßen in der Altstadt. Gelohnt hat es sich aber trotzdem, gerade in der dunklen Jahreszeit waren die Lichtshows besonders schön und eindrucksvoll.

Gegen Ende des Semesters, im Januar, hatte ich neben den Klausuren auch einige Abschlussvorträge von Gruppenprojekten, die wir während des Semesters in der Energietechnik-Vertiefung erarbeitet hatten. Bei vielen Projekten ging es um das Thema Energieversorgung in Frankreich und Europa. Konkret habe ich beispielsweise in einer Arbeit mit einem spanischen und einem französischen Studenten die Energiepolitik Frankreichs, Spaniens und Deutschlands analysiert und verglichen. Was ich dabei vor allem mitnehmen konnte, waren die verschiedenen Sichtweisen auf die Energiepolitik in Europa und die unterschiedlichen daraus abgeleiteten Maßnahmen. Ich habe gelernt, dass es unglaublich wichtig ist, sich gegenseitig zuzuhören und Argumente auszutauschen, bevor man sich auf eine Meinung festlegt und zudem immer offen für neue Ideen zu sein, selbst wenn man von einer Sache überzeugt ist. Gleichzeitig konnte ich aber auch feststellen, dass bestimmte grundlegende Ziele wie das schnelle Erreichen von Klimaneutralität und ein dafür notwendiger Wandel in Politik, Industrie und Gesellschaft unter den Studierenden in meiner

Vertiefungsrichtung eigentlich nie zur Diskussion standen, sondern vielmehr als Handlungsgrundlage gesehen wurden.

Insgesamt habe ich in Lyon ein großartiges, bereicherndes und abwechslungsreiches Auslandssemester verbracht, das mich sowohl fachlich als auch menschlich weitergebracht hat. Zu vielen Kommilitoninnen und Kommilitonen aus unterschiedlichen Ländern habe ich auch weiterhin Kontakt und bin sicher, dass ich auch noch einige Male nach Lyon zurückkehren werde. Zudem spreche ich inzwischen fließend Französisch und kann mir vorstellen, in Zukunft in einem internationalen Umfeld zu arbeiten. Einen Auslandsaufenthalt in Lyon kann ich auf jeden Fall weiterempfehlen: Nicht nur die Stadt und die schöne Umgebung, sondern auch die Hochschule mit einem wirklich breiten Fächerangebot und den vielen unterschiedlichen studentischen Initiativen garantieren eigentlich für alle, die dorthin kommen, ein erstklassiges Auslandserlebnis!

Zurück in Deutschland engagiere ich mich weiterhin im Rahmen des BeBuddy-Programms der RWTH Aachen für internationale Studierende und war bei der Welcome-Week zu Beginn des Sommersemesters als Helfer dabei. Bei meinem Auslandssemester habe ich selbst gesehen, wie wichtig ein guter Start in einer neuen Stadt ist.

Ich möchte mich herzlich für die Unterstützung durch den Herbert-Kind-Preis bedanken und hoffe, dass noch viele weitere Studierende diese Möglichkeit bekommen werden!

Lisa Reis



Lisa Reis kann herausragende Studienleistungen, praktische Erfahrung in Industrie- und Forschung sowie soziales Engagement vorweisen. Das Preiskomitee hält sie daher in fachlicher und persönlicher Hinsicht für eine würdige Preisträgerin des Herbert-Kind-Preises 2022.

Lebenslauf

Lisa Reis, geboren 1998 in Ludwigshafen, hat nach einem sehr guten Abitur Elektro- und Informationstechnik mit dem Schwerpunkt Elektrische Energietechnik an der TU Kaiserslautern studiert und als Beste ihres Jahrgangs

mit der Note „sehr gut“ abgeschlossen. Derzeit studiert Frau Reis im gleichnamigen Masterstudiengang und erzielt auch dort ausgezeichnete Noten. Gleichzeitig forschte sie als Mitarbeiterin am Lehrstuhl für Energiesysteme und Energiemanagement im Bereich Verteilnetzautomatisierung. Praktika absolvierte sie in verschiedenen Bereichen der elektrischen Energietechnik am Fraunhofer ITWM, bei ABB und Siemens Energy.

Frau Reis ist Stipendiatin der Studienstiftung des Deutschen Volkes und im Network² Förderprogramm der Netze BW. Während ihres Studiums engagierte sie sich aktiv in der Studierendenvertretung und in der Regionalgruppe von Ingenieure ohne Grenzen. VDE Mitglied ist sie seit 2017.

Den Herbert-Kind-Preis erhält Frau Reis für ihre sehr guten Studienleistungen, ihr nebenberufliches Engagement und ihre spürbare Leidenschaft für die Energietechnik. Sie wird ein Semester in Trondheim verbringen, wo sie an der NTNU in Kooperation mit dem Forschungsinstitut SINTEF Energy ihre Masterarbeit über netzbildende HGÜ-Anlagen anfertigen wird. Nach dem Auslandsaufenthalt wird wie üblich ein Erfahrungsbericht veröffentlicht.

ETG Veranstaltungen

Vorschau

**21.–22. Juni 2022,
ECC Berlin (Estrel Congress Center),
VDE FNN/ETG Tutorial**

12. Tutorial Schutz- und Leittechnik

<https://www.schutz-leittechnik.de>

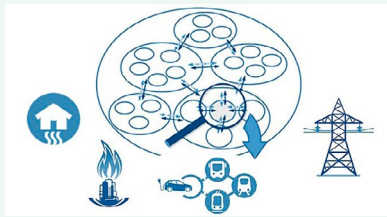


© VDE FNN

**5.–6. Juli 2022,
Arvena Kongress Hotel, Bayreuth
ETG ITG Fachforum**

Zellulare Zukunft der Energieversorgung

[Weitere Informationen*](#)



© VDE

**19. September 2022,
Fraunhofer-Forum, Berlin,
Fachtagung**

Industriearbeitskreis Mittelspannungs- Leistungselektronik

www.ms-leistungselektronik.de



© Fraunhofer ISE

Nach dem erfolgreichen Auftakt unserer Online-Veranstaltung am 15. Februar 2022 blicken wir mit großer Freude auf unsere Präsenzveranstaltung am *21. und 22. Juni 2022* im ECC in *Berlin*.

Nationale und internationale Expertinnen und Experten greifen die vorausschauenden Lösungen aus Schutz- und Leittechnik vom Online-Preview auf und werden diese Themen weiter vertiefen.

Aufgrund der gegenwärtigen Pandemie-Lage bieten wir das Veranstaltungsformat auch hybrid an. Gerne können Sie den Fachvorträgen online folgen. Bei einer Präsenzteilnahme profitieren Sie zusätzlich von der Kombination aus Workshops, Ausstellung und Poster-Session zur optimalen Informationsvermittlung. Zur fachlichen Diskussion und zum Erfahrungsaustausch laden die Diskussionsrunden nach den Vorträgen und Tagungspausen ein, ebenso wie der gemeinsame Abend am ersten Veranstaltungstag.

Wir dürfen keine Zeit mehr verlieren! Jetzt gilt es, gemeinsam die Energiewende umzusetzen – sofort und zielgerichtet. Hier setzt die Fachtagung an. Sie zeigt nicht nur die konkrete Zielsetzung, sondern auch den Weg dorthin auf. Basis ist der zellulare Ansatz, im Jahr 2015 vom VDE erstmals veröffentlicht und seither stetig weiterentwickelt.

Gemeinsam wird von Fachexpertinnen und -experten das Energiesystem der Zukunft auf der Basis von Energiezellen aufgezeigt und ein konkreter Plan zur Umsetzung entwickelt, auch für die breite Öffentlichkeit verständlich und für die Politik richtungsweisend.

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

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

* <https://www.vde.com/de/etg/veranstaltungen/veranstaltung?id=20664&type=vde%7Cvdb>

**28.–29. September 2021,
Pentahotel Leipzig,
Fachtagung**

Netzregelung und Systemführung 2022

Energiewende in der Stromversorgung
– Systemstabilität und -Sicherheit

www.vde.com/netzregelung-2022



© Franz Metelec / Fotolia

**11.–13. Oktober 2022,
Esslingen am Neckar,
Fachtagung**

STE 2022

Sternpunktbehandlung in Netzen bis
110 kV (D-A-CH)

www.vde-ste.de



© VDE/Mümpfer

**8.–10. November 2022,
Mercure Hotel MOA Berlin,
Fachtagung**

VDE Hochspannungstechnik

Forschung und Technik für die
Energiewende

www.vde-hochspannungstechnik.de



Mit diesen Top-Themen werden wir
uns beschäftigen:

- I) Energieversorgungsnetze im Wandel – Integration neuer Anlagen und Betriebsmittel
- II) Systemdienstleistungen für zukünftige Netze
- III) Netzanforderungen an Umrichterregelungen
- IV) Neue Aspekte und Methoden zur dynamischen Modellierung von Energieversorgungsnetzen unter aktuellen Rahmenbedingungen

Die Energiewende hat den Ausbau und die Rolle der Übertragungs- und Verteilnetze drastisch verändert. Das Verhalten eines Energieversorgungsnetzes bei einpoligen Fehlern hängt im Wesentlichen von der Art der Sternpunktbehandlung ab, welche oft als gegeben vorausgesetzt wird und deren Auswirkungen vernachlässigt werden. Tatsächlich stellt die Sternpunktbehandlung jedoch einen wichtigen Aspekt beim Aus- und Umbau der Netze dar.

Das sind die Themen:

1. Auswirkung zunehmender Verkabelung
2. Anforderungen an Erdungssysteme
3. Neuentwicklungen bei Betriebsmitteln
4. Innovative Verfahren zur Sternpunktbehandlung
5. Konzepte und Automatisierung für Erdfehlerbehandlung
6. Neue Methoden zur Erdschlusserfassung und -lokalisierung
7. Auswirkungen der Harmonischen im Fehlerstrom
8. Erfahrungen aus dem Netzbetrieb und Erdschlussmessungen

Hochspannungstechnik ist eine Schlüsseltechnologie für die Energiewende. Sie ermöglicht den effizienten und sicheren Energietransport über sehr weite Entfernungen und damit den Ausgleich der volatilen Einspeisung regenerativer Erzeuger. Dafür setzen deutsche Netzbetreiber neben der konventionellen Drehstromübertragung die Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ, HVDC) ein. Höhere Auslastung des Netzes und Digitalisierung beeinflussen Konstruktion, Herstellung, Betriebsverhalten, Alterung, Diagnose und Monitoring aller Betriebsmittel. Deshalb kommen der Entwicklung und Anwendung von neuen Werkstoffen, Auslegungs- und Prüfverfahren von Isoliersystemen und Produkten eine besondere Bedeutung zu.

Mit dem neuen Schwerpunktthema „High Voltage Goes Green“ sollen konkrete technische Lösungen für nachhaltige und CO₂-neutrale Materialien und Betriebsmittel einer breiten Öffentlichkeit vorgestellt werden. Denn Wissenschaft, Forschung und industrielle Produktentwicklung haben in den letzten Jahren verschiedene Materialien und Geräte entwickelt, die nachhaltigere und emissionsarme Herstellung und Betrieb ermöglichen.

**21.–22. November 2022,
Kongress Palais Kassel,
Fachtagung**

Erzeugung und Speicherung elektrischer Energie

Wege zu einer klimaneutralen
Energieversorgung

[Weitere Informationen*](#)



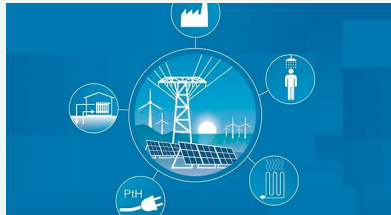
© Panya Studio / stock.adobe.com

**14.–15. Dezember 2022,
Niedersächsische Landesvertretung
in Berlin, Fachtagung**

8. Dialogplattform Power-to-Heat

Wärmewende jetzt!

[Weitere Informationen*](#)



© Energietechnische Gesellschaft (ETG)

Es ist Zeit zum Handeln, denn die Umsetzung der Maßnahmen zur Erreichung einer klimaneutralen Energieversorgung in Deutschland wird immer dringlicher. Fossile Energieträger müssen so schnell als möglich durch erneuerbare Energien ersetzt werden.

Im Rahmen der Fachtagung werden Sie Gelegenheit haben, mehr über die technischen Herausforderungen der beschleunigten Energiewende zu erfahren und mit Expertinnen und Experten Lösungsoptionen kritisch zu diskutieren. So möchten wir gemeinsam an möglichen Wegen arbeiten, die mit der erforderlichen Akzeptanz zu einer klimaneutralen Energieversorgung führen.

Der Wärmesektor stellt den größten Hebel für die Substitution fossiler Energieträger dar, bei der Nutzung erneuerbarer Energien hinkt er jedoch deutlich hinterher!

Schwerpunkte der Fachtagung sind Technik, Erfahrungsberichte und die regulatorischen Rahmenbedingungen. Expertinnen und Experten zeigen umsetzbare Lösungen auf und geben Handlungsempfehlungen, wie eine beschleunigte Transformation des Wärmesektors gelingen kann.

Nutzen Sie die Gelegenheit, das neuste Expertenwissen zu gewinnen, am Erfahrungsaustausch teilzunehmen und sich mit Fachleuten und anderen Teilnehmerinnen und Teilnehmern aus Wissenschaft und Wirtschaft zu vernetzen.

*Gemeinsam mit dem Energie-
Forschungszentrum Niedersachsen
(EFZN).*

* <https://www.vde.com/de/etg/veranstaltungen/veranstaltung?id=20519&type=vde%7Cvdb>

* <https://www.vde.com/de/etg/veranstaltungen/veranstaltung?id=21192&type=vde%7Cvdb>

Vorschau ETG Veranstaltungen

E7 ETG Kongress 2023 – Call for Papers

www.etg-kongress.com

Liebe Fachgemeinschaft, liebe ETG Mitglieder,

wir, der gesamte Programmausschuss, freuen uns sehr, Sie zum ETG Kongress 2023 in die Stadthalle Wuppertal einladen zu dürfen! Wenn Ihnen das jetzt bekannt vorkommt, ja, das ist der zweite Anlauf! Wir hoffen wirklich, dass die Rahmenbedingungen dieses Mal eine Durchführung vor Ort erlauben. Das besondere, inspirierende Ambiente ist sicher bestens geeignet, um in den Pausen und im Rahmenprogramm endlich mal wieder auch Smalltalk und Persönliches auszutauschen – und im eigentlichen Kongress kritisch über den Stand unserer Energiewende und vor allem über Mittel und Wege zur Beschleunigung zu diskutieren.

Denn Beschleunigung ist das Gebot der Stunde! Das ist wahrlich keine neue Erkenntnis – „Wandel und Geschwindigkeit“ war schon das Kernfazit unseres letzten ETG Kongresses 2021. Seitdem gibt es aber eine neue Bundesregierung, die die Ziele für die Energiewende deutlich gestrafft hat: Treibhausgasneutralität im Stromsektor bis 2035 (statt 2050), 80 % erneuerbare Energien im Jahr 2030. Das ist quasi schon „morgen“. Und dann gibt es das epochale Ereignis eines russischen Angriffskrieges

mitte in Europa, mit dem unsäglichen Leid für die Menschen in der Ukraine. Neben vielen anderen, noch unüberschaubaren Folgen für unsere globale Gemeinschaft, wird vielen Ländern, allen voran Deutschland, schlagartig ihre Abhängigkeit von russischen Energieträgern bewusst – was jetzt möglichst umgehend zu ändern ist. Die Energiewende steht damit im politischen und gesellschaftlichen Fokus wie nie zuvor.

Da ist es gut, dass die grundlegenden Bausteine der Energiewende mittlerweile gut bekannt und etabliert sind – und sich auch nur geringfügig ändern, im Kontext des Gesamtbildes. Es braucht einen massiven Zubau an erneuerbarer Stromerzeugung, Netzausbau, Flexibilität und Speicher allerorten und Digitalisierung. Dass dies nicht nur Schlagworte sind, sondern wirklich einen umfassenden und tiefgreifenden Wandel unserer Energiesysteme bedeuten, ist in Fachkreisen ebenso bekannt und etabliert. Was sich gerade durch die aktuellen Begebenheiten noch mal deutlich ändert, ist die Geschwindigkeit. Nicht, dass es den Akteuren beim bisher angedachten Tempo langweilig geworden wäre – es ist aber ein-

fach offensichtlich geworden, dass wir als Gesellschaft keine, wirklich gar keine Zeit zu verlieren haben und die Beschleunigung des Wandels die zentrale Aufgabe ist, die jetzt zu lösen ist. Mit neuen technischen Lösungen und Konzepten, aber vor allem auch mit Änderungen an Prozessen und in der Digitalisierung, am Ordnungsrahmen, in der personellen Ausstattung, in einfach allen Bereichen des Energiesektors und den verbundenen Sektoren.

Die Aufgaben sind also drängender und relevanter denn je! Für die Lösungen braucht es kontinuierliche Weiterentwicklungen, Innovationen, Revolutionen und Disruptionen – und Ihre Beiträge! Wir freuen uns auf Ihre Einreichungen zum breit gefächerten Themenspektrum des Kongresses, und auf die gemeinsame Diskussion und den Austausch mit Ihnen!

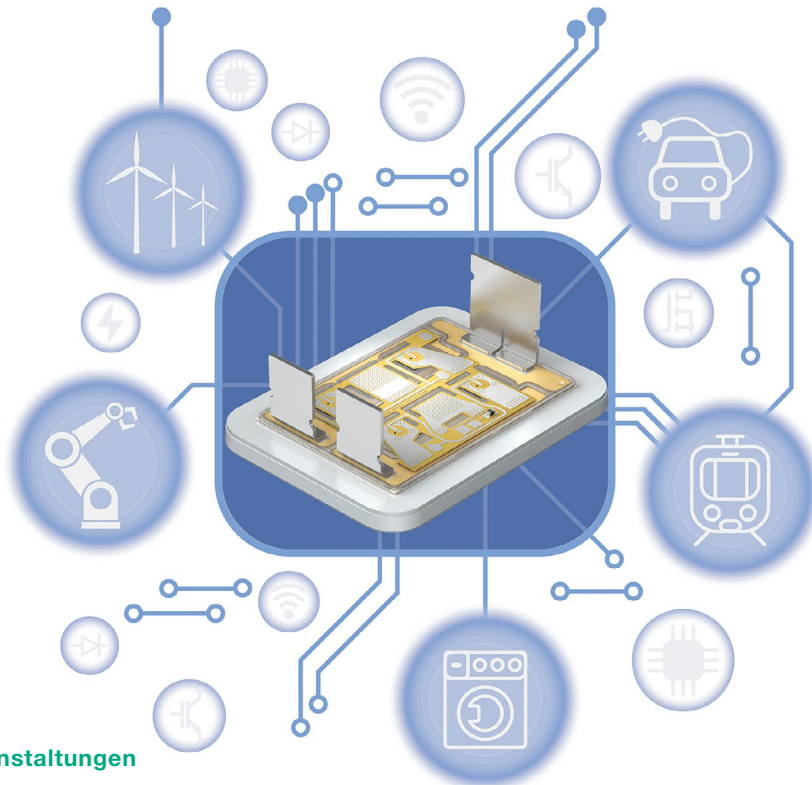


*Dr.-Ing. Michael Schwan
Siemens AG
ETG Vorsitzender und
Kongressleiter*

Termine

- Einsendeschluss für Zusammenfassung: 17. Oktober 2022
- Benachrichtigung der Autorinnen bzw. Autoren: . . . 30. November 2022
- Abgabetermin für den Kongressbeitrag: 18. Januar 2023
- Benachrichtigung der Autorinnen bzw. Autoren
über Annahme oder Überarbeitung: 01. März 2023
- Kongressbeginn: 03. Mai 2023





Rückblick ETG Veranstaltungen

E8 CIPS 2022 – 12. Internationale Konferenz zur Systemintegration in der Leistungselektronik

15. - 17. März 2022 in Berlin

Leistungselektronik ist oftmals unsichtbar, aber sie ist unverzichtbar für die effiziente Umwandlung von Elektrizität, um z. B. aus dezentralen erneuerbaren Quellen erzeugte elektrische Energie in das Stromnetz einzuspeisen, elektrische oder elektronische Anwendungen zu versorgen oder drehzahlvariable Antriebe zu speisen.

Die *International Conference on Integrated Power Electronics Systems (CIPS)* konzentriert sich auf den technologischen Hintergrund, beginnend mit den zu integrierenden Komponenten (wie passive Bauelemente und Sensoren). Der

größte Teil der Konferenz befasst sich mit Leistungshalbleiterchips aus Silizium (Si) oder, in zunehmendem Maße, aus Materialien mit großer Bandlücke wie Siliziumkarbid (SiC) und Galliumnitrid (GaN). Alle diese Komponenten müssen gehäust werden, wobei Materialien und Prozesse eine wichtige Rolle spielen; die daraus resultierenden Schaltungen bestimmen die Funktion einschließlich parasitärer Elemente wie Streuinduktivitäten. Vom Gehäuse hängt in der Regel das thermische Verhalten der Komponenten sowie ihre Zuverlässigkeit ab. Auf der CIPS 2022 wurden verschiedene Optimierungsansätze vorgestellt, wie z. B. die Einbettung der Chips in Leiterplatten und die beidseitige Kühlung, die eine hohe Zuverlässigkeit auch unter anspruchsvollen Betriebsbedingungen in modernen Anwendungen gewährleisten.

