



Technische
Universität
Braunschweig



Institut für Hochspannungstechnik
und Energiesysteme

SEMINAR

STUDIENSEMINAR FÜR ELEKTRISCHE ENERGIESYSTEME

Ergebnisberichte Teil 1 und Teil 2

Prof. Dr. Bernd Engel

Prof. Dr. M. Kurrat

**elenia Institut für Hochspannungstechnik und Elektrische
Energiesysteme**

Wintersemester 2020/21

Braunschweig, 25.01.2021

Inhaltsverzeichnis

Zeitplan	2
E.-W. Bauni Kamga - Anwendungsfällen für intelligente Messsysteme in hochintegrierten Quartieren aus der Sicht von Batteriespeichersystemen	4
Bericht	4
Präsentation	9
Z. Xu - Anforderungsspezifikationen an intelligente Messsysteme aus der Sicht von Batteriespeichersystemen .	51
Bericht	51
Präsentation	56
V. Zimmermann - Inter-Area-Oscillations im europäischen Verbundnetz	77
Bericht	77
Präsentation	97
M. S. Skroch - Möglichkeiten zur aktiven Spannungsbandstützung mittels Wärmepumpen im Kontext eines Smart-Grid	117
Bericht	117
Präsentation	121
O. Landrath - Überblick und Herausforderungen zukünftiger Batterietechnologien	142
Bericht	142
Präsentation	146
F. Feldt - Zusammensetzung und Eigenschaften von CuCr Plasmen im Vakuum	168
Bericht	168
Präsentation	172
K. Neumann - Vakuumschalter in der Hochspannungsebene: Technologie, Design und Anforderungen	192
Bericht	192
Präsentation	196
H. Gundelach - Bestimmung von DC-Netztopologien im Nieder- und Mittelspannungsbereich	219
Bericht	219
Präsentation	224

Referent	Thema
Gruppe 1 - Prof. Engel	
Emmanuel-Wilson	Anwendungsfällen für intelligente Messsysteme in hochintegrierten Quartieren aus der Sicht von Batteriespeichersystemen
Bauni Kanga	
Zexuan Xu	Anforderungsspezifikationen an intelligente Messsysteme aus der Sicht von Batteriespeichersystemen
Violetta Zimmermann	Inter-Area-Oscillations im europäischen Verbundnetz
Mike Stefan Skroch	Möglichkeiten zur aktiven Spannungsbandstützung mittels Wärmepumpen im Kontext eines Smart-Grid
Gruppe 2 - Prof. Kurrat	
Oliver Landrath	Überblick und Herausforderungen zukünftiger Batterietechnologien
Felten Feldt	Zusammensetzung und Eigenschaften von CuCr Plasmen im Vakuum
Kai Neumann	Vakuumschalter in der Hochspannungsebene: Technologie, Design und Anforderungen
Hendrik Gundelach	Bestimmung von DC-Netztopologien im Nieder- und Mittelspannungsbereich
Abschluss	

Anwendungsfällen für intelligente Messsysteme in hochintegrierten Quartieren aus der Sicht von Batteriespeichersystemen

Emmanuel-Wilson Bauni Kamga

Institut für Hochspannungstechnik und elektrische Energieanlagen – **elenia**, Braunschweig, e.bauni-kamga@tu-braunschweig.de

Kurzfassung

Die Digitalisierung aller gesellschaftlichen Lebensbereiche stellt unsere Gesellschaft vor große Herausforderungen. In der Energiebranche können digitalisierte Energiesysteme durch den Einsatz von intelligenten Messsystemen eine wichtige Rolle für eine erfolgreiche Gestaltung der Energiewende spielen. Intelligente Messsysteme ermöglichen eine Steigerung der Energieeffizienz durch die Echtzeitmessung des Stromsverbrauchs und können somit u.a. einen wichtigen Beitrag zum verbesserten Management und Steuerung von Batteriespeichersystemen liefern.

Abstract

The digitalization of all areas of social life poses major challenges for our society. In the energy sector, digitized energy systems can play an important role in successfully shaping the energy transition through the use of smart metering systems. Smart metering systems enable an increase in energy efficiency through the real-time measurement of electricity consumption and can thus make an important contribution to the improved management and control of battery storage systems, among other things.

1 Einleitung

Aufgrund der wetterabhängigen Energiebereitstellung der erneuerbaren Energien, muss sich der Stromverbrauch zunehmend nach dem Angebot richten. Ist mehr als genug Strom im Netz werden Speicher geladen. Gibt es entgegen wenig Strom im Netz, wird der Stromverbrauch sobald wie möglich reduziert und die Batteriespeicher werden entladen [13]. Somit gewährleisten Batteriespeicher einen stabilen Netzbetrieb und eine Energieoptimierung. Im Energiesystem werden Millionen Einheiten vernetzt und aufeinander abgestimmt. Diese zunehmende Komplexität erfordert ein hohes Maß an Automatisierung. Das Zusammenspiel zwischen der schwankenden Stromerzeugung, den flexiblen Verbrauch und die Infrastrukturen funktioniert nur mit intelligenten Messsystemen [13]. Außerdem ermöglichen intelligente Messsysteme zahlreiche Anwendungsfälle und werden auch für die Einbindung von Batteriespeichern genutzt [3].

2 Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen und die Komponenten eines intelligenten Systems erläutert.

2.1 Intelligente Messsysteme (iMSys)

Ein intelligentes Messsystem ist eine über einen Smart-Meter-Gateway in ein Kommunikationsnetz eingebundene moderne Messeinrichtung zur Erfassung elektrischer Energie, das den tatsächlichen

Energieverbrauch und die tatsächliche Nutzungszeit widerspiegelt [1]. Eine Verpflichtung zum Einbau von intelligenten Messsystemen ist für die nachfolgenden Fälle gesetzlich vorgeschrieben:

- bei allen Letztverbrauchen mit einem Jahresverbrauch von mehr als 6000 Kilowattstunde (kWh)
- bei Neuanlagen mit einer installierten Leistung von mehr als 7 kW [5].

Ein iMSys besteht mindestens aus einer modernen Messeinrichtung und aus einem Smart-Meter-Gateway, welches die zentrale Kommunikationseinheit des intelligenten Messsystems ist [3].

2.2 Moderne Messeinrichtung (mMe)

Eine moderne Messeinrichtung ist eine Messeinrichtung, die den tatsächlichen Elektrizitätsverbrauch und die tatsächliche Nutzungszeit widerspiegelt und kann durch ein SMGW in ein Kommunikationsnetz eingebunden werden [2]. Im Gegensatz zu analogen Zählern (Ferraris-Zähler), bei denen man nur den Zählerstand ablesen kann, sind mMe digitale Zähler, die die aktuelle bezogene Leistung in Kilowatt anzeigen und die Verbrauchswerte werden bis zu 24 Monaten speichern [8].

2.3 Smart-Meter-Gateway

Der Smart-Meter-Gateway ist die zentrale Kommunikationseinheit eines intelligenten Messsystems und verfügt über drei definierte Schnittstellen. Die elektronischen Messeinrichtungen werden im lokalen Metrologischen Netz (LMN) mit den verschiedenen

Marktteilnehmern im Weitverkehrsnetz (WAN) und dem lokalen Heimnetz (HAN) verbunden. Der SMGW stellt sicher, dass alle Kommunikationsverbindungen verschlüsselt werden und dass nur bekannte Teilnehmer und Geräten vertraut wird. Die Einrichtung der Kommunikationsverbindung obliegt dem Gateway-Administrator, der sowohl für die Konfiguration als auch für den sicheren Betrieb verantwortlich ist. Die Voraussetzung für den Einsatz von SMGW ist eine Zertifizierung durch das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) [4].

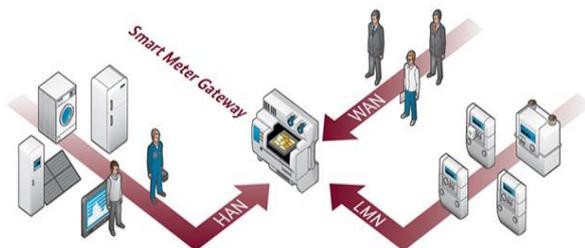


Bild 1: Systemarchitektur eines intelligenten Messsystems. [4]

Lokale Metrologische Netz – LMN (Local Metrological Network)

Die Messeinrichtungen des Letztverbrauchers werden über das Lokale Metrologische Netz mit dem SMGW verbunden. Diese senden die erhobenen Verbrauchs- und Einspeisewerte sowie Netzzustandsdaten (z.B. Spannung, Phasenwinkel, Frequenz) an das Gateway, wo sie gespeichert und weiterverarbeitet werden [4].

Weitverkehrsnetz – WAN (Wide Area Network)

Im WAN kommuniziert das SMGW mit den externen Marktteilnehmern wie zum Beispiel dem Gateway-Administrator, dem Verteilnetzbetreiber, dem Energielieferanten und dem Messstellenbetreiber. Im WAN besitzt das SMGW eine vertrauenswürdige Instanz, den SMGW Administrator, der für die Einrichtung, Konfiguration, Mandantenverwaltung (Schlüssel- und Zertifikatsmanagement), Tarifverwaltung (Kommunikations- und Tarifierungsprofile) und den sicheren Betrieb von Smart-Meter-Gateways verantwortlich ist [4].

Das Heimnetz – HAN (Home Area Network)

Im HAN stellt das SMGW drei logische Schnittstellen:

- **CLS-Schnittstelle:** Über diese Schnittstelle können steuerbare Komponenten wie zum Beispiel Photovoltaik-Anlagen, Klimaanlage, und Mehrwertdienste gesicherte Kommunikationsverbindungen mit dem externen Marktteilnehmer im WAN unterhalten [7]. Außerdem kann der Letztverbraucher über diese Schnittstelle

geeignete Geräte anschließen und Zugriff auf externe Marktteilnehmer für Steuerungs- und Fernwartungszwecken ermöglichen [4].

- **Letztverbraucher-Schnittstelle:** Mit Hilfe der Letztverbraucher-Schnittstelle hat der Letztverbraucher die Möglichkeit die jeweilige gespeicherte und ihm zugeordnete Informationen abzurufen. Er erhält nach erfolgreicher Authentifizierung lesenden Zugriff auf seine Daten [7].

- **Service-Techniker-Schnittstelle:** Über diese logische Schnittstelle wird einem Service-Techniker die Gelegenheit geboten, wichtige Informationen über den Systemzustand des SMGW in Erfahrung zu bringen. Diese Informationen unterstützen ihn bei der Diagnose von Fehlersituationen [4].

3 Hauptteil

Im vorausgegangenen Grundlagenteil wurden die Definition von intelligenten Messsystemen, sowie ihren Komponenten vorgestellt. In diesem Kapitel werden wir uns mit den regulatorischen Rahmenbedingungen, Anwendungsfälle, Anforderungen sowie den Generationen von iMSys auseinandersetzen.

3.1 Regulatorische Rahmenbedingungen

Um die Einführung von intelligenten Messsystemen voranzutreiben und zu unterstützen wurden gesetzliche und regulatorische Rahmenbedingungen geschaffen. Auf europäischer Ebene ist die EU-Binnenmarkttrichtlinie 2009/72/EG für die mögliche Einführung von iMSys und intelligente Zähler relevant [5]. Nach dieser EU-Richtlinie wird gefordert, dass bis spätestens 2020 mindestens 80% der Verbraucher mit iMSys ausgestattet sein sollen, sofern ein Mitgliedsstaat nicht auf Basis einer Kosten-Nutzen-Analyse zu einer negativen/abweichenden Bewertung kommt [6].

Auf deutsche Ebene wurde die EU-Richtlinie im Jahr 2016 durch das Gesetz zur Digitalisierung der Energiewende (GDEW) in nationales Recht umgesetzt. Das GDEW ist der Kernbestandteil zur Ausstattung und zum Betrieb von iMSys in Deutschland. Nach diesem Gesetz ist eine Verpflichtung zum Einbau von intelligenten Messsystemen für die nachfolgenden Fälle gesetzlich vorgeschrieben:

- bei allen Letztverbräuchen mit einem Jahresverbrauch von mehr als 6000 Kilowattstunde (kWh)
- bei Neuanlagen mit einer installierten Leistung von mehr als 7 kW [6].

3.2 Anwendungsfälle

Zur Energieoptimierung und Verbundsteuerung werden in Quartieren intelligente Messsysteme eingesetzt, die die mögliche Anwendungsfälle einrichten. **Die Visualisierung des Haushaltsstroms** wird durch die Einführung von iMSys ermöglicht. Der Letztverbraucher die Gelegenheit seine Verbrauchsdaten über ein Kundenportal oder eine App am PC, Tablet oder Smartphone jederzeit abzurufen und abzulesen. Wie **Bild 2** zeigt wird den Stromverbrauch bei dem Kundenportal der Firma Discovery in Echtzeit gezeigt. Außerdem können im Discovery-Portal Schwellenwerte definiert werden bei deren unter- oder überschreiten der Verbraucher benachrichtigt wird. Durch die graphische Darstellung einzelner Geräte lässt sich der Konsum einzelnen Geräten zuordnen und Stromfresser eindeutig identifizieren. Dadurch werden die Nutzer Ihren Elektrizitätsverbrauch besser verstehen und sich bewusster mit dem Strom verhalten [9].



Bild 2: Discovery-Portal [9]

Aus der Sicht von Batteriespeichern leisten iMSys auf einen wichtigen Beitrag für **die optimale Dimensionierung von Batteriespeichern**. Durch die Echtzeitmessung und Visualisierung von Stromverbrauch, zeichnen iMSys das langfristige Stromverbrauchsmuster auf, wodurch es erstmals möglich ist, Batteriespeicher datenbasiert zu dimensionieren. Da auf Basis der gesammelten Daten genau ermittelt werden kann, wann wie viel Strom verbraucht wird, können Batterien perfekt auf die Bedürfnisse des Nutzers geplant werden und die Rendite wird deutlich gesteigert [10].

iMSys ermöglichen **den Abruf der Ist-Einspeisung eines Batteriespeichers**. Dieser Anwendungsfall erlaubt die aktuelle Ist-Einspeisung eines Batteriespeichers im Rahmen einer aktuell durchgeführten Energiemanagementmaßnahme auszulesen und einem berechtigten externen Marktteilnehmer zur Verfügung zu stellen. Der Marktteilnehmer kann mithilfe des SMGW-Administrators den Abruf der Ist-Einspeiseleistung veranlassen. Dieser muss dann nach erfolgreichem Durchführen des Wake-Up- Service die Erfassung und den Versand der aktuellen Einspeiseleistung anstoßen oder die Ereignisse konfigurieren, welche den Versand auslösen [7].

iMSys können auch zur **Steuerung von Erzeugungsanlagen und Batteriespeichern** genutzt werden. **Bild 3** zeigt den Ablauf des Schaltens bzw. Steuerns von Anlagen über das SMGW. Im ersten Schritt sendet der aktiver Externer Marktteilnehmer eine Kommunikationsanfrage zu einem Smart Meter Gateway Administrator (SMGWA). Dann sendet der SMGWA ein Wake-Up-Paket an den SMGW. Sobald der SMGW das Wake-Up-Paket bekommen hat, baut er einen Kanal zum SMGWA auf. Dieser parametrisiert das SMGW gemäß den Anforderungen des externen Marktteilnehmers. Weiterhin baut der SMGW einen Kanal zu dem Marktteilnehmer und zur Steuerbox (CLS-Modul) auf. Jetzt kann der externe Marktteilnehmer ein Schaltbefehl an das CLS-Modul senden, um die entsprechende Anlage zu schalten [3].

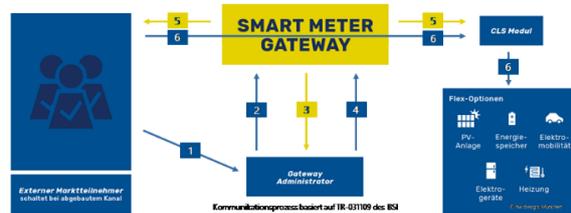


Bild 3: Ablauf des Schaltens / Steuerns einer Anlage durch den SMGW [11]

3.3 Anforderungsspezifikationen

Datenschutz und Datensicherheit sind die zentralen Anforderungen an intelligenten Messsystemen. Aufgrund der Verarbeitung und Zusammenführung personenbezogener Verbrauchsdaten im SMGW und dem hohen Angriffspotenzial und Ausforschungspotenzial über das Weitverkehrsnetz, müssen iMSys den Schutz vor missbräuchlicher Datenverarbeitung gewährleisten [7]. Dafür ist die **physische Trennung der Netze** elementar. Jede Kommunikation zwischen den Netzen muss über den SMGW laufen, damit der Informationsfluss für den Letztverbraucher jeder Zeit transparent und nachvollziehbar ist [5]. Ein weiterer wichtiger Punkt ist **die Anonymisierung bzw. Pseudonymisierung von Daten**. Bei der Übertragung von nicht abrechnungsrelevanten Messwerten vom SMGW an einen EMT (externe Marktteilnehmer) ist es notwendig, die Identität des Anschlussnutzers (hier gegeben durch die Identität des messenden Zählers) nicht offen zu legen. Um dies zu erreichen, werden die Identifikation des Zählers durch ein Pseudonym ersetzt [7]. **Bild 4** stellt eine pseudonymisierte Messdatenübertragung dar. Dies erfolgt durch folgende Schritte:

- Aus Messwerten, die einem Auswertungsprofil folgend pseudonymisiert

übertragen werden sollen, wird die eindeutige kanonische Geräte-ID durch das SMGW entfernt und durch ein im Auswertungsprofil hinterlegtes Pseudonym ersetzt.

- Die so aufbereiteten Daten werden dann vom SMGW für den Empfänger (EMT) verschlüsselt, signiert und an den SMGW-Administrator übertragen.
- Der SMGW-Administrator prüft die Signatur des SMGW und damit die Authentizität der empfangenen Daten und leitet diese nach Entfernung der SMGW Signatur an den Empfänger weiter.
- Der Empfänger entschlüsselt die Nachricht [6].

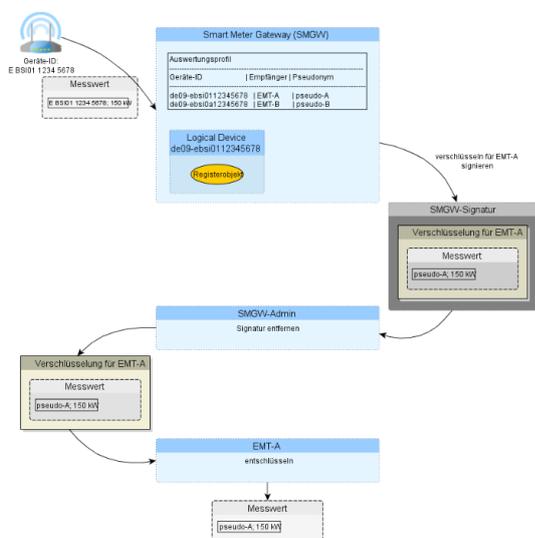


Bild 4: Pseudonymisierte Messübertragung [6]

Eine weitere Anforderung an iMSys ist die **Messwertverarbeitung**. Intelligente Messsysteme müssen die von aus modernen Messeinrichtungen stammende Messwerten zuverlässig verarbeiten, erheben, übermitteln, protokollieren, speichern und löschen [5]. Weiterhin müssen iMSys Multi-mandantenfähig sein. Unter **Multi-Mandantenfähigkeit** versteht man die Fähigkeit eines intelligenten Messsystems die Daten mehrerer Kunden und mehrere Zähler parallel bearbeiten zu können. Damit können die Messwerte verschiedene Letztverbraucher erfasst, bearbeitet und gespeichert werden [5]. (z. B in einem Mehrfamilienhaus)

3.4 Generationen von iMSys

Es unterscheidet sich vier Generationen von iMSys. Die erste Generation (**G1 Basis**) erfüllt 42% der vom Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik gestellten Anforderungen, womit fünf Dienstleistungen erbracht werden können [12]. Mit der folgenden

Generation **G1 Netz** werden vier weiterer Dienstleistungen ermöglicht u.a. die Steuerung von Anlagen und Batteriespeichern. Bei der **Ziel-Generation** sind die klassischen Netz- und Systemdienstleistungen überwiegend realisierbar und es können insgesamt 17 Dienstleistungen bereitgestellt werden [12]. Diese Generation **GY Zukunft** soll alle Anforderungen erfüllen und somit alle mögliche Dienstleistungen ermöglichen [3].

4 Zusammenfassung

Moderne Messeinrichtungen und Smart Meter Gateway bilden zusammen ein intelligentes Messsystem, welches den tatsächlichen Stromverbrauch misst und zur standardisierten Kommunikation in Energienetzen dient. Nach dem Gesetz zur Digitalisierung der Energiewende ist eine Verpflichtung zum Einbau von iMSys in Deutschland für Letztverbraucher mit einem Jahresverbrauch von mehr als 6000 kWh und für Neuanlagen mit einer installierten Leistung von mehr als 7 kW. Neben der Visualisierung des Haushaltsstroms, dienen iMSys zur optimalen Dimensionierung und Steuerung von Batteriespeichern. Außerdem bieten iMSys die Gelegenheit, die Ist-Einspeisung von Batteriespeichern abzurufen. Aufgrund dem hohen Informationsfluss müssen iMSys hohe Sicherheitsanforderungen wie Datenschutz und Datensicherheit erfüllen und die Daten müssen bei der Übertragung nicht abrechnungsrelevanten Messwerten pseudonymisiert werden. Die erste von den vier iMSys-Generationen erfüllen noch nicht alle Anforderungen an iMSys wie zum Beispiel die Steuerung von Anlagen und Batteriespeichern. Dies wird im Laufe der Zeit durch die nächsten Generationen ermöglicht.