Der technologische Entwicklungstrend, eine Steigerung der Wirkungsgrade bei gleichzeitiger deutlicher Reduzierung der Systemgröße und höherer Zuverlässigkeit zu erreichen, ist nur durch eine hohe Systemintegration möglich. Andererseits werden neue Schnittstellenmaterialien benötigt, um die Wärmeübertragung zu verbessern und die Anforderungen an den Wärmeausdehnungskoeffizienten zu erfüllen.

Auf der Konferenz wurden viele Entwicklungstrends in der Leistungselektronik und zum Technologie-Roadmapping im Zusammenhang mit höheren Leistungsdichten, höheren Wirkungsgraden, verbesserter Zuverlässigkeit und neuen Designregeln für das Packaging und die 3D-Systemintegration vorgestellt und diskutiert.



Fachdiskussionen in der Postersession | VDE



Diskussion mit Teilnehmenden vor Ort + online | VDE



Beitrag von Fraunhofer Institut gewinnt den Best Paper Award | VDE

Darüber hinaus gab es zahlreiche Beiträge zu den entsprechenden Prüfverfahren. Während diese in Bezug auf Silizium-Bauelemente ausgereift und standardisiert sind und beeindruckende Ergebnisse von Bauelementen mit breiter Bandlücke berichtet werden konnten, sind weitere Forschungsarbeiten erforderlich. Dazu müssen Verschleiß- und Ausfallmechanismen besser verstanden werden, damit sie möglicherweise vorhergesagt und schließlich beseitigt werden können, um noch zuverlässigere Bauelemente und folglich auch Schaltungen und Systeme zu realisieren. In einigen Beiträgen wurden Beispiele für integrierte leistungselektronische Systeme vorgestellt und die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) behandelt. Letztere ist angesichts der steilen Spannungs- und Stromflanken, die bei Schaltvorgängen von Leistungshalbleitern auftreten, von entscheidender Bedeutung, wobei ein geeignetes leistungselektronisches Design wesentlich dazu beitragen kann, die unerlässliche EMV auf Systemebene zu erreichen.

Neben diesen technischen Aspekten sorgte die starke Beteiligung der Industrie an der Konferenz dafür, dass auch Kostenaspekte angemessen berücksichtigt wurden. Höhere Investitionen in Leistungshalbleiterkomponenten und deren Integration können zu wirtschaftlichen Vorteilen auf Systemebene führen, wo die Leistungselektronik weitere Optimierungen und neue Funktionen ermöglicht.

Die CIPS wurde von VDE ETG in Zusammenarbeit mit dem ECPE European Center for Power Electronics organisiert. Die 12. CIPS fand vom 15. bis 17. März 2022 als Hybrid-Konferenz statt. Zwei Drittel der Teilnehmer und Teilnehmerinnen waren persönlich in Berlin anwesend und schätzten die Möglichkeit, sich endlich wieder direkt auszutauschen.

Der Tagungsband mit Keynotes, eingeladenen und eingereichten Beiträgen ist im VDE Verlag (ETG Fachbericht 165) und in IEEE Xplore erhältlich. Die nächste CIPS ist für den 12. bis 14. März 2024 in München geplant, die Einreichungsfrist für Beiträge endet im Sommer 2023.



CIPS 2022 fand als hybride Konferenz in Berlin statt | VDE

Aktuelle Informationen unter
www.cips.eu

Prof. Dr.-Ing. Nando Kaminski,
Universität Bremen (Technical Chair)Prof. Dr.-Ing. Andreas Lindemann,
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
(Technical Chair)

VDE Young Net – Geschäftsstelle

Y1 „Irgendwas mit Strom“ – Imageproblem der Elektrotechnik

Der Fachkräftemangel ist schon heute ein gesamtgesellschaftliches Problem und wird sich weiter verschärfen – so der Weckruf der VDE Studie zum Arbeitsmarkt 2022. Unsere Hoffnung, dass die Elektrotechnik aus sich heraus für Nachwuchs sorgen kann, wurde mit den ersten Zwischenergebnissen einer neuen laufenden und bisher größten Image-Studie in der Elektrotechnik begraben: Die Elektrotechnik hat ein Imageproblem. Die Ergebnisse der Studie, einem Gemeinschaftsprojekt des Fachbereichstags der Elektro- und Informationstechnik FBTEI e. V., des Verbands der Elektrotechnik Elektronik und Informationstechnik e. V. (VDE e. V.) und des Internationalen Zentralinstituts für das Jugend- und Bildungsfernsehen (IZI), zeigen aber auch: Erste Überlegungen zum Aufpolieren des Images können schon heute angestellt werden.

Was sind die Gründe dafür und wie können wir – auch als VDE – Abhilfe leisten? Dazu klärte der Interimsreport zur Studie „Image der Elektrotechnik“ auf: Dr. Maja Götz, Leiterin des IZI, illustrierte die Zwischenergebnisse einer Online-Befragung von 1.195 Studierenden der Elektrotechnik. Bei der Befragung waren 835 Studentinnen und Studenten im ersten oder zweiten Semester vertreten, was interessante Einblicke in die Studienwahl ergibt. In einer zweiten Phase wurden 50 hochtalentiert junge Menschen im Abituralter ausführlich qualitativ interviewt, was u.a. kreative Elemente wie Bildauswahl und das Erstellen von Collagen beinhaltete. Die kommende dritte Phase, eine Befragung von 600 Schülerinnen und Schülern, wird bis September 2022 fertig gestellt. Die gesamte Imagestudie soll Aufschluss über Folgendes geben:

- Bekanntheit und Image von Elektro- und Informationstechnik
- Voraussetzungen für das Studium der Elektro- und Informationstechnik
- Vorstellung zur späteren Berufstätigkeit

Erste Überlegungen zum Aufpolieren des Images können allerdings schon heute angestellt werden.

Ein Mangel mit Ansage

Der Bedarf an Fachkräften in der Technik wächst stetig. Gründe sind der demografische Wandel, also die Ruhestandswelle, die auf uns zurollt. Problematisch ist aber nicht nur, diese Fachkräfte zu ersetzen – der Bedarf wächst darüber hinaus. Das ist auch nicht sehr verwunderlich, denn angesichts vielfältiger Herausforderungen, die beispielsweise durch den Klimawandel verursacht werden, wird der Ruf nach vor allem technologischen Lösungen immer lauter. Die (Elektro-)Technik nehme in diesem Kontext eine Schlüsselrolle ein, so Dr. Michael Schanz, Autor der Studie und Leiter des VDE Fachausschusses Studium, Beruf und Gesellschaft: „Von der Energiewende bis zur Industrie 4.0, von der Elektromobilität bis zum autonomen Fahren, von der Digitalisierung bis zur Künstlichen Intelligenz – die Elektro- und Informationstechnik wird allerorten benötigt. Es gibt also keinen Grund zu der Annahme, dass wir in Zukunft weniger Zusatzbedarf haben werden.“

Demgegenüber beginnen immer weniger junge Menschen ein Studium der Elektrotechnik oder Informationstechnik: Ende 2021 haben sich mit 13.100 Studentinnen und Studenten 4,3 Prozent weniger für dieses Studium entschieden als noch 2020. Leider können wir diesen Rückgang nicht der Coronakrise zuschieben, denn diese Randeffekte sind bereits herausgerechnet. Es wäre eine Hilfe, wenn jährlich diese 13.000 neuen Fachkräfte in elektro- oder informationstechnische Berufe nach Studienabschluss eintreten würden – leider

Trend	Folge	Höhe	
Demografie	hoher Ersatzbedarf	Rekordhöhe	Bedarf ↑
Technologie-getriebenes Wachstum	hoher Zusatzbedarf	seit Jahren auf hohem Niveau	Bedarf ↗
wenig Interesse am Studienfach	weniger Absolvierende v. a. an Universitäten	sinkt drastisch	Angebot ↓
Schwundquoten	weniger Absolvierende v. a. an HAWn	Rekordhöhe	Angebot ↓

Bild 1: Vierfache Verknappung. Vier Trends, die den Fachkräftemangel verschärfen und ihre Ausmaße (Michael Schanz).

reduziert der Anteil von Abbrecherinnen und Abbrecher (inklusive Studienfachwechsel), die Zahl potenzieller neuer Arbeitskräfte noch einmal deutlich: Von denen, die sich für ein Studium der Elektro- oder Informationstechnik entschieden haben, verlieren wir zusätzlich 63 Prozent (!), eine Verdoppelung im Vergleich zu 1993.

Der Fachkräftemangel und Nachwuchsschwund in MINT-Berufen (Mathematik, Informatik, Naturwissenschaften und Technik) beschäftigt die gesamte Gesellschaft nicht erst seit Februar 2022. Beispielsweise dokumentiert das MINT-Nachwuchsbarometer¹ von acatech und der Körber-Stiftung jährlich, dass sich diese Probleme verschärfen – und dies, obwohl MINT-Förderprojekte und -initiativen, wie die bundesweite MINTvernetz Koordinationsstelle oder die vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten MINT-Cluster, in Hülle und Fülle entstehen und durch die Bundespolitik vorangetrieben werden. Verpuffen diese Anstrengungen einfach? Haben wir den richtigen Zeitpunkt verschlafen und können nun nur noch so gut wie möglich kompensieren?

Die missverstandene Elektrotechnik?

Das Unverständnis für diese katastrophale Lage ist groß, denn im VDE tummeln sich die (Elektro- und Informations-) Technik-Fans. Wieso erreichen wir mit diesen Studiengängen, die sich durch höchste Aktualität, starke Praxisbezüge und Eigenverantwortlichkeit sowie das gemeinschaftliche Lösen von technischen Problemen in Teamwork, kaum potenziellen Nachwuchs? Die hohe Attraktivität von elektrotechnischen und informationstechnischen Berufen, die wir ganz klar sehen, schlägt sich leider nicht in dessen Image nieder. Zwar ist die Informatik mit einem Anteil von 13 Prozent das beliebteste technische Studienfach, mit einem Anteil von nur 3,5 Prozent hat die Elektrotechnik seit 2010 gut ein Drittel an Beliebtheit eingebüßt. Hieraus können wir zweierlei schließen: Ohne Anstrengungen, die Vorzüge und Attraktivität dieser Berufsbeiriche den Zielgruppen aufzuzeigen, ist erstens ein weiteres Einbüßen an Beliebtheit sehr wahrscheinlich. Wenn weniger Menschen diesen Beruf wählen, gibt es weniger Rolemodels, weniger authentische Einblicke in diesen Berufsstand, weniger Interesse in diese Berufe reinzuschnuppern. Zweitens verbirgt sich hier aber ein Hoffnungsschimmer, denn die Bemühungen das Image und die Attraktivität der Informationstechnik aufzupolieren tragen offensichtlich Früchte. Wir unterliegen also nicht dem berühmten Cassandra-Komplex, die Katastrophe herannahen zu sehen und zur Handlungsunfähigkeit verdammt zu sein. Wir können etwas tun!

Warum Elektrotechnik studieren?

Warum ist die Elektrotechnik nicht aus sich heraus schon attraktiv für kommende Generationen? Detaillierte Beschreibungen zu Gründen erwarten wir noch, Ansatzpunkte finden wir aber bereits bei den veröffentlichten Zwischenergebnissen.

Studierende haben sich für die Elektrotechnik entschieden, weil es Berufe mit Zukunft sind, die die eigenen Interessen treffen und gute Verdienstmöglichkeiten bieten. Die Vorzüge dieser Karrierewege werden also zumindest wahrgenommen, müssen aber für kommende Generationen stärker herausgestellt werden: Nachrückende Generationen sind nämlich erlebnisorientiert, wollen sinnerfüllende Berufe ergreifen und etwas gestalten und bewegen. Sie werden jetzt vielleicht entgegen, dass dies vollständig auf die Elektrotechnik zutrifft – unsere Zielgruppe nimmt die Elektrotechnik aber vor allem als simple Anwendung technischer Lösungen und nicht als dessen Gestaltung wahr. Gleichzeitig wird jedoch das Durchhaltevermögen und der sichere Umgang mit Zahlen und Einheiten als wichtigste Eigenschaften für ein erfolgreiches Elektrotechnikstudium genannt. Das hat zumindest einen Touch von Eliten-Studiengängen und gibt Hinweise für die hohen Abbruch- und Fachwechsel-Quoten. Dieses Selbstverständnis hat zur Folge, dass die Hürden für einen Studienbeginn vermutlich höher wahrgenommen werden, also etwas für Überflieger. Am sich zuspitzenden Nachwuchsproblem sehen wir, dass wir uns dieses Image nicht mehr leisten können.

Wie können wir das ändern?

Eine erste Befragung von Abiturientinnen und Abiturienten, die in den Fächern Physik, Mathematik und Informatik die Noten gut bis sehr gut erzielten – im Folgenden „High Potentials“ benannt – bringen noch mehr Licht ins Dunkel: Die Elektrotechnik wird vor allem mit „Strom“ und „Kabeln“, assoziiert, findet also eher im Kleinen und Abstrakten statt. „Strom“ hat dabei einen bedrohlichen Charakter, weshalb auch gerade Mädchen weniger von der Elektrotechnik angezogen werden. Das Wort „Elektro“ ist also negativ besetzt und müsste entweder Aufwertung erfahren oder durch positiv-besetzte Synonyme abgelöst werden. Die Elektrotechnik wird interessanterweise gleichzeitig auch haptisch-physisch wahrgenommen, was sich in der häufigen Nennung der Assoziationen „Maschinen“ und „Sachen“ zeigt. Hier gibt es laut Dr. Maya Götz die potenzielle Stellschraube für das Image der Elektrotechnik, als Bereich wahrgenommen zu werden, in dem kleine Dinge große Dinge bewegen (Maschinen) und gestalten (Lösungen für gesellschaftliche Probleme). Unserer Zielgruppe müssen wir bewusst machen, dass es ohne die Elektroingenieurinnen und -ingenieure keine grüne, digitale und nachhaltige Transformation geben könne, so Herr Schanz. Das Bedürfnis der Jugend sinnstiftende Berufe zu ergreifen, um die Welt zu verbessern, kann die Elektrotechnik also durchaus erfüllen. Wieso kommt das bei der Zielgruppe nicht an?

Konsequenzen für die Nachwuchsförderung

Natürlich ist das eine Frage der Kommunikationskanäle. Wir müssen kommende Generationen dort erreichen, wo sie sich informieren, kommunizieren und vernetzen. Dass hier die Sozialen Medien bei Jugendlichen mit Abstand die größte Rolle spielen, ist kein Geheimnis. In der Folge steigt auch unsere Präsenz als VDE auf diesen Kanälen, wie bei Twitter, Instagram oder LinkedIn. Klar ist aber auch, dass die Ansprache, des-

¹ Bspw. <https://www.acatech.de/publikation/mint-nachwuchsbarometer-2021/> (Zugriff 19.04.2022)

sen Form, Wording und Gestaltung, stimmen müssen. „Wir nutzen eine persönliche Ansprache, mit der sich junge Menschen identifizieren können. Authentisch, nahbar, sinnstiftend und zum Wohle des Gemeinwesens handelnd, das ist das Image, das wir anstreben“ so Laura Arndt, neue Leiterin der VDE Young Net Geschäftsstelle. Die Studie bescheinigt hierzu schon jetzt: Wichtig ist dabei auch, auf konkrete, gendersensible Sprache zu achten.

Schon die Erkenntnis, dass Jugendliche vor allem männliche und stereotypische Elektroingenieure assoziieren, spricht unbedingt für dieses Umdenken, denn die Sprache bestimmt das Denken. Wer immer nur den „Elektroingenieur“ hört, stellt sich auch immer einen Elektroingenieur vor. Die Selbstverständlichkeit, dass mit einer stellvertretenden Geschlechtsform alle angesprochen werden, wird also zunehmend abgelöst und muss Konsequenzen für unsere Ansprache haben, in Wort und Bild.

Das Altbekannte und bisher Funktionierende ist mehr als in Frage gestellt. Wir müssen uns um unseren Nachwuchs bemühen, denn offensichtlich rennt uns die Jugend die Türen nicht mehr ein. Wir sollten nahbar und menschlich sein, zeigen, dass die Elektrotechnik nicht nur handlungsmächtig, sondern zukunftssichernd ist – für die Elektroingenieurin und den Elektroingenieur, wie für die Gesellschaft. Vorbilder, authentische Einblicke in Berufe, die Berücksichtigung aller Schulformen und Klassenstufen, die bisher noch nicht zu unseren Zielgruppen zählten: Das sind Stellschrauben, die wir schon jetzt ausloten können, um die Attraktivität der (Elektro-) Technik frühzeitig bewusst zu machen. Es reicht nicht mehr aus, Jugendliche kurz vor Studien- oder Ausbildungsbeginn zu gewinnen, sich sinnbildlich die Rosinen, die Gewinnerinnen und Gewinner unseres Bildungssystems, herauszupicken. Wir haben nicht genügend Rosinen! Vielmehr müssen wir solche Potenziale ausschöpfen, die bisher ungenutzt blieben: Frühe Faszination für Technik, die explizite Ansprache von Mädchen und jungen Frauen, das Aufwerten der Elektrotechnik weg von „irgendwas mit Strom“, hin zu den vielen Beispielen von Zukunftssicherung, wie wir sie im VDE aufzeigen können.

Die VDE Young Net Geschäftsstelle dankt für diese wichtigen Erkenntnisse und stellt sich diesen Herausforderungen. Sie sind herzlich eingeladen, MI(N)Tzuwirken.



Laura Arndt
Leitung VDE Young Net Geschäftsstelle
laura.arndt@vde.com



Corinna Gosev
Assistenz VDE Young Net Geschäftsstelle
corinna.gosev@vde.com



DIE ENERGIEVERSORGUNG DER ZUKUNFT ENTWICKELN SIE MIT! JETZT AUCH IN AACHEN!

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

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

Für unseren neuen Standort in **Aachen** suchen wir

Senior/Junior Power System Consultants und Application Engineers (W/M/D)

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 160 Ländern tätig.

POWER SYSTEM SOLUTIONS

MADE IN GERMANY

I1 Aktuelle Informationen aus CIRED



Liebe ETG Mitglieder,

vor einem Jahr haben wir hier an dieser Stelle die Frage aufgeworfen, ob „digital“ der neue Normalzustand ist. Heute sehen wir, wie die direkte Interaktion der Fachkollegen und -kolleginnen wieder Fahrt aufnimmt und die digitalen Möglichkeiten zugleich weiter stark nachgefragt werden. Ein Beispiel ist da auch unsere Frühjahrssitzung, die nun wieder in persona in Dresden stattfinden kann und als hybride Veranstaltung ca. einem Drittel der Mitglieder eine Remote-Teilnahme ermöglicht.

Nichtsdestotrotz hat das COVID-Geschehen auch weiterhin Auswirkungen. Nachdem wir in der letzten Ausgabe optimistisch von der Gründungsveranstaltung der neuen CIRED Organisation am 22.12.2021 geträumt hatten, musste diese Veranstaltung wegen der Pandemie ein weiteres Mal verschoben werden und findet nun aller Voraussicht am 23. Mai 2022 in Brüssel statt. Sie sehen, die Erfahrung lehrt uns mit optimistischen Aussagen vorsichtig zu werden.

Die aktuell Lage der Weltpolitik hat natürlich auch die Welt der CIRED erreicht. Mit dem russischen Krieg in der Ukraine erschwert sich die fachliche Zusammenarbeit mit den ukrainischen Kollegen und Kolleginnen massiv, während die Aktivitäten der CIRED mit dem russischen Liaison-Komitee gestoppt wurden. Davon betroffen sind vor allem Arbeitsgruppen, die nun ohne den Input der Fachkollegen und -kolleginnen auskommen müssen. Weiterhin zeigt diese Entwicklung die immense Bedeutung einer sicheren Energieversorgung und die Bedeutung eines zuverlässigen elektrischen Netzes. Wichtige Investitionen in neue Netztechnologien zur weiteren Integration erneuerbarer Energiequellen, grünem Wasserstoff und Energiespeicher sind die Grundlage für eine lebenswerte Zukunft auf unserem Planeten. Die Dringlichkeit dieser Aufgabe verschärft sich angesichts des Krieges in Europa und der Unsicherheiten bei der Versorgung mit fossilen Energieträgern massiv.

Die wichtigste CIRED Veranstaltung des Jahres wird der Workshop „E-Mobility and Power Distribution Systems“ am 02./03. Juni 2022 in Porto sein. Von deutscher Seite sind wir mit einer respektablen Anzahl von mehr als 70 Beiträgen vertreten und stellen damit auch wieder die größte Delegation.

Mit dem Call for Papers für die nächste CIRED-Konferenz 2023 in Rom wirft das nächste Großereignis seine Schatten voraus. Bis zum 14. September 2022 sind alle Fachkollegen und -kolleginnen aufgefordert, ihre Themen für die sechs Sessions einzureichen.

Aufgrund der neuen Sessionstruktur sollen die Schwerpunktthemen hier noch einmal benannt werden:

- Session 1: Betriebsmittel
- Session 2: Power Quality und Elektromagnetische Verträglichkeit
- Session 3: Netzbetrieb
- Session 4: Schutz- und Leittechnik, Automatisierung des Netzbetriebs
- Session 5: Netzplanung
- Session 6: Kunden und Geschäftsmodelle im Verteilernetz, Risikomanagement, Regulierung



**CIRED Porto
Workshop 2022
E-mobility and power
distribution systems**



Die Abstracts werden in einem zweistufigen Verfahren zuerst von den jeweiligen nationalen Komitees und anschließend von den Session Advisory Groups bewertet. Die Entscheidung über Annahme oder Ablehnung eines Abstracts liegt dann beim Technischen Komitee. Angenommene Abstracts müssen dann in einen entsprechenden Beitrag bis zum 23. Januar 2023 überführt werden, der in Deutschland wieder den zweistufigen Bewertungsprozess über das Deutsche Komitee und die jeweilige Session Advisory Group durchläuft.

Der Aufwand eines solchen Review-Prozess ist sehr hoch, da für jedes Abstract und jeden Beitrag nicht nur mehrere Bewertungen erstellt, sondern auch zusammengefasst und bei abweichenden Meinungen in den jeweiligen Komitees und Gruppen diskutiert werden.

Weiterhin werden wir auch dieses Jahr wieder gemeinsam mit den nationalen Komitees der Schweiz und Österreichs uns austauschen. Dazu lädt das österreichische Nationalkomitee zur diesjährigen OVE-Energietechnik Fachtagung am 19./20. Oktober nach Graz ein. Das vollständige Programm finden Sie unter folgendem Link: <https://www.energietechnik-tagung.at/programm>

Wir würden uns freuen, wenn das Programm auch Kollegen und Kolleginnen aus Deutschland zur Teilnahme anregt und wir somit den guten fachlichen Austausch in der D-A-CH Region kontinuierlich ausbauen können.

Für die anstehende warme Jahreszeit wünschen wir Ihnen vor allem Gesundheit und viele Möglichkeiten zum direkten fachlichen Austausch mit den Kolleginnen und Kollegen, wir sind gerne mit dabei.

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



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



*Dr. Roland Drewek
SW Kiel Netz GmbH*

I2 Aktuelle Informationen aus dem Deutschen Komitee der CIGRE



Im letzten halben Jahr lag ein Schwerpunkt des DK CIGRE auf der finalen Auswahl und Vorbereitung der deutschen Beiträge für die kommende Session in Paris. Zudem galt es, die Nachfolge und den Vorsitz in den deutschen Studienkomitees zu organisieren; für verdiente CIGRE-Mitstreiter, die nach 6 bzw. 8 Jahren die maximale Amtszeit erreicht haben.

Erfreulich ist, dass wir bis 24. Januar 2022 insgesamt 44 deutsche Beiträge zur Session einreichen konnten, die auch durch das Technical Council bestätigt wurden, was die hohe Qualität durch strenge nationale Begutachtung im Vorfeld bestätigt. Mit den deutschen Beiträgen werden wir bei der kommenden Session in Paris wieder einen hohen Anteil der Paper stellen und vortragen. Ich freue mich sehr auf diese Veranstaltung und hoffe, Sie dort zahlreich zu treffen. Nach zwei rein virtuellen Veranstaltungen starten wir in Paris mit großer Zuversicht live. Endlich ergibt sich dort wieder die Möglichkeit zum persönlichen Austausch. Nach ersten Messen, die ich besuchen konnte, erwarte ich auch auf der CIGRE 2022 Session in Paris nach langer Zeit ein Wiedersehen im Kolleg*innen- und Branchenkreis und hoffe auf hohe Beteiligung. Innerhalb weniger Tage die ganze Fachwelt – Betreiber, Hochschulen und Industrie persönlich zu treffen – das macht für mich jede Session so besonders wertvoll. Nutzen Sie diese Chance, seien Sie dabei und melden Sie sich bitte rechtzeitig an: [Delegate Registrations | CIGRE](https://session.cigre.org/registration)¹

Einige Studienkomitees (SC) waren neu zu besetzen, nachdem die bisherigen Vorsitzenden die maximale Dienstzeit erreichen. Hier konnten wir für viele SC hochwertige neue nationale Vorsitzende gewinnen. Diese sind inzwischen auch bestätigt. Z. B.

- SC A 1: Herr Dr. Hendrik Steins,
Siemens Energy Global GmbH & Co. KG
- SC A 2: Herr Ronny Fritsche,
Siemens Energy Global GmbH & Co. KG
- SC B 1: Herr Jan Brüggmann,
Amprion GmbH
- SC B 3: Herr Maik Hyrenbach,
ABB AG
- SC C5: Herr Prof. Dr.-Ing. Albert Moser,
RWTH Aachen
- SC C6: Herr Prof. Dr.-Ing. Przemyslaw Komarnicki,
Fraunhofer IFF/ Hochschule Magdeburg-Stendal

Leider ist es uns noch nicht gelungen, für alle Arbeitsgruppen nationale Koordinatoren zu gewinnen. Folgende Vakanzen gibt es noch: C2 Power system operation & control, C3 Power system environmental performance, D1 Materials and emerging test techniques, D2 Information systems and telecommunications. Wir freuen uns über Ihre Meldungen zur Teilnahme. Ich finde es wünschenswert, wenn der traditionell starke deutsche Verband auch in allen Studienkomitees durch qualifizierte Mitglieder international vertreten ist. Aus meiner Sicht sind die Themen im Rahmen der deutschen Energiewende unbedingt relevant.

Ein dritter Arbeitsschwerpunkt ist die Vorbereitung der [CIGRE/CIRED Infoveranstaltung](https://www.vde.com/de/dk-cigre/veranstaltungen/veranstaltung?id=20865&type=vde%7Cvdb)². Diese findet in diesem Jahr am 11. Oktober 2022 im Dorint Hotel in Mannheim statt. Unter dem Thema „Technologien für die klimaneutrale Zukunft“ erwarten Sie spannende Beiträge und die Möglichkeit, sich mit den Referent*innen, sowie den Mitgliedern im deutschen Komitee der CIGRE und den Vorsitzenden der Studienkomitees persönlich zu vernetzen. Diese werden traditionell vor Ort sein, da im gleichen Zug sowohl eine Sitzung des DK CIGRE als auch der SC stattfinden wird. Kommen Sie nach Mannheim und erleben Sie die Vorträge persönlich. Die Teilnahme an der Infoveranstaltung ist dank Sponsoren wie gewohnt kostenlos.



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

¹ <https://session.cigre.org/registration>

² <https://www.vde.com/de/dk-cigre/veranstaltungen/veranstaltung?id=20865&type=vde%7Cvdb>

S1 Neues aus Politik und Regulierung

„Osterpaket“ sieht massiven EE-Ausbau vor

Unter dem Eindruck des russischen Angriffskrieges auf die Ukraine, hat das Bundeskabinett am 06.04.2022 auf Vorschlag von Vizkanzler und Bundeswirtschafts- und Klimaschutzminister Robert Habeck das sogenannte „Osterpaket“ zur Energiepolitik verabschiedet. Dabei handelt es sich um ein Artikelgesetz, das auf über 500 Seiten unter anderem Änderungen zum Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG), zum Windenergie-auf-See-Gesetz (WindSeeG), zum Energiewirtschaftsgesetz (EnWG), zum Bundesbedarfsplangesetz (BBPlG) und zum Netzausbaubeschleunigungsgesetz Übertragungsnetz (NABEG) umfasst.

Als Herzstück des Pakets ist der Grundsatz verankert, dass die Nutzung erneuerbarer Energien im überragenden öffentlichen Interesse liegt und der öffentlichen Sicherheit dient: Die erneuerbaren Energien sind zu einer Frage der nationalen Sicherheit geworden.

EE-Ausbau

Bis 2030 sollen mindestens 80 Prozent des deutschen Bruttostromverbrauchs aus Erneuerbaren bezogen werden. 2035 soll dann Strom nahezu vollständig aus Erneuerbaren Energien stammen. Die Stromversorgung soll damit weitestgehend unabhängig von fossilen Energieimporten werden.

Um das neue Ausbauziel von 80 Prozent für 2030 zu erreichen, werden die Ausbaupfade deutlich angehoben:

- **Solarenergie:** Die Ausbauraten werden auf 22 GW pro Jahr gesteigert, so dass im Jahr 2030 PV-Dachanlagen, PV-Freiflächenanlagen und besondere Solaranlagen von insgesamt rund 215 GW installiert sind.
- **Windenergie an Land:** Die Ausbauraten werden auf 10 GW pro Jahr gesteigert, so dass im Jahr 2030 insgesamt rund 115 GW installiert sind.
- **Windenergie auf See:** Die Ausbauziele werden auf mindestens 30 Gigawatt bis zum Jahr 2030, mindestens 40 Gigawatt bis zum Jahr 2035 und mindestens 70 Gigawatt bis zum Jahr 2045 gesteigert.

Zur Beschleunigung des Ausbaus der Windenergie an Land wird ein gesondertes Gesetzespaket geschnürt, das als „Sommerpaket“ in einem zweiten Schritt im Kabinett beschlossen werden soll. Zur Beschleunigung des Ausbaus auf See wird das WindSeeG grundlegend überarbeitet.

Die Förderung der Biomasse wird stärker auf hochflexible Spitzenlastkraftwerke fokussiert, damit die Bioenergie ihre Stärke als speicherbarer Energieträger zunehmend systemdienlich ausspielen kann.

Bürgerenergieprojekte (Windprojekte bis 18 MW und Solarprojekte bis 6 MW) können künftig auch realisiert werden, ohne dass sie zuvor an einer Ausschreibung teilnehmen müssen. Die finanzielle Beteiligung der Kommunen wird maßvoll überarbeitet.



© Simon Kraus / stock.adobe.com

Um die fluktuierende Erzeugung aus erneuerbaren Energien zu verstetigen und die Speicherung in Wasserstoff und Rückverstromung in der Praxis zu erproben, sollen innovative Konzepte erneuerbarer Energien mit lokaler wasserstoffbasierter Stromspeicherung gefördert und dadurch der Markthochlauf der Wasserstofftechnologie befördert werden.

Neue Biomethan- und neue KWK-Anlagen sollen auf Wasserstoff ausgerichtet werden („H₂-ready“).

Der Finanzierungsbedarf für die erneuerbaren Energien wird künftig über das Sondervermögen „Energie- und Klimafonds“ gedeckt und die EEG-Förderung über den Strompreis beendet. Hierdurch sollen die Stromverbraucher entlastet und zugleich die Sektorenkopplung gestärkt werden. Rechtstechnisch wird dies durch entsprechend hohe Bundeszuschüsse auf das EEG-Konto der Übertragungsnetzbetreiber umgesetzt.

Netzausbau

Der Bundesbedarfsplan zum Ausbau der Übertragungsnetze wird aktualisiert. Es werden 19 neue Netzausbauvorhaben aufgenommen und 17 Netzausbauvorhaben geändert. Das Ziel der Treibhausgasneutralität im Jahr 2045 wird unmittelbar in das Energiewirtschaftsgesetz aufgenommen und in den Verfahren der Netzplanung stärker verankert. Ziel der Netzentwicklungsplanungen wird ein Klimaneutralitätsnetz. Des Weiteren werden auch die Planungen auf Verteilernetzebene konsequent an dem Ziel eines vorausschauenden und effizienten Netzausbaus in Richtung Treibhausgasneutralität ausgerichtet.

Quellen:

- <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2022/04/20220406-habeck-das-osterpaket-ist-der-beschleuniger-fur-die-erneuerbaren-energien.html>
- https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/0406_ueberblickspapier_osterpaket.html

S2 Aus Industrie und Forschung

dena schlägt Systementwicklungsplan zum Netzausbau vor

Die dena hat am 25.01.2022 ihren Abschlussbericht zur Netzstudie III veröffentlicht. Sie zeigt auf, wie die Energieinfrastrukturplanung weiterentwickelt werden muss, um den Anforderungen auf dem Weg zu einem klimaneutralen Energiesystem gerecht zu werden.

Eine integrierte Energieinfrastrukturplanung sei entscheidend für eine erfolgreiche sektorenübergreifende Energiewende, so die dena. Die verschiedenen Energienetze dürften nicht länger basierend auf unterschiedlichen Annahmen geplant werden.

Erforderlich sei eine Weiterentwicklung hin zu einer integrierten Energienetzplanung, die das ganze System in den Blick nimmt. Dazu empfiehlt die dena-Studie einen Systementwick-

lungsplan einzuführen, der den heutigen Netzentwicklungsplänen vorgelagert ist und diese so auf eine gemeinsame, auf das Ziel der Klimaneutralität ausgerichtete Grundlage stellt.

Der vorgelagerte Systementwicklungsplan-Prozess soll die bisherigen Energieinfrastruktur-Planungsprozesse ergänzen und einen konsistenten, abgestimmten Rahmen setzen, der eine Planung vom Ziel der Klimaneutralität her erlaubt.

Die Ergebnisse des Systementwicklungsplans sollen jedoch nicht nur Grundlage für die Netzentwicklungspläne sein, sondern auch Strategieempfehlungen an die Politik enthalten und als Orientierung für Unternehmen zur zukünftigen Entwicklung des Energiesystems dienen.

Auch die Infrastrukturplanung im Verteilnetz sollte in Zukunft integriert erfolgen und die Netze für Strom, Gas bzw. Wasserstoff und Wärme gemeinsam in den Blick nehmen. Die Ergebnisse eines Systementwicklungsplans könnten dabei als Orientierung genutzt werden, um eine konsistente Gesamtstrategie für die Entwicklung der Transport- und Verteilnetze sicherzustellen.

Quelle: <https://www.dena.de/newsroom/publikationsdetailansicht/pub/abschlussbericht-dena-netzstudie-iii/>

S3 International

IPCC: Zeitfenster für nachhaltigen Klimaschutz schrumpft

Der Weltklimarat IPCC hat am 27.02.2022 unter dem Titel „Climate Change 2022 – Impacts, Adaptation and Vulnerability“ den zweiten Teil seines sechsten Sachstandsbericht veröffentlicht. In diesem zweiten Teil geht es um die Folgen der Erderwärmung und die nötigen Anpassungen. Die zentrale Erkenntnis: Das Zeitfenster für nachhaltigen Klimaschutz schrumpft und die Auswirkungen treten viel schneller auf und sind zerstörerischer und weitreichender als vor 20 Jahren erwartet. Die Erderwärmung führt bereits heute schon zu gefährlichen Veränderungen der Natur und Milliarden Menschen werden immer stärker darunter leiden. Selbst wenn es gelänge, die Erwärmung auf 1,5 Grad über dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen, müsse die Menschheit demnach schon in den nächsten 20 Jahren erhebliche Auswirkungen verkraften.

Neben der drastischen Verringerung des Ausstoßes klimaschädlicher Treibhausgase seien fundamentale gesellschaftliche Veränderungen nötig. Die Energie müsse sauber, die Wegwerfmentalität beseitigt, Städte und Landwirtschaft müssten nachhaltig und die Mobilität verändert werden.

Quelle: <https://www.tagesschau.de/ausland/weltklimarat-bericht-101.html>



© Romolo Tavan / stock.adobe.com



Dr.-Ing. Thomas Benz
Geschäftsführer ETG

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

Zum Klimaschutznetz bis 2030

Wir haben in Deutschland eines der zuverlässigsten Stromsysteme der Welt. Unsere weitverzweigte Infrastruktur mit mehr als 100.000 km Übertragungsnetz und 1,7 Millionen km Verteilnetz versorgt 45 Millionen Kunden.

Ambitionierte Klimaschutzziele und die Reduzierung der Energieabhängigkeit mit dem Übergang von zentralen Kohle- und Kernkraftwerken hin zu erneuerbarer Energieerzeugung ändern jedoch die Herausforderungen an die Versorgungssicherheit und an die benötigten Strukturen nachhaltig.

Der von Russland gegen die Ukraine geführte Krieg zeigt aktuell deutlich auf, welche Risiken eine überwiegend von Importen abhängige Energieversorgung mit sich bringt. Erneuerbare Energien sind auch ein zentraler Schritt in Richtung Unabhängigkeit.

Die Dekarbonisierung geht mit zunehmender Elektrifizierung des Verkehrs- und Wärmesektors sowie der Industrie einher und führt zu einem wachsenden Bedarf an erneuerbarem Strom. E-Mobilität und Wärmepumpen bringen zusätzliche Herausforderungen für die Systemintegration mit sich, bieten aber auch zusätzliche Flexibilitätspotentiale. Die Energiewende wird nur gelingen, wenn wir diese Flexibilität nutzbar machen, d.h. nicht nur Millionen von dezentralen Einspeisern, sondern auch Millionen von flexiblen Verbrauchern und Speichern effizient ins System integrieren.

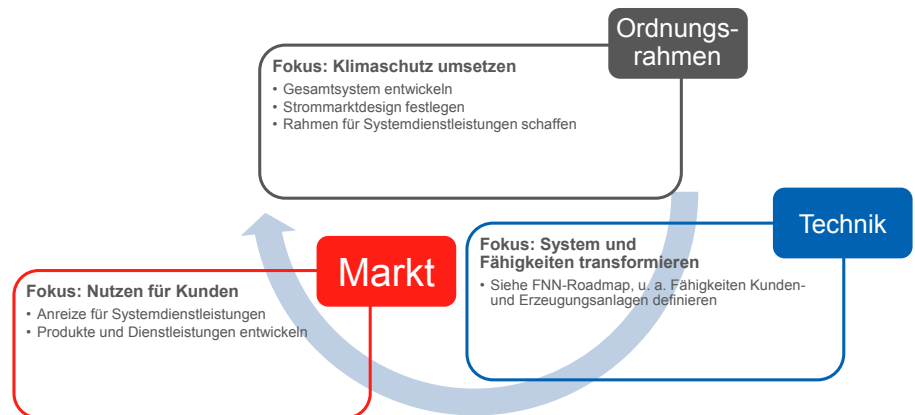


Bild 2: Transformation Energiesystem 2030: Dreisprung

ren. Dies ist ohne einen zügigen Ausbau der Übertragungs- und Verteilungsnetze und ohne umfassende Digitalisierung der Verteilnetze mit intelligenter Systemsteuerung der angeschlossenen Anlagen nicht zu schaffen. Cyber-Sicherheit und Datenschutz „by design“ sind hierbei unverzichtbare Bausteine.

Für diese Transformation hin zu einem „Klimaneutralitätsnetz“ arbeiten im VDE FNN alle betroffenen Fachkreise eng zusammen und die unterschiedlichen Sichtweisen beziehungsweise Interessen führen im Dialog zu ausgewogenen und vorausschauenden technischen Lösungen.

VDE FNN hat ein [Zielbild zum Energiesystem 2030](#)¹ erstellt und mit einer

konkreten [Roadmap](#)² zur Umsetzung hinterlegt. Damit werden Aktions-schwerpunkte der VDE FNN Arbeit konkretisiert und so zukünftige Herausforderungen frühzeitig angegangen.

Entscheidend ist, dass die Anpassung/Neugestaltung von Ordnungsrahmen, Marktdesign und technischer Regelsatz Hand in Hand gehen. Große Herausforderungen bilden zurzeit die Fortentwicklung des Ordnungsrahmens für einen beschleunigten Netzausbau, Digitalisierung und Marktdesign. Ein Beispiel: Es hilft nichts, wenn intelligente Messsysteme verbaut werden und Steuerungen so technisch möglich werden, den Endkunden aber aufgrund ei-

1 <https://www.vde.com/de/presse/pressemitteilungen/fnn-netze-kongress>

2 <https://www.vde.com/resource/blob/2169730/a7cab3d922e17010a4b9c483ddb8b490/roadmap-data.pdf>

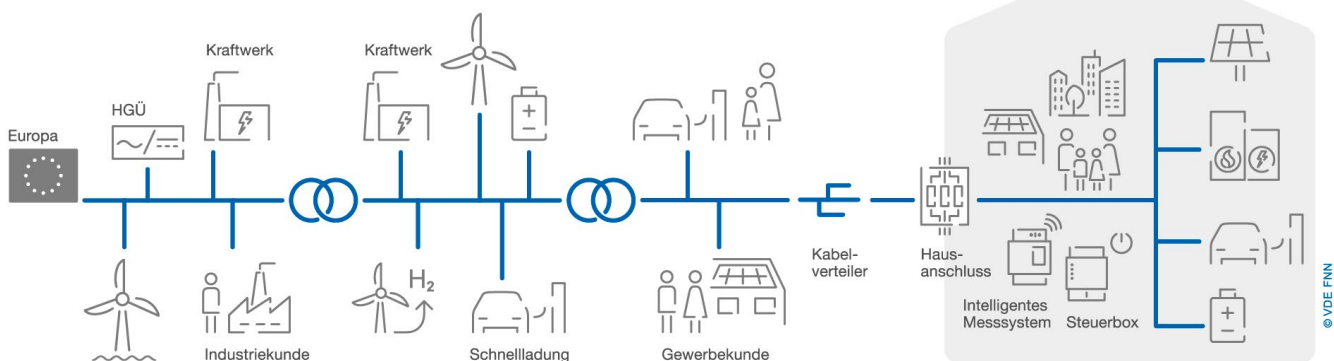
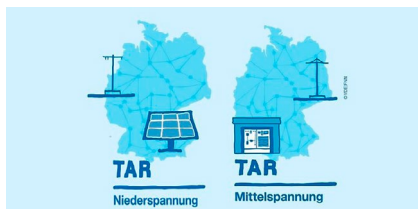


Bild 1: Energiesystem 2030

nes fehlenden Ordnungsrahmens (z. B. §14a Novelle) der mögliche Nutzen noch nicht angeboten werden kann. Und natürlich wird auch der Ausbau der erneuerbaren Energien nur dann das Energiesystem dekarbonisieren, wenn der grüne Strom auch in die Netze eingespeist und zu Verbrauchern transportiert werden kann.



Entscheidung leicht gemacht!

Da gehäuft Anfragen zur Abgrenzung der Anwendungsregeln "Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz" (VDE-AR-N 4105) und der TAR Mittelspannung (VDE-AR-N 4110) eingehen, sorgt die neue [Entscheidungshilfe](#)³ von VDE FNN nun für Klarheit.