5 Literatur

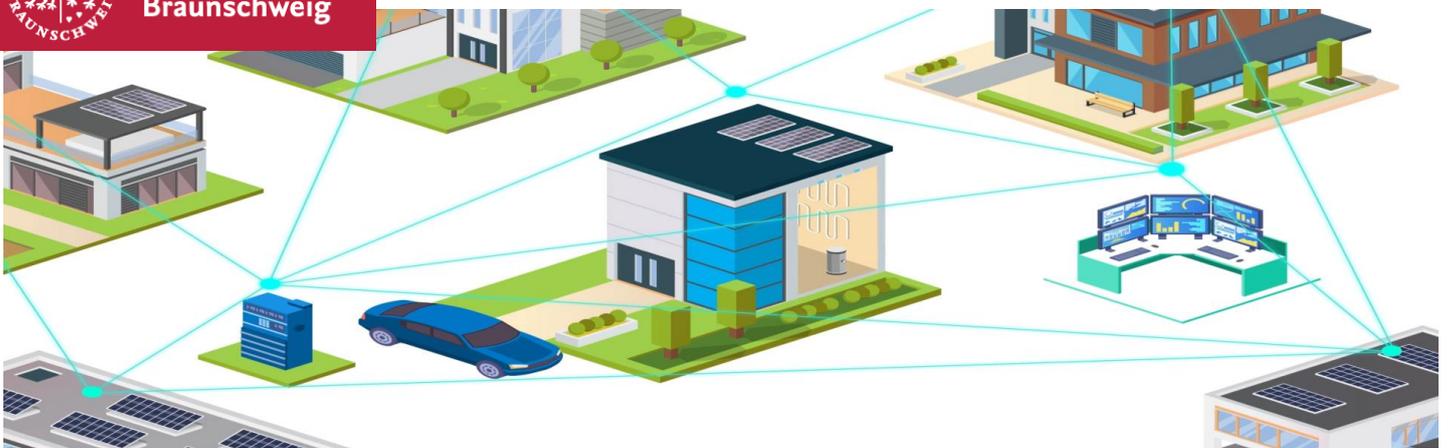
- [1] § 2 Abs. 1 Nr. 7, 15, 19 MsbG
- [2] Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik, Marktanalyse zur Feststellung der technischen Möglichkeit zum Einbau intelligenter Messsysteme nach § 30 MsbG, Version 1.0, 31.01.2019.
- [3] Sebastian Faller, Grundlagen zu intelligenten Messsystemen (iMSys), 15.09.2020
- [4] Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik, Das Smart-Meter-Gateway, Januar 2020
- [5] Ernst & Young, Kosten-Nutzen-Analyse für einen flächendeckenden Einsatz intelligenter Zähler, 2013
- [6] Karsten Vortanz und Peter Zayer, Smart Meter Rollout: intelligente Messsysteme als Schnittstelle zum Kunden im Smart Grid und Smart Market, Wiesbaden: Springer Fachmedien, 2017

- [7] Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik, Technische Richtlinie BSI TR-03109-1; Version 1.0.1, 16.01.2019
- [8] Bundesnetzagentur, Moderne Messeinrichtungen / Intelligente Messsysteme https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Verbraucher/Metering/SmartMeter_node.html
- [9] Discovergy, Welche Vorteile bringen Smart Meter? <https://discovergy.com/blog/smart-meter-vorteile>
- [10] Shine, was ist ein Smart Meter? <https://www.shine.eco/2018/12/20/was-ist-ein-smart-meter/>
- [11] Forschung für Energiewirtschaft e.V., Messen und Steuern über iMSys – Funktioniert das? <https://www.ffe.de/themen-und-methoden/digitalisierung/899-messen-und-steuern-ueber-imsys-funktioniert-das>
- [12] Elisabeth Springmann, Intelligente Messsysteme als Enabler für Netz- und Systemdienstleistungen durch Flexibilitätsoptionen, FFE 2020
- [13] Agentur für Erneuerbare Energien, Digitalisierung ist für den flexiblen Strommarkt der Zukunft unverzichtbar, 23.04.2020 <https://www.unendlich-viel-energie.de/presse/pressemitteilungen/neue-ae-animation-digitalisierung-ist-fuer-den-flexiblen-strommarkt-der-zukunft-unverzichtbar>



Technische
Universität
Braunschweig

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen



Anwendungsfälle für intelligente Messsysteme in hochintegrierten Quartieren aus der Sicht von Batteriespeichersystemen

Emmanuel-Wilson, Bauni Kamga, 25.01.2021

Agenda

- Einleitung & Motivation
- Grundlagen
 - Intelligente Messsysteme (iMSys)
 - Moderne Messeinrichtung (mMe)
 - Smart-Meter-Gateway (SMGW)
- Regulatorische Rahmenbedingungen
- Anwendungsfälle
- Anforderungsspezifikationen
- Generationen von intelligenten Messsystemen
- Zusammenfassung

Agenda

- Einleitung & Motivation
- Grundlagen
 - Intelligente Messsysteme
 - Moderne Messeinrichtung (mMe)
 - Smart-Meter-Gateway (SMGW)
- Regulatorische Rahmenbedingungen
- Anwendungsfälle
- Anforderungsspezifikationen
- Generationen von intelligenten Messsystemen
- Zusammenfassung

Einleitung & Motivation

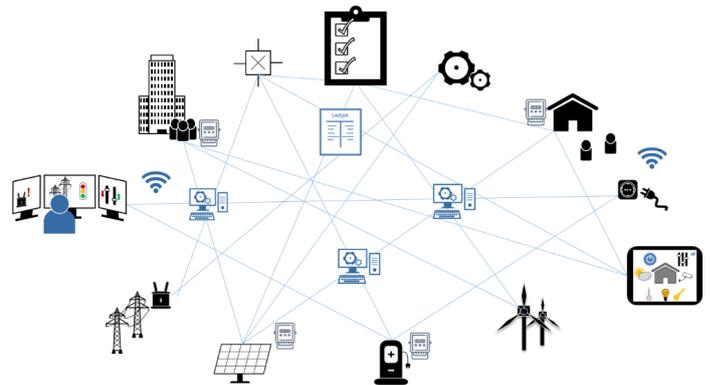
- Einsatz von Batteriespeichern für einen stabilen Netzbetrieb und eine Energieoptimierung



Quelle: [1] Agentur für Erneuerbaren Energie

Einleitung & Motivation

- Digitalisierte Energiesysteme für eine erfolgreiche Gestaltung der Energiewende auf Quartierebene



Quelle: [2], FFE

Agenda

- Einleitung & Motivation
- Grundlagen
 - Intelligente Messsysteme
 - Moderne Messeinrichtung (mMe)
 - Smart-Meter-Gateway (SMGW)
- Regulatorische Rahmenbedingungen
- Anwendungsfälle
- Anforderungsspezifikationen
- Generationen von intelligenten Messsystemen
- Zusammenfassung

Intelligente Messsysteme (iMSys)

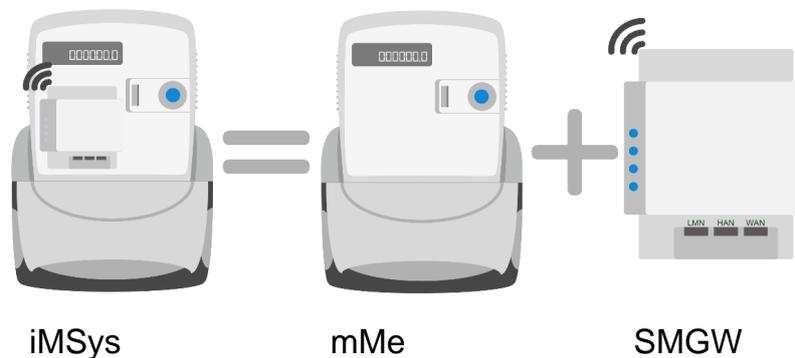
Ein iMSys ist ein Messsystem, das

- den tatsächlichen Stromverbrauch misst
- die tatsächliche Nutzungszeit widerspiegelt
- die Messdaten verarbeitet
- zu einer sicheren und standardisierten Kommunikation in den Energienetzen dient

Intelligente Messsysteme (iMSys)

Ein iMSys besteht aus zwei Komponenten:

- Mindestens eine Moderne Messeinrichtung (mMe)
- Ein Smart Meter Gateway (SMGW)



Quelle: [3] Digimeto

Agenda

- Einleitung & Motivation
- Grundlagen
 - Intelligente Messsysteme
 - Moderne Messeinrichtung (mMe)
 - Smart-Meter-Gateway (SMGW)
- Regulatorische Rahmenbedingungen
- Anwendungsfälle
- Anforderungsspezifikationen
- Generationen von intelligenten Messsystemen
- Zusammenfassung

Moderne Messeinrichtung (mMe)

Eine mMe ist eine Messeinrichtung, die

- den Elektrizitätsverbrauch in Echtzeit misst und widerspiegelt.
- die aktuelle bezogene Leistung anzeigt
- Stromverbrauchswerte bis zu 24 Monaten speichert



Quelle: [4] Grundlagen zu intelligenten Messsystemen

Moderne Messeinrichtung (mMe)

Gegenüberstellung Ferraris-zähler, mMe, iMSys

	Ferraris-Zähler	Moderne Messeinrichtung	Intelligentes Messsystem
Zählertyp	Analoger Zähler	Digitaler Zähler ohne Kommunikationseinheit	Digitaler Zähler mit Kommunikationseinheit
Funktionen des Zählers	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aktueller Zählerstand 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aktueller Zählerstand ▪ Gespeicherte Werte: <ul style="list-style-type: none"> ▪ Tages- ▪ Wochen- ▪ Monats- ▪ jahresgenau 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Aktueller Zählerstand ▪ Abrufbar in Viertelstundenwerten <ul style="list-style-type: none"> ▪ Tages- ▪ Wochen- ▪ Monats- ▪ jahresanzeige

Agenda

- Einleitung & Motivation
- Grundlagen
 - Intelligente Messsysteme
 - Moderne Messeinrichtung (mMe)
 - Smart-Meter-Gateway (SMGW)
- Regulatorische Rahmenbedingungen
- Anwendungsfälle
- Anforderungsspezifikationen
- Generationen von intelligenten Messsystemen
- Zusammenfassung

Smart-Meter-Gateway

Smart-Meter-Gateway:

- Zentrale Kommunikationseinheit eines intelligenten Messsystems
- Verbindet mMe mit verschiedenen Marktteilnehmer über drei Schnittstellen
- Gewährleistet die Verschlüsselung der Kommunikationsverbindung
- Wird durch das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) zertifiziert

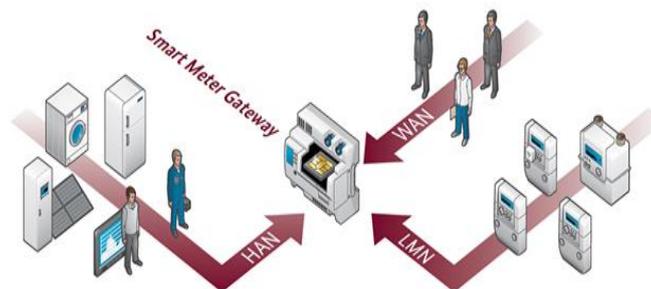


Quelle: [4] Grundlagen zu intelligenten Messsystemen

Smart-Meter-Gateway

Die drei Schnittstellen von dem SMGW:

- Lokal Metrologisches Netz (LMN)
- Weitverkehrsnetz (WAN)
- Heimnetz (HAN)

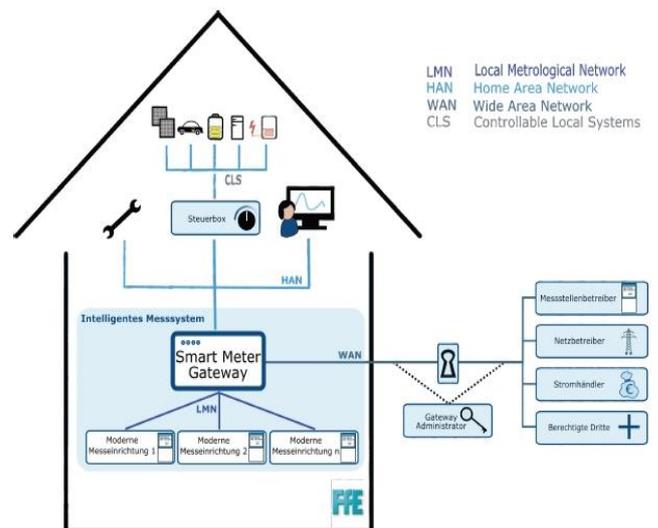


Quelle: [5] BSI

Smart-Meter-Gateway

Lokal Metrologisches Netz – LMN (Local Metrological Network):

- Verbindet die mMe des Letztverbrauchers mit dem SMGW
- Ermöglicht den Versand von Verbrauchs-, Einspeisewerten und Netzzustandsdaten an das SMGW

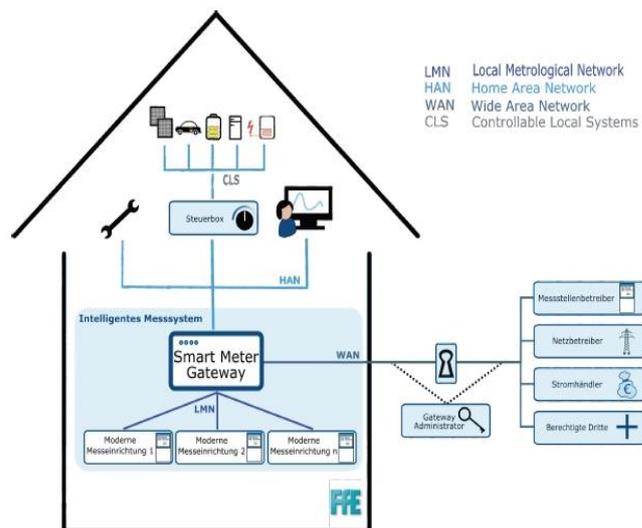


Quelle: [6] FFE

Smart-Meter-Gateway

Weitverkehrsnetz – WAN (Wide Area Network):

- Dient zur Kommunikation mit den externen Marktteilnehmern
- Ermöglicht die Steuerung und Konfiguration von SMGW durch den SMGW-Administrator



Quelle: [6] FFE

Smart-Meter-Gateway

Heimnetz- HAN (Home Area Network)

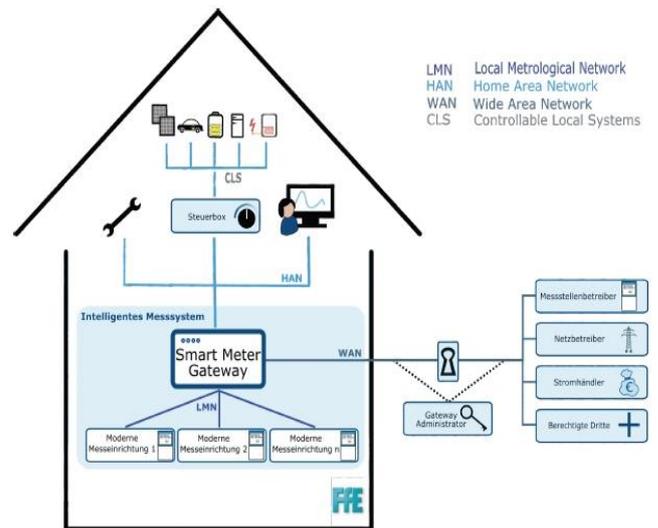


Smart-Meter-Gateway

Heimnetz- HAN (Home Area Network):

- **CLS-Schnittstelle:**

Dient zur Kommunikationsverbindung und Steuerung (durch Steuerbox) von steuerbaren Komponenten im HAN des Anschlussnutzers mit externen Marktteilnehmern



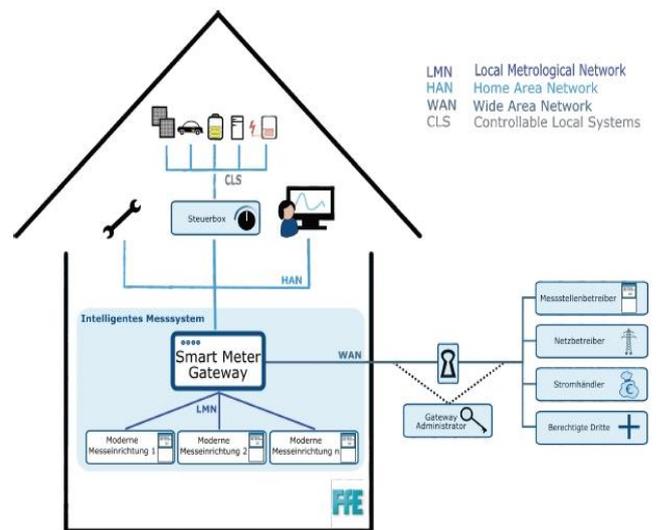
Quelle: [6] FFE

Smart-Meter-Gateway

Heimnetz- HAN (Home Area Network):

- **Letztverbraucher-Schnittstelle:**

Ermöglicht dem Letztverbraucher den Zugriff auf seine Verbrauchsdaten



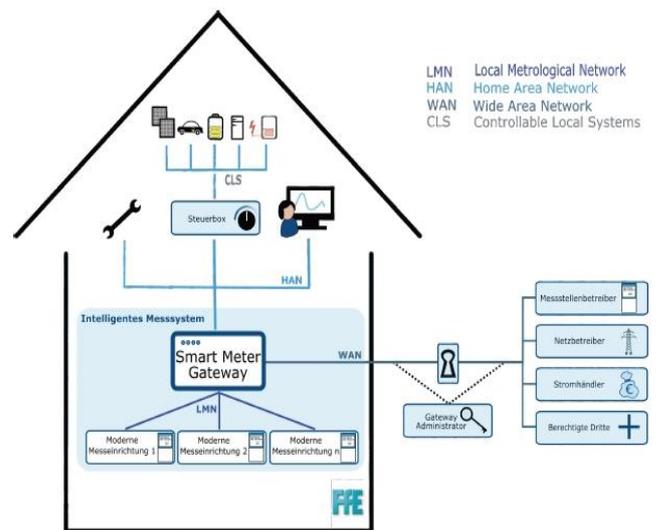
Quelle: [6] FFE

Smart-Meter-Gateway

Heimnetz- HAN (Home Area Network):

- **Service-Techniker-Schnittstelle:**

Bietet dem Service-Techniker die Gelegenheit, wichtige Informationen über dem Systemstand einzusehen

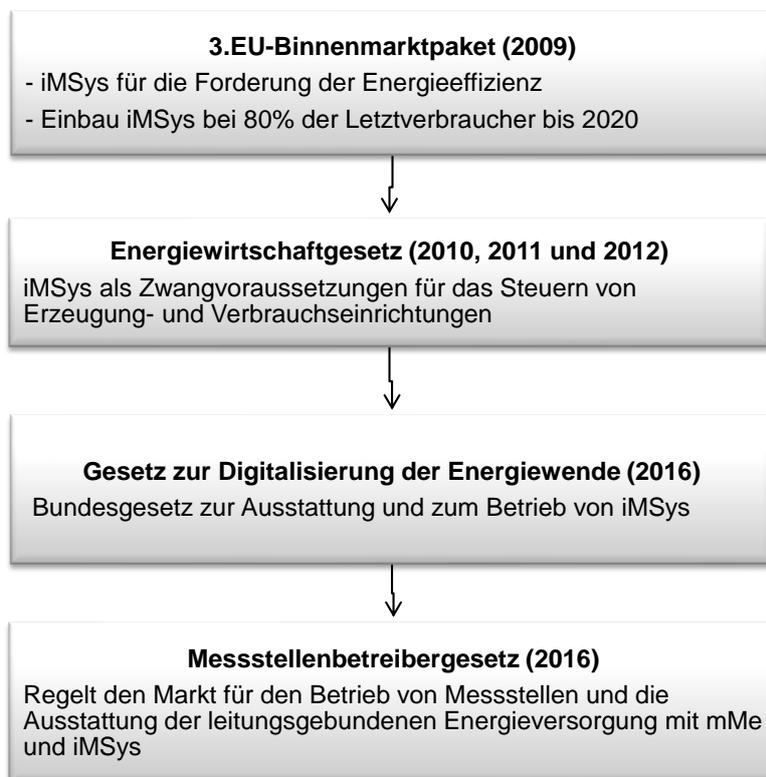


Quelle: [6] FFE

Agenda

- Einleitung & Motivation
- Grundlagen
 - Intelligente Messsysteme
 - Moderne Messeinrichtung (mMe)
 - Smart-Meter-Gateway (SMGW)
 - Lokale Metrologische Netz- LMN (Local Metrological Network)
 - Weitverkehrsnetz- Wan (Wide Area Network)
 - Heimnetz- HAN (Home Area Network)
- Regulatorische Rahmenbedingungen
- Anwendungsfälle
- Anforderungsspezifikationen
- Generationen von intelligenten Messsystemen
- Zusammenfassung

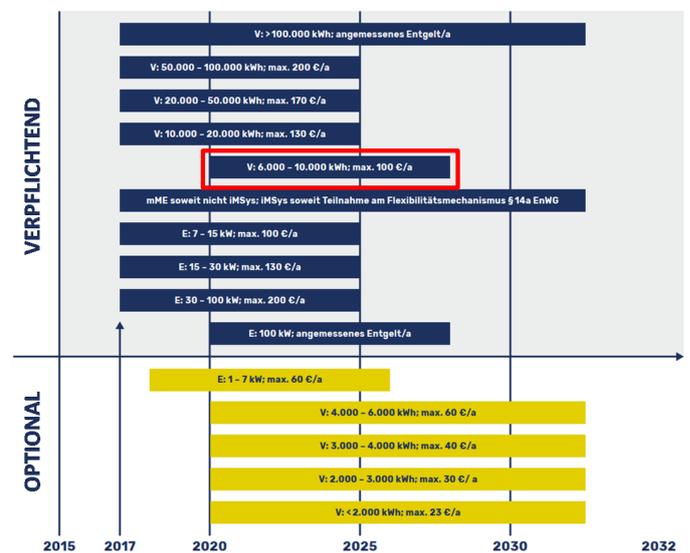
Regulatorische Rahmenbedingungen



Regulatorische Rahmenbedingungen

Einbaupflicht von iMSys für:

- alle Letztverbrauchen mit einem Jahresverbrauch von mehr als 6000 Kilowattstunde (kWh)
- Neuanlagen mit einer installierten Leistung von mehr als 7 kW