Erfolgt der Anschluss beziehungsweise der Nachweis der elektrischen Eigenschaften meiner Energieerzeugungsanlage gemäß Anwendungsregel „[Erzeugungsanlagen am Niederspannungsnetz](#)“ (VDE-AR-N 4105)⁴ oder „[Technische Regeln für den Anschluss von Kundenanlagen an das Mittelspannungsnetz und deren Betrieb](#)“ (VDE-AR-N 4110)⁵? Diese Frage stellt nicht nur Anlagenbetreiber, sondern auch Netzbetreiber, Prüfinstitute und Anlagenprojektor vor eine Herausforderung.

Aus diesem Grund wurde eine Anwendungshilfe veröffentlicht, um – je nach Einzelfall – zu der richtigen Technischen Anwendungsregel zu gelangen. Auf den einzelnen Pfaden werden verschiedene Kriterien wie beispielsweise die Anlagentypen differenziert erfasst. Dadurch liefert VDE FNN einen fundier-

ten und übersichtlichen Orientierungsmaßstab für die Praxis.



Erzeugungsanlagen einfach und korrekt am Netz anschließen – Anschlussplanung und Anlagen-zertifizierung

Der Anschluss von Erzeugungsanlagen ab 135 kW am Mittelspannungsnetz stellt Hersteller, Zertifizierer, Installateure und Netzbetreiber gleichermaßen vor Herausforderungen. Ab 28. Januar unterstützt sie eine [Webinar-Reihe](#)⁶ bei der erfolgreichen Anschlussplanung und Zertifizierung.

Die [Technischen Anschlussregeln Mittelspannung \(VDE-AR-N 4110\)](#)⁷ konkretisieren die Forderungen aus dem europäischen Network Code RfG und der Elektrotechnischen-Eigenschaften-Nachweis-Verordnung (NELEV) im Bezug auf den Nachweis der Mindestanforderungen. Durch den Zubau von Erneuerbaren-Energien-Anlagen steigen die Anschlussanfragen insbesondere für Anlagen mit einer Leistung zwischen 135 kW und 950 kW (Anlagenzertifikat B) und größer 950 kW (Anlagenzertifikat A), etwa Solarparks und Biogasanlagen.

Die Webinar-Reihe

Die neue, praxisgerechte [Webinar-Reihe](#)⁸ der Fördergesellschaft Windenergie und andere Dezentrale Energien (FGW e. V.) bietet das richtige Wissen, um Anlagen schnell zu zertifizieren und ans Netz anschließen zu können. VDE FNN und andere Verbände sowie Unternehmen unterstützen das Vorhaben von

FGW. Gemeinsam erarbeiten sie Lösungen für beschleunigte Zertifizierung und Netzanschluss von Erzeugungsanlagen.

Seit 28. Januar findet jeden Freitag von 8:00 bis 10:00 Uhr ein [Webinar](#)⁹ statt. Dabei werden die relevanten Schritte der Anschlussplanung sowie des vereinfachten Anlagenzertifikates B anhand praktischer Beispiele besprochen. Die Experten und Expertinnen verschiedener Zertifizierungsstellen beantworten durch anwenderorientierte Vorträge und Praxis-Workshops wichtige Fragen und geben Tipps für einzureichende Dokumente.

Zielgruppen

- Installateure/Handwerk
- Zertifizierer
- Anlagenerrichter
- Fachplaner
- Netzbetreiber

[Anwendungshilfe für TAR Mittelspannung \(VDE-AR-N 4110\)](#)¹⁰



Netzbetreiber aufgepasst: neue Regel zum Krisenmanagement

Die VDE Anwendungsregel „Sicherheit im Stromnetz – Krisenmanagement des Netzbetreibers“ (VDE-AR-N 4143-1) bietet Netzbetreibern eine praxisnahe Hilfestellung in unvorhersehbaren Krisensituationen, um schnellstmöglich zum Normalbetrieb zurückkehren zu können.

3 <https://www.vde.com/resource/blob/2169348/759cfb8b039ebbbe83be3968437e5098/entscheidungshilfe-4105-4110-pdf-data.pdf>

4 <https://www.vde-verlag.de/normen/0100492/vde-ar-n-4105-anwendungsregel-2018-11.html>

5 <https://www.vde-verlag.de/normen/0100495/vde-ar-n-4110-anwendungsregel-2018-11.html>

6 <https://wind-fgw.de/2021/12/22/fgw-initiiert-eine-webinarreihe-erfolgreicher-netzanschluss-fuer-erzeugungsanlagen-am-mittelspannungsnetz-fuer-betreiber-fachplaner-und-installateure/>

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

8 <https://wind-fgw.de/aktivitaeten/fgw-seminare/>

9 <https://wind-fgw.de/aktivitaeten/fgw-seminare/>

10 <https://www.vde.com/resource/blob/1963772/29dd34d0465403dbb590032b76eca216/02-1-anwendungsbereich-1-bild-data.png>

Das Wichtigste in Kürze

- Die Anwendungsregel legt verbindliche, einheitliche Regelungen für die Handlungsfähigkeit im Krisenfall fest
- Zählpunkte und Netzebenen der Netzbetreiber sowie die BSI-Kritikverordnung sind durch differenzierte Anforderungen berücksichtigt
- Es besteht größtenteils eine Übergangsfrist zur Einführung der Maßnahmen von einem Jahr
- Erstmals wird eine Notstromversorgung über mindestens 72 Stunden für besondere Einrichtungen und Organisationen notwendig

Nutzen

Die VDE Anwendungsregel beschreibt die Anforderungen an die Organisation und das Management der Netzbetreiber im Krisenfall einschließlich der vorbereitenden und nachbereitenden Maßnahmen. Die Krisenbedeutung eines Netzbetreibers korreliert unter anderem mit der Anzahl der Zählpunkte und der Netzebene sowie der BSI-Kritikverordnung. Daher wird in der VDE Anwendungsregel zwischen drei Schwellenwertgruppen mit hohen, mittleren und geringen Anforderungen unterschieden. Netzbetreiber müssen die Maßnahmen größtenteils innerhalb von einem Jahr nach dem Inkrafttreten der Anwendungsregel umsetzen.

Vorteil für Querverbundunternehmen

Die Anforderungen für Betreiber elektrischer Netze sind eng mit denen der Gas- und Wasserinfrastruktur verzahnt.

Herkunft

Die VDE Anwendungsregel „Sicherheit im Stromnetz – Krisenmanagement des Netzbetreibers“ basiert auf dem FNN Hinweis S 1002 „Sicherheit in der Stromversorgung“, die Inhalte wurden aktualisiert und erweitert. Grundlage hierfür sind praxisnahe und aktuelle Erfahrungen der Netzbetreiber in der Krisenbewältigung.

Zielgruppe

- Netzbetreiber öffentlicher Stromversorgungsnetze

FNN-Ressourcenregister

Das netzbetreiberübergreifende Register für Ressourcen in Krisenfällen zeigt die bei Netzbetreibern verfügbaren technischen Betriebsmittel und Materialien. Diese freiwilligen Angaben ergänzen die teilnehmenden Unternehmen mit Notfallkontakten. VDE FNN pflegt das Register seit Jahren kontinuierlich und stellt es allen teilnehmenden Netzbetreibern zur Verfügung.



Netzstabilität erhalten: wie Erzeugungsanlagen sich systemstützend verhalten

VDE FNN beschreibt in einem FNN Hinweis technische Fähigkeiten von Erzeugungsanlagen, um das Stromnetz in kritischen Betriebszuständen stabil zu betreiben. Der Hinweis ist auf Deutsch und Englisch im [VDE-Shop](#)¹¹ erhältlich.

Hintergrund

Die Technischen Anwendungsregeln definieren unter dem Begriff „Fahren auf der Kennlinie“ Anforderungen an Erzeugungsanlagen, die keinen Stabilitätskriterien unterliegen. Sie stellen weder netzbildende noch systemstützende Fähigkeiten sicher. Eine gewisse Durchdringung des Verbundsystems bzw. vom Verbund abgetrennter Teilsysteme mit Erzeugungsanlagen ohne netzbildende Eigenschaften ist weiterhin tolerabel, solange die Stabilität in Summe gewährleistet ist. Erzeugungseinheiten ohne netzbildende Eigenschaften müssen dann aber zumindest systemstützende Eigenschaften aufweisen. In jedem Fall sind Reglerstrukturen sowie Parametrierungen auf Basis definierter Stabilitätskriterien festzulegen. Im Mittelpunkt stehen dabei die Regelung der Frequenz (Wirkleistungsbilanzierung).

Das Wichtigste in Kürze

Der FNN Hinweis „Netzbildendes und systemstützendes Verhalten von Erzeugungsanlagen“ beschreibt Anforderungen und Nachweise für Erzeugungsanlagen (EZA) sowie kontinuierlich regelbare Speichersysteme und Verbrauchseinrichtungen (EZVA) zur Gewährleistung der Teilnetzbetriebsfähigkeit sowie zur schnellen und stabilen Überfrequenzabregelung bei Großstörungen. Die erforderlichen regelungstechnischen Maßnahmen gehen davon aus, dass jede EZA und EZVA innerhalb eines begrenzten Regelbereichs einen stabilen Teilnetzbetrieb bzw. Inselnetzbetrieb zulassen und Beschränkungen des Wirkleistungsgradienten nur außerhalb dieses begrenzten Betriebsbereichs zur Anwendung kommen. Der Grundansatz dabei ist, Regeleigenschaften, wie sie bereits vor Jahrzehnten noch im Einsatz waren, auch für primär effizienzoptimierte Anlagen wiederzubeleben. Das beschriebene Regelverhalten wird nur bei seltenen Störereignissen vollumfänglich angefordert. Die EZA und EZVA werden im Normalbetrieb dadurch nicht zusätzlich beansprucht. Neben Festlegung und ausführlicher Begründung der Anforderungen wird aufgezeigt, wie Nachweise innerhalb des Zertifizierungsprozesses zu gestalten sind.

VDE FNN Experten haben in der Erarbeitung des FNN Hinweises die Ansicht und wichtige Erfahrung von allen relevanten Akteuren eingebracht. Dieser FNN Hinweis kann bereits jetzt Hilfestellung in den Fällen bieten, in denen die derzeit gültigen TAR-Anforderungen zu konkretisieren sind.

EU-Aspekte

Der FNN Hinweis bietet die Grundlage für tiefergehende und fachliche Diskussionen auf europäischer Ebene, um potenzielle systemstabilitätsgefährdende Aspekte zu definieren und beheben zu können. Das systemstützende Verhalten von Erzeugungsanlagen ist kritisch für den sicheren Betrieb des Verbundnetzes und soll in der Revidierung der European Network Codes, insbesondere die NC RfG, berücksichtigt werden.

Der FNN Hinweis wird in EU-Kreisen vorgestellt, um die Weiterentwicklung der Anforderungen für Erzeugungsanlagen sowie kontinuierlich regelbare Spei-

¹¹ <https://shop.vde.com/de/netzbildendes-und-systemst%C3%BCtzendes-verhalten-von-erzeugungsanlagen-download-2>

chersysteme und Verbrauchsanlagen zu unterstützen.

Die Übersetzung ins Englisch des FNN Hinweises wird voraussichtlich im März 2022 im [VDE Shop](#)¹² erscheinen.

Kontext

Die Diskussionsergebnisse des internen FNN-Expertenworkshops zum Thema „Wirkleistungsanpassung bei Über- und Unterfrequenz und Reglerstabilität“ (Oktober 2018) haben Handlungsbedarfe hinsichtlich Weiterentwicklung der Technischen Anschlussregeln ([VDE-AR-N 4105](#)¹³/[4110](#)¹⁴/[4120](#)¹⁵/[4130](#)¹⁶) aufgezeigt. Die Anforderungen der genannten TARs zum „Fahren auf der Kennlinie“ und die entsprechenden Nachweise können nicht ausschließen, dass dennoch ein instabiles Verhalten von Erzeugungsanlagen auftreten kann. Im Falle der Bildung eines Teilnetzes (z.B. als Folge eines System Splits), welche aus einem Teil des Übertragungsnetzes sowie unterlagerten Verteilnetzen besteht, müssen auch die Anlagen im Verteilnetz bei einer frequenzbedingten Leistungsanpassung („Fahren auf der Kennlinie“) stabil bleiben. In der [VDE-AR-N 4130](#)¹⁶ stellt der Nachweis zur Teilnetzbetriebsfähigkeit diese Stabilität sicher. In den [VDE-AR-N-4105](#)¹³/[4110](#)¹⁴/[4120](#)¹⁵, sind entsprechende Anforderungen und Nachweise derzeit nicht verpflichtend verankert.

Zielgruppen

- **Netzbetreiber:** können die Wichtigkeit der Anforderungen an EZA und EZVA zur Teilnetzbetriebsfähigkeit besser einschätzen und bei Netzanlussituation adäquat prüfen.
- **Anlagenbetreiber und Projektentwickler:** können die Anforderungen

und Zertifizierungsprozesse zur stabilen Teilnetzbetriebsfähigkeit rechtzeitig in die Planungs- und Realisierungskonzepte einbeziehen.

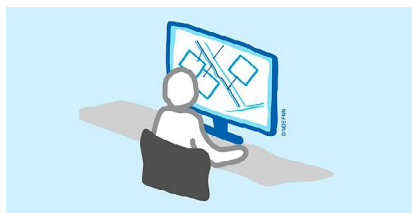
- **Hersteller von EZA und EZVA:** erhalten einen rechtzeitigen Anstoß zu den notwendigen Entwicklungen von EZA- und EZVA-Komponenten und mit entsprechenden Eigenschaften und Anforderungen an die Nachweise.

Nutzen

Der FNN Hinweis bietet insbesondere Herstellern, Betreibern und Planern die Möglichkeit, die zu erwartenden geänderten Anforderungen in den TARs rechtzeitig umzusetzen und diese im Zusammenhang mit der Zertifizierung der Anlagen einzuplanen.

Überführung in die Regelsetzung

Die Erkenntnisse des FNN Hinweises werden in der Weiterentwicklung der Anforderungen für Erzeugungsanlagen in der geplanten Überarbeitung der TARs berücksichtigt. Dieser FNN Hinweis ist nur ein erster Schritt: VDE FNN wird weiter technischen Anforderungen im Konsens mit den relevanten Akteuren festlegen und damit einen wichtigen Beitrag zur Systemstabilität des deutschen Stromnetzes leisten.



VDE FNN Studie: aktuelle Unsymmetrie-Grenzwerte weiter zukunftsfähig

Aktuell sind in öffentlichen Niederspannungsnetzen bereits einphasige und zweiphasige Geräte mit hoher Leistung im Einsatz. Wenn in Zukunft immer mehr Geräte wie Elektroautos und Speicher ans Niederspannungsnetz angeschlossen werden, steigen sowohl Nutzungsdauer als auch Gleichzeitigkeit. VDE FNN hat in einer Studie die Auswirkungen untersucht und bewertet: Die bisherigen Grenzwerte können weiterhin beibehalten werden.

Zwischen Januar 2020 und Dezember 2021 hat das Forum Netztechnik/

Netzbetrieb im VDE (FNN) die Studie *Unsymmetrie in der Niederspannung* durchgeführt, um Unsymmetrie-Grenzwerte zu überprüfen. Damit wird eine wichtige Grundlage für den sicheren und zuverlässigen Netzbetrieb im Niederspannungsnetz der Zukunft geschaffen. Für die Studie wurden eine Metastudie erstellt sowie Feld- und Labormessungen und umfangreiche Simulationen durchgeführt.

Schwerpunkte

- Grundlagen und Metastudie
- Feldmessungen zur Unsymmetrie in Niederspannungsnetzen
- Charakteristiken von unsymmetrischen Geräten und deren Einfluss auf die Unsymmetrie
- Simulation der Einflussfaktoren und Bewertung unterschiedlicher Grenzwerte

Ergebnisse

- Metastudie: der aktuelle Grenzwert ist weitgehend robust, bei einer Reduzierung des Grenzwertes ergibt sich eine deutlich höhere Aufnahmekapazität
- Labormessungen zeigen bei dreiphasig angeschlossenen Geräten überwiegend eine symmetrische Leistungsaufnahme
- Der Grenzwert der Spannungsunsymmetrie in der Niederspannung wurde in den Feldmessungen nicht überschritten. Jedoch wurde der zulässige Gesamtstöreintrag der Spannungsunsymmetrie im Niederspannungsnetz vom aktuellen gemessenen Gesamtstöreintrag teilweise überschritten.
- Bei den Simulationen wurden verschiedene typische Netze (Stadt, Vorstadt, Dorf, ländlich) und verschiedene Durchdringungsgrade berücksichtigt. Auch bei der erwarteten hohen Durchdringung mit Elektrofahrzeugen sollte der derzeitige Unsymmetrie-Grenzwert weiter angewendet werden, da gleichzeitig eine Entwicklung hin zum symmetrischen Laden erfolgt. Die tatsächliche Entwicklung soll aber zusätzlich gemonitort werden.

Der neue VDE FNN Hinweis "Metasystematik zur Netzauskunft (S 115)" be-

¹² <https://shop.vde.com/de/>

¹³ <https://www.vde.com/de/fnn/arbeitsgebiete/tar/tar-niederspannung/erzeugungsanlagen-am-niederspannungsnetz-vde-ar-n-4105-2018>

¹⁴ <https://www.vde.com/de/fnn/arbeitsgebiete/tar/tar-mittelspannung-vde-ar-n-4110>

¹⁵ <https://www.vde.com/de/fnn/arbeitsgebiete/tar/tar-hochspannung-vde-ar-n-4120>

¹⁶ <https://www.vde.com/de/fnn/arbeitsgebiete/tar/tar-hoehchstspannung-vde-ar-n-4130>

schreibt die Rahmenbedingungen für digitale Auskunftsanfragen zu elektrischen Energienetzen. Grundlage dafür ist eine Metasystematik zur Netzauskunft.

Die Anforderungen an den Prozess der Netzauskunft sind in den letzten Jahren aufgrund zunehmenden Bautätigkeiten und der wachsenden Anzahl von neuen Versorgungsunternehmen gestiegen. Parallel haben sich am Markt neue Verfahren und Dienstleistungen zur Anfrage von Netzauskünften etabliert.

Die Anzahl und Diversität der Auskunftssuchenden, der Versorgungsunternehmen und sonstiger Netzinfrastrukturbetreiber steigt. Häufig sind auch Form und Inhalt der Auskunftsanfragen unterschiedlich strukturiert. Daher digitalisieren viele Versorgungsunternehmen ihre Prozesse, um die Bearbeitung und Erteilung von Netzauskünften effizienter zu gestalten. In diesem Zusammenhang sind neben Auskunftsportalen der Versorgungsunternehmen weitere privatwirtschaftliche Portallösungen entstanden, die den Anfragenden im Auskunftsprozess unterstützen.

Das Wichtigste in Kürze

- Mindestanforderungen an eine standardisierte Auskunftsanfrage über Metasystemportale sowie deren dortige digitale Weiterverarbeitung
- Möglichkeiten, Zusammenhänge und Abhängigkeiten eines übergreifenden Standards für die im Anfrageprozess beteiligten Abläufe und IT-Systeme

Der VDE FNN Hinweis beschreibt, wie Zuständigkeiten für Auskünfte ermittelt und Auskünfte in einem einheitlich definierten Datenformat weitergeleitet werden.

Die Teilnahme an einem Metasystemportal ist dem jeweiligen Versorgungsunternehmen im Rahmen seiner eigenen Prozesse freigestellt. Im Fall einer Teilnahme sind die Bedingungen für die Zusammenarbeit in einer Vereinbarung zwischen dem Versorgungsunternehmen und dem Metasystemportalbetreiber festzuschreiben.

Zielgruppen

- Versorgungsunternehmen
- Sonstige Netzinfrastrukturbetreiber
- Metasystemportalbetreiber

Nutzen

- Effizientere Anfragen zu elektrischen Energienetzen
- Definition von Mindestanforderungen an eine standardisierte Auskunftsanfrage
- VDE FNN Hinweis „Metasystematik zur Netzauskunft (S 115)“ und DVGW-Merkblatt „Metasystematik zur Netzauskunft GW 115“ bilden ein einheitliches Regelwerk der Sparten Strom, Gas und Wasser



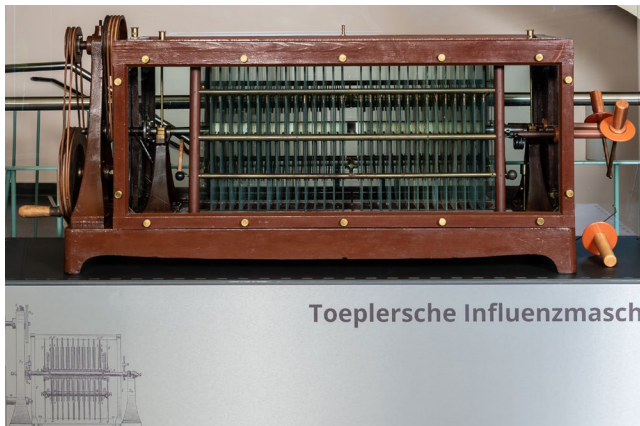
*Dipl.-Ing.
Dieter Quadflieg
Forum Netztechnik/
Netzbetrieb im VDE
(FNN)*

H1 Influenzmaschinen – eine elementare Theorie der Effizienz dieser über- und unterschätzten frühen Energiewandler

Eingebettet in historische Betrachtungen zu Aufbau und Anwendung von klassischen Influenzmaschinen wurde kürzlich gezeigt, dass deren Wirkungsgrad die 50%-Grenze nicht überschreiten kann [1], [2]. Die Betrachtungen hierzu fußen auf dem von Robert Wichard Pohl angegebenen Maschinen-Modell [3]. Es ist das Ziel dieses Beitrages, die genannten Berechnungen für unterschiedliche Belastungsfälle zu verallgemeinern und auch zu zeigen, wie mit speziellen Modifikationen die für diese Maschinen geltenden Begrenzungen tatsächlich erreicht oder auch durchbrochen werden könnten. Eine Renaissance der Influenzmaschinen soll damit nicht begründet werden.

1 Die Vorgeschichte

In der späten Mitte des 19. Jahrhunderts verdrängten neuartige Generatoren die auf Reibungselektrizität gegründeten Hochspannungserzeuger aus den physikalischen Kabinetten: die Influenzmaschinen. Die Erwartungen waren hoch. August Toepler, einer der Erfinder, meinte 1866, dass damit „vielleicht der unmittelbarste Weg angedeutet seyn dürfte, durch mechanische Arbeit elektrische Wirkung zu erzielen“ [4]. Diese Erwartungen bestätigten sich nicht (Bild 1.1,2). Der „unmittelbarste Weg“ blieb den wenig später vorgestellten „dynamo-elektrischen“ Generatoren des Werner (von) Siemens vor-



Toeplersche Influenzmaschine

Bild 1.1: Die wohl größte Maschine der jungen Influenzmaschinentechnik ist die von Oscar Leuner, „Mechaniker am Königl. Polytechnikum Dresden“ (Ehrentitel, kein Angestelltenverhältnis!) nach dem Vorbild einer Toeplerschen 20-Platten-Maschine aufgebaute 60-Platten-Maschine (58 bewegte Platten, Basislänge etwa 1,5 Meter). Leuner stellte sie 1881, eingebettet in den Ausstellungsbeitrag des Dresdner Polytechnikums, zur Internationalen Ausstellung für Elektrizität in Paris vor. Sie wurde 1945 aus dem zerstörten Hauptgebäude der TH Dresden am ehemaligen Bismarckplatz geborgen und von dem Mechaniker Wunderwald rekonstruiert. Sie steht heute im Vestibül des Toepler-Baus der TU Dresden. (Quelle: Foto TUD, Michael Kretschmer)



Bild 1.2: Seit dem frühen 20. Jahrhundert dienen Influenzmaschinen, von Ausnahmen abgesehen, nur noch didaktischen Zwecken. Hier eine solche Maschine (Platten-Durchmesser 31 cm) in der vom britischen Erfinder James Wimshurst geprägten Ausstattung; hergestellt von Voluta, Deutschland, um 1935.

(Quelle: Eigentum des Autors)

behalten [5]. Die höchsten mit Influenzmaschinen erreichten Wirkungsgrade dokumentierten Toepler (1879, ca. 20 %) [6] und, ein Vierteljahrhundert später, Heinrich Wommelsdorf (ca. 27 %) [7]. Weiter zielende Überlegungen, z. B. in [8], blieben Spekulation. Es gehört zur Geschichte dieser in der frühen Röntgentechnik durchaus bedeutsamen Maschinen, dass, wohl wegen deren drastischen Bedeutungsverlustes am Ende des ersten Drittels des vergangenen Jahrhunderts, eine fundierte quantitative Analyse der energetischen Eigenschaften unerledigt blieb.¹ Das wird in einigen wesentlichen Eckpunkten hier nachgeholt.

2 Das Modell nach R. W. Pohl (Bild 2)

Wenn der Rotor, eine isolierende Speiche mit den metallischen Elektroden α und β , in das von der Spannung U_e zwischen den Elektroden γ und δ aufgebaute Feld eintritt, wird er von dem als „Neutralisator“ bezeichneten Doppelpfeil kurzgeschlossen. Er wird zum kompakten elektrischen Leiter, auf dessen Außenflächen α und β gleich große entgegengesetzte Ladungen zu γ und δ induziert werden. Wenn der Rotor das Statorfeld verlässt, wird der Kurzschluss der Elektroden α und β aufgehoben. Die Ladungen sind getrennt und werden in den durch die Elektroden α - β , γ - α und δ - β gebildeten Kapazitäten gespeichert. Deren Resultierende C_i wird mit dem Drehen des Rotors in Richtung der Kontakte A, K durch mechanische Arbeit gegen die Kraft des elektrischen Feldes verkleinert. Spannung und elektrische Energie steigen entsprechend. Auf ei-

¹ In der umfangreichen Influenzmaschinen-Literatur findet sich eine Arbeit, in der, ebenfalls angelehnt an das Modell von Pohl, der Wirkungsgrad betrachtet wird [9]. Der Autor kommt zu dem kaum interpretierbaren Schluss, dass der Wirkungsgrad für kapazitiv gestützte Lasten maximal 25% und für rein ohmsche Lasten maximal 50% beträgt. Dieser Aussage wird hier ausdrücklich widersprochen. Ausführlichere Literaturhinweise werden in [1], [2] gegeben.

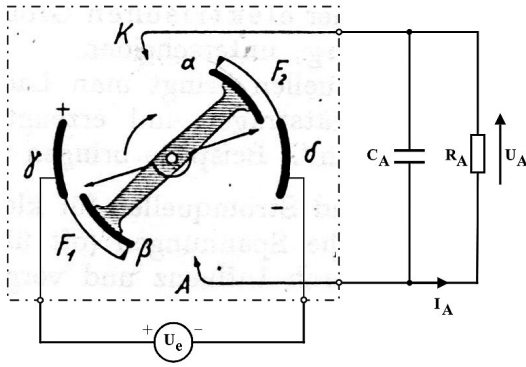


Bild 2: Die fremderregte Influenzmaschine nach dem Modell von Pohl [3]. Aus wissenschaftshistorischen Gründen sind die innerhalb der Strichpunktierung befindlichen Elemente original von Pohl übernommen.

nem hohen Spannungsniveau $U_{\alpha\beta} = U_E = vU_e > U_A$ – die innere Kapazität C_i erreicht ihren kleinsten Wert C – werden Ladungen an die Last $C_A \parallel R_A$ übergeben. Die Spannungsverhältnisse veranschaulicht Bild 3. Der (symbolischen) Eingangsspannungsquelle U_e wird keine Energie entzogen; die umgesetzte elektrische Energie entstammt der mechanisch aufgewendeten Arbeit.

Die Drehung des Rotors zur Last hin habe die Elektroden von Rotor und Stator so entkoppelt, dass die Rotorkapazität als Maschinenkapazität C angenommen werden darf. F sei die Fläche der Elektroden α und β , l ihr Abstand; s bezeichne den Luftspalt zu den Elektroden δ, γ bei horizontaler Rotorstellung. Damit erhält die Verstärkung v eine (grobe) geometrische Deutung:

$$U_E = vU_e = \frac{Ql}{\epsilon F}; Q = \frac{U_e \epsilon F}{2s} \rightarrow v \leq \frac{l}{2s} \quad (1)$$

Das Kleiner-Zeichen steht für die reale, nicht vollständige Entkopplung. Auch die Berücksichtigung parasitärer Kapazitäten würde v verkleinern; ebenso wie eine größere resultierende Dielektrizitätskonstante längs der Speiche des Rotors. Die nachfolgend hergeleiteten energetischen Grenzwerte werden von den gebrauchten Vereinfachungen nicht berührt.

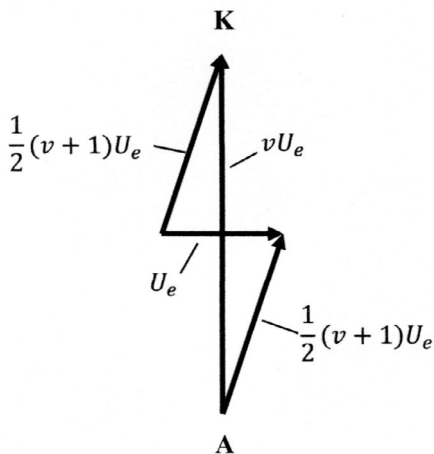


Bild 3: Die Spannungsverhältnisse in der Influenzmaschine unmittelbar vor der Kontaktierung des Rotors mit der Last. Die Orientierung der Spannungspfeile des maschineninternen Maschenumlaufs ist der Anschaulichkeit halber an die Geometrie des Modells angelehnt.

3 Wirkungsgrad

Vorausgesetzt sei (zunächst) eine so ausgiebige kapazitive Stützung der ohmschen Last, dass der Laststrom als Gleichstrom betrachtet werden darf. Ausgedrückt wird dies durch

$$C_A = kC \text{ mit } k \gg 1. \quad (2)$$

Diese Annahme schließt ein, dass die Kontaktierung des Rotors mit der Last als Prozess ohne zeitliche Ausdehnung betrachtet werden darf. Die quantitative Analyse des Ladungstransfers führt auf einen Ladungszuwachs auf C_A von

$$\Delta Q = \frac{k}{1+k} C (U_E - U_A) \quad (3)$$

verbunden mit einem Spannungszuwachs

$$\Delta U_A = \frac{1}{1+k} (U_E - U_A) \quad (4)$$

und einem Energiezuwachs

$$\Delta E_{C_A} = \frac{kC}{2} (2U_A \Delta U_A + \Delta U_A^2). \quad (5)$$

Vergleicht man diesen mit der pro Zyklus aufzuwendenden mechanischen Energie $E = (C/2)U_E^2$, so ergibt sich ein Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{k(2U_A \Delta U_A + \Delta U_A^2)}{U_E^2}. \quad (6)$$

Da der Spannungszuwachs voraussetzungsgemäß als sehr klein angenommen werden darf, führt eine simple Extremwertbetrachtung auf

$$U_{E_{opt}} = 2U_A, \quad (7)$$

woraus

$$\eta_{max} = \frac{1}{2} \frac{k}{1+k} \quad (k \gg 1) \rightarrow \eta_{max, k \rightarrow \infty} = \frac{1}{2} \quad (8)$$

folgt.

4 Drehzahl und Innenwiderstand

Die zur Erzeugung der Ausgangsleistung erforderliche Zahl n von in der Zeiteinheit T zu leistenden Arbeitszyklen ($n = T^{-1}$) – man beachte, dass je Umdrehung zwei ausgeführt werden – ergibt sich mit $I_A = \Delta Q n$ zu

$$n = \frac{1+k}{k} I_A \frac{1}{C(U_E - U_A)}. \quad (9)$$

Betrieben unter optimalen Bedingungen – Gl. (7) und $k \gg 1$ – beträgt die Zyklenzahl

$$n_{opt} = (R_A C)^{-1}. \quad (10)$$

Mit der Leerlaufspannung U_E und dem Kurzschlussstrom $I_{SC} = nQ = nCU_E$ kann der Influenzmaschine der Innenwiderstand

$$R_i = (n_{opt} C)^{-1} \quad (11)$$

zugeordnet werden. Unter optimalen Bedingungen scheint das Verhalten der Influenzmaschine mit dem Verhalten des klassischen Zweipols bei maximalem Leistungstransfer zu korrespondieren: $R_i = R_A \rightarrow \eta = 1/2$. Ein wesentlicher Unterschied besteht aber darin, dass der Innenwiderstand über die Drehzahl mit der Last verknüpft ist. Das hindert die Influenzmaschine daran, wie der klassische Zweipol Ausgangsleistung gegen Wirkungsgrad tauschen zu können. Der Grenzfall $R_A \rightarrow \infty, \eta \rightarrow 1$ bleibt den Influenzmaschinen verwehrt.

5 Die selbsterregte Maschine

Die Fähigkeit zur Selbsterregung von Influenzmaschinen erklärt das Modell nach Pohl mit den Kontakten F_1 und F_2 in Bild 4. Die nach dem Ladungstransfer auf der Rotorkapazität verbliebenen Restladungen werden nach einigen Zyklen die Elektroden γ und δ so aufladen, dass $U_E = vU_A$ gilt. Gl. (7) erfordert, ebenso wie eine hier unterdrückte Extremwertbetrachtung,

$$v_{opt} = 2. \quad (12)$$

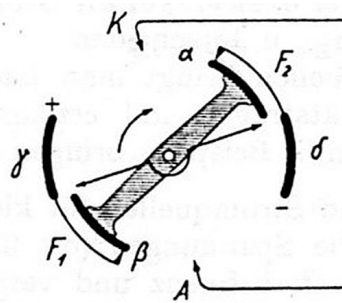


Bild 4: Das Modell Pohls mit der Möglichkeit zur Selbsterregung vermittelt der Kontakte F_1 und F_2 .

6 Eine Zwischenbilanz

Die 50%-Grenze des Wirkungsgrades ist evident. Schwerer als diese Grenze wirkt, dass die klassischen Maschinen nicht gezielt auf die geforderten Optimierungsbedingungen eingestellt werden können und insofern meistens weitab vom Optimum arbeiteten. Bild 5 skizziert eine selbsterregte Maschine nach Pohl ergänzt um die Möglichkeit zur optimalen Anpassung.

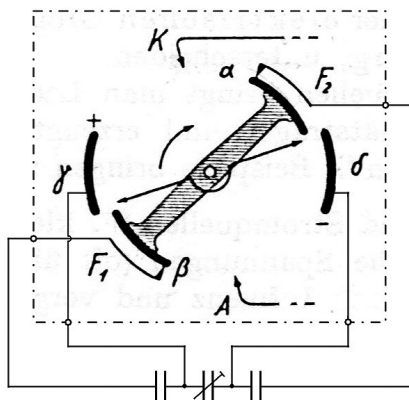


Bild 5: Eine mit $v > 2$ ausgestattete selbsterregte Maschine wird mit einem in die Rückkopplung eingefügten kapazitiven Spannungsteiler, der den Verstärkungsüberschuss kompensiert, an die Forderung nach den Gln. (7) u. (12) angepasst.

7 Kapazitiv schwächer gestützte Lasten

Bei signifikanter Reduzierung der Stützkapazität ist die Ausprägung von „Sägezähnen“ auf der Ausgangsspannung (Bild 6) nicht mehr zu vernachlässigen. Die beim Kontaktieren der inneren Kapazität C , aufgeladen auf U_E , mit der äußeren Kapazität $C_A = kC$, entladen auf U_L , herbeigeführte Umverteilung der Ladungen führt zu folgenden Spannungsverhältnissen:

$$U_1 = \frac{U_L kC + U_E C}{(1+k)C} \quad (13)$$

Weiter ist davon auszugehen, dass die für $k \rightarrow \infty$ ermittelte Zyklenzahl nach Gl. (10) nicht mehr das Optimum gewährleistet. Um dieses aufzusuchen wird die Zyklendauer T mit x bewertet. Der Sägezahn gehorcht dann

$$U_L = U_1 e^{-\frac{xT}{kC R_A}} = U_1 e^{-\frac{x}{k}}. \quad (14)$$

Aus beidem folgt

$$U_1 = \frac{U_E}{1+k - k e^{-\frac{x}{k}}}. \quad (15)$$

Mit jedem Zyklus wird also die Energie

$$E_A = \frac{U_E^2}{R_A(1+k - k e^{-\frac{x}{k}})^2} \int_0^{Tx} e^{-\frac{2t}{kT}} dt = \frac{U_E^2}{R_A(1+k - k e^{-\frac{x}{k}})^2} \frac{kT}{2} (1 - e^{-\frac{2x}{k}}) \quad (16)$$

abgegeben. Dem steht die mechanisch aufzubringende Energie

$$E_{mech} = \frac{C}{2} U_E^2 = \frac{T}{2R_A} U_E^2 \quad (17)$$

gegenüber. Also lautet der x, k -abhängige Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{k(1 - e^{-\frac{2x}{k}})}{(1+k - k e^{-\frac{x}{k}})^2}. \quad (18)$$

Zur rechnerischen Vereinfachung substituieren wir

$$z = e^{-\frac{x}{k}} \quad (19)$$

und erhalten mit einer Extremwertbetrachtung

$$z_{opt} = \frac{k}{1+k}. \quad (20)$$

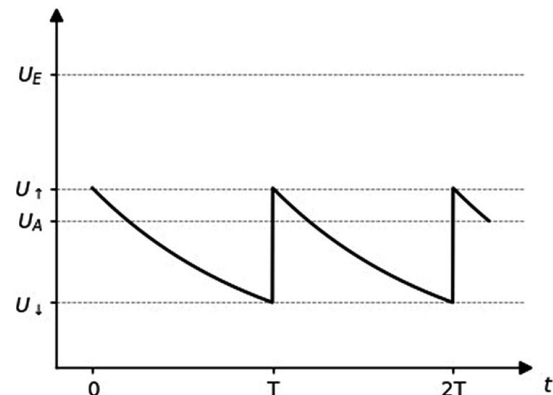


Bild 6: Sägezahnprägung für kapazitiv schwach gestützte Lasten; hier etwa maßstäblich für $k=1$.

Der so darstellbare Wirkungsgrad

$$\eta(k_{opt}) = \eta_{max,k} = \frac{k[1 - (\frac{k}{1+k})^2]}{(1+k - k\frac{k}{1+k})^2} \quad (21)$$

lässt sich leicht zurückführen auf

$$\boxed{\eta_{max,k} = \frac{k}{1+2k}} \rightarrow \eta_{max,k \rightarrow \infty} = \frac{1}{2} \quad (22)$$

mit erkennbarer Verwandtschaft zu der unter engeren Voraussetzungen hergeleiteten Gl. (8).² Um die Grenze $\eta_{max,k}$ nach Gl. 22 zu realisieren, müssen Maschinenspannung und Drehzahl angepasst werden. Für letztere gilt

$$n_{opt} = n_{opt,k \rightarrow \infty} \frac{1}{x_{opt}} \quad (23)$$

mit

$$x_{opt} = k * \ln \frac{1+k}{k} \quad (24)$$

Das folgt aus den Gln. (19) u. (20). Die Spannungsanpassung ergibt sich aus der Energiebilanz

$$E_A = E_{mech} \eta_k = \frac{U_E^2 C R_A}{2 R_A} \eta_{max} = \frac{U_E^2 T}{2 R_A} \eta_{max} = \frac{U_A^2 x_{opt} T}{R_A} \quad (25)$$

und aus den Gln. (22) u. (24):

$$U_{E_{opt,k}}^2 = \frac{1}{2} U_{E_{opt,k \rightarrow \infty}}^2 \frac{x_{opt}}{\eta_{max}} = \frac{1}{2} U_{E_{opt,k \rightarrow \infty}}^2 (1+2k) \ln \frac{1+k}{k} \quad (26)$$

Es gilt die Maschinengleichung

$$\boxed{\eta_{max,k} * \frac{n_{opt,k}}{n_{opt,k \rightarrow \infty}} * \frac{U_{E_{opt,k}}^2}{U_{E_{opt,k \rightarrow \infty}}^2} = \frac{1}{2}} \quad (27)$$

2 Bei ausgiebig kapazitiv gestützter Last ist es weitgehend gleichgültig, ob die Kontaktierung konstruktiv bedingt tatsächlich, wie oben angenommen, kurzzeitig stattfindet, ob sie durch Funkenprung zwischen einander dicht nahegekommenen Elektroden vollzogen wird, oder ob die Kontakte für eine gewisse Zeit schleifen. Bei geringen Stützkapazitäten wirkt ein Schleifen der Kontakte wie eine (geringfügige, im Rahmen der ohnehin hinzunehmenden Unsicherheiten vernachlässigbare) Erhöhung des Parameters k .

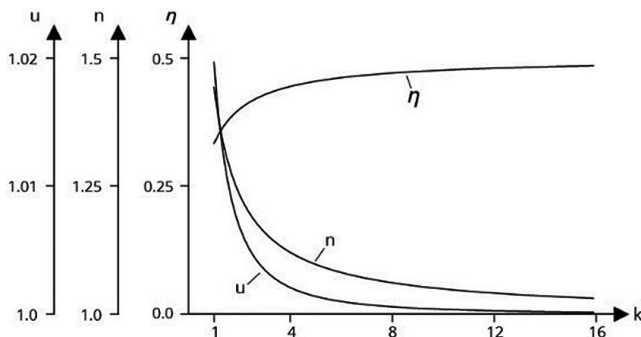


Bild 7: Wirkungsgrad sowie Anpassung von Drehzahl und Maschinenspannung bei reduzierter Kapazität der Last. η folgt Gl. (22), $n = (n_{opt,k}) / (n_{opt,k \rightarrow \infty})$ den Gln. (23) u. (24); $u = \sqrt{(U_{E_{opt,k}}^2) / (U_{E_{opt,k \rightarrow \infty}}^2)}$ nach Gl. (26). Die erforderliche Spannungsnachführung ist im Bereich realer k -Werte erkennbar marginal.

Die Zusammenhänge sind in Bild 7 veranschaulicht.³

8 Gehen mehr als 50 %?

Die unvermeidlichen (Funken-) Verluste entstehen a) beim Kontaktieren der Maschinenkapazität mit der äußeren Last und b) beim Neutralisieren. Die in Bild 8 dargestellte Erweiterung des Pohlschen Modells vermeidet die Verluste nach a). Die Verbindung der (variablen) Maschinenkapazität C_i mit der Last soll hergestellt werden, sobald die Maschinenspannung die Lastspannung erreicht. Und sie soll gelöst werden, sobald die Maschinenkapazität ihren kleinsten Wert erreicht hat und keine Ladung mehr transferieren kann. Diesen Mechanismus übernehmen (ideale) Gleichrichter und ein Kommutator.