Quelle: [7] FFE

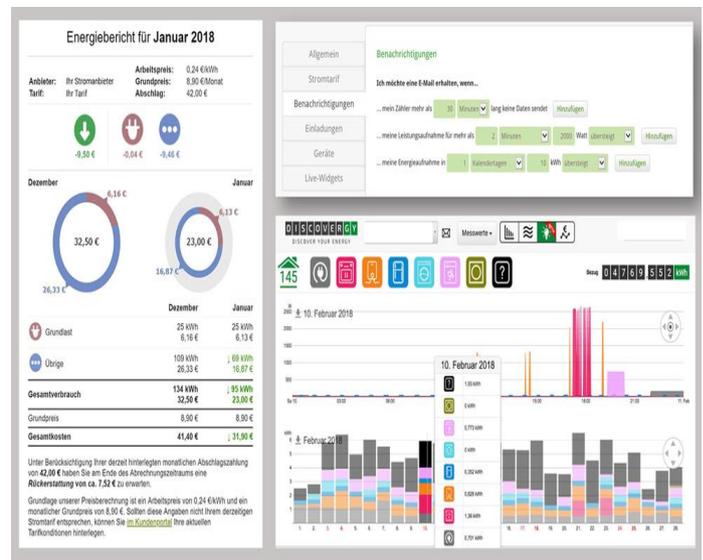
Agenda

- Einleitung & Motivation
- Grundlagen
 - Intelligente Messsysteme
 - Moderne Messeinrichtung (mMe)
 - Smart-Meter-Gateway (SMGW)
 - Lokale Metrologische Netz- LMN (Local Metrological Network)
 - Weitverkehrsnetz- Wan (Wide Area Network)
 - Heimnetz- HAN (Home Area Network)
- Regulatorische Rahmenbedingungen
- **Anwendungsfälle**
- Anforderungsspezifikationen
- Generationen von intelligenten Messsystemen
- Zusammenfassung

Anwendungsfälle

- **Transparente Erfassung von Energieverbrauch:**

Visualisierung des Haushaltstroms

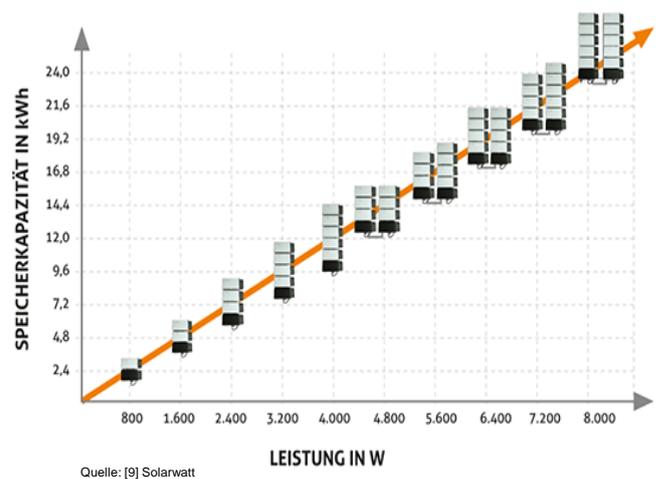


Quelle: [8] Discovery Blog

Anwendungsfälle

- **Transparente Erfassung von Energieverbrauch:**

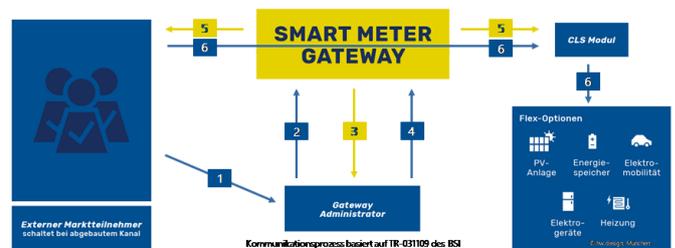
Optimale Dimensionierung von Batteriespeichern



Anwendungsfälle

- **Steuerung dezentraler Erzeugungsanlagen, Batteriespeicher und Verbrauchseinrichtungen**

Externe Marktteilnehmer können Batteriespeicher über den SMGW steuern



Quelle: [10] FFE

Anwendungsfälle

Abruf der Ist-Einspeisung eines Batteriespeichers

- Ist-Einspeiseleistung eines Batteriespeichers kann zur Verfügung eines berechtigten externen Marktteilnehmer gestellt werden

Abruf von Netzzustandsdaten

- Netzzustandsdaten (Frequenz, Phasenwinkel, etc.) können an Marktteilnehmer versendet werden

Agenda

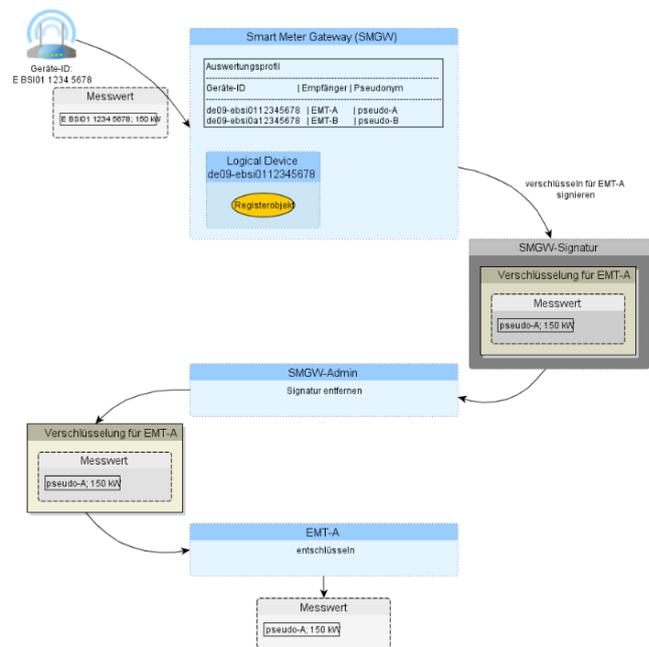
- Einleitung & Motivation
- Grundlagen
 - Intelligente Messsysteme
 - Moderne Messeinrichtung (mMe)
 - Smart-Meter-Gateway (SMGW)
 - Lokale Metrologische Netz- LMN (Local Metrological Network)
 - Weitverkehrsnetz- Wan (Wide Area Network)
 - Heimnetz- HAN (Home Area Network)
- Regulatorische Rahmenbedingungen
- Anwendungsfälle
- Anforderungsspezifikationen
- Generationen von intelligenten Messsystemen
- Zusammenfassung

Anforderungsspezifikationen

Anforderungen an iMSys:

- **Datenschutz und Datensicherheit**

- Physische Trennung der Netze
- Verschlüsselung der Kommunikationsdaten
- Pseudonymisierung / Anonymisierung



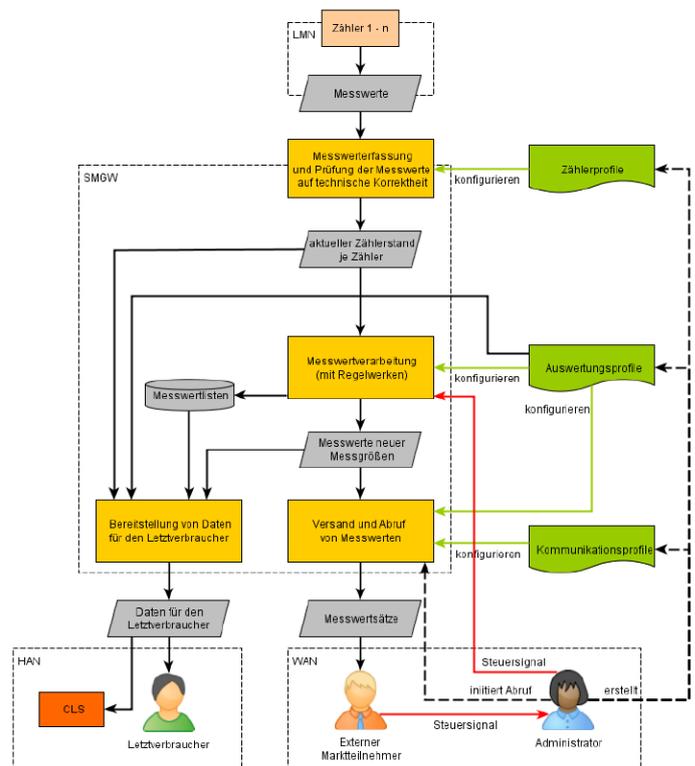
Quelle: [11] BSI

Anforderungsspezifikationen

Anforderungen an iMSys:

- **Messdatenverarbeitung**

iMSys müssen die von aus modernen Messeinrichtungen stammende Messwerten zuverlässig verarbeiten, erheben, übermitteln, protokollieren, speichern und löschen



Quelle: [11] BSI

Anforderungsspezifikationen

Multi-Mandantenfähigkeit

- Fähigkeit eines iMSys die Daten mehrerer Kunden und mehrere Zähler parallel bearbeiten zu können

Ein Smart-Meter-Gateway beinhalten

- SMGW ist die zentrale Kommunikationsplattform und soll in jedem intelligenten Messsystem vorhanden sein

Agenda

- Einleitung & Motivation
- Grundlagen
 - Intelligente Messsysteme
 - Moderne Messeinrichtung (mMe)
 - Smart-Meter-Gateway (SMGW)
 - Lokale Metrologische Netz- LMN (Local Metrological Network)
 - Weitverkehrsnetz- Wan (Wide Area Network)
 - Heimnetz- HAN (Home Area Network)
- Regulatorische Rahmenbedingungen
- Anwendungsfälle
- Anforderungsspezifikationen
- **Generationen von intelligenten Messsystemen**
- Zusammenfassung

Generationen von intelligenten Messsystemen

iMSys G1 Basis

iMSys G1 Netz

iMSys GX Ziel

iMSys GY Zukunft

Generationen von intelligenten Messsystemen

iMSys G1 Basis

- Erbringen fünf mögliche Dienstleistungen
- Ermöglichen keine Steuerung

Letztgang-analyse	Optimierung des Energie-einkaufs	Strompreis-optimierter Betrieb (manuell)	Abrechnung	Verbesserung von Prognosen für BKV und EVU	Flexibilitäts-märkte
Netzanalyse und -monitoring	Intraday-Vermarktung	Day-Ahead-Vermarktung	Steuerung §14a Anlagen	Ausgleichs-energie Bilanzkreis	Einspeise-management
Blindleistungs-management	Anlagen-monitoring	Eigen-verbrauchs-optimierung	Spitzenlast-management	Ausgleichs-energie für PPA	Sekundär-regelleistung
Minuten-reserveleistung	Abschaltbare Lasten (Engpass-management)	Arbitrage	Primärregel-leistung	Redispatch (spannungs-bedingt)	Redispatch (strombedingt)
				Abschaltbare Lasten (frequenz-bedingt)	

Möglich
Teilweise möglich
Nicht möglich

Quelle: [4] Grundlagen zu intelligenten Messsystemen

Generationen von intelligenten Messsystemen

iMSys G1 Netz

- Mit der Generation 1 Netz werden fünf weitere Dienstleistungen ermöglicht u.a. die Steuerung von Anlagen

Lastgang-analyse	Optimierung des Energie-einkaufs	Strompreis-optimierter Betrieb (manuell)	Abrechnung	Verbesserung von Prognosen für BKV und EVU	Flexibilitäts-märkte
Netzanalyse und -monitoring	Intraday-Vermarktung	Day-Ahead-Vermarktung	Steuerung §14a Anlagen	Ausgleichs-energie Bilanzkreis	Einspeise-management
Blindleistungs-management	Anlagen-monitoring	Eigen-verbrauchs-optimierung	Spitzenlast-management	Ausgleichs-energie für PPA	Sekundär-regelleistung
Minuten-reserveleistung	Abschaltbare Lasten (Engpass-management)	Arbitrage	Primärregel-leistung	Redispatch (spannungs-bedingt)	Redispatch (strombedingt)

Möglich	Teilweise möglich	Nicht möglich	Abschaltbare Lasten (frequenz-bedingt)
---------	-------------------	---------------	--

Quelle: [4] Grundlagen zu intelligenten Messsystemen

Generationen von intelligenten Messsystemen

iMSys GX Ziel

- Mit der Ziel Generation Können 17 Dienstleistungen bereitgestellt werden

Lastgang-analyse	Optimierung des Energie-einkaufs	Strompreis-optimierter Betrieb (manuell)	Abrechnung	Verbesserung von Prognosen für BKV und EVU	Flexibilitäts-märkte
Netzanalyse und -monitoring	Intraday-Vermarktung	Day-Ahead-Vermarktung	Steuerung §14a Anlagen	Ausgleichs-energie Bilanzkreis	Einspeise-management
Blindleistungs-management	Anlagen-monitoring	Eigen-verbrauchs-optimierung	Spitzenlast-management	Ausgleichs-energie für PPA	Sekundär-regelleistung
Minuten-reserveleistung	Abschaltbare Lasten (Engpass-management)	Arbitrage	Primärregel-leistung	Redispatch (spannungs-bedingt)	Redispatch (strombedingt)

Möglich	Teilweise möglich	Nicht möglich	Abschaltbare Lasten (frequenz-bedingt)
---------	-------------------	---------------	--

Quelle: [4] Grundlagen zu intelligenten Messsystemen

Generationen von intelligenten Messsystemen

iMSys GY Zukunft

- Alle mögliche Dienstleistungen sollen mit der Generation GY Zukunft realisierbar sein

Lastgang-analyse	Optimierung des Energie-einkaufs	Strompreis-optimierter Betrieb (manuell)	Abrechnung	Verbesserung von Prognosen für BKV und EVU	Flexibilitäts-märkte
Netzanalyse und -monitoring	Intraday-Vermarktung	Day-Ahead-Vermarktung	Steuerung §14a Anlagen	Ausgleichs-energie Bilanzkreis	Einspeise-management
Blindleistungs-management	Anlagen-monitoring	Eigen-verbrauchs-optimierung	Spitzenlast-management	Ausgleichs-energie für PPA	Sekundär-regelleistung
Minuten-reserveleistung	Abschaltbare Lasten (Engpass-management)	Arbitrage	Primärregel-leistung	Redispatch (spannungs-bedingt)	Redispatch (strombedingt)

Möglich	Teilweise möglich	Nicht möglich	Abschaltbare Lasten (frequenz-bedingt)
---------	-------------------	---------------	--

Quelle: [4] Grundlagen zu intelligenten Messsystemen

Agenda

- Einleitung & Motivation
- Grundlagen
 - Intelligente Messsysteme
 - Moderne Messeinrichtung (mMe)
 - Smart-Meter-Gateway (SMGW)
 - Lokale Metrologische Netz- LMN (Local Metrological Network)
 - Weitverkehrsnetz- Wan (Wide Area Network)
 - Heimnetz- HAN (Home Area Network)
- Regulatorische Rahmenbedingungen
- Anwendungsfälle
- Anforderungsspezifikationen
- Analyse der heutigen Generationen von intelligenten Messsystemen
- Zusammenfassung

Zusammenfassung

- Moderne Messeinrichtungen und Smart Meter Gateway bilden zusammen ein intelligentes Messsysteme
- iMSys messen den tatsächlichen Stromverbrauch und dienen zu einer sicheren und standardisierten Kommunikation in den Energienetzen
- iMSys ermöglichen eine optimale Dimensionierung, die Steuerung sowie der Abruf der Ist-Einspeisung von Batteriespeichern
- Bei dem Informationsfluss müssen iMSys den Datenschutz und die Datensicherheit gewährleisten

Vielen Dank für ihre Aufmerksamkeit!



Gibt es noch Fragen?

Quellen

- [1] Agentur für Erneuerbare Energien, Digitalisierung ist für den flexiblen Strommarkt der Zukunft unverzichtbar, 23.04.2020
<https://www.unendlich-viel-energie.de/presse/pressemitteilungen/neue-ae-animation-digitalisierung-ist-fuer-den-flexiblen-strommarkt-der-zukunft-unverzichtbar>
- [2] Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V., Digitalisierung der Energiewirtschaft
<https://www.ffe.de/themen-und-methoden/digitalisierung>
- [3] Digimeto
https://digimeto.de/wps/portal/digimeto/cms/menu_main/smart-metering/fragen-antworten
- [4] Sebastian Faller, Grundlagen zu intelligenten Messsystemen (iMSys), 15.09.2020
- [5] Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik, Das Smart-Meter-Gateway, Januar 2020
- [6] Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.
<https://www.ffe.de/publikationen/vortraege/638-intelligente-messsysteme-imsys-zur-digitalen-integration-von-netzoptimierenden-massnahmen-nom>
- [7] Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.
<https://www.ffe.de/themen-und-methoden/digitalisierung/888-rollout-von-intelligenten-messsystemen-wer-bekommt-was-und-wann>
- [8] Discovery Blog, 05.09.2017
<https://discovery.com/blog/smart-meter-vorteile>
- [9] Solarwatt
<https://www.solarwatt.de/stromspeicher>
- [10] Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V.
<https://www.ffe.de/themen-und-methoden/digitalisierung/899-messen-und-steuern-ueber-imsys-funktioniert-das>
- [11] Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik, Technische Richtlinie BSI TR-03109-1, Version 1.0.1, 16.01.2019

Anforderungsspezifikationen an intelligente Messsysteme aus der Sicht von Batteriespeichersystemen

Requirements specifications of smart metering systems from the perspective of battery storage systems

Zexuan Xu,

Institut für Hochspannungstechnik und Energiesysteme – **elenia**, Braunschweig, z.xu@tu-braunschweig.de

Kurzfassung

Im Rahmen dieses Berichtes erfolgen die Dokumentation und Ausarbeitung in dem Thema „intelligentes Messsystem (iMSys)“, besonders aus der Sicht von Batteriespeichersystemen. Die grundlegenden Konzepte und Prinzipien von iMSys werden zuerst erläutert. Danach wird ein gesetzlicher Rollout von iMSys nach Bedingungen vorgestellt und die exemplarischen Anwendungsfälle mit Batteriespeichern werden nach Anforderungen und Rahmenbedingungen im Vergleich mit iMSys in der aktuellen Ausgangslage diskutiert. Mit der Visualisierung der Anforderungsspezifikationen an iMSys werden die Umsetzungsmöglichkeiten und Verbesserungen am Ende festgelegt.

Abstract

In the context of this report, documentation and elaboration are carried out on the subject of “intelligent measuring systems (iMSys)”, especially from the perspective of battery storage systems. The basic concepts and principles of iMSys are explained first. Then a legal rollout of iMSys according to conditions is presented and the exemplary use cases with battery storage are discussed according to requirements and framework conditions in comparison with iMSys in the current starting position. With the visualization of the requirement specifications on iMSys, the implementation options and improvements are finally determined.

1 Einleitung

Deutschland steckt mitten in der Energiewende. Erneuerbare Energie und Energiespeicher bringen während der Umsetzung der Energiewende die Herausforderungen an die Revolution der Versorgungskonzepte bzw. Mess- und Kommunikationskonzepte.

Um das Ziel zu erreichen, kommt insbesondere der Digitalisierung eine große Bedeutung, damit neue Funktionen und Prozesse branchenübergreifend und - vernetzend ermöglicht werden können.

Als Grundstein hat Deutscher Bundestag 2016 das Gesetz zur Digitalisierung der Energiewende (GDEW) beschlossen. Laut GDEW müssen die alten Stromzähler durch intelligente Messsysteme ausgetauscht werden. Ein digitalisiertes Netz mit Batteriespeichersystemen wird zur Umsetzung der intelligenten Messsysteme in diesem Bericht fokussiert.

2 Theoretische Grundlagen

Ein intelligentes Messsystem laut des Gesetzes zur Digitalisierung der Energiewende (GDEW) besteht aus zwei Komponenten: eine moderne Messeinrichtung und das Smart-Meter-Gateway (SMGW). [1]

Eine moderne Messeinrichtung wird als ein digitaler Stromzähler, der den detaillierten Energieverbrauch ggf. eine zeitabhängige Energiemessung darstellt, bezeichnet. Außerdem muss eine moderne Messeinrichtung in der

Lage sein, sich mit dem Kommunikationsnetz zu verbinden. [2]

Das SMGW bietet einem Elektrizitätszähler die Möglichkeit an, die Messdaten über das Kommunikationsnetz zu übermitteln, den Energieverbrauch fernabzulesen und gezielt zu managen. [5]

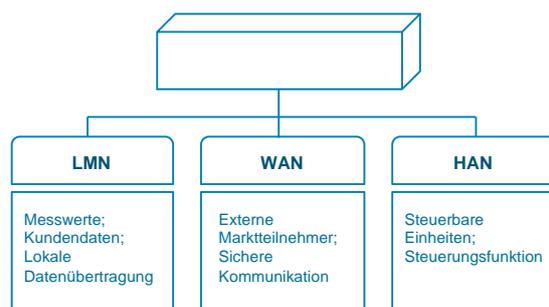


Abbildung 1 Smart-Meter-Gateway

Die Schnittstellen von SMGW werden in Abbildung 1 strukturell dargestellt. Das Lokale Metrologische Netz (LMN) nimmt durch die Sensoren bzw. den Zähler die Messwerte und Netzzustandsdaten auf und übermittelt die Daten zu SMGW. Gleichzeitig lässt sich das Weitverkehrsnetz (WAN) durch SMGW mit externen Marktteilnehmern verbinden, z.B. Administrator, Netzbetreiber, Messstellentreiber. Die Komponenten ggf.

Verbraucher und Einspeiser, die steuerbar sind oder mit einem Steuerbox aufgebaut (Controllable Local Systems, CLS, z.B. PV-Anlagen), werden an dem lokalen Heimnetz (HAN) mit dem entsprechenden Ziel gesteuert. Das komplette Konzept erreicht eine bidirektionale Kommunikation mit verschiedenem Stakeholder (Nutzer, Betreiber, Energieversorger) in dem Netz. Aus der energiewirtschaftlichen Sicht erfolgen dadurch die gezielte Steuerungsfunktionen, z.B. Mehrfachnutzung von Batteriespeichern. [3]

3 Hauptteil

In diesem Kapitel wird das Konzept für ein iMSys mit Batteriespeicher fokussiert. Aus gesetzlicher, wirtschaftlicher und technischer Sicht ist es zu beantworten, wie ein iMSys im Netz mit Batteriespeicher aussieht, mit welchem Ziel und warum das Netz gesteuert werden muss, sowie welche technischen Bedingungen erfüllt werden müssen.

3.1 Ausgangslage

Gemäß § 29 GDEW wird der verpflichtende Anbau eines intelligenten Messsystem für alle Erzeugungsanlagen ab einer installierten Leistung von 7 kW oder für Verbraucher mit einem Jahresenergiebedarf von mehr als 6.000 kWh durchgeführt [1]. Je größer der Anteil von Strom aus erneuerbaren Energien wird, desto größer wird die Herausforderung, die Produktion und den Verbrauch von Strom ins Gleichgewicht zu bringen. Als Minimalanforderung vom SMGW werden die verschiedenen Tarifierungsfälle (TAF) umgesetzt. Im Anhang werden die Tabellen für TAF dargestellt. In Tabelle 1 werden die TAF nach Auslöser im Regelwerk zugeordnet. Tabelle 2 beschreibt Funktionalität und Kategorie von TAF. Erste Generation vom iMSys (G1-SMGW) muss nach Technische Richtlinie eine sichere Kommunikation im HAN, WAN und LMN ermöglichen und ein Basisprofil für die TAF 1, 2, 6 und 7 besitzen [2].

3.2 Funktionsweise

Um über iMSys zu messen und steuern, müssen die Komponenten in der Lage sein, technische Anforderungen zu erreichen.

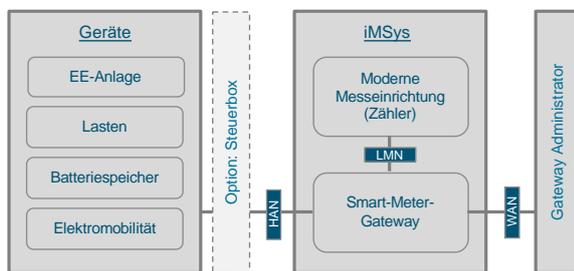


Abbildung 2 Übersicht technischer Anforderungen

Das SMGW als Kommunikationszentral verbindet durch LMN mit dem Stromzähler, durch HAN mit lokalen Verbrauchern und Energieerzeugern und durch WAN mit dem Gateway-Administrator. Mit dem Steuerbox können

sich die Verbraucher und Einspeiser mit dem Kommunikationsnetz binden, damit die Daten zwischen Gateway und Endnutzer übermitteln und austauschen können.

Außerdem werden berechnete Rollen bzw. Stakeholders am SMGW definiert.

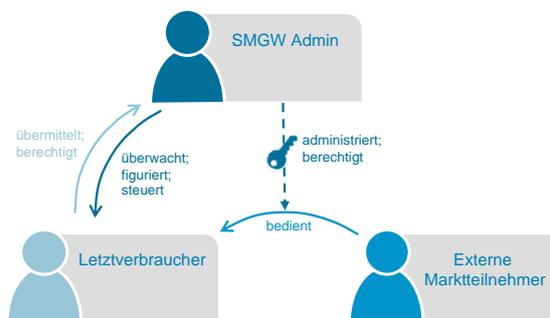


Abbildung 3 Übersicht Stakeholders am SMGW in Anlehnung an [4]

Der Smart-Meter-Gateway Administrator (SMGW Admin) ist der vertrauenswürdige Stakeholder, der das SMGW vom Letztverbraucher (Kunden) direkt überwacht, figuriert und steuert. Zu den externen Marktteilnehmern (EMT) gehören alle Teilnehmer außer SMGW Admin in WAN, z.B. Messstellenbetreiber, Verteilnetzbetreiber sowie andere Dienstleister in WAN. Der EMT verfügt sowohl über das Recht, Messwerte abzurufen, als auch Schaltsignale zu übermitteln. Hierfür muss jedoch jeweils der SMGW Admin eingebunden werden, welcher die Zugriffsrechte des EMT auf das jeweilige Smart-Meter-Gateway überprüft.

3.3 Anwendungsfall

Dieses Kapitel werden zwei exemplarische Anwendungsfälle mit Batteriespeichersystemen dargestellt. Die Anforderungsspezifikationen an iMSys werden diskutiert.

3.3.1 Haushalt

Ein Einfamilienhaus besitzt die PV-Anlage mit Batteriespeicher und ein Elektroauto. Nach dem Gesetz müssen sie die Messeinrichtung zu einem iMSys, das die Mindestanforderungen der 1. Generation erfüllt, umsetzen. Durch das iMSys möchte die Familie das Ziel erreichen, dass sie möglichst mehr erneuerbare Energie benutzen und das E-Auto unter Berücksichtigung vom dynamischen Strompreis ökonomisch aufladen.

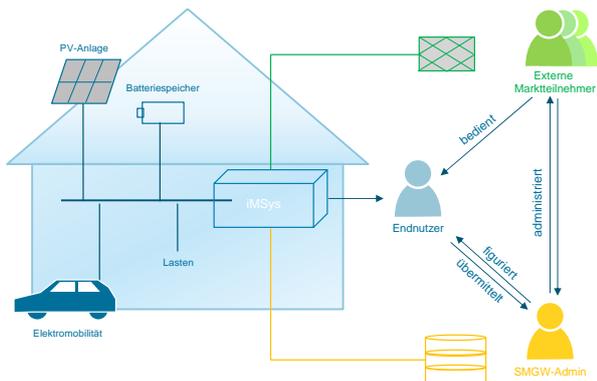


Abbildung 4 Beispielkonzept: Anwendungsfall im Haushalt mit PV-Anlage und Elektromobilität

In Abbildung 4 dargestellte Übersicht beschreibt alle relevanten Komponenten und Stakeholders für dieses Konzept. Das Hauptziel ist, mehr erneuerbar produzierte Energie von PV-Anlage zu speichern und zu verwenden, sowie Ladevorgänge vom E-Auto zu steuern. Zum Beispiel: Das Beladen von E-Auto, es ist viel sinnvoller, dass man mit eigenem Solarstrom verwendet. Es ist günstiger und auch umweltfreundlicher. Außerdem ist PV-Anlage wetterabhängig. Falls das E-Auto tagsüber zu Hause geladen werden kann, könnte die PV-Anlage zum direkten Laden eingesetzt werden. Wenn das Auto tagsüber z.B. für die Arbeit gefahren wird, wäre der Einsatz eines Batteriespeichers sinnvoll. Damit kann tagsüber der eigene Solarstrom eingespeichert und am Abend beim Beladen an das E-Auto abgegeben werden. Um das Ziel zu erreichen, müssen folgende Anforderungen erfüllt werden und entsprechende TAF unterstützt werden:

- Verbraucher und Einspeiser sind verbunden mit dem SMGW im iMSys.
- TAF7 erfasst und versendet die Zählerstandgänge mit Registrierperiode.
- TAF9 ermöglicht den Abruf aktueller Einspeiseleistung von der PV-Anlage.
- Die Nutzzustandsdaten sind an berechnete Marktteilnehmer durch SMGW Admin periodisch oder bei Ereignis zu übermitteln (TAF10)
- TAF11 steuert unterbrechbare Verbraucher und PV-Anlage. Abruf und Prognose der Nutzerzustandsdaten (separate Ergebnisse von Produktion der PV-Anlage und Verbrauch vom E-Auto notwendig)
- Verschiedene Strompreise für unterschiedliche Zeiträume für die Einsparung verfügbar. (TAF2)

Die besonderen Funktionen können mit TAF 2, 7, 9, 10 und 11 erfolgen. Allerdings bietet G1-SMGW die TAF 1, 2, 6 und 7 an, d.h. in diesem Anwendungsfall ist es mit dem zertifizierten G1-SMGW noch nicht ausreichend.

Mit G1-SMGW hat man momentan die Möglichkeiten, Zählerstandgänge in 15-Minuten-Takt abzubilden. Außerdem sind die G1-SMGW für den Einsatz zur Steuerung von PV-Anlagen unter 100 kW und Verbraucher in der Niederspannung mit Steuereinheiten geeignet. [2]

Mit der Technik und Komponenten im neusten Stand gibt es Möglichkeiten, die Anlagen zu steuern.

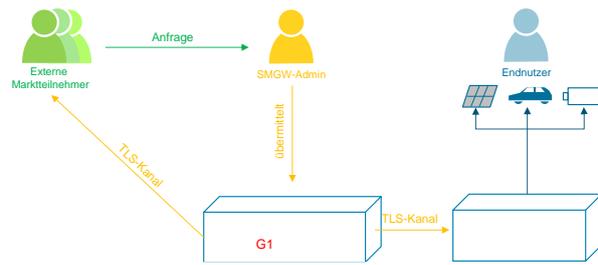


Abbildung 5 Beispielkonzept mit Steuerbox

In Abbildung 5 wird ein Beispiel mithilfe von Steuerbox dargestellt. Lokal werden die Anlagen mit CLS (Controllable Local System) Modul zum Steuerbox verbunden, damit die Anlagen angesteuert werden können. Das Konzept verläuft wie folgende: externer Marktteilnehmer erstellt eine Kommunikationsanfrage an Gateway Administrator. Damit können sie einen Kanal zum SMGW und einen Kanal zwischen Gateway und Steuerbox aufbauen. Externer Marktteilnehmer sendet Anforderung durch SMGW an Steuerbox, um die Ansteuerung von Anlagen zu ermöglichen. Mit der Möglichkeit könnte es erreichen, die Anlagen fern zu steuern, die Einspeisesleistung abzurufen und die Daten zu übermitteln.

Allerdings ist es noch nicht realistisch, die Daten auszuwerten, im SMGW zu dokumentieren oder die Tarifierung zu berücksichtigen.

4 Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Berichtes wurde dargestellt, was ein iMSys ist und welche Komponenten eine Rolle spielen. Das iMSys ermöglicht eine digitale Rechnungsstellung nach dem tatsächlichen Verbrauch und bietet verschiedene Tarife zur Auswahl, sowie vorbereitet für die zukünftige Ergänzungen. Mit dem Ziel der Mehrfachnutzung von Batteriespeichern wurde ein Beispielkonzept im Bericht vorgestellt. Dazu notwendige Funktionen von TAF wurden diskutiert.

Allerdings ist zu erwarten, dass das heutige SMGW die endgültigen Erwartungen noch nicht erfüllen könnte. Mit aktuellem Stand von der Technik sind die Anforderungen nur bedingt erreichbar. Um die Erzeugungsenergieanlagen und den Verbraucher mit hohem Energiebedarf direkt zu steuern, muss die derzeitige Funktionalität weiter ergänzt werden, z.B. Übermittlung von Netzzustandsdaten, dynamische automatische Steuerung.

Konkret wird es zukünftig möglich, Strom genau dann zu verbrauchen, wenn viel günstiger Strom aus erneuerbaren Energien da ist. Über die intelligenten Messsysteme erhalten Stromkunden eine entsprechende Information und können selbst entscheiden, wann sie wieviel Strom nutzen.

5 Literatur

- [1] Gesetz zur Digitalisierung der Energiewende. Deutscher Bundestag. Abgerufen am 1. September 2016.
- [2] Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik, Marktanalyse zur Feststellung der technischen Möglichkeit zum Einbau intelligenter Messsysteme nach § 30 MsbG, Version 1.0, Bonn: 2019.
- [3] Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik, Das Smart-Meter-Gateway – Cyber-Sicherheit für die Digitalisierung der Energiewirtschaft, Bonn: 2020.
- [4] Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik, Technische Richtlinie BSI TR-03109-1 – Anforderungen an die Interoperabilität der Kommunikationseinheit eines intelligenten Messsystems, Version 1.0.1, Bonn: 2019.
- [5] T. Mühl, Elektrische Messtechnik – Grundlagen, Messverfahren, Anwendung, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017.

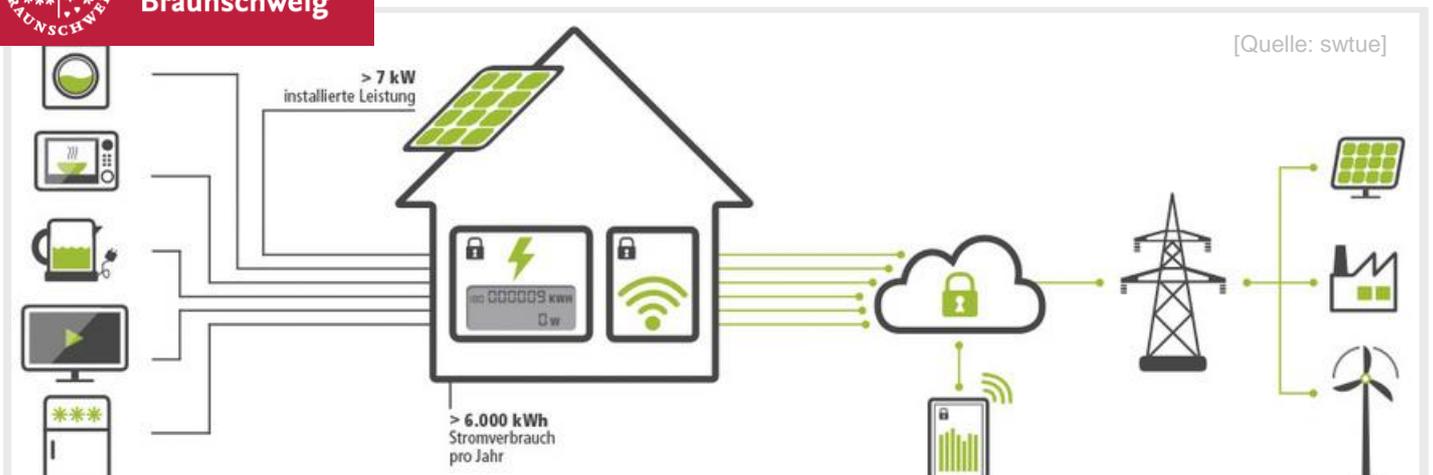
6 Anhang

TAF	Name	Auslöser im Regelwerk
TAF1	Datensparsame Tarife	Internes Ereignis: Zeitpunkt
TAF2	Zeitvariable Tarife	
TAF7	Zählerstandsgangmessung	
TAF8	Erfassung von Extremwerten	
TAF3	Lastvariable Tarife	Internes Ereignis: Grenzwert
TAF4	Verbrauchsvariable Tarife	
TAF12	Prepaid Tarif (informativ)	
TAF5	Ereignisvariable Tarife	Internes oder externes Ereignis
TAF10	Abruf von Netzzustandsdaten	
TAF6	Ablesung von Messwerten im Bedarfsfall	Externes Ereignis
TAF9	Abruf der Ist-Einspeisung	
TAF11	Steuerung von unterbrechbaren Verbrauchseinrichtungen und Erzeugungsanlagen (informativ)	

Tabelle 1 Übersicht der Tarifierungsfälle (TAF) mit Zuordnung zu den Auslösern im Regelwerk [4]

TAF	Beschreibung	Kategorie
TAF1	Ablesung vom Zählerstand pro Abrechnungszeitraum. (ein oder mehrere angeschlossenen Zähler; min. Abrechnungszeitraum: ein Monat)	Tarifierung und Bilanzierung
TAF2	Zeitliche Erfassung von Verbraucher und Einspeiser.	
TAF3	Leistungsabhängige Umschaltung in mehreren Laststufen.	
TAF4	Einordnen verbrauchter Energiemengen in Verbrauchsstufen.	
TAF5	Ereignisabhängige Umschaltung in verschiedenen Tarifstufen.	
TAF6	Abruf von Messwerten in nicht planbaren Situationen, z.B. Umzug, Lieferantenwechsel und Wechsel in den Grundversorgungstarif.	
TAF7	Erfassung und Versendung von Zählerstandsgängen. (zentrale Tarifierung außerhalb des SMGW möglich)	
TAF8	Erhebung von Maximal- bzw. Minimalleistungswerten.	
TAF9	Auslesen der aktuellen Ist-Einspeiseleistung einer Erzeugungsanlage im Rahmen einer Energiemanagementmaßnahme.	Steuerbare Anlagen
TAF10	Bereitstellung von Netzzustandsdaten. (periodisch oder bei Ereignis)	Netzzustandserhebung
TAF11	Erfassung der Messwerte bei Erhalt von Steuersignalen oder anderen externen Ereignissen.	
TAF12	Eine bestimmte Energiemenge zur Verfügung bei dem ein bestimmter Betrag.	
TAF13	Bereitstellung der Letztverbraucher-spezifische Daten zum Zwecke der Visualisierung an der WAN-Schnittstelle.	

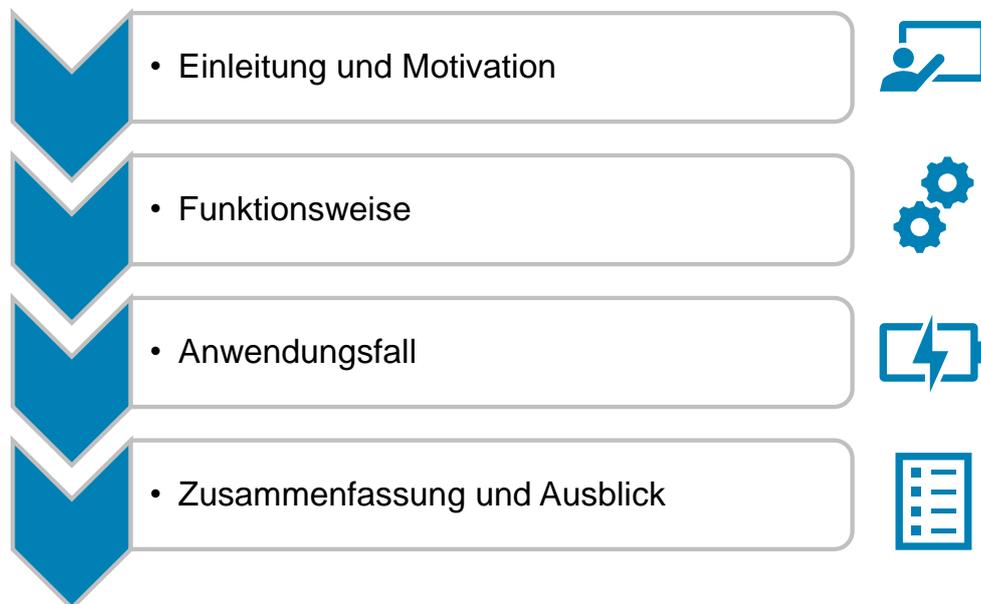
Tabelle 2 Anforderungen und Kategorie der Tarifierungsfälle in Anlehnung an [4]



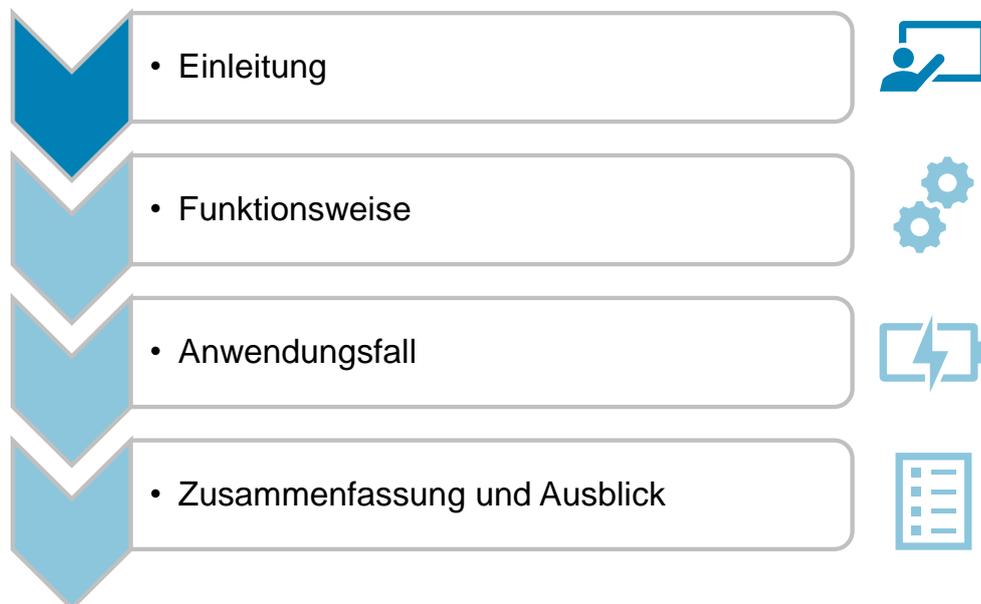
Anforderungsspezifikationen an intelligente Messsysteme aus der Sicht von Batteriespeichersystemen

Zexuan Xu, 25.01.2021

Agenda



Agenda

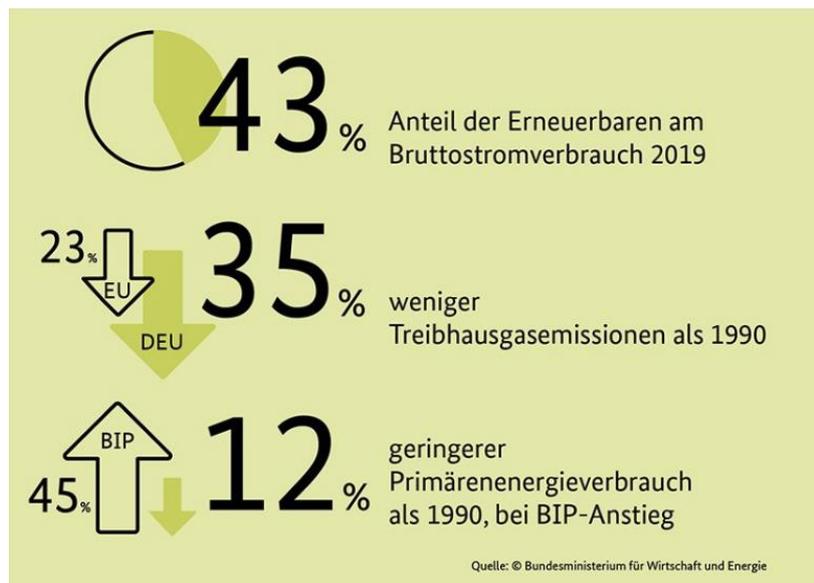


Einleitung – Energiewende

Sicher

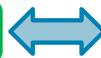
Sauber

Bezahlbar



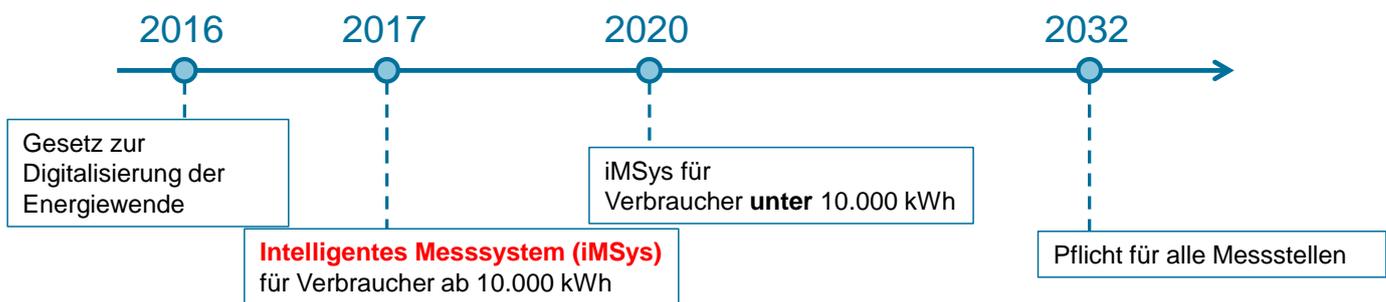
[Quelle: bmwi¹]