Für eine quantitative Abschätzung des erzielten Effektes unterstellen wir eine ausgiebige kapazitive Stützung der Last und gehen von $U_e = U_A$ aus; und zwar unabhängig davon, ob die Maschine über die Kontakte F_1 und F_2 (Bild 4) rückgekoppelt (also selbsterregt) ist, oder ob einer fremderregten Maschine diese Spannung von außen aufgeprägt wird. Mit dieser Notation beträgt die Anfangsenergie auf dem Rotor

$$E_{Anf} = \frac{vC}{2} U_A^2 \quad (28)$$

Mit dem Ende der Ladungsübertragung sinkt diese Energie auf

$$E_{Ende} = \frac{c}{2} U_A^2 \quad (29)$$

Damit erfährt die Last je Zyklus einen Energiezuwachs von

$$\Delta E = \frac{(v-1)c}{2} U_A^2 \quad (30)$$

Ein Energieverlust tritt dabei nicht ein; die (idealen) Dioden halten das Produkt aus Strom und Spannung bei Null. Bezieht

3 Die vorausgesetzte Anwesenheit von Stützkapazitäten – wenigstens von kleinen – ist wenig einschränkend. Man bedenke, dass die Maschinenkapazitäten funktionsbedingt sehr klein sind und durchaus in der Größenordnung der unvermeidbaren parasitären Stützkapazitäten liegen. Insofern ist hier ein ziemlich allgemeiner Fall beschrieben.

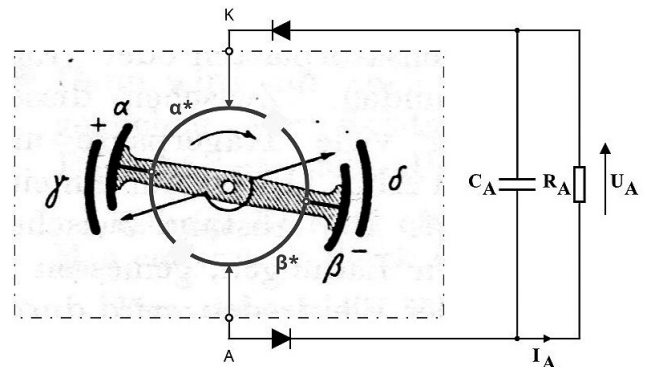


Bild 8: Eine auf Pohls Modell gegründete Maschine zur Vermeidung der „Funken“-Verluste bei der maschineninternen Übergabe der Ladungen an die Last. Die Rotorelektroden α , β sind elektrisch und mechanisch mit dem Kommutator α^* , β^* verbunden.

man den Energiezuwachs der Last auf alle Energieumsätze, also auf diesen Energiezuwachs *und* die Neutralisierungsverluste

$$E_{\text{Neutr}} = \frac{c}{2} U_A^2, \quad (31)$$

so gilt für den Wirkungsgrad

$$\eta_{k \rightarrow \infty} = \frac{\frac{v-1}{2} c U_A^2}{\frac{v-1}{2} c U_A^2 + \frac{c}{2} U_A^2} = 1 - \frac{1}{v}. \quad (32)$$

Die mit Gl. (32) für große Verstärkungsfaktoren v nahegelegte Konsequenz verdeckt einen charakteristischen Unterschied zu den „dynamoelektrischen“ Maschinen: Auch die nach *Bild 8* modifizierten Generatoren arbeiten mit unvermeidlichen Verlustprozessen, den Neutralisierungsverlusten, die einer direkten Reduzierung durch Ingenieurkunst nicht zugänglich sind.

Dank

Der Autor dankt Herrn Dr. Ernst Weihreter, Berlin, herzlich für die freundschaftliche, geduldige und fruchtbare Begleitung der hier vorgestellten Arbeit.

Literatur

- [1] Dörfel, Günter and Weihreter, Ernst: The Fifty Percent Machines – A Short History of Influence Machines and an Elementary Theory of Their Efficiency: An Attempt. *Annalen der Physik* (Berlin) [533] (2021) H. 1, 2000465, 1–6. Als pdf zugänglich unter <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/andp.202000465>
- [2] Dörfel, Günter: August Toepler und die frühe Elektrophysik am Königlichen Polytechnikum in Dresden. *Dresdner Hefte zur Geschichte der Elektrotechnik*, H. 5, VDE Dresden e. V. 2021. Als pdf zugänglich unter <https://www.vde-dresden.de/de/facharbeit-regional/dresdner-hefte-zur-geschichte-der-elektrotechnik>
- [3] Pohl, Robert Wichard: Einführung in die Elektrizitätslehre. Verlag von Julius Springer, Berlin 1927 u. viele weitere Auflagen.
- [4] Toepler, A.: Vergleichende Versuche über die Leistung der Influenzmaschine mit und ohne Metallbelegung. *Poggendorffs Annalen der Physik und Chemie* 127 [203] (1866), 177–198, Tafel III.
- [5] Siemens, W.: Ueber die Umwandlung von Arbeitskraft in elektrischen Strom ohne Anwendung permanenter Magnete. (Vorläufige Anzeige aus d. Monatsber. d. K. Akad. d. Wiss. zu Berlin, Januar 1867). *Poggendorffs Annalen der Physik und Chemie* 130 [206] (1867), 332–335.
- [6] Toepler, August: Über die Vervollkommenung der Influenzmaschine. *Sitzungsberichte der Königlich Preuss. Akad. d. Wissenschaften* 1879, Gesamtsitzung v. 11. Dez. 1879, 950–980.
- [7] Wommelsdorf, H.: Über die Abhängigkeit der Stromstärke, Leistung sowie des Wirkungsgrades der Influenzmaschinen vom Entladepotential. *Physikalische Zeitschrift* 5 (1904), 792–796.
- [8] Toepler, Max: Leistung vielplattiger Influenzmaschinen, *Historisches. Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Hochschule Dresden* 2 (1952/53) H. 1, 11–12.
- [9] Strauch, Helmar: Die elektrostatischen Maschinen. *Physikalische Zeitschrift* 36 (1935) 575–584.



Prof. Dr.-Ing. Günter Dörfel
c/o Leibniz-Institut für Festkörper- und
Werkstoffforschung Dresden,
Bereich Forschungstechnik

H2 Die Entwicklung des Bahnstromnetzes in Deutschland

Der folgende Beitrag setzt die Reihe der Vorträge, gehalten auf der Tagung des Ausschusses Geschichte der Elektrotechnik „25 Jahre Elektrische Wiedervereinigung Deutschlands“ am 17. Dezember 2020, fort.

Abkürzungen im Text:

Rbd Reichsbahndirektion
Uw Unterwerk
fUw fahrbares Unterwerk

1 Die Entwicklung des elektrischen Streckennetzes

Der Anfang des elektrischen Zugbetriebes war geprägt von der Suche nach dem geeigneten Stromsystem.

Erste Versuche wurden mit Gleichstrom durchgeführt. Auf der Berliner Gewerbeausstellung stellte Werner von Siemens eine Ausstellungsbahn vor, die mit 150 V Gleichstrom betrieben wurde.

Das Gleichstromsystem hat den entscheidenden Nachteil, in der Spannungshöhe begrenzt zu sein. Es konnten nur Spannungen von maximal 3.000 V erreicht werden. Für die Übertragung großer Leistungen werden entsprechend hohe Ströme benötigt, die große Leitungsquerschnitte erfordern. Die Speiseentfernung (Abstand der Einspeisestellen) waren wegen der Spannungshöhe ebenfalls gering, was die Kosten für die Primärkomponenten der Bahnstromversorgung entsprechend verteuerte.

1899 gründete sich die „Studiengesellschaft für Schnellbahnen“. Die beteiligten Firmen, unter anderen AEG und Siemens brachten Triebwagen und Lokomotiven zum Einsatz, die mit Drehstrom betrieben wurden, und auf der Versuchsstrecke zwischen Marienfelde und Zossen Geschwindigkeiten über 200 km/h erreichten. Damit bewies das Drehstromsystem seine Eignung für den schweren Bahnbetrieb. Eine An-

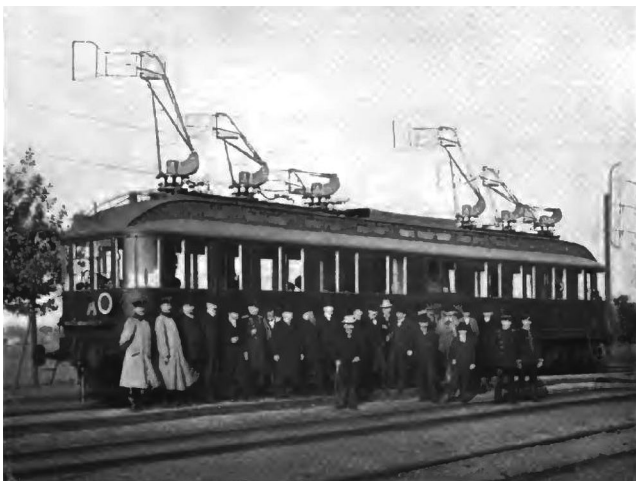


Bild 1: Bild eines Drehstromversuchstriebwagen

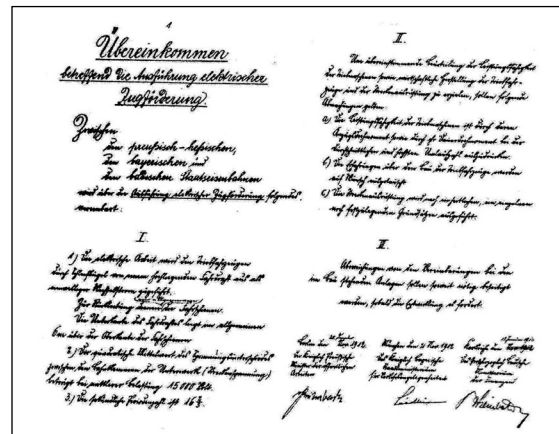


Bild 2: Übereinkommen betreffend die Ausführung elektrischer Zugförderung

wendung des Systems in großem Maße scheiterte aber, weil der Aufbau der Oberleitung zu kompliziert war und auch keine der ausgeführten Bauarten eine unterbrechungsfreie Stromzuführung ermöglichte.

Ab 1903 begannen in Berlin zwischen Niederschöneweide und Spindlersfeld Versuche mit Einphasenwechselstrom niedriger Frequenz (6 kV, 25 bis 40 Hz), die recht erfolgreich waren. In den folgenden Jahren wurden weitere Strecken ausgerüstet, darunter ab 1905 die Strecke Murnau – Oberammergau mit 5,5 kV und 15 Hz.

Bei den Preußischen Staatsbahnen befasste man sich ab 1909 mit Überlegungen der Fernbahnelektrifizierung in größerem Umfang. Auf der Grundlage eines von Gustav Wittfelds erarbeiteten Programms wählte man hierfür die Strecke Magdeburg – Leipzig aus. Die Bahnenergie sollte aus Braunkohle in einem bahneigenen Kraftwerk in Muldenstein erzeugt werden.

Die Versuche begannen 1911 nach der Inbetriebnahme des Kraftwerkes in Muldenstein. Bei den Versuchen wurden unterschiedliche Spannungen zwischen 5 und 10 kV und eine Frequenz von 15 Hz verwendet. Die niedrige Frequenz ermöglichte den Einsatz von Fahrmotoren auf der Basis des Gleichstrom-Reihenschlussmotors.

Im Ergebnis aller dieser seit 1903 ausgeführten Versuchsbetriebe wurde Ende 1912 und Anfang 1913 zwischen der – Preußisch/Hessischen Staatsbahn, der – Bayerischen Staatsbahn und der – Badischen Staatsbahn das „Übereinkommen betreffend die Ausführung elektrischer Zugförderung“ (Bild 2) abgeschlossen.

Mit diesem Dokument, in dem die Spannung auf 15.000 Volt und die Frequenz auf 16 2/3 Hz festgelegt wurden, war die entscheidende Grundlage für die Entwicklung des elektrischen Zugbetriebes in Deutschland geschaffen worden.

Dem Übereinkommen schlossen sich die Bahnen in Österreich, der Schweiz, in Schweden und in Norwegen an.

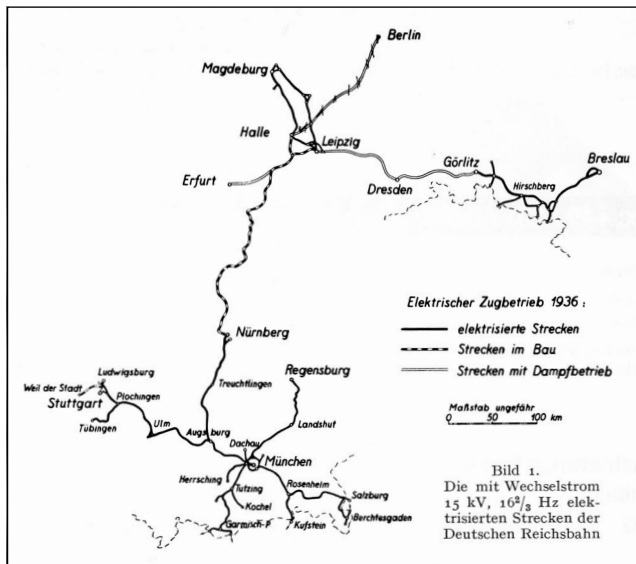


Bild 3: Elektrischer Zugbetrieb 1936

In Deutschland begann danach die Entwicklung dreier Teilnetze in Süddeutschland, in Mitteldeutschland und in Schlesien.

1.1 Süddeutsches Netz

Die Wasserkraftwerke in Kammerl, Bad Reichenhall waren ab 1914 die Grundlage für Streckenelektrifizierungen im Raum Garmisch, Partenkirchen und Bad Reichenhall.

Nach Fertigstellung des Walchenseekraftwerkes und der Isarkraftwerke in Aufkirchen und Etting wurden die Strecken

- München – Garmisch,
- Tutzing – Kochel und
- München – Landshut

beginnend ab 1924 elektrifiziert.

Ab 1924 wurden erste Hochspannungsleitungen errichtet:

- Kochel – Pasing,
- Landshut – Pasing,
- Aufkirchen – Etting,
- Etting – Pfrombach und
- Pasing – Augsburg.

Das süddeutsche Netz wurde bis 1933 von München aus über Rosenheim nach Freilassing und über Augsburg und Ulm bis nach Stuttgart ausgebaut.

1935 erreichte der elektrische Betrieb von Augsburg über Donauwörth und Treuchtlingen die Frankenmetropole Nürnberg.

Die Übersicht in Bild 3 zeigt die Strecken mit elektrischer Zugförderung im Jahr 1936. Die drei vorhandenen Teilnetze, die im Folgenden noch weiter beschrieben werden, und die geplanten Verbindungen der Teilnetze sind dargestellt.

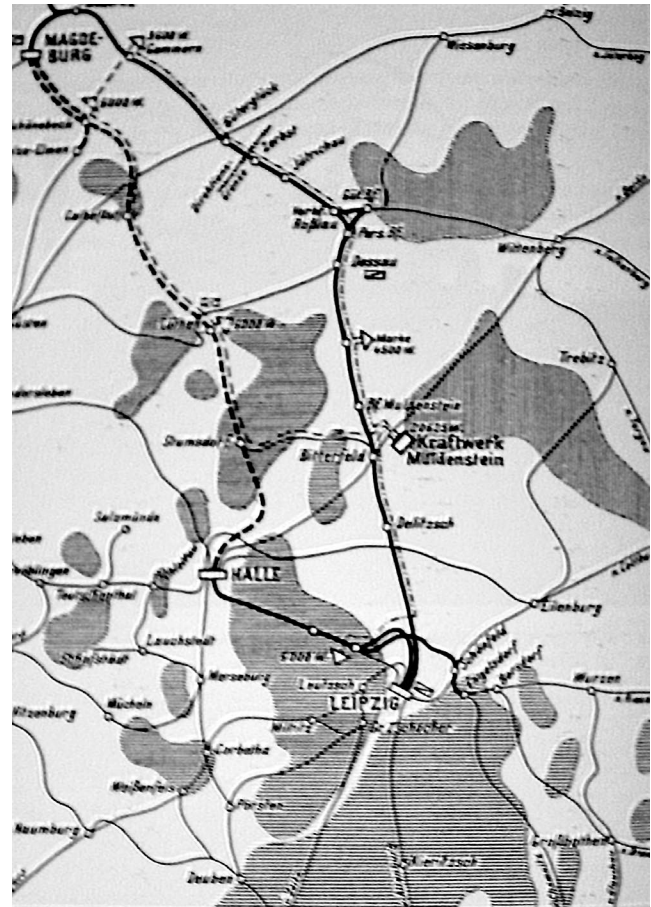


Bild 4: Die Karte zeigt den Netzausbau in Mitteldeutschland.

1.2 Mitteldeutsches Netz

Wie oben schon erwähnt begann der Versuchsbetrieb zwischen Dessau und Bitterfeld ab 1911. Bis 1914 wurde das Netz bis nach Magdeburg, Leipzig und Halle ausgebaut.

Zu Beginn des Ersten Weltkrieges im August 1914 wurde der Versuchsbetrieb in Mitteldeutschland eingestellt. Die Elektrolokomotiven wurden nach Schlesien abgegeben.

1922/23 erfolgte dann die Wiederaufnahme des elektrischen Zugbetriebes auf der oben genannten Strecke.

Ab 1923 begannen die Vorbereitungen der Streckenelektrifizierung auf der Strecke Halle (S) – Magdeburg.

Zur Stromversorgung der Strecken wurden weitere Unterwerke, neben den bestehenden Uw Marke und Leutzsch, in Köthen, Schönebeck und Gommern vorgesehen. Dazu wurde eine 60-kV-Leitung über Stumsdorf nach Köthen und Schönebeck errichtet. Von Schönebeck nach Gommern wurde der 60-kV-Ring geschlossen.

In Bitterfeld erfolgte dazu noch eine Einspeisung direkt aus dem Kraftwerk Muldenstein.

Ende 1923 waren in Mitteldeutschland 354 km Hauptgleise und 216 km Neben- und Überholungsgleise mit Oberleitungen überspannt. Die elektrifizierte Streckenlänge erreichte 173 km.



Bild 5: Elektrifizierte Bahnlinsen in Schlesien 1939

Quelle: Datei: Elektrifizierte Bahnlinsen in Schlesien bis 1939.png – <https://de.wikipedia.org>

1.3 Das schlesische Netz

Streckeninbetriebnahmen:

- Niedersalzbrunn – Halbstadt 1914
- Königszell – Rubbank 1919
- Rubbank – Liebau 1921
- Rubbank – Greiffenberg – Lauban . . . 1922
- Lauban – Görlitz – Schlauroth 1924
- Königszell – Breslau 1928
- Lauban – Kohlfurt 1928

Unterwerke:

- Niedersalzbrunn
- Rubbank
- Hirschberg
- Lauban

Kraftwerk: Mittelsteine

Das Bahnstromnetz in Schlesien wurde mit 80 kV betrieben. Zwischen Niedersalzbrunn und Mottkau war zusätzlich eine 15-kV-Speiseleitung vorhanden.

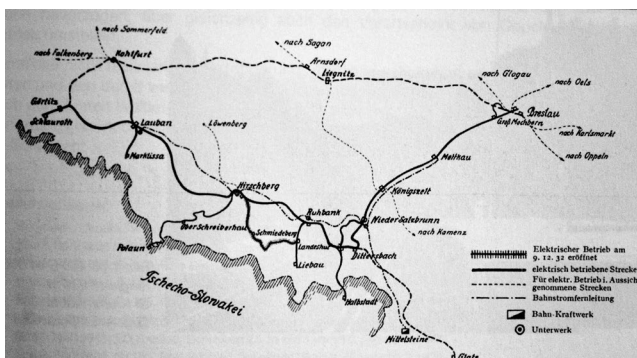


Bild 6: Bahnstromleitungen des Schlesischen Netzes

Im schlesischen Netz wurde der elektrische Zugbetrieb während des 1. Weltkrieges nicht eingestellt.

2 Die Netzentwicklung bis 1945

Nach der Machtübernahme durch die Nationalsozialisten 1933 konzentrierte man sich bei der weiteren Streckenelektrifizierung vorrangig auf den Zusammenschluss der süddeutschen und der mitteldeutschen Netze und der Weiterführung der Streckenelektrifizierung bis nach Berlin.

1934 wurde durch die Hauptverwaltung der Deutschen Reichsbahngesellschaft ein Gutachten in Auftrag gegeben, die dafür optimale Streckenführung zu ermitteln. Der Auftrag hierfür erging an die neutrale Reichsbahndirektion Essen und deren Präsidenten Bergmann. Die Studie sollte die Wirtschaftlichkeit des elektrischen Zugbetriebes auf der Strecke Nürnberg – Halle / Leipzig – Berlin nachweisen.

Bereits in der Aufgabenstellung war dabei die Strecke über Saalfeld und Halle mit den Abzweigen Großheringen – Erfurt und Großkorbetha – Leipzig, gegenüber der Strecke über Hof und Leipzig favorisiert worden.

Schwerpunkte der Studie waren:

- Einsatz neuer Triebfahrzeuge,
- Steigerung der Streckengeschwindigkeit,
- Linienverbesserung und
- Notwendige Energiequellen (Kraft- und Unterwerke).

Nach 9 Monaten wurden bereits die Ergebnisse präsentiert. Die Ergebnisse wurden in drei Bauplänen dargestellt.

Der Bauplan 1 beinhaltete nur die Beseitigung von Geschwindigkeitseinschränkungen in kurzen Abschnitten.