Produktion



Verbrauch

Einleitung – Digitalisierung



Was kann/muss eingebaut werden	Pflicht oder Option	Verbrauch in kWh/a
Intelligentes Messsystem	Option*	Bis 2.000
		> 2.000 bis 3.000
		> 3.000 bis 4.000
		> 4.000 bis 6.000
	Pflicht	> 6.000 bis 10.000
		> 10.000 bis 20.000
		> 20.000 bis 50.000
		> 50.000 bis 100.000
Mindestens moderne Messeinrichtung soweit nicht sogar Pflichteinbau für intelligentes Messsystem (s. oben)		über 100.000
		Alle unterbrechbaren Verbrauchseinrichtungen nach § 14a EnWG
		Alle Neubauten unabhängig vom Verbrauch
		Alle großen Renovierungen unabhängig vom Verbrauch***
		alle sonstigen

[Quelle: stadtwerte-schwabach]

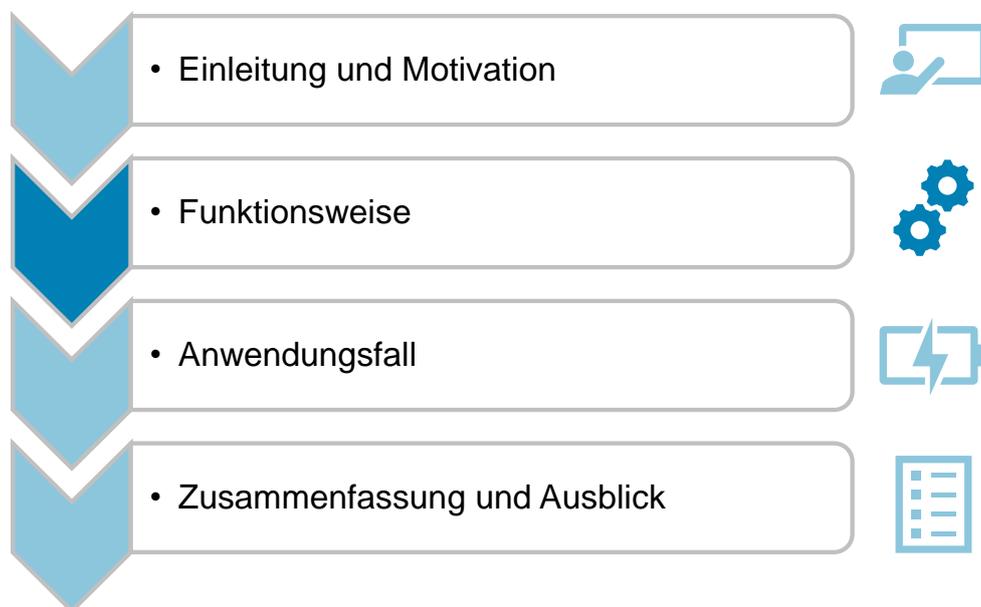
Was kann/muss eingebaut werden	Pflicht oder Option	Installierte Leistung in kWp
Intelligentes Messsystem	Option*	1 bis 7
	Pflicht	> 7 bis 15
		> 15 bis 30
		> 30 bis 100
		über 100
Mindestens moderne Messeinrichtung soweit nicht sogar Pflichteinbau für intelligentes Messsystem (s. oben)		Alle Neubauten unabhängig von der Leistung
		Alle großen Renovierungen unabhängig vom Verbrauch**
		alle sonstigen

[Quelle: stadtwerte-schwabach]

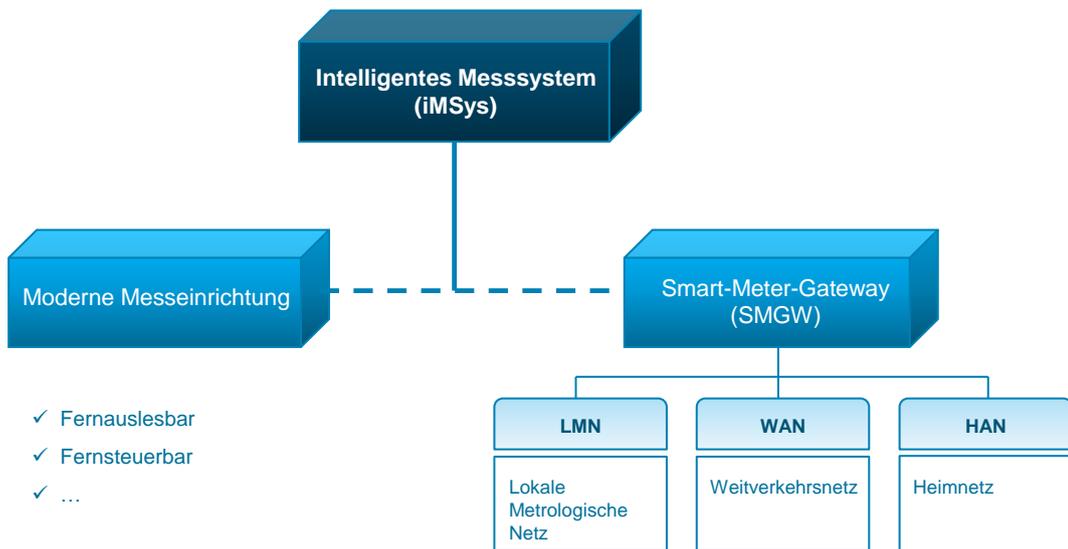
⇒ **Pflichteinbau:**

- Verbraucher **über 6.000 kWh**
- Erzeugungsanlage mit installierter Leistung **über 7 kWp**

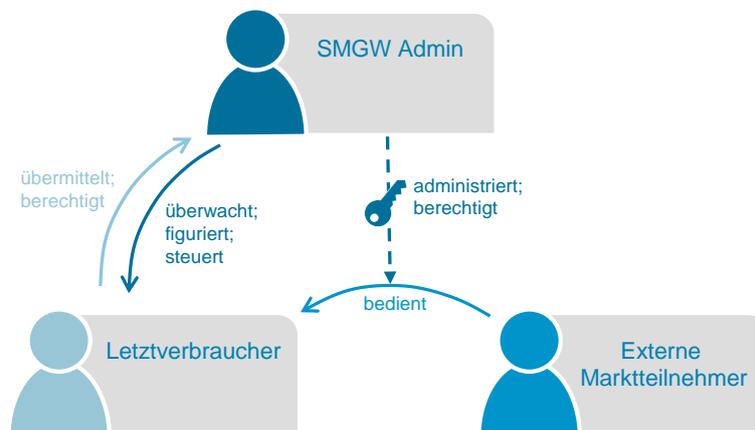
Agenda



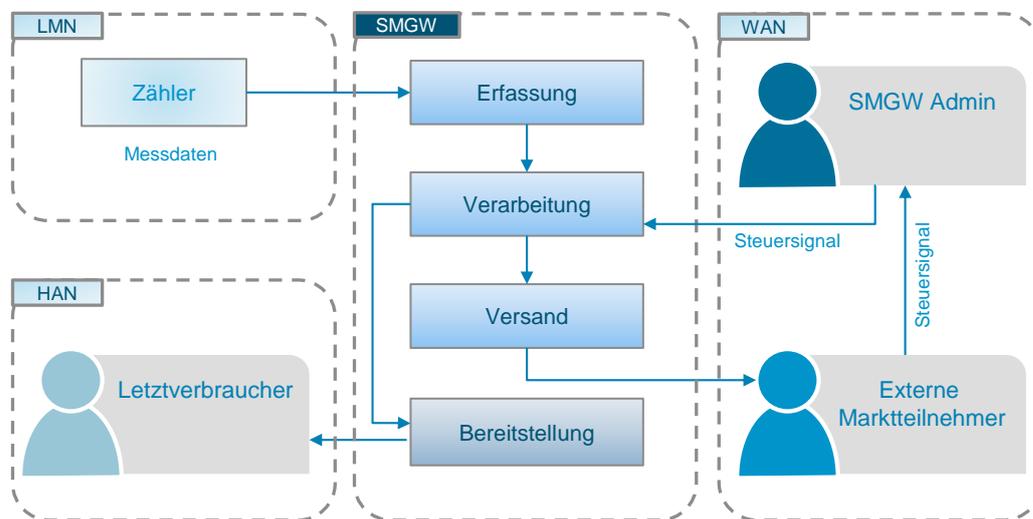
iMSys – intelligentes Messsystem



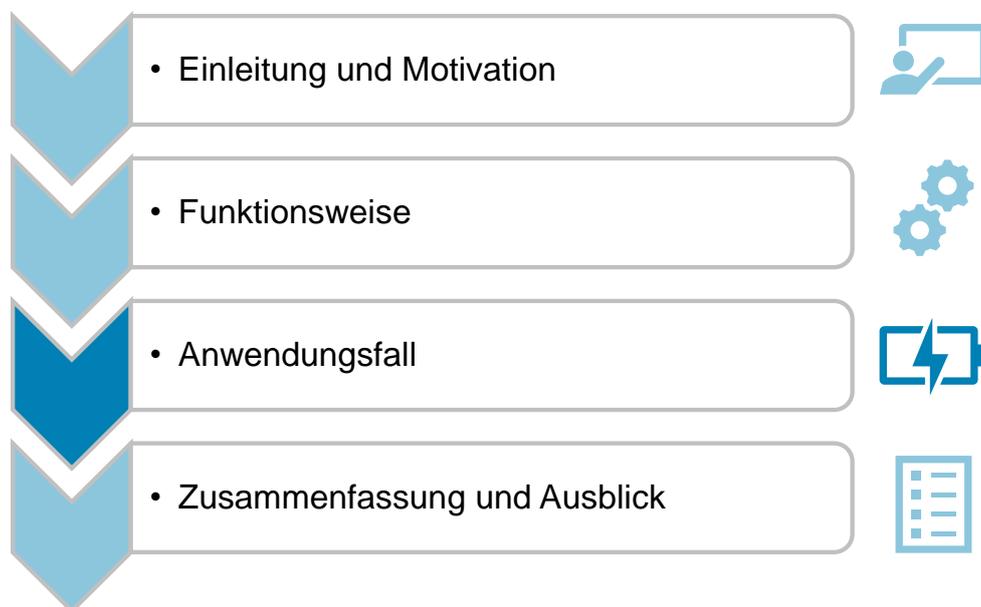
Funktionsweise – Stakeholders



Funktionsweise – Datenfluss

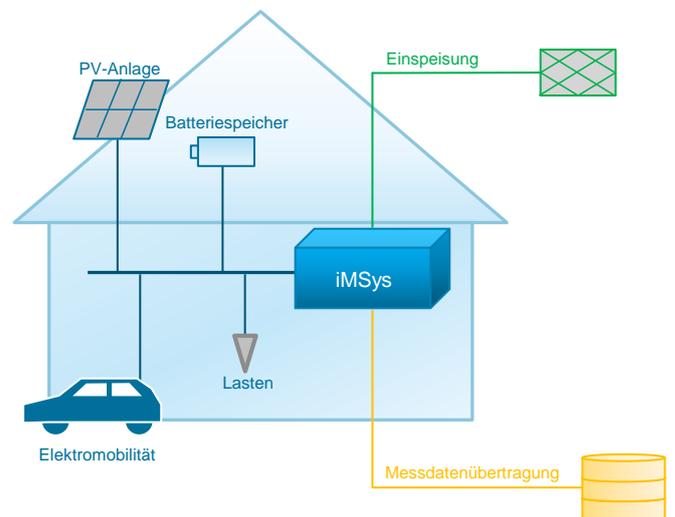


Agenda



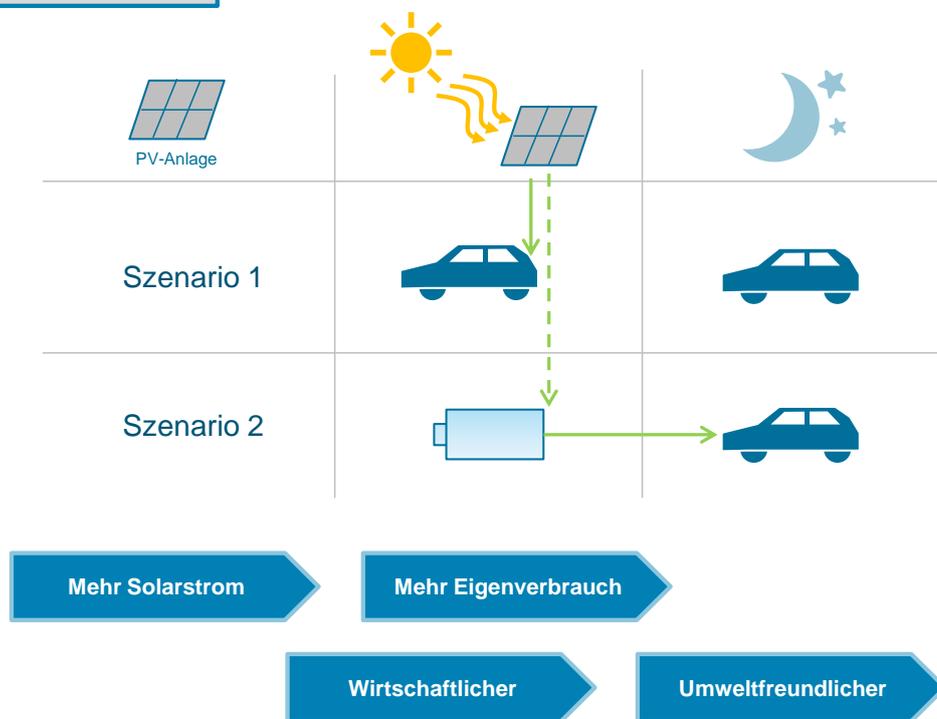
Anwendungsfall

- Prosumer (**P**roducer und **C**onsumer)
- iMSys mit G1-SMGW installiert
- Ziel: Mehrfachnutzung von Batteriespeicher
 - Automatische dynamische Steuerung
 - Beispiel: Optimiertes Laden von E-Auto

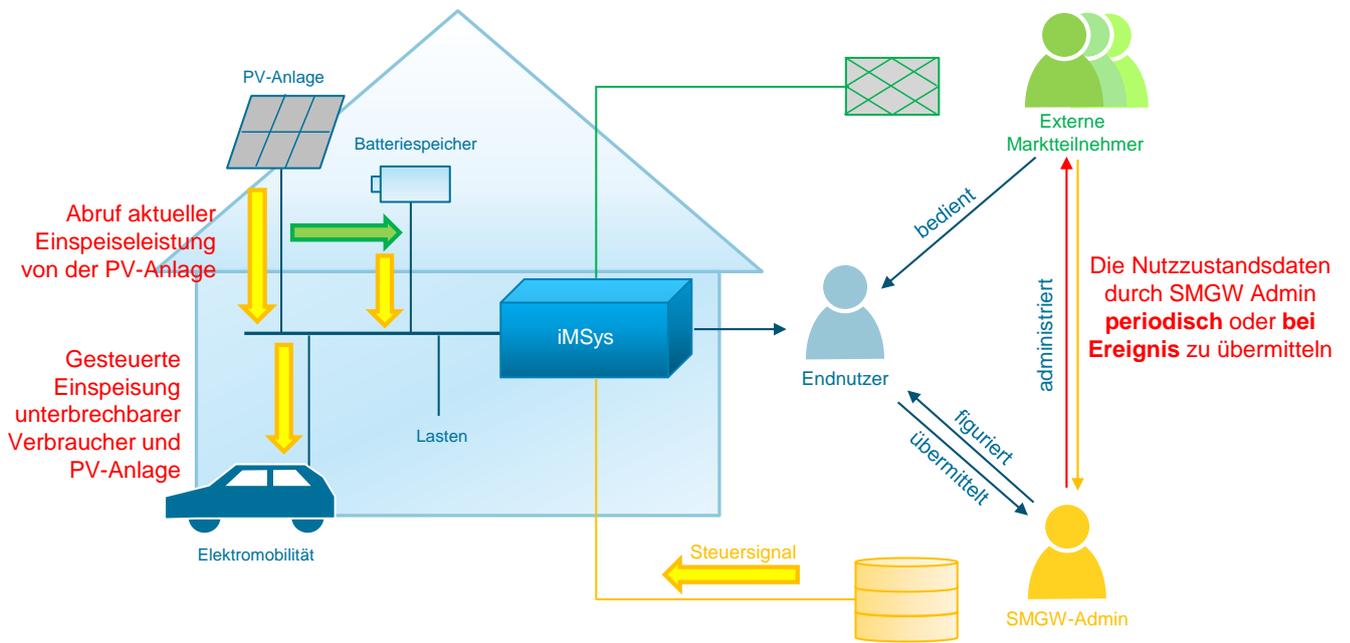


Anwendungsfall

Beispiel: das Beladen von E-Auto



Anwendungsfall



Erfüllt G1-SMGW?

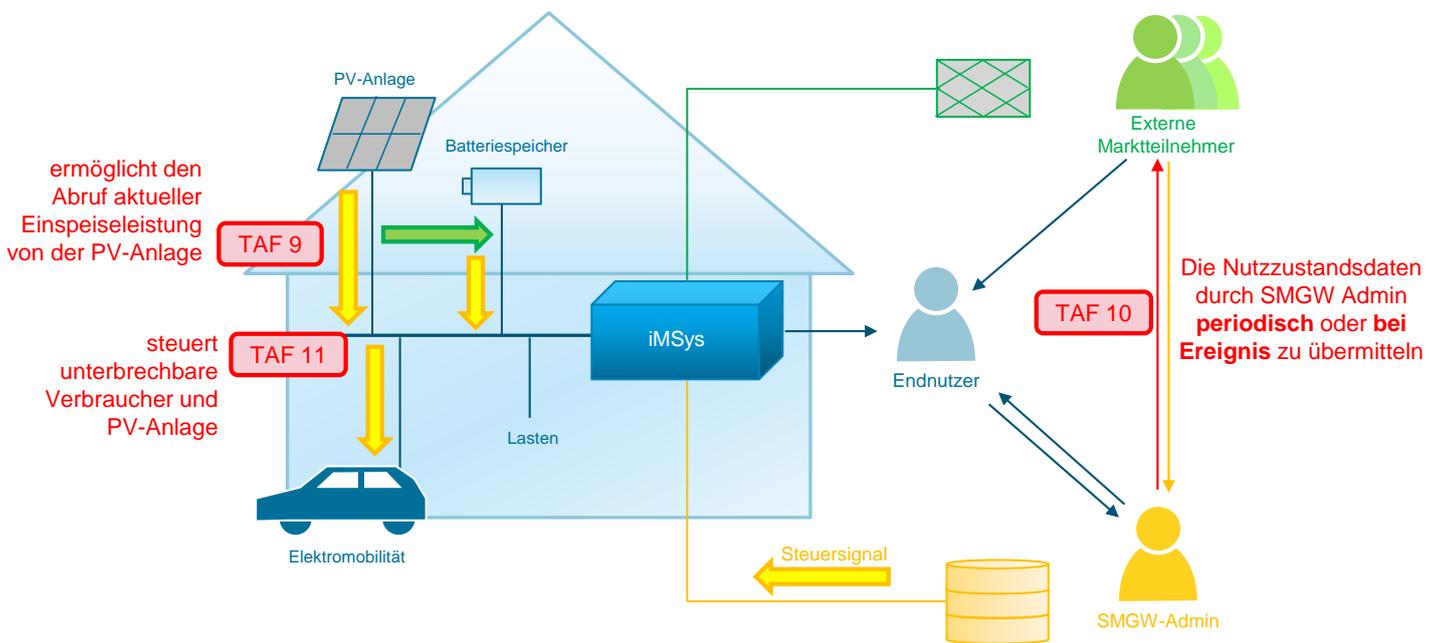
Tarifanwendungsfälle (TAF)

– Laut technische Richtlinien von Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik

Tarifanwendungsfälle	TAF 1	Datensparsame Tarife	In unserem Anwendungsfall besonders erforderlich
	TAF 2	Zeitvariable Tarife	
	TAF 3	Lastvariable Tarife	
	TAF 4	Verbrauchsvariable Tarife	
	TAF 5	Ereignisvariable Tarife	
	TAF 6	Ablesung von Messwerten im Bedarfsfall	
	TAF 7	Zählerstandgangsmessung	
	TAF 8	Erfassung von Extremwerten	
	TAF 9	Abruf der IST-Einspeisung	
	TAF 10	Abruf von Netzzustandsdaten	
	TAF 11	Steuerung von unterbrechenden Verbrauchseinrichtungen und Erzeugungsanlagen (informativ)	
	TAF 12	Prepaid Tarif (informativ)	

[Quelle: bmwi²]

Anwendungsfall



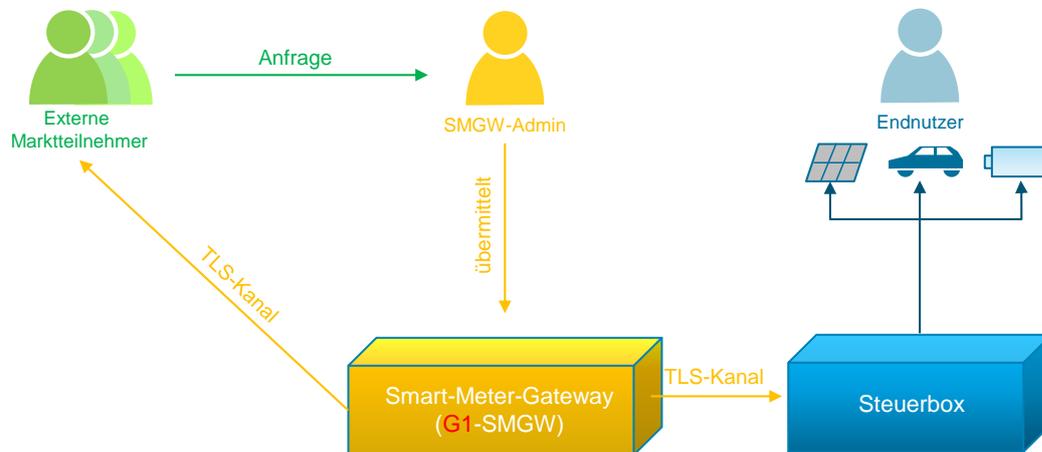
Tarifanwendungsfälle (TAF)

– Laut technische Richtlinien von Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik

Tarifanwendungsfälle	TAF 1	Datensparsame Tarife	In unserem Anwendungsfall besonders erforderlich
	TAF 2	Zeitvariable Tarife	
	TAF 3	Lastvariable Tarife	Smart-Meter-Gateway der 1. Generation (G1-SMGW)
	TAF 4	Verbrauchsvariable Tarife	
	TAF 5	Ereignisvariable Tarife	
	TAF 6	Ablesung von Messwerten im Bedarfsfall	
	TAF 7	Zählerstandgangsmessung	
	TAF 8	Erfassung von Extremwerten	
	TAF 9	Abruf der IST-Einspeisung	
	TAF 10	Abruf von Netzzustandsdaten	
	TAF 11	Steuerung von unterbrechenden Verbrauchseinrichtungen und Erzeugungsanlagen (informativ)	
	TAF 12	Prepaid Tarif (informativ)	Zwischenlösung?

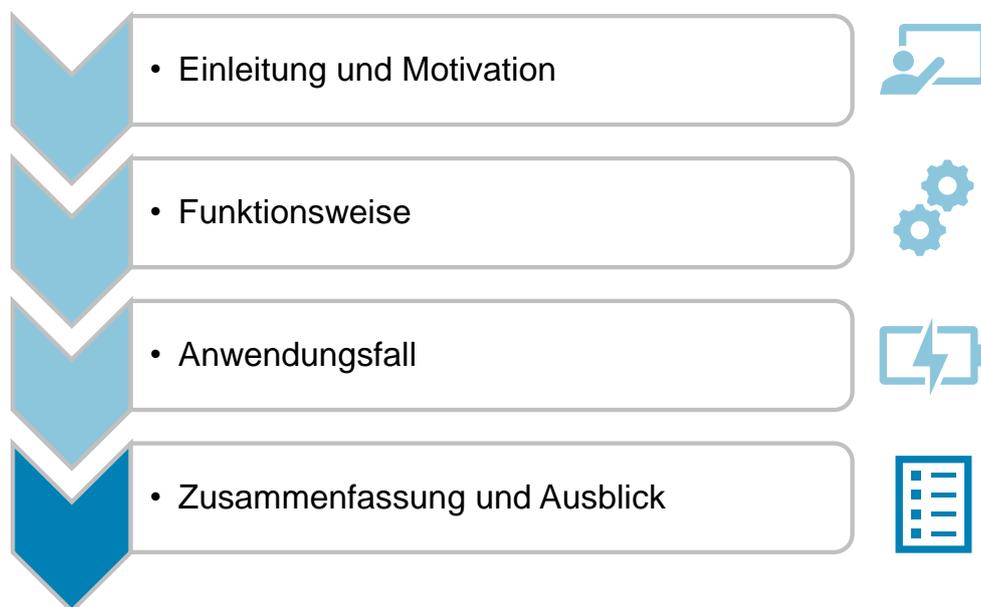
[Quelle: bmwi²]

Anwendungsfall



- | | |
|-----------------------------|-------------------|
| ✓ Fernsteuerbarkeit | ✗ Datenauswertung |
| ✓ Abruf der Ist-Einspeisung | ✗ Dokumentation |
| ✓ Datenübermittlung | ✗ Tarifierung |

Agenda



Zusammenfassung und Ausblick

iMSys

- Kern zur Digitalisierung der Energiewende
- Produktion und Verbrauch ins Gleichgewicht

Ausblick

- Aktuell: Vorbereitungsphase
- Zukunft: umweltfreundlich und wirtschaftlich

Quellen

[swtue] Titelfolie:

<https://www.swtue.de/netze/messstellenbetrieb/digitale-zaehler/intelligentes-messsystem-imsys.html>

[bmwi¹] Seite 4:

<https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Infografiken/Energie/energiewende-schreitet-voran.html>

[stadtwerke-schwabach] Seite 5:

<https://www.stadtwerke-schwabach.de/Fuer-Kunden/Stadtwerke-Schwabach-Digitalisierung-1-2019-web.pdf>

[bmwi²] Seite 14, 16:

https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/digitalisierung-der-energiewende-thema-1.pdf?__blob=publicationFile&v=6

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Fragen

Feedback



Technische
Universität
Braunschweig

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen



Inter-Area-Oscillations im europäischen Verbundnetz

Violetta Zimmermann, 25.01.2021

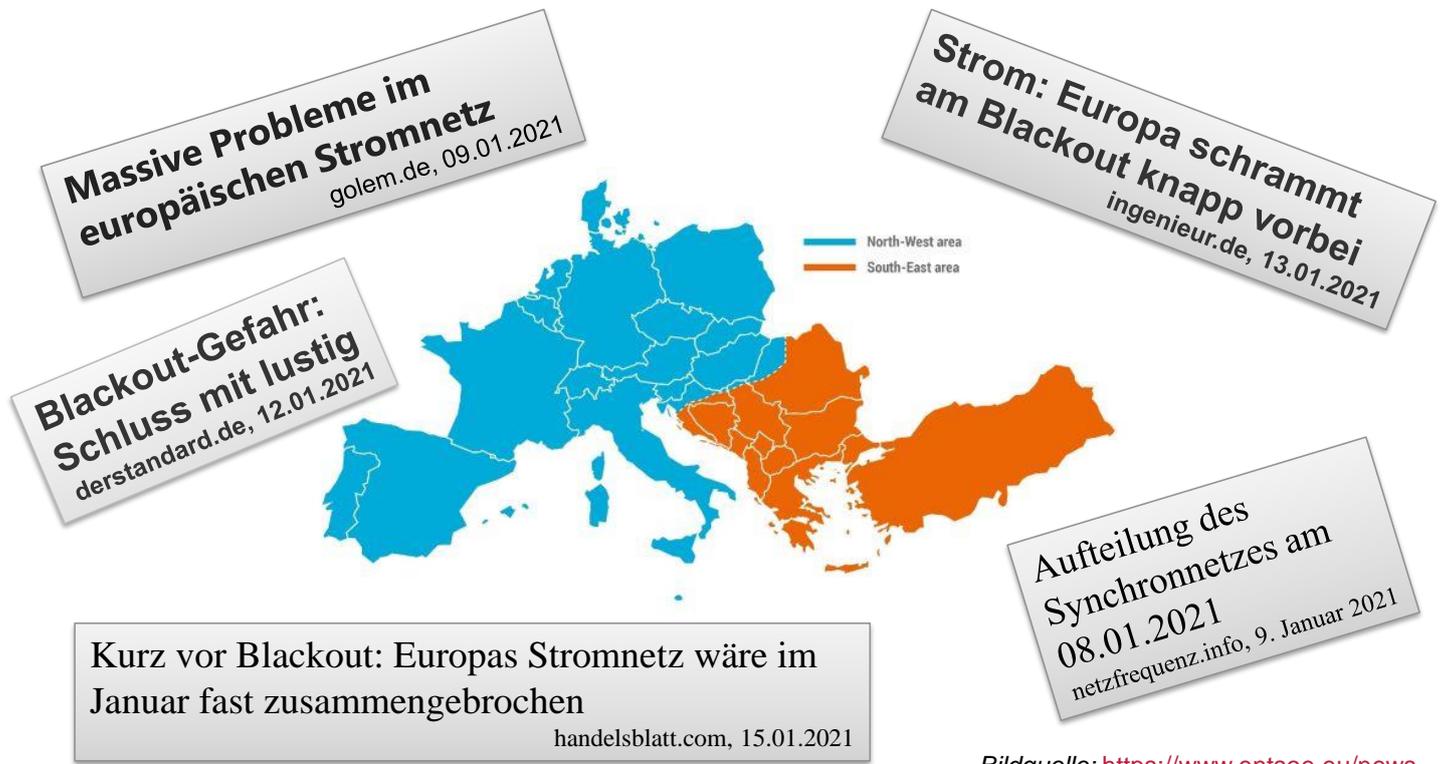
Agenda

- Motivation
- Europäisches Verbundnetz
- Inter-Area-Oscillations
- Prägnante Ereignisse
- Zusammenfassung

Agenda

- Motivation
- Europäisches Verbundnetz
- Inter-Area-Oscillations
- Prägnante Ereignisse
- Zusammenfassung

Motivation

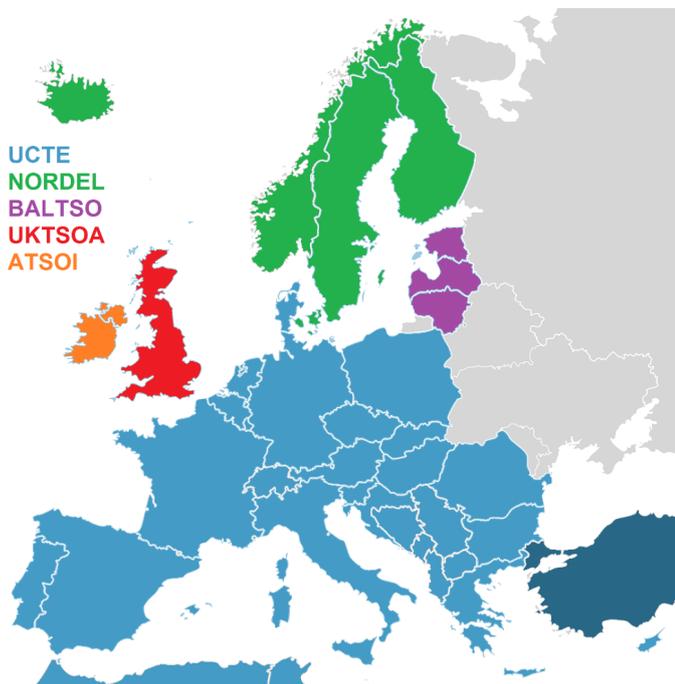


Bildquelle: <https://www.entsoe.eu/news>

Agenda

- Motivation
- Europäisches Verbundnetz
- Inter-Area-Oscillations
- Prägnante Ereignisse
- Zusammenfassung

Europäisches Verbundnetz



Bildquelle: <https://pixabay.com>

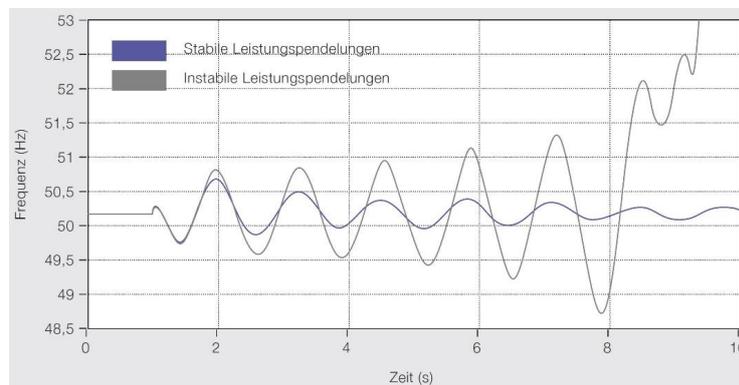
- European Network of Transmission System Operators for Electricity, kurz ENTSO-E
- 2009 gegründet, 42 ÜNB aus 35 Ländern
- **Ziele**
 - Gemeinsame Sicherheitsstandards
 - Veröffentlichung eines Netzentwicklungsplans
 - Optimaler Energiebinnenmarkt
- Türkei seit 2016 im Beobachtermodus

Agenda

- Motivation
- Europäisches Verbundnetz
- Inter-Area-Oscillations
- Prägnante Ereignisse
- Zusammenfassung

Inter-Area-Oscillations

Grundlagen



Bildquelle: M. Larsson, L.-F. Santos: Ausgependelt, in: ABB review 4|15, S. 57–61, 2015.

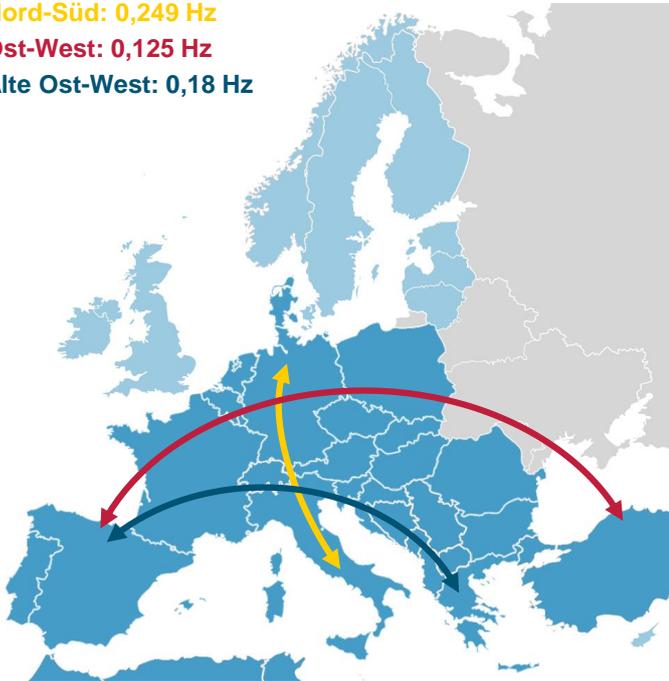
- Alle Synchrongeneratoren im Verbundnetz synchron miteinander gekoppelt
- Starre Verbindung zwischen Drehzahl und Netzfrequenz, natürliche Trägheit
- Ausbreitung schwach gedämpfte Schwingungen
- Niederfrequente, großräumige Leistungspendelungen zwischen Netzbereichen

Inter-Area-Oscillations im europäischen Verbundnetz

Nord-Süd: 0,249 Hz

Ost-West: 0,125 Hz

Alte Ost-West: 0,18 Hz



Bildquelle: <https://pixabay.com>

- Schwingungsfrequenzen, Moden
- Flüchtige Schwingungen in lokalen Anlagen: 0,9 Hz bis 2 Hz
- Dominante niederfrequente Inter-Area-Moden
- Mit der Systemgröße steigt die Anzahl an Schwingungsmoden
- Besonders kritisch: hohe Leistungsflüsse aus den Grenzgebieten
- Studien und Maßnahmen vor Zusammenschluss mit der Türkei

Inter-Area-Oscillations

Ursachen und Folgen

Ursachen

- Teilweise ohne direkte Ursache
- Konkrete Störungen, z.B. der Ausfall einer Übertragungsleitung
- Hohe überregionale Leistungsflüsse, geringe Dämpfung

Folgen:

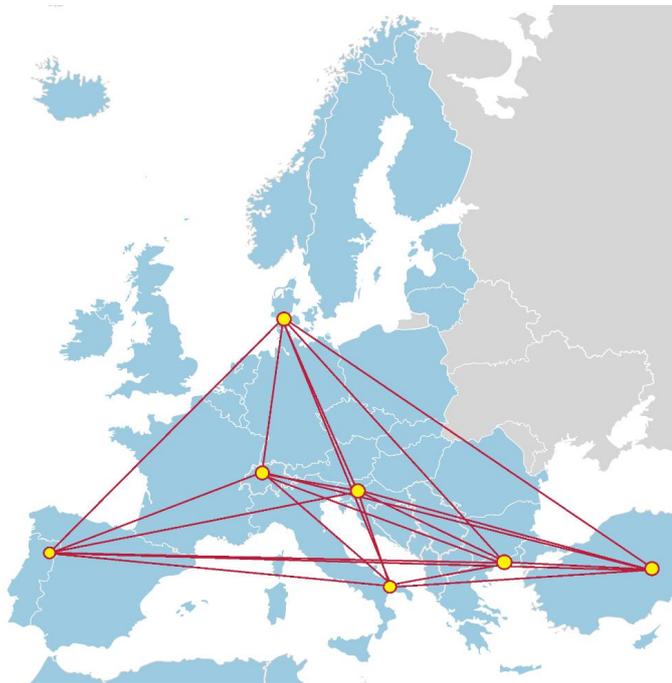
- Trennung des Verbundsystems
- Großräumige Stromausfälle



Bildquelle:
<https://pixabay.com>

Inter-Area-Oscillations

Überwachung und Gegenmaßnahmen



Bildquelle: <https://pixabay.com>

Überwachung

- Kontinuierliche Kontrolle durch dezentrale Überwachungssysteme
- Echtzeit-Messungen durch Phasor Measurement Unit (kurz PMU)
- Echtzeit-Analysewerkzeug zur Auswertung der Frequenz, Amplitude und Dämpfung

Gegenmaßnahmen

- Aktive Dämpfungsmodule
- Reduktion der Leistungsübertragung durch Redispatch

Agenda

- Motivation
- Europäisches Verbundnetz
- Inter-Area-Oscillations
- Prägnante Ereignisse
- Zusammenfassung

Prägnante Ereignisse

Westküste der Vereinigten Staaten 1996



Bildquelle: <https://gisgeography.com>

Ereignis

- 10. August 1996
- Hohe Nord-Süd Leistungsflüsse
- Im südlichen Gebiet niedrige Erzeugung

Ursache

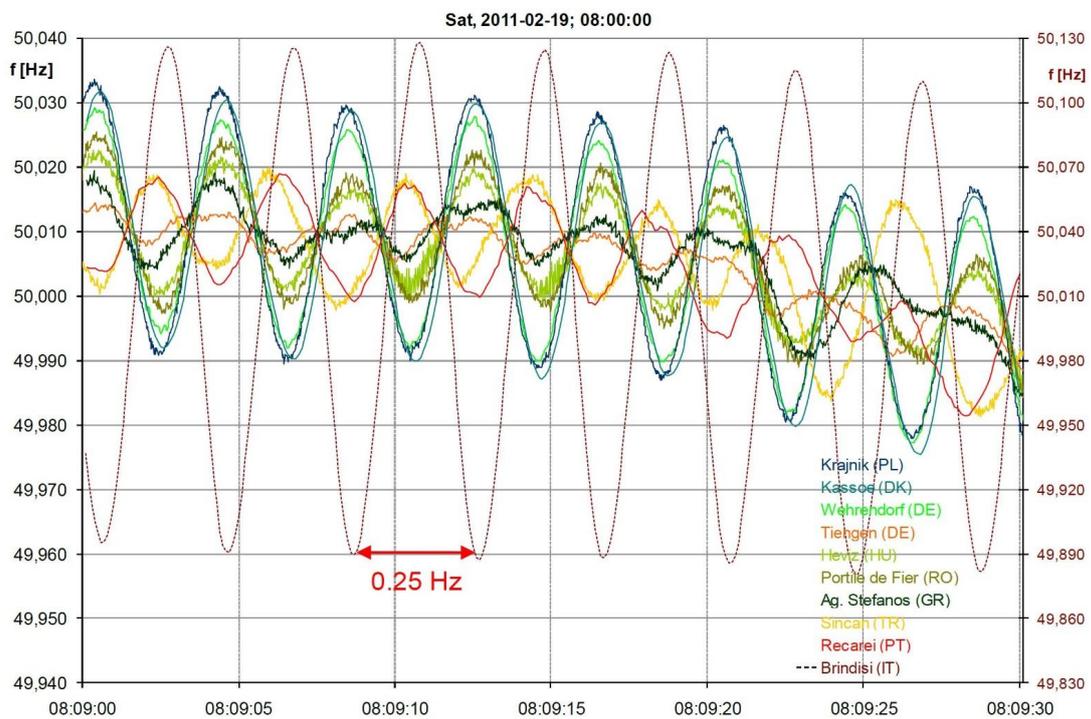
- Reduzierte Blindleistungsstützung durch Wartungsarbeiten
- Ausfall einer Übertragungsleitung

Folgen

- Zusammenbruch des Netzes in vier Teilnetze
- Abschaltung von dreizehn Generatoren des McNary-Damms

Prägnante Ereignisse

Europäisches Verbundnetz 2011 (I)



Bildquelle: Analysis of CE Inter-Area Oscillation of 19th and 24th February 2011. ENTSO-E SG SPD REPORT, 2011.