Im Bauplan 2 waren dagegen schon kostspielige Umbauten enthalten und der Bauplan 3 war so gestaltet, dass keine Geschwindigkeitseinschränkungen mehr vorhanden waren, was nur mit Streckenverlegungen, dem Bau von Tunneln und neuen Brückenbauwerken erreicht werden konnte.

Zur Ausführung entschied man sich nach langwierigen Diskussionen, auch mit dem Einverständnis der Generalität, für die Streckenelektrifizierung nach Bauplan 2, weil er das Optimum zwischen Aufwand und Nutzen ergab.

Die Oberste Bauleitung für Elektrifizierung (OBE) erhielt von der Reichsbahngesellschaft alle Vollmachten für die Realisierung der Streckenelektrifizierung, sie wurde auch eigens zu diesem Zweck von München nach Leipzig verlegt. Gleiches eignete sich noch einmal nach der deutschen Wiedervereinigung am Anfang der 90er Jahre.

Die Netzzusammenführung erfolge im Wesentlichen in folgenden Schritten:

- Augsburg – Donauwörth 10 / 1934
- Donauwörth – Nürnberg 05 / 1935
- Nürnberg – Saalfeld 10 / 1939
- Unterwerke Zapfendorf und Steinbach
- Saalfeld – Weißenfels 1941
- Unterwerke Rothenstein und Großkorbetha
- Weißenfels – Leipzig 11 / 1942

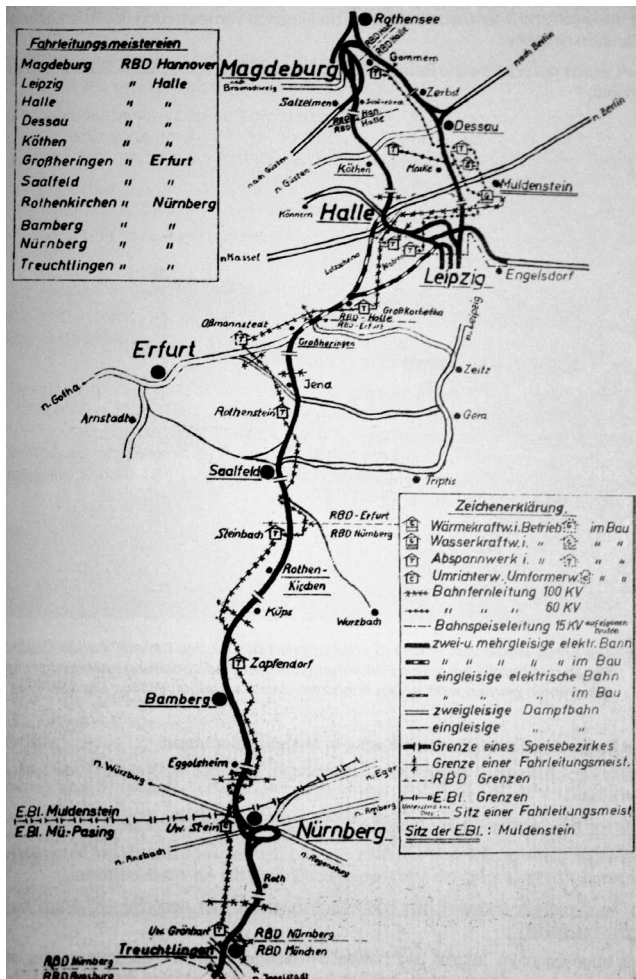


Bild 7: Geplante Verbindung Mitte – Süd bis 1941

Der Übersichtsplan berücksichtigt geplante Netzerweiterungen. Im Plan ist der Standort eines Unterwerkes Oßmannstedt erkennbar, welches für den Streckenabschnitt Großheringen – Erfurt erforderlich gewesen wäre.

Für die 1967 errichtete Bahnstromleitung Großkorbetha – Weimar konnte auf die alten Leitungsrechte zurückgegriffen werden.

1938 ergaben sich durch die Annektierung Österreichs geänderte Verhältnisse im elektrisch betriebenen Netz. Die Anlagen der ÖBB wurden der DRG zugeordnet und die Hochspannungsnetze wurden 1939 mit der Leitung

- Kochel – Zirl und 1940 mit der Leitung
- Traunstein – Steindorf

zusammengeschaltet.

Die Netzbetriebsführung übernahm die Elektrische Oberbetriebsleitung Innsbruck.

Bild 8 zeigt den Ausbauzustand des Bahnstromnetzes bis 1945.

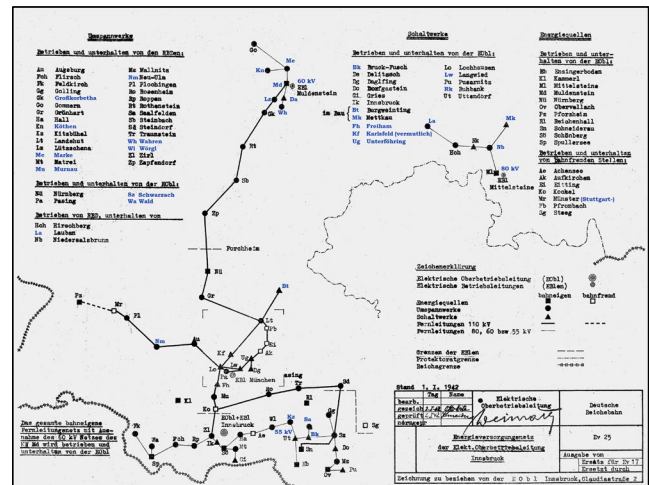


Bild 8: Energieversorgungsnetz (Bahnstromleitungen) nach Annexion Österreichs

3 Der Neuanfang nach Kriegsende 1945

Die nachfolgenden Übersichten listen die elektrischen Wiederinbetriebnahmen der Strecken nach dem zweiten Weltkrieg auf.

3.1 Mitteldeutsches Kernnetz, Rbd Halle und Magdeburg

- 19.07.1945 . . Leipzig – Halle -Sachsendorf,
- 25.07.1945 . . Leipzig – Bitterfeld,
- 30.07.1945 . . Bitterfeld – Dessau
- 01.08.1945 . . Leipzig-Leutzsch – Weißenfels
- 16.08.1945 . . Sachsendorf – Magdeburg und Leipzig – Leipzig-Leutzsch
- 10/1945 Gommern – Königsborn,
- 11/1945 Königsborn -Biederitz,
- 12/1945 Dessau – Zerbst,
- 02/1946 Gommern – Prödel,
- 03/1946 Prödel – Güterglück, Magdeburg Hbf – Rothensee, Schönebeck – Salzern

3.2 Rbd Erfurt

- 07.08.1945 . . Jena-Saalfeld – Naumburg,
- 15.09.1945 . . Naumburg – Weißenfels,
- 26.11.1945 . . Jena-Saalfeld – Schwarzburg,
- 10.12.1945 . . Schwarzburg – Saalfeld (a),
- 14.01.1946 . . Probstzella – Eichicht (Kaulsdorf),
- 01.02.1946 . . Eichicht (Kaulsdorf) – Saalfeld (a)
- 09.03.1946 . . Bf Saalfeld

3.3 110-kV-Leitungen

Nach Kriegsende wird in der einschlägigen Literatur nur noch die Spannungsebene 110 kV verwendet.

Der Leitungsabschnitt Muldenstein – Großkorbetha war nicht unterbrochen, er war ständig betriebsbereit.

- 19.10.1945: Das Uw Rothenstein geht ans Netz, Spannung von Großkorbetha,
 - 09.11.1945: 110-kV-Leitung bis Steinbach am Wald betriebsbereit, fUw Bf Eichicht angeschlossen, Durchschaltung über die Oberleitung nach Steinbach am Wald
- Der 110-kV-Lückenschluss kam nicht mehr zustande.

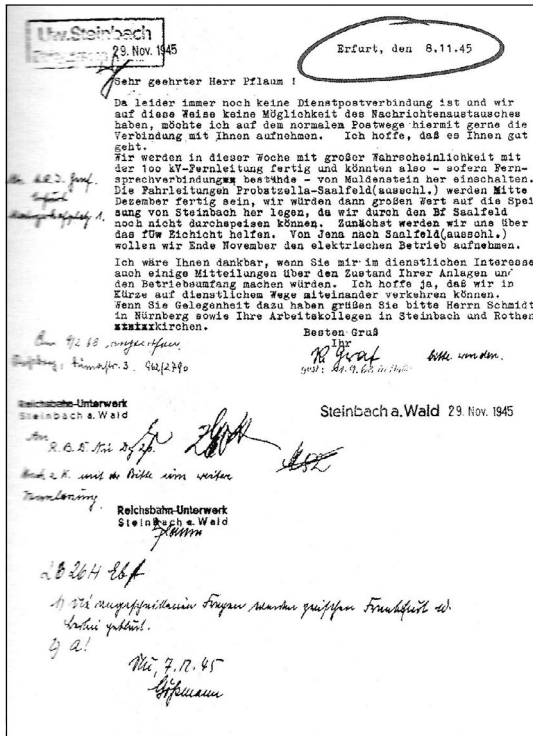


Bild 9: Schreiben der Rbd Erfurt an das Uw Steinbach am Wald

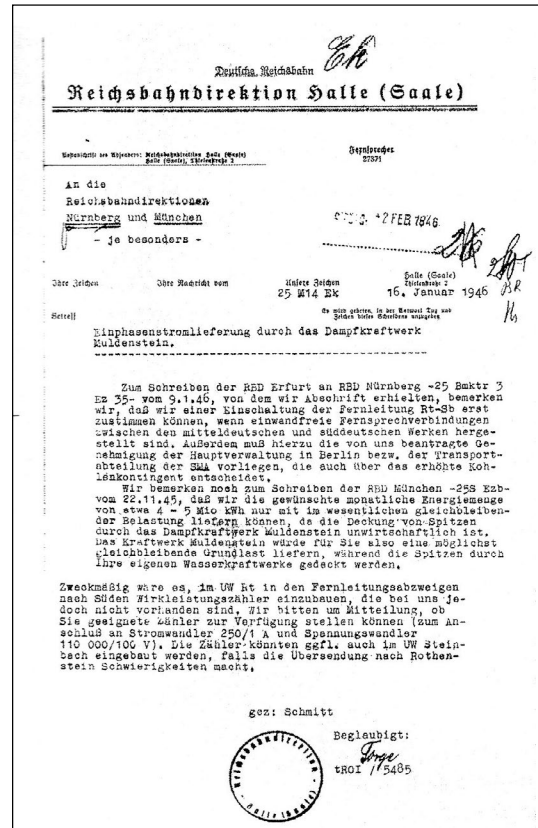


Bild 10: Schreiben der Rbd Halle (S) an die Direktionen München und Nürnberg zur Lieferung von 110-kV-Bahnstrom

4 Demontagen im Netz

Die Demontagen von Anlagen der elektrischen Zugförderung betrafen nur die Anlagen im Bereich der sowjetischen Besatzungszone und die nun in Polen liegenden Anlagen des schlesischen Netzes.

Über Anlagenrückbauten im Bereich der westlichen Besatzungszonen ist in der einschlägigen Literatur nichts erwähnt.

Am 08.03.1946 erging eine erste Information an den Präsidenten der Reichsbahndirektion Halle zur Anlagendemontage und zum Verbleib der Elektrolokomotiven.

Der offizielle sowjetische Befehl zur Anlagendemontage ist datiert vom 29.03.1946, darin war der Abschluss der Demontagetarbeiten für den 05.04.1946 angeordnet.

Eine solch unsachliche Terminvorgabe sorgte dafür, dass die Oberleitungs- und Fernleitungsmasten über den Fundamenten mit Schneidbrennern abgeschnitten wurden und das Kettenwerk der Oberleitung (Fahrdrat, Tragseil und Hänger) meist zusammen auf Kabeltrommeln gewickelt wurde.

Die Demontagetarbeiten dauerten teilweise bis in den September 1946.

Das Bahnkraftwerk Muldenstein wurde am 06.04.1946 abgeschaltet.

Alle Oberleitungs- und Fernleitungsmaterialien, die ortsfesten Anlagen der Unterwerke und die Bahnmaschinen aus Muldenstein wurden in die Sowjetunion verbracht.

5 Neubeginn in der DDR nach 1950

Schon 1947 gab es erste Initiativen zur Neuelektrifizierung mit der „Denkschrift über Bestand und Bedarf an Lokomotiven in der SBZ“

Anhang 2.2: Denkschrift über den Bestand und Bedarf an Lokomotiven in der SBZ (Abschrift aus BArch DM 1/3177)

Es folgt Auszug:

- 72 - 4. Neuelektrisierung

Die schwierige Kohlenlage wird noch viele Jahre anhalten, auch wenn die Zonengrenzen einmal gefallen sein sollten, weil die Ruhrkohle als Gegenstand der Reparationen nur beschränkt zur Verfügung stehen wird. Die Bahnen im mitteldeutschen Raum werden nach wie vor in großem Ausmaß auf Braunkohle angewiesen sein. Unter diesen Umständen kommt als wirksamstes Mittel zur Behebung der aus der Braunkohle erwachsenden Schwierigkeiten die Elektrisierung der früher elektrisch betriebenen Strecken und weiterer dafür geeigneter Strecken in Frage. Ob man dabei die Energie aus dem Netz der allgemeinen Landesversorgung oder aus den eigenen, wieder einzurichtenden Kraftwerken entnimmt, bedarf noch näherer Untersuchung.

Einen Überblick über die sich hierbei ergebenden Fragen gibt die "Zusammenfassung" einer im April 1946 ausgearbeiteten "Denkschrift über die in der sowjetischen Besatzungszone Deutschlands zu erwartende Verkehrsentfaltung und die Entwicklung der Landverkehrsmittel", die als *Anlage 14* beigelegt ist. Aus ihr mag darauf hingewiesen werden, dass die Elektrisierung auf jeden Fall die wirtschaftlichste Lösung darstellt; sie erfordert ein Kapital von 152 000 000 RM einschl. der Kosten für die elektrischen Lokomotiven. Unter Verwendung der Gebäude der ausgebauten Kraftwerke und Unterstationen würden die Jahreskosten beim elektrischen Betrieb rd. 19,5 Mio. RM, bei Verwendung der vorhandenen Dampflok unter Verfeuerung von Braunkohlenbriketts 23,5 Mio. RM unter der Verfeuerung von Steinkohle 20,1 Mio. RM betragen.

Dabei müssen aber noch die außerordentlichen Vorteile für den Betrieb hervorgehoben werden, die die elektrische Zugförderung bietet. Alle Schwierigkeiten, die sich aus der Unzulänglichkeit der Lok-Behandlungsanlagen ergeben, fallen fort. Die elektrische Lokomotive beschleunigt die Züge erheblich schneller als die Dampflok, weil sie vom Anfahren an mit voller Leistung arbeiten kann. Dadurch ergeben sich besondere Vorteile bei eingleisigen Strecken, wie die jetzt vorzugsweise vorhanden sind.

Der Bedarf an Lokomotivpersonal ist geringer und das Personal wird nicht so stark in Anspruch genommen. Vor allem fällt die große physische Anstrengung für den Heizer fort. Die elektrischen Lokomotiven sind auch im Allgemeinen weniger ausbesserungsbedürftig. Da die Frage der Stromart bei der Entnahme der Energie aus dem Netz der Landesversorgung noch nicht endgültig geklärt ist, wäre hierbei die Mitwirkung der übrigen deutschen Bahnen erforderlich.

Neben der Wiederherstellung des elektrischen Betriebes auf den früher damit versehenen Strecken sollte dieser aber auf allen Strecken neu eingeführt werden, bei denen sich das mit Rücksicht auf die betrieblichen und wirtschaftlichen Vorteile irgendwie vertreten lässt.

An eine Inangriffnahme dieser Arbeiten kann aber nicht gedacht werden, solange die jetzt bestehenden Schwierigkeiten in der Bereitstellung der erforderlichen Werkstoffe und des Finanzkapitals nicht behoben sind.

Trotzdem sollte in die Erörterung aller mit der Elektrisierung zusammenhängenden Fragen schon bald eingetreten werden, damit sie bei der Möglichkeit einer Elektrisierung und der Beschaffung neuer Lokomotiven geklärt sind.

Ende Auszug

Ende des eingefügten Dokumentes aus „Wechselstromzugbetriebe in Deutschland“ Band 3

Im Abkommen vom 18.03.1952 zwischen der Regierung der DDR und der Regierung der UdSSR über die Überlassung von elektrischen Eisenbahnfahrzeugen und der Ausrüstung für Bahnkraftwerke und Unterwerke an die DDR im Austausch gegen Reisezugwagen, wurde die Lieferung von 355 vierachsigen Reisezugwagen in Ganzmetallbauweise in den Jahren 1952 bis 1954 vereinbart worden.

Am 01.04.1953 erging der Auftrag zur Bildung eines kommissarischen Hauptreferates „Elektrische Zugförderung“

Am 07.05.1952 wurde die *Oberste Bauleitung Elektrifizierung (OBE)* wieder gebildet.

In *Bild 11* sind die ersten Planungen zur Streckenelektrifizierung dargestellt. *Bild 12* zeigt die bis 1959 elektrifizierten Strecken

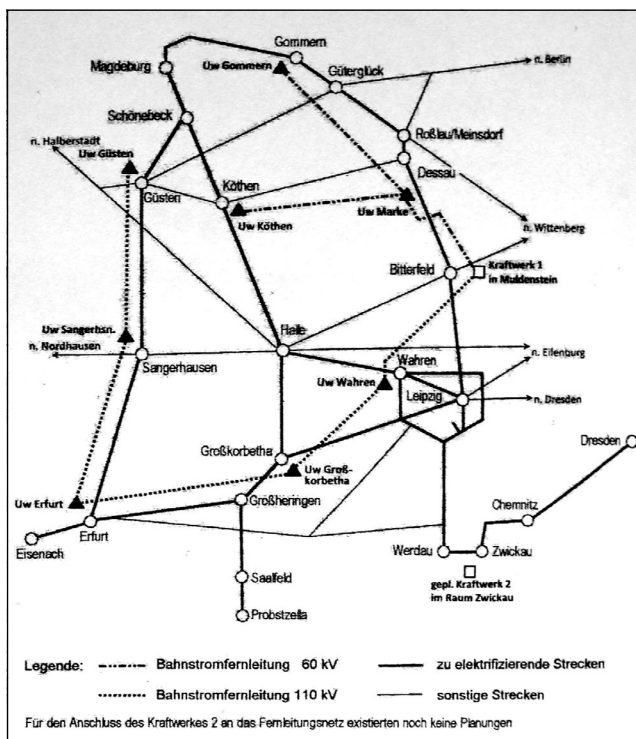


Bild 11: Planungen zur Streckenelektrifizierung und zur Gestaltung der ortsfesten Anlagen

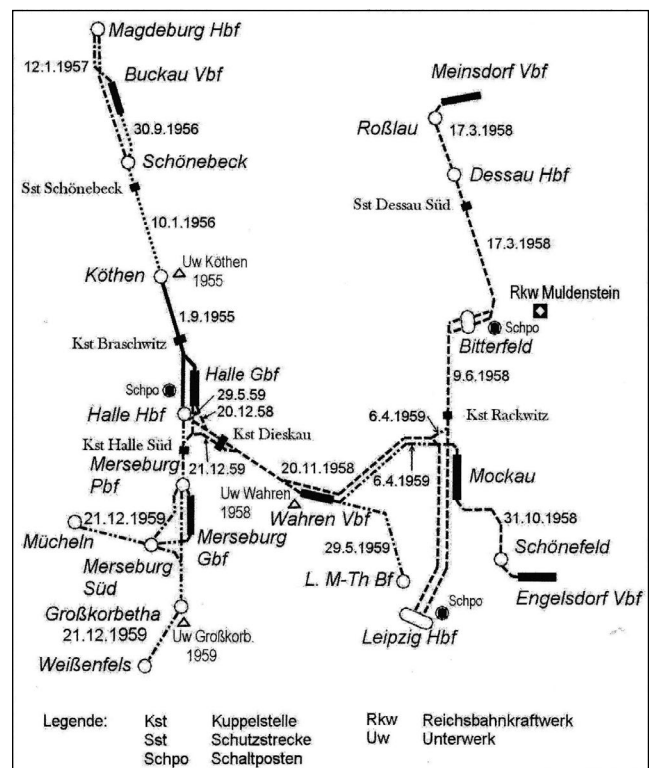


Bild 12: Streckenelektrifizierungen von 1955 bis 1959

6 Energieerzeugung im Ostnetz bis 1990

Das Zentrale Bahnenergienetz der DR bestand aus den Erzeugerwerken:

- Reichsbahnkraftwerk Muldenstein 1955
3 Bahnmaschinen je 11 MW
2 Umformer je 10 MW
- Umformerwerk Chemnitz 1965
2 Asynchron-Synchron-Umformer je 25 MW
- Umformerwerk Dresden 1977 und 1983
2 Asynchron-Synchron-Umformer je 30 MW
1 Asynchron-Synchron-Umformer je 30 MW

Übersicht der Bahnstromleitungen im Bereich der DR

- Muldenstein – Leipzig-Wahren 1958
- Leipzig-Wahren – Großkorbetha 1961
- Großkorbetha – Gößnitz 1961
- Gößnitz – Chemnitz 1964
- Chemnitz – Dresden-Stetzsch 1966
- Großkorbetha – Weimar 1967
- Riesa – Muldenstein 1969
- Dresden-Stetzsch – Riesa 1970
- Dresden-Stetzsch – Niedersiedlitz 1977

7 Das dezentrale Bahnenergienetz der DR

Das dezentrale Bahnenergienetz der DR ist dem chronischen Devisenmangel in der DDR geschuldet.