Prägnante Ereignisse Europäisches Verbundnetz 2011 (II)

Ereignis

- 19. Februar 2011
- 0,25 Hz Mode mit maximaler Amplitude von 100 mHz
- Entlang der Nord-Süd-Achse
- Pendelschwingungen des italienischen Netzes gegen den Rest
- Ca. 15 Minuten

Ursache

- Hohe Solarstromeinspeisung in Südtalien
- Solarkraftwerke üblicherweise keine Dämpfungseinrichtungen

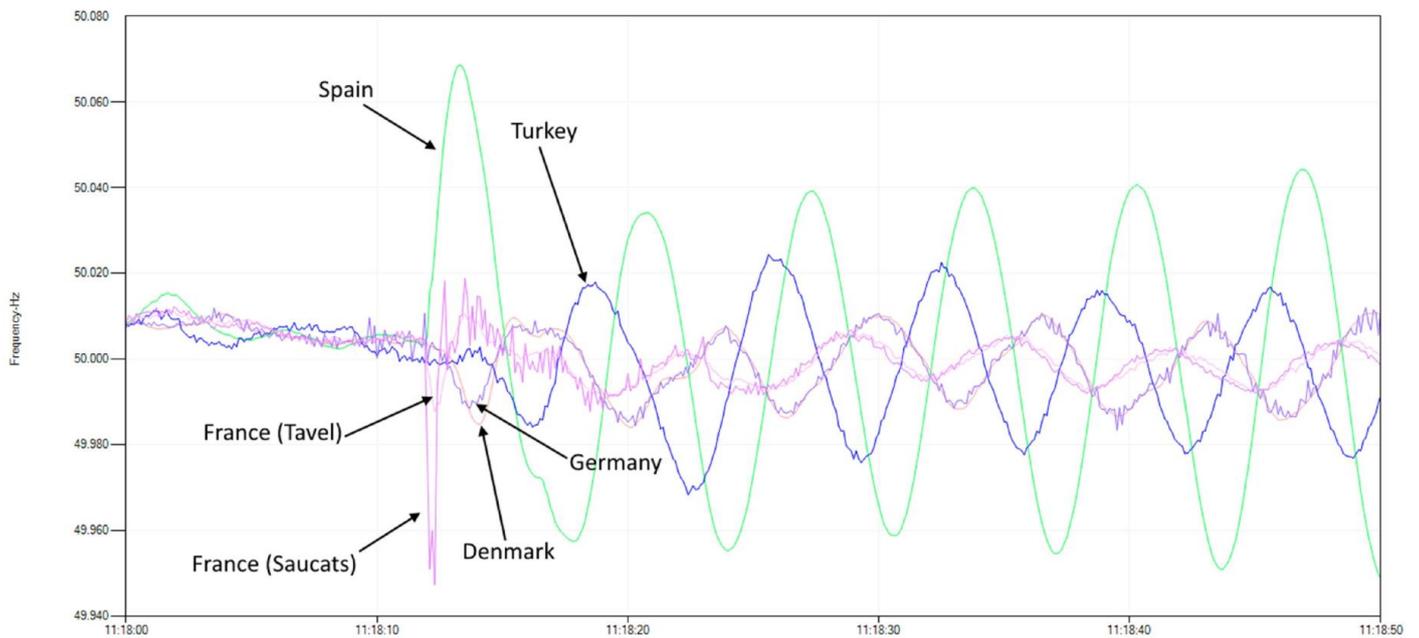
Maßnahmen

- Reduktion des Leistungsimports



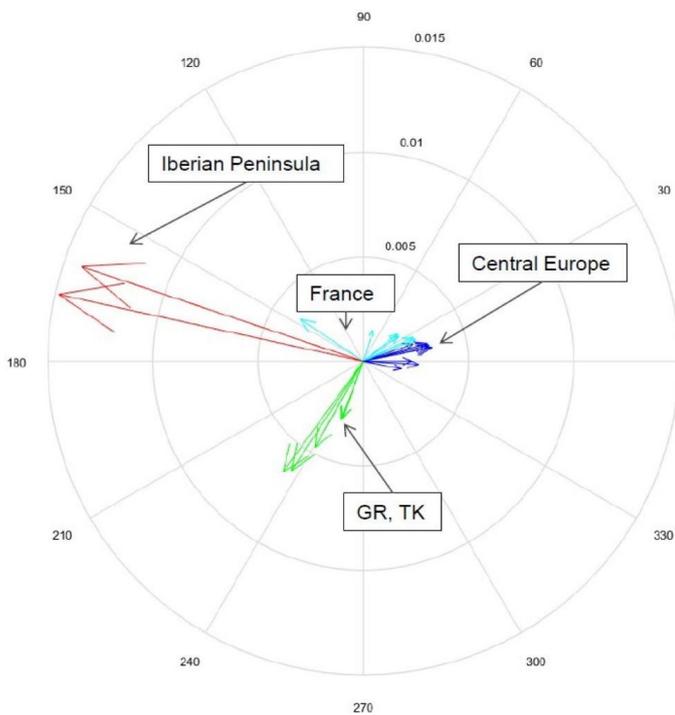
Bildquelle: <https://pixabay.com>

Prägnante Ereignisse Europäisches Verbundnetz 2016 (I)



Bildquelle: Analysis of CE Inter-Area Oscillation of 1st December 2016. ENTSO-E SG SPD REPORT, 2017.

Prägnante Ereignisse Europäisches Verbundnetz 2016 (II)



- Pendelschwingungen der iberischen Halbinsel gegenphasig zu Zentraleuropa
- 70° Spannungswinkeldifferenz zu östlichen Ländern des Verbundnetzes
- Höhere Amplituden an den Grenzgebieten als im Zentrum
- Höchste Amplitude in Spanien und Portugal

Bildquelle: Analysis of CE Inter-Area Oscillation of 1st December 2016. ENTSO-E SG SPD REPORT, 2017.

Prägnante Ereignisse Europäisches Verbundnetz 2016 (III)

Ereignis

- 01. Dezember 2016
- 0,15 Hz Mode
- Entlang der Ost-West-Achse
- Ca. 6 Minuten

Ursache

- Ausfall einer Übertragungsleitung erhöhte die Netzimpedanz
- Vorher hohe Leistungsflüsse

Maßnahmen

- Reduktion des Leistungstransports zwischen Spanien und Frankreich



Bildquelle: <https://pixabay.com>

Agenda

- Motivation
- Europäisches Verbundnetz
- Inter-Area-Oscillations
- Prägnante Ereignisse
- Zusammenfassung

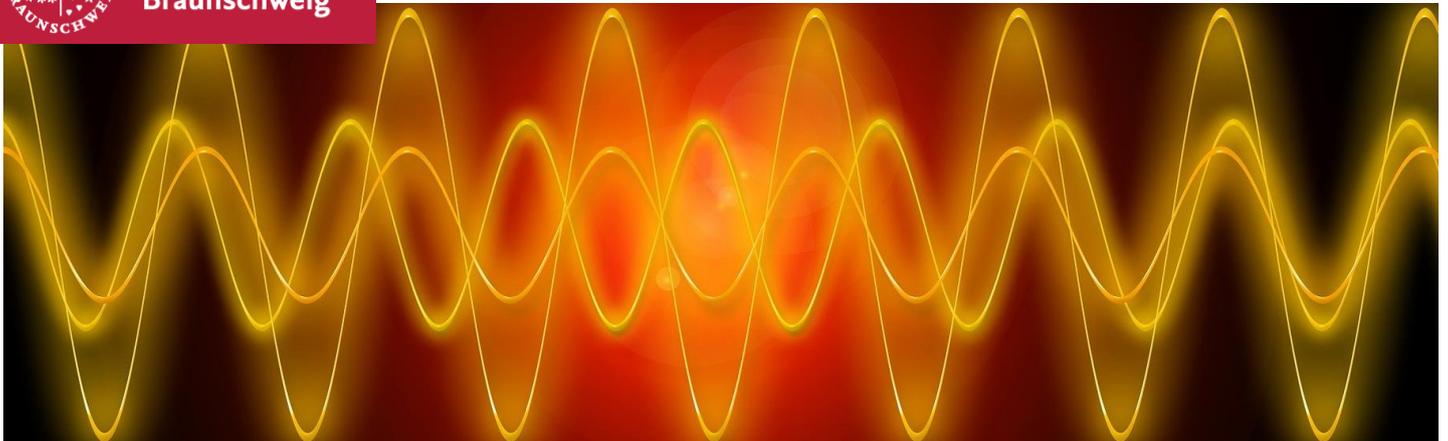
Zusammenfassung

- Inter-Area-Oscillations sind weiträumige Frequenzschwingungen in großen Verbundnetzen
- Kritisch in Kombination mit verhältnismäßig kleinen Störungen
- Ursache: Stromtransport über lange Strecken bei geringer Systemdämpfung
- Folgen: Großräumige Stromausfälle möglich
- Dämpfungseinrichtungen erforderlich
- Durch dezentrale Überwachungssysteme schnelle Koordination der ÜNB möglich



Technische
Universität
Braunschweig

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen



Inter-Area-Oscillations im europäischen Verbundnetz

Violetta Zimmermann, 25.01.2021

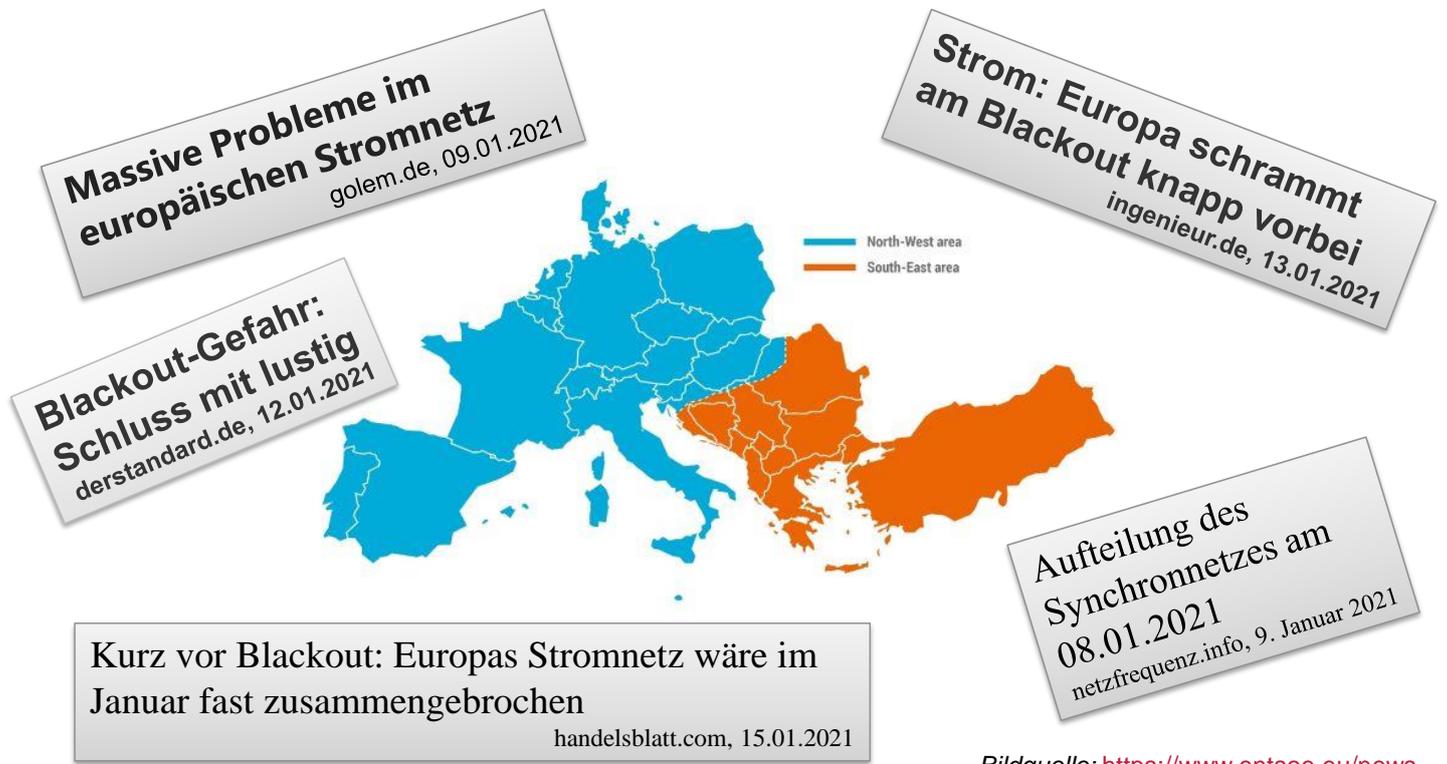
Agenda

- Motivation
- Europäisches Verbundnetz
- Inter-Area-Oscillations
- Prägnante Ereignisse
- Zusammenfassung

Agenda

- Motivation
- Europäisches Verbundnetz
- Inter-Area-Oscillations
- Prägnante Ereignisse
- Zusammenfassung

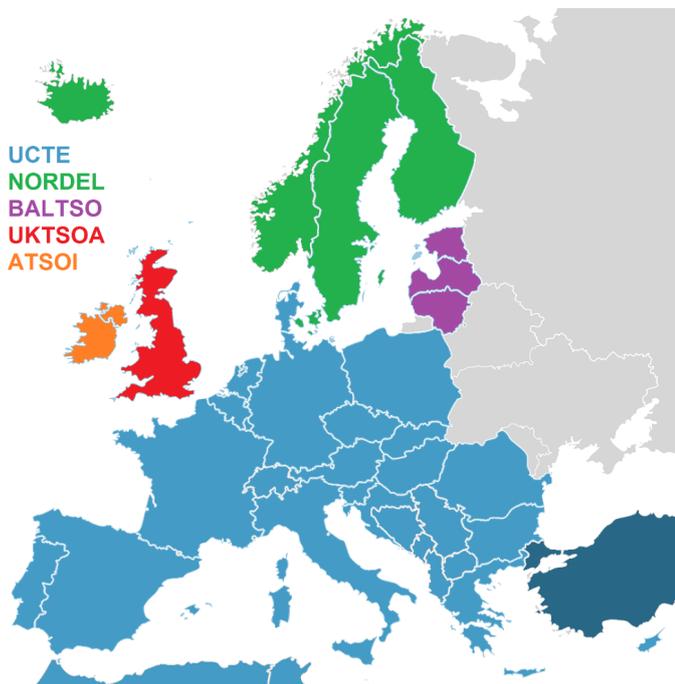
Motivation



Agenda

- Motivation
- Europäisches Verbundnetz
- Inter-Area-Oscillations
- Prägnante Ereignisse
- Zusammenfassung

Europäisches Verbundnetz



Bildquelle: <https://pixabay.com>

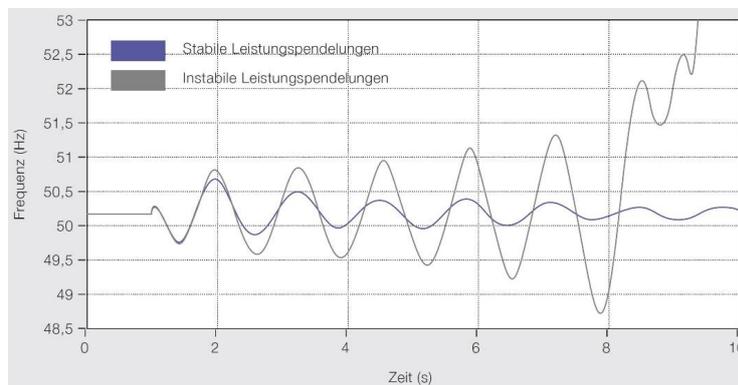
- European Network of Transmission System Operators for Electricity, kurz ENTSO-E
- 2009 gegründet, 42 ÜNB aus 35 Ländern
- **Ziele**
 - Gemeinsame Sicherheitsstandards
 - Veröffentlichung eines Netzentwicklungsplans
 - Optimaler Energiebinnenmarkt
- Türkei seit 2016 im Beobachtermodus

Agenda

- Motivation
- Europäisches Verbundnetz
- Inter-Area-Oscillations
- Prägnante Ereignisse
- Zusammenfassung

Inter-Area-Oscillations

Grundlagen



Bildquelle: M. Larsson, L.-F. Santos: Ausgependelt, in: ABB review 4|15, S. 57–61, 2015.

- Alle Synchrongeneratoren im Verbundnetz synchron miteinander gekoppelt
- Starre Verbindung zwischen Drehzahl und Netzfrequenz, natürliche Trägheit
- Ausbreitung schwach gedämpfte Schwingungen
- Niederfrequente, großräumige Leistungspendelungen zwischen Netzbereichen

Inter-Area-Oscillations im europäischen Verbundnetz

Nord-Süd: 0,249 Hz

Ost-West: 0,125 Hz

Alte Ost-West: 0,18 Hz



Bildquelle: <https://pixabay.com>

- Schwingungsfrequenzen, Moden
- Flüchtige Schwingungen in lokalen Anlagen: 0,9 Hz bis 2 Hz
- Dominante niederfrequente Inter-Area-Moden
- Mit der Systemgröße steigt die Anzahl an Schwingungsmoden
- Besonders kritisch: hohe Leistungsflüsse aus den Grenzgebieten
- Studien und Maßnahmen vor Zusammenschluss mit der Türkei

Inter-Area-Oscillations

Ursachen und Folgen

Ursachen

- Teilweise ohne direkte Ursache
- Konkrete Störungen, z.B. der Ausfall einer Übertragungsleitung
- Hohe überregionale Leistungsflüsse, geringe Dämpfung

Folgen:

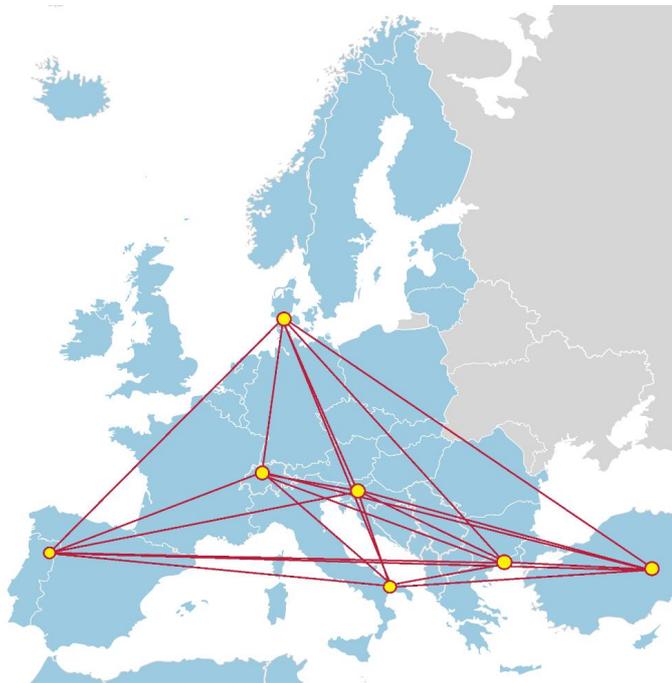
- Trennung des Verbundsystems
- Großräumige Stromausfälle



Bildquelle:
<https://pixabay.com>

Inter-Area-Oscillations

Überwachung und Gegenmaßnahmen



Bildquelle: <https://pixabay.com>

Überwachung

- Kontinuierliche Kontrolle durch dezentrale Überwachungssysteme
- Echtzeit-Messungen durch Phasor Measurement Unit (kurz PMU)
- Echtzeit-Analysewerkzeug zur Auswertung der Frequenz, Amplitude und Dämpfung

Gegenmaßnahmen

- Aktive Dämpfungsmodule
- Reduktion der Leistungsübertragung durch Redispatch

Agenda

- Motivation
- Europäisches Verbundnetz
- Inter-Area-Oscillations
- Prägnante Ereignisse
- Zusammenfassung

Prägnante Ereignisse

Westküste der Vereinigten Staaten 1996



Bildquelle: <https://gisgeography.com>

Ereignis

- 10. August 1996
- Hohe Nord-Süd Leistungsflüsse
- Im südlichen Gebiet niedrige Erzeugung

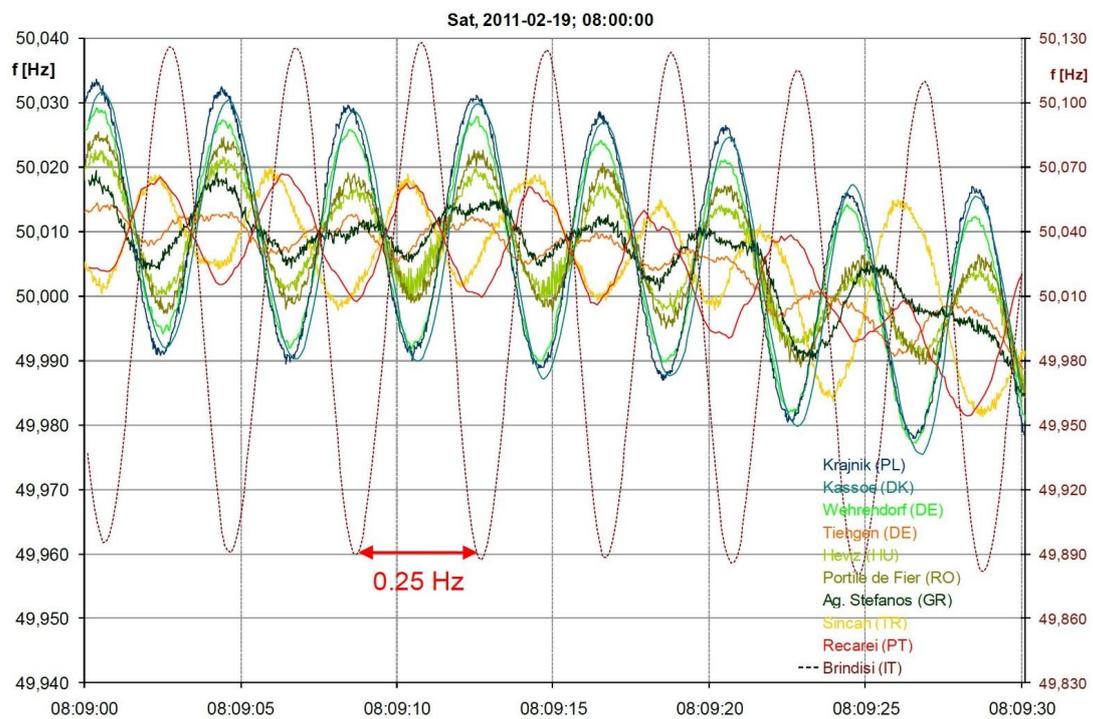
Ursache

- Reduzierte Blindleistungsstützung durch Wartungsarbeiten
- Ausfall einer Übertragungsleitung

Folgen

- Zusammenbruch des Netzes in vier Teilnetze
- Abschaltung von dreizehn Generatoren des McNary-Damms

Prägnante Ereignisse Europäisches Verbundnetz 2011 (I)



Bildquelle: Analysis of CE Inter-Area Oscillation of 19th and 24th February 2011. ENTSO-E SG SPD REPORT, 2011.