Die Beschaffung weiterer Asynchron-Synchron-Umformer, bzw. die Beschaffung von Bahnstromgeneratoren im Ausland war nicht mehr möglich und die eigene Industrie war nicht in der Lage Maschinen dieser Größenordnung zu liefern.

Geliefert werden konnten Synchron-Synchron-Umformer mit 10 MW Umformerleistung, montiert auf einem 7-achsigen Fahrgestell.

Der praktische Einsatz dieser Umformer begann 1973 im Umformerwerk Weimar, nachdem die ersten beiden Umformer im Reichsbahnkraftwerk Muldenstein erprobt wurden. Diese ersten beiden Umformer hatten noch separate Erregermaschinen. Bei den folgenden Umformern waren die Erregermaschinen gemeinsam mit Umformermotor und Umformergenerator auf der gemeinsamen Umformerwelle montiert.

Alle Streckenelektrifizierungen bei der DR, die nach 1972 (Dresden – Leipzig) realisiert wurden, gehörten zum dezentralen Bahnenergienetz. Das waren alle Strecken nördlich und östlich der Linie Halle(S) – Leipzig – Dresden.

Eine Besonderheit bildete dabei der Abschnitt Großkorbetha – Weißenfels – Erfurt – Neudietendorf, der auch dezentral betrieben wurde, weil das Ufw Weimar die Versorgungsbereiche der Ufw Großkorbetha und Weimar über die Bahnstromleitung Großkorbetha – Weimar mit dezentralem Bahnstrom versorgen konnte.

Bis 1993 wurden 104 Stück dieser Sy-Sy-Umformer geliefert. Für die Revision der Sy-Sy-Umformer wurden im Reparaturwerk „Clara Zetkin“ in Erfurt (RWZ) die notwendigen Kapazitäten geschaffen. In Erfurt wurden auch neue Umformer montiert, deren Maschinenteile in Dresden gefertigt waren. Das RWZ wurde von der Fa. SIEMENS übernommen.

Synchron-Synchron-Umformerwerke bei der DR (Auszug)

- Weimar 1973 4×10 MW
- Magdeburg 1974 4×10 MW
- Doberlug-Kirchhain . . . 1981 3×10 MW
- Rummelsburg 1984 4×10 MW
- Stendal 1986 3×10 MW
- Wittenberge 1987 3×10 MW
- Schwerin 1967 3×10 MW
- Wittenberg 1987 4×10 MW
- Falkenberg 1987 4×10 MW
- Eberswalde 1987 4×10 MW
- Stralsund 1989 3×10 MW
- Cottbus 1989 3×10 MW

8 Das Zusammenwachsen der getrennten Netze

Bereits im März 1990 wurden zwischen den zuständigen Fachbereichen der DB und der DR eine Konzeption zum Zusammenwachsen der elektrischen Netze in den Spannungsebenen 15 und 110 kV vereinbart.

Realisiert wurden diese Vorhaben im Rahmen der *Verkehrsprojekte Deutsche Einheit* ab 1994.

Im Osten wurden die Erzeugerwerke

- Kirchmöser 1994 160 MW und
- Schkopau 1996 110 MW errichtet.

Die beiden Teilnetze wurden durch drei 110-kV-Lückenschlüsse

- Hannover – Nitzan 1995
- Weimar – Bebra 1996 und
- Weimar – Steinbach am Wald . . . 2001 verbunden.

Der erste hier erwähnte Lückenschluss wurde am 14.03.1995 realisiert. Nach 50-jähriger Trennung erfolgte um 15:06 Uhr die Parallelschaltung der 110-kV-Bahnenergienetze der früheren DB und DR, nachdem bereits um 13:28 Uhr der erste Synchronisierungsversuch gelungen war.

Für den zweiten genannten Lückenschluss wurde ab Großraum Erfurt ein Gemeinschaftskorridor mit der 380-kV-Leitung Vieselbach – Meklar realisiert. Im Gemeindebereich von Herleshausen verwenden beide Leitungen das gleiche Gestänge. Dieser Lückenschluss verzögerte sich gegenüber dem 15-kV-Lückenschluss um ca. 9 Monate wegen Einwendungen gegen die Leitungen auf hessischem Territorium.

Das Bahnstromnetz wird mit Erdschlusskompensation betrieben, auch Resonanzsternpunktterdung (RESPE) oder gelöstes Netz bezeichnet und dient in den elektrischen Energieversorgungsnetzen dazu, den Fehlerstrom bei nicht beabsichtigten Erdschlüssen eines Außenleiters zu kompensieren.

Im deutschen Bahnstromnetz sind 15 Erdschlusslöschspulen verteilt. Die Erdschlusslöschspulen sind in 9 Anlagen regelbar.

Das Bahnstromnetz der DB ist an zwei Stellen direkt mit dem Netz der ÖBB und an zwei weiteren Stellen über Kuppelspanner mit dem Netz der SBB verbunden.

Die in Singen und Haltingen eingesetzten 4 Kuppelspanner zur SBB haben Leistungsgrößen von jeweils 50 MVA.

Zwischen der ÖBB und der SBB ist eine Leitungskupplung in Vorarlberg mit einer Übertragungsleistung von 50 MVA vorhanden (siehe *Bild 13*).

Das Bahnstromnetz der DB hatte 2007 eine Länge von 7.754 km. Seitdem sind noch die Leitungen

- Schkopau – Weimar ca. 60 km,
 - Eischleben – Wolfsburg ca. 25 km
 - und die
 - Stichleitung zum Uw Roth ca. 20 km
- hinzugekommen.

Bild 14 zeigt das Bahnstromnetz im Ausbauszustand 2011.

Die im Nordosten der Republik vorhandenen dezentralen Synchron-Synchron-Umformerwerke werden seit 2012 in Umrichterwerke umgebaut. Anstelle der Synchron-Synchron-Umformer kommen statische Umrichter zum Einsatz. Die Leistungsgrößen werden dabei nicht verändert.

Erste Anlagen dieser Bauart kamen in Lalendorf und Rostock zum Einsatz.

Das Einphasenwechselstromsystem mit einer Frequenz von 16,7 Hz ist auch heute noch ein Bahnstromsystem, welches allen Anforderungen, auch dem modernen Hochgeschwindigkeitsverkehr, gerecht wird.

Den entscheidenden Vorteil stellt dabei die Durchschaltung des Gesamtnetzes in den Spannungsebenen 15 und 110 kV dar. Die Übertragungsverluste werden reduziert, im 15-kV-Oberleitungsnetz sind keine Trennstellen vorhanden, an denen die Triebfahrzeuge abgeschaltet werden müssen. Der elektrische Betrieb wird dadurch einfacher und sicherer.

Abschließend noch eine Übersicht zur Erzeugung der Bahnenergie in Deutschland (siehe Bild 15).

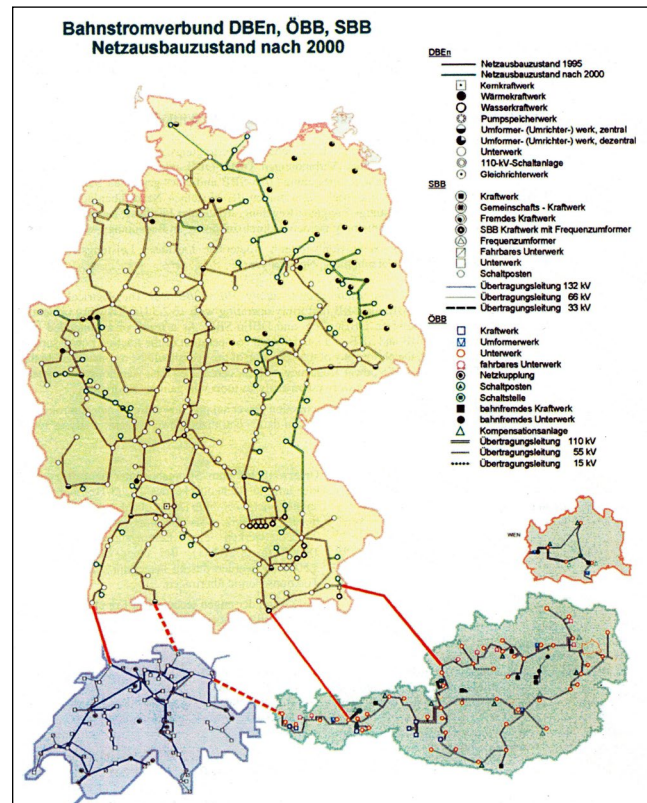


Bild 13: Bahnenergieverbund Deutschland – Österreich – Schweiz, oder kurz Bahnenergieverbund DB – ÖBB – SBB



Dietwalt Moschkau

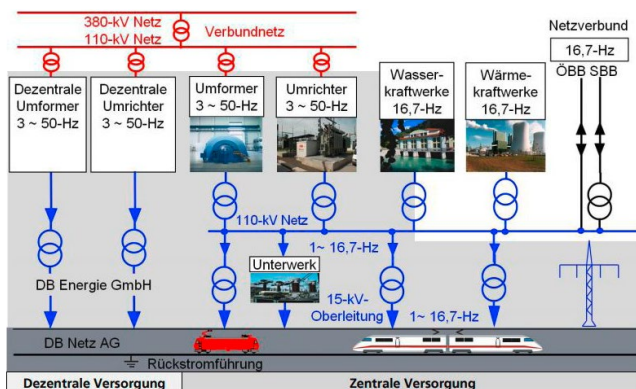


Bild 15: Prinzipieller Aufbau der Bahnstromversorgung

Quelle: Darstellung der DB Energie GmbH



Bild 14: Bahnstromnetz, Erzeuger-, Übertragungs- und Verteileranlagen

L1 Leserbrief von Prof. Dr. Hartmut Grabinski¹, Prof. Dr. Erhart Kunze² und Prof. Dr. Fred Wiznerowicz²

¹ Leibniz Universität Hannover, ² Hochschule Hannover

Antwort auf den Leserbrief von Prof. Dr. Martin Poppe (erschieden im ETG journal 01/2022)

Hat der Poynting-Vektor auch im statischen Fall eine physikalische Bedeutung?

In seinem Leserbrief im ETG journal 01/2022 auf Seite 74 gibt Herr Kollege Poppe weitere interessante Hinweise zu unserem Aufsatz „Wie gelangt die elektrische Energie zum Verbraucher“ im ETG journal 02/2021. Abschließend stellt er – sinngemäß – die Frage, ob die Interpretation des Poynting-Vektors $\vec{S}$ zur Beschreibung eines Energietransports in Richtung von $\vec{S}$ auch dann zulässig sei, wenn sich beispielsweise ein geladener Kondensator innerhalb einer konstant durchströmten Spule befindet. In diesem Fall sind nämlich elektrisches und magnetisches Feld voneinander unabhängig, wobei eigentlich zu berücksichtigen ist, dass es während des Einbringens des Kondensators in das Magnetfeld stets (!) zu einer Wechselwirkung zwischen beiden Feldtypen kommt. Es ergeben sich dann geschlossene Feldlinien des Poynting-Vektors, also ein kreisender Energiefluss ohne externe Wirkung.

Um die Antwort vorweg zu nehmen: Ja, auch im Fall statischer Felder ist die Betrachtung des Poynting-Vektors $\vec{S}$ nicht nur richtig und sinnvoll, sondern sogar notwendig, wie im Folgenden schrittweise gezeigt wird.

Die vom Kollegen Poppe hier gestellte, naheliegende Frage wird in der Tat bereits seit Jahrzehnten immer wieder diskutiert, wobei es zu unterschiedlichen Auffassungen gekommen ist. So wird gelegentlich auch heute noch die auch in Lehrbüchern vertretene These zitiert, dass dann der Poynting-Vektor in statischen Feldern eben nicht mehr sinnvoll anwendbar sei, und in der Tat ist es so, dass der Poynting-Vektor bei seiner Ableitung normalerweise nicht einzeln auftritt, sondern im Zusammenhang mit einem Flächenintegral über eine geschlossene Hüllfläche $A_{\text{Hüll}}$, also in der Form

$$\oint_{A_{\text{Hüll}}} \vec{S} \cdot d\vec{A}.$$

Wenn nun aber die Feldlinien von $\vec{S}$ in sich geschlossen sind, gehen in die Hüllfläche stets ebenso viele Feldlinien hinein wie hinaus. Mit anderen Worten: Das Integral ist dann immer Null, und man könnte also vermeintlich auf den Poynting-Vektor verzichten.

Es kommt noch hinzu: Wenn man zu irgendeinem Poynting-Vektor $\vec{S}$ ein beliebiges Vektorfeld hinzu addiert, welches geschlossene Feldlinien aufweist, so hätte dieses dann neue Vektorfeld überhaupt keinen Einfluss auf obiges Integral. Das hat in der Folge dazu geführt, dass manche Wissenschaftler der Größe $\vec{S}$ selbst jegliche physikalische Realität abgesprochen haben, weil $\vec{S}$ eben nicht eindeutig sei. Allerdings weist beispielsweise schon Simonyi [Simo] unter Hinweis auf relativistische Betrachtungen darauf hin, dass diese Auffassung so nicht stimmen könne.

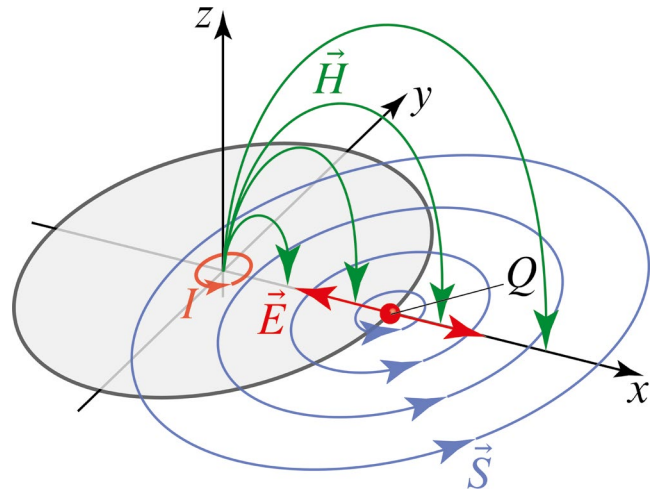


Bild 1: Scheibe aus Kunststoff mit einer vom Strom I durchströmten, supraleitenden Leiterschleife und einer Punktladung Q . Das elektrische Feld der Punktladung ist andeutungsweise nur durch zwei Feldlinien dargestellt. Es hat die elektrische Feldstärke $\vec{E}$. Dabei weist $\vec{E}$ kugelsymmetrisch von der Punktladung fort. Das magnetische Feld der Leiterschleife hat die magnetische Feldstärke $\vec{H}$. Feldlinien des magnetischen Feldes sind im ersten Quadranten der x - z -Ebene dargestellt. Feldlinien des Poynting-Vektors $\vec{S}$ sind in der x - y -Ebene teilweise eingezeichnet.

Um nun die physikalische Realität des Poynting-Vektors zu zeigen, ohne explizit mit den erwähnten, aber doch recht unanschaulichen relativistischen Betrachtungen hantieren zu müssen, hat Feynman ein einfaches Gedankenexperiment formuliert, welches unter dem Begriff „Feynman's Disc Paradox“ in die Literatur eingegangen ist [Feyn]. Eine quantitative Behandlung dieses (dort noch weiter vereinfachten) Paradoxons stammt von Aguirregabiria et al. [Agui]. Sie soll hier qualitativ wiedergegeben werden.

Das Bild zeigt eine Kunststoffscheibe, die in der x - y -Ebene liegt und um die z -Achse rotieren kann. In der Mitte der Scheibe befindet sich eine sehr kleine, supraleitende Leiterschleife, die vom konstanten Strom I durchflossen wird. Auf dem Rand der Scheibe ist eine Punktladung Q angebracht. Alles befindet sich in Ruhe. Das magnetische Feld der Leiterschleife ergibt zusammen mit dem elektrischen Feld der Punktladung überall im Raum das Feld eines Poynting-Vektors $\vec{S}$, dessen Feldlinien alle in sich geschlossen sind. Im Bild sind Feldlinien von $\vec{S}$ in der x - y -Ebene teilweise eingezeichnet. Feynman [Feyn] schreibt: „Der Poynting-Vektor zeigt hier also einen Energiestrom, der ständig im Kreis fließt. Nirgends tritt eine Änderung der Energie auf. Alles, was in ein Volumen hineinfließt, fließt auch wieder hinaus. Also gibt es in diesem sogenannten statischen Fall eine Zirkulation der Energie.“

Nun wird die Situation dahingehend verändert, dass sich die Leiterschleife langsam erwärmen möge, so dass die Supraleitung verschwindet. Strom I und magnetische Feldstärke $\vec{H}$ streben also gegen Null und damit auch $\vec{S}$. Dabei wird, wie aus dem Induktionsgesetz bekannt, ein elektrisches Feld der Stärke $\vec{E}_1$ induziert, dessen Feldlinien als konzentrische Kreise um die z -Achse verlaufen. $\vec{E}_1$ bewirkt nun eine Kraft $\vec{F} = Q \vec{E}_1$ auf die Punktladung und ist gemäß der Lenzschen Regel so gerichtet, dass sie die Punktladung Q und damit auch die Scheibe in Rotation versetzt und zwar bezüglich der z -Achse rechtswendig. Die Anordnung besitzt dann also den Drehimpuls $\vec{L}$. Gemäß dem Satz von der Erhaltung des Drehimpulses muss dieser Drehimpuls aber auch schon vorher vorhanden gewesen sein, als sich die Anordnung noch in Ruhe befand. Tatsächlich lässt sich zeigen (da fängt dann das hier nicht erläuterte Relativistische an), dass dieser Drehimpuls vorher im Poynting-Vektor „versteckt“ war. Der Poynting-Vektor liefert nämlich nicht nur die Energieströmung, sondern, wenn man ihn durch das Quadrat der Lichtgeschwindigkeit c teilt, auch die elektromagnetische Impulsdichte $\vec{p}_V$ gemäß

$$\vec{p}_V = \vec{S}/c^2,$$

also einen Impuls pro Volumen, woraus sich der differentielle Impuls $d\vec{p}$ eines Volumenelementes dV dann zu $d\vec{p} = \vec{p}_V dV$ ergibt. Hiermit lässt sich dann – ganz formal nach den bekannten Gesetzen der Mechanik – durch Integration schließlich der offenbar schon vorher im elektromagnetischen Feld enthaltene Drehimpuls $\vec{L}_{\text{Feld}}$ des Feldes errechnen, der in der Tat identisch mit dem zuvor erhaltenen mechanischen Drehimpuls $\vec{L}$ ist. Der Drehimpulserhaltungssatz ist also – wie es sein muss – in der Tat erfüllt.

Zusammenfassend ergibt sich also auf die eingangs gestellte Frage folgende Antwort: Auch im statischen Fall, also bei rein kreisendem Energiefluss, ist die Betrachtung des Poynting-Vektors $\vec{S}$ nicht nur sinnvoll, sondern sogar erforderlich. Das Gedankenexperiment sagt also keineswegs – wie man vielleicht zunächst glauben könnte – an den Grundfesten der Energieerhaltung und der Impulserhaltung, sondern die Betrachtung des Poynting-Vektors ist hierfür zwingend notwendig.

Literatur

- [Simo] Simonyi, K.: Theoretische Elektrotechnik. VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, 1956.
- [Feyn] Feynman, R. P.: Feynman-Vorlesungen über Physik. Die Kapitel 17.4 und 27.6. sind unter derselben Nummer mit demselben Inhalt in verschiedenen Auflagen von etwa 1987 bis 2015 enthalten, z. B. in De Gruyter 2015.
- [Agui] Aguirregabiria, J. M.; Hernández, A.: The Feynman paradox revisited. Eur. J. Phys. 2 (1981), S. 168–170.

■ 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 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 2022 – 23

2022

20.–22. Juni, Berlin
Fachtagung

[FNN ETG Tutorial Schutz- und
Leittechnik](#)

5.–6. Juli, Bayreuth
ETG ITG Fachforum

[Zellulare Zukunft der
Energieversorgung 2022](#)

5.–9. September, Hannover
Fachtagung

[24th European Conference on
Power Electronics and Applica-
tions \(EPE'22 ECCE Europe\)](#)

14.–15. September, Linz (Österreich)
Fachtagung

[IKMT 2022 – Innovative Klein-
und Mikroantriebstechnik](#)

19. September, Berlin
Fachtagung

[Treffen des Industrie-
kreis Mittelspannungs-
Leistungselektronik 2022](#)

28.–29. September, Leipzig
Fachtagung

[Netzregelung und
Systemführung 2022](#)

11.–13. Oktober, Esslingen am Neckar
Fachtagung

[STE 2022](#)

Sternpunktbehandlung in Netzen
bis 100 kV (D-A-CH)

8.–10. November, Berlin
Fachtagung

[VDE Hochspannungstechnik](#)

21.–22. November, Kassel
Fachtagung

[Erzeugung und Speicherung
elektrischer Energie](#)

1.–2. Dezember, Dresden
Rail.S/VDE Symposium

[Elektrische Fahrzeugantriebe
und -ausrüstungen](#)

14.–15. Dezember, Landesvertretung
Niedersachsen in Berlin
Fachtagung

[8. Dialogplattform Power-to-Heat](#)

2023

3.–4. Mai, Wuppertal
Fachtagung

[ETG Kongress 2023](#)

Die Energiewende beschleunigen

20.–21. Juni, Bad Nauheim
Fachtagung

[Bauelemente der Leistungs-
elektronik und ihre
Anwendungen 2023](#)

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