Prägnante Ereignisse Europäisches Verbundnetz 2011 (II)

Ereignis

- 19. Februar 2011
- 0,25 Hz Mode mit maximaler Amplitude von 100 mHz
- Entlang der Nord-Süd-Achse
- Pendelschwingungen des italienischen Netzes gegen den Rest
- Ca. 15 Minuten

Ursache

- Hohe Solarstromeinspeisung in Südtalien
- Solarkraftwerke üblicherweise keine Dämpfungseinrichtungen

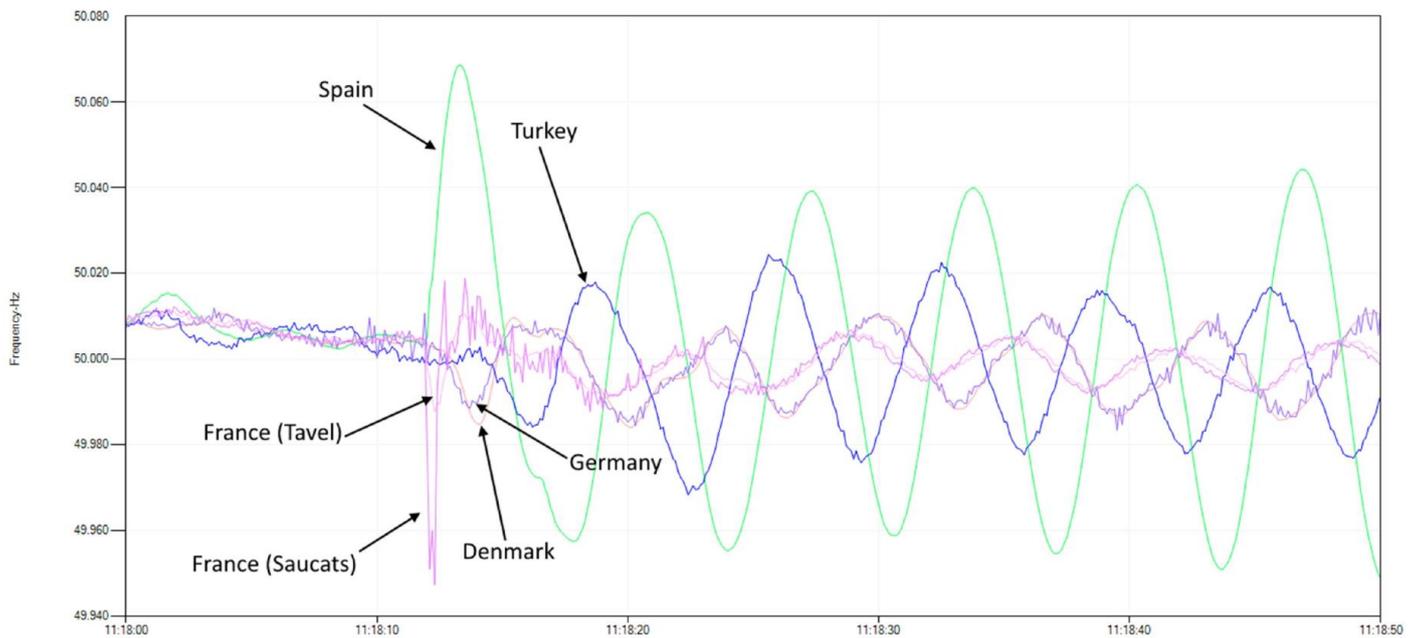
Maßnahmen

- Reduktion des Leistungsimports



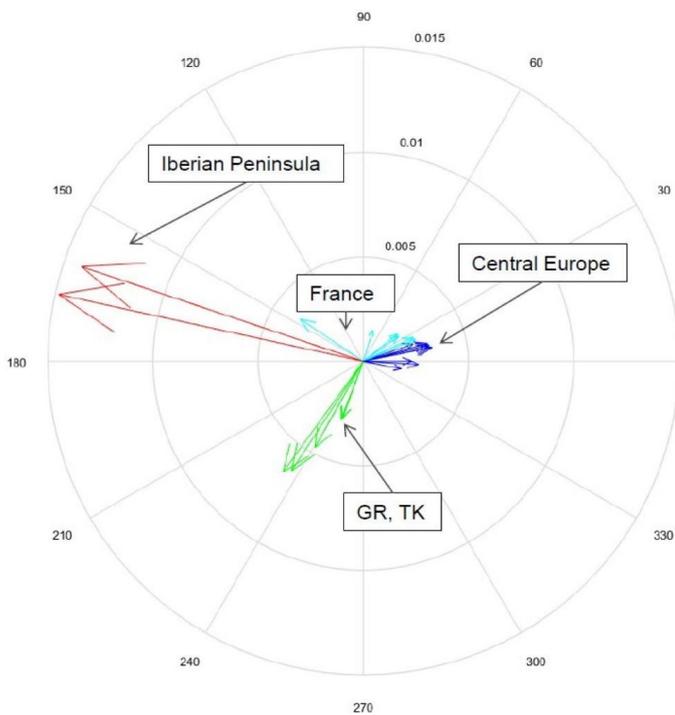
Bildquelle: <https://pixabay.com>

Prägnante Ereignisse Europäisches Verbundnetz 2016 (I)



Bildquelle: Analysis of CE Inter-Area Oscillation of 1st December 2016. ENTSO-E SG SPD REPORT, 2017.

Prägnante Ereignisse Europäisches Verbundnetz 2016 (II)



- Pendelschwingungen der iberischen Halbinsel gegenphasig zu Zentraleuropa
- 70° Spannungswinkeldifferenz zu östlichen Ländern des Verbundnetzes
- Höhere Amplituden an den Grenzgebieten als im Zentrum
- Höchste Amplitude in Spanien und Portugal

Bildquelle: Analysis of CE Inter-Area Oscillation of 1st December 2016. ENTSO-E SG SPD REPORT, 2017.

Prägnante Ereignisse Europäisches Verbundnetz 2016 (III)

Ereignis

- 01. Dezember 2016
- 0,15 Hz Mode
- Entlang der Ost-West-Achse
- Ca. 6 Minuten

Ursache

- Ausfall einer Übertragungsleitung erhöhte die Netzimpedanz
- Vorher hohe Leistungsflüsse

Maßnahmen

- Reduktion des Leistungstransports zwischen Spanien und Frankreich



Bildquelle: <https://pixabay.com>

Agenda

- Motivation
- Europäisches Verbundnetz
- Inter-Area-Oscillations
- Prägnante Ereignisse
- Zusammenfassung

Zusammenfassung

- Inter-Area-Oscillations sind weiträumige Frequenzschwingungen in großen Verbundnetzen
- Kritisch in Kombination mit verhältnismäßig kleinen Störungen
- Ursache: Stromtransport über lange Strecken bei geringer Systemdämpfung
- Folgen: Großräumige Stromausfälle möglich
- Dämpfungseinrichtungen erforderlich
- Durch dezentrale Überwachungssysteme schnelle Koordination der ÜNB möglich

Möglichkeiten zur aktiven Spannungsbandstützung mittels Wärmepumpen im Kontext des Smart-Grids

Mike Skroch

Institut für Hochspannungstechnik und elektrische Energieanlagen – **elenia**, Braunschweig, mike.skroch@tu-bs.de

Kurzfassung

Durch die Veränderungen des Leistungsflusses im Energienetz von unidirektionalen zu bidirektionalen Leistungsflüssen bedarf es eine Umgestaltung der Netzstruktur und der Möglichkeiten zur Erhaltung der Systemdienstleistungen. Dezentrale Wärmepumpen könnten zukünftig durch das Power-to-Heat-Prinzip eine innovative Rolle zur aktiven Spannungshaltung spielen. Die Beeinflussung der Wirkleistung aber auch die Bereitstellung von Blindleistung sind mögliche Ansätze hierfür.

Abstract

Due to the changes in the power flow in the energy grid from unidirectional to bidirectional power flows, a change in the grid structure and the possibilities for maintaining system services is required. In the future, decentralised heat pumps could play an innovative role in active voltage maintenance through the power-to-heat principle. The influencing of active power but also the provision of reactive power are possible approaches for this.

1 Einleitung

Der globale Klimawandel und die damit verbundenen Auswirkungen für Ökologie und Ökonomie haben in den letzten Jahrzehnten für einen Sinneswandel im Umgang mit Energie und deren Erzeugung aus fossilen Brennstoffen hin zur Versorgung mittels erneuerbarer Energien gesorgt. Mit dem Energiekonzept der deutschen Bundesregierung aus den Jahren 2010 und 2011 wurde das Ziel beschlossen bis zum Jahr 2050 mindestens 80% des Bruttostromverbrauchs aus erneuerbaren Energieträgern bereitstellen zu können. Kern des Beschlusses, ist sowohl eine sichere und ökologisch nachhaltige Energieversorgung als auch mehr Unabhängigkeit von Importen fossiler Energieträger zu erreichen. [1] Hauptziel der Umstellung auf erneuerbare Energiequellen ist die Verringerung des CO₂-Ausstoßes in der Energieversorgung. Die Bundesregierung hat sich das Ziel gesetzt, bis zum Jahr 2030 den Treibhausgasausstoß um 55% im Vergleich zu 1990 zu senken. [2]

Für eine sichere elektrische Energieversorgung sind Systemdienstleistungen wie z.B. die Spannungshaltung in Verteil- und Übertragungsnetzen notwendig, die durch den massiven Zubau von dezentralen Erzeugungsanlagen und den damit einhergehenden Wandel in der Versorgungsstruktur auf technische Innovationen angewiesen sind. Dabei steht unter anderem die Spannungshaltung im Bereich der Verteilnetze im Fokus, da dort die Mehrzahl an erneuerbaren Energieanlagen in das Netz eingebunden werden. [3] Eine der notwendigen technischen Innovationen zur Spannungshaltung in Verteilnetzen könnten modifizierte Power-to-Heat-Anlagen bzw. Wärmepumpen darstellen, die zum Ausgleich fluktuierender Einspeisung bzw. fluktuierenden Verbrauches eingesetzt werden könnten. [4]

In dieser Arbeit soll den Fragen nachgegangen werden, wie sich die Leistung von Wärmepumpen in Netzen mit hoher Anzahl dezentraler Erzeugungsanlagen effizient zur Spannungsbandstützung nutzen lassen und welche

Maßnahmen speziell im Verteilnetz dafür am sinnvollsten sind.

2 Theoretische Grundlagen

Um einen besseren Einstieg in die Thematik zu ermöglichen, werden in diesem Kapitel die notwendigen Grundlagen zur Funktionsweise einer Wärmepumpe und der zulässigen Abweichungen des Spannungsbandes im Übertragungs- und Verteilnetz näher erläutert.

2.1 Funktionsweise von Wärmepumpen

Wärmepumpen werden als Heizsystem oder Teil eines hybriden Heizsystems eingesetzt, um den Einsatz fossiler Brennstoffe zu verringern. Sie nehmen über ein Kühlmittel die Wärme der Umgebungstemperatur von Luft, Wasser oder dem Erdreich auf und geben diese nach der Verdichtung an einen Wärmeverteiler wieder ab. Dieser Prozess wird in Abbildung 1 dargestellt und kann als invertierte Funktionsweise eines Kühlschranks aufgefasst werden, der die Wärme der kälteren Seite im Kühlschrank entnimmt und zur wärmeren Außenseite transportiert.

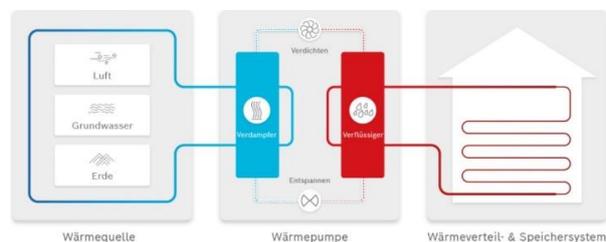


Abbildung 1: Wärmepumpe [5]

Die Wärmepumpe besteht grundsätzlich aus einem Kompressor bzw. Verdichter, einem Kältemittel und einem Kondensator. Auf der kälteren Seite saugt der Kompressor das gasförmige Kältemittel an und verdichtet dieses, um den Druck zu erhöhen, wodurch die

Gastemperatur ansteigt. Im Kondensator sinkt durch den Bedarf an Wärme die Temperatur ab, bis das Kühlmittel kondensiert. Bei diesem Prozess wird Kondensationswärme abgegeben, die über das Heizsystem verteilt wird. [6]

2.2 Blindleistung und Spannungsband

Elektrische Verbrauchs- und Erzeugungseinheiten aus Industrie oder privaten Haushalten entnehmen Strom aus dem europäischen Stromnetz und speisen dort ebenfalls ein. Das europäische Netz wird in Übertragungs- und Verteilnetze unterteilt. Bei Übertragungsnetzen handelt es sich um Höchstspannungsnetze mit einer Spannungsebene von 220 bis 380 kV. Verteilnetze bestehen aus Hochspannungsnetzen mit einer Spannungsebene von 110 kV, Mittelspannungsnetzen mit einer Spannungsebene von 10 bis 20 kV (teilweise auch 6 kV oder 35 kV) und Niederspannungsnetzen mit einer Spannung von 0,4 kV (teilweise auch 0,6 kV). Da in dieser Arbeit speziell der Einsatz von Wärmepumpen zur Spannungsstützung betrachtet wird, wird der Hauptaugenmerk auf das Nieder- und Mittelspannungsnetz gelegt, in denen Wärmepumpen je nach Anwendungsfall im Netz integriert werden.

Aus diesem Grund werden die Grenzwerte für die Spannungsabweichung in Mittel- und Niederspannungsnetzen näher betrachtet.

Laut der DIN-Norm 50160 gilt für das Niederspannungsnetz und das Mittelspannungsnetz eine Abweichung von 10% der zulässigen Nennspannung. [7]

Die VDE-AR-N 4105-Norm schreibt eine maximale Spannungserhöhung an Netzanschlusspunkten im Niederspannungsnetz von 3% vor, die Erzeuger und Speichereinheiten verursachen dürfen. [8]

Gründe für schnelle und langsame Spannungsschwankungen können neben der Lastabhängigkeit des Netzabschnittes auch Unsymmetrien im Dreiphasensystem oder die Total Harmonic Distortion (Effektivwert aller Oberschwingungen dividiert durch den Gesamteffektivwert einer Wechselgröße, unter ausschließlicher Berücksichtigung von ganzzahligen Vielfachen ihrer Grundfrequenz) sein. Blindleistung wird im Wechselstromkreis durch Bauteile hervorgerufen, die ein induktives oder kapazitives Verhalten aufweisen. Als Beispiel für induktives Verhalten im Netz sind Elektromotoren zu nennen, deren Spulen Induktivitäten darstellen. Parallel verlegte Leiterstrecken, die eine große Länge aufweisen, verhalten sich hingegen z.B. kapazitiv. Durch die erzeugte Blindleistung, die keinen Beitrag zum Energietransport leistet, findet eine Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung statt, die zu hohen Transportverlusten führen kann. [3]

Als Maß für die Phasenverschiebung in induktive oder kapazitive Richtung dient der sog. Verschiebungsfaktor

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (1)$$

der sich aus der Wirkleistung P und der Scheinleistung S zusammensetzt. Idealerweise liegt dieser im Kompensationsfall bei 1. Zu große Abweichungen von diesem Wert können zu hohen Transportverlusten führen,

weshalb Kraftwerke neben der Wirkleistung auch Blindleistung im Netz bereitstellen. Eine weitere Auswirkung der Blindleistung kann eine Spannungssenkung bei zunehmendem Anteil induktiver Blindleistung und einer Spannungsanhebung bei zunehmendem Anteil kapazitiver Leistung im Netz sein. [3]

3 Möglichkeiten zur aktiven Spannungsbandstützung

Um die durch die DIN EN 50160 definierten Spannungsgrenzen der Netzspannung einzuhalten, müssen Maßnahmen zur Gewährleistung der Spannungsqualität von den Übertragungs- und Verteilnetzbetreibern getroffen werden. Auf Basis historisch gewachsener Strukturen erfolgte der Leistungsfluss im Netz unidirektional durch konventionelle Kraftwerke, deren Synchrongeneratoren den Leistungsfluss vorgegeben haben. Die Netze wurden dabei für den vertikalen Leistungsfluss konzipiert, sodass in den höheren Netzebenen eingespeist und nach unten hin verteilt wurde. Durch dieses Prinzip führt eine Spannungsänderung von konventionellen Kraftwerken zu einer Spannungsänderung an den Netzanschlusspunkten in den Verteilnetzen. Zu große Spannungsschwankungen können durch Kuppeltransformatoren abgefedert werden, indem über das Wicklungsverhältnis des Transformators die Spannung auf der Sekundärseite (Mittelspannung) angepasst wird. Für eine lokale Spannungshaltung im Niederspannungsnetz sorgen ebenfalls Synchrongeneratoren (z.B. der lokalen Stadtwerke) oder auch Kompensationsanlagen, die durch den Einsatz von Blindleistung das Spannungsniveau senken bzw. erhöhen können. [9]

Durch die Integration von dezentralen erneuerbaren Energieanlagen müssen die Netze, speziell Verteilungsnetze, für bidirektionale Leistungsflüsse angepasst werden.

Einen innovativen Ansatz zur lokalen Spannungshaltung bietet der regelbare Ortsnetztransformator („rOnt“). Dieser nimmt über Sensoren Daten über den gegenwärtigen Netzzustand auf und steuert bei Bedarf einen Laststufenschalter an. Durch den Laststufenschalter kann eine Entkopplung des Niederspannungsnetzes vom Mittelspannungsnetz bewirkt werden, sodass z.B. dem Niederspannungsnetz die vollen $\pm 10\%$ Toleranz für das Spannungsband zur Verfügung stehen. [10]

Da das Niederspannungsnetz einen eher ohmsch geprägten Widerstand aufweist, bewirkt vor allem die bezogene Wirkleistung eine Beeinflussung der Spannung. Das Einspeisen von Blindleistung kann diesem Effekt entgegenwirken, hat jedoch durch die ohmsch geprägte Netzimpedanz im Vergleich zur Bereitstellung von positiver/negativer Regelleistung einen geringen Einfluss. Die Blindleistungsbereitstellung könnte zukünftig trotzdem einen Beitrag zur Spannungshaltung leisten und durch Wechselrichter dezentraler Erzeugungsanlagen wie PV-Anlagen aber auch durch Leistungselektronik von Wärmepumpenkonfigurationen erfolgen. Wärmepumpen in Verbindung mit thermischen Speichern und Organic

Rankine Cycle bieten neben der Möglichkeit der Blindleistungsbereitstellung auch das Power-to-Heat-Konzept, das zur lokalen Spannungshaltung beitragen kann und im folgenden Kapitel erläutert wird.

3.1 Einfluss von Wärmepumpen durch Wirkleistungsaufnahme

Um die Veränderungen der Energieversorgung effizient zu nutzen und Systemdienstleistungen wie die Spannungshaltung zu gewährleisten, könnten SG-Ready-Wärmepumpen (Smart-Grid-Ready) aufgrund von Synergieeffekten des Wärme- und Stromsektors einen innovativen Lösungsansatz darstellen. Beim Power-to-Heat-Ansatz besteht die Möglichkeit Leistungüberschüsse zu nutzen, die durch die volatile Erzeugung von dezentralen Energieanlagen erzeugt werden können. Kommt es beispielsweise zu nicht prognostizierten starken Windstärken, speisen Windenergieanlagen zunehmend in das Netz ein und erhöhen den Anteil an der Gesamtzeugung. Nachdem die elektr. Energie aus dem Netz aufgenommen und in thermische Energie gewandelt wurde, kann diese als Prozesswärme genutzt oder in das Fernwärmenetz eingespeist werden. Auch Gebäude, die sich in unmittelbarer Nähe der Wärmepumpen befinden können über Nahwärme mit der thermischen Energie versorgt werden. Industrielle Großpumpen sind dabei in der Lage, große Mengen an Energie aufzunehmen und in Wärme zu wandeln. [4] [11]

Beim Power-to-Heat-to-Power-Konzept wird sich das Prinzip des Thermopotentialspeichers zu Nutze gemacht, dessen Prozess in Abbildung 2 dargestellt ist.

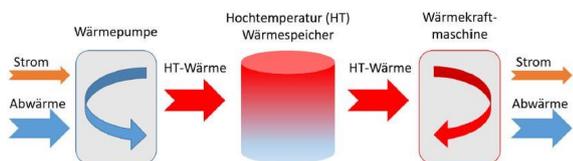


Abbildung 2: Thermopotentialspeicher [3]

Der Thermopotentialspeicher besteht aus einer Hochtemperaturwärmepumpe, einem Wärmespeicher und der ORC (Organic Rankine Cycle) bzw. Wärmekraftmaschine. Flacht die Einspeisung von dezentralen Erzeugern wie PV-Anlagen bspw. durch Verschattung ab, kann durch den Thermopotentialspeicher wie folgt der Erzeugungsbeitrag zu Teilen ausgeglichen werden. Nach Aufnahme der elektrischen Energie aus dem Netz wird ein Kühlmittel über die Wärmepumpe auf ein bestimmtes Temperaturniveau gehoben, um anschließend die Wärme an einen thermischen Speicher abzugeben. Bei einem erhöhten Bedarf an elektrischer Energie im Netz wird die thermische Energie über den Organic Rankine Cycle zu einem Teil verstromt und mit Strom-zu-Strom-Wirkungsgraden von bis zu 60 % wieder an das Netz abgegeben. [4][11]

3.2 Einfluss von Wärmepumpen durch Blindleistungsabgabe

Eine weitere Möglichkeit zur lokalen Spannungshaltung durch Wärmepumpenkonfigurationen, die nun betrachtet werden soll, ist das lokale Einspeisen von Blindleistung in das Verteilnetz.

Über die Einspeisung von Blindleistung durch dezentrale Erzeuger besteht die Möglichkeit der Spannungsbeeinflussung. Mit einer spannungsabhängigen Blindleistungsvorgabe, auch Q(U)-Regelung genannt, könnte mit intelligenter Vernetzung der einzelnen dezentralen Erzeuger im Smart-Grid-Konzept eine dezentrale Blindleistungsbereitstellung in Zukunft möglich sein. [3]

Damit Blindleistung durch die verwendeten Wechselrichter oder entsprechender Leistungselektronik bereitgestellt werden kann, die z.B. im Power-to-Heat-to-Power-Konzept verwendet werden könnten, benötigt es kommunikations- und besonders leistungsfähige Wechselrichter im Bereich der Wärmepumpen (SG-Ready) und PV-Anlagen. Diese müssen bei maximaler Wirkleistungsbereitstellung weiterhin Blindleistung zur Verfügung stellen können und sind aufgrund dessen auch kostenintensiver als konventionelle Wechselrichter. Diese Kosten würden sich nach bisherigem Stand nicht amortisieren können, da die Bereitstellung von Blindleistung für Endverbraucher nicht vergütet wird.

4 Fazit

Die Spannungshaltung durch Wärmepumpen könnte ein innovatives Teilstück eines Gesamtkonzepts zur zukünftigen Spannungshaltung darstellen. Vor allem die Möglichkeit der Wirkleistungsaufnahme bei überschüssiger Leistung im Netz stellt einen attraktiven Aspekt dar und ist aktuell bereits durch Wärmepumpen mit dem SG-Ready-Label umsetzbar. Der Rahmen der aktiven Einflussnahmen zur Stabilisierung der Netzspannung durch Einspeisung ist hierbei jedoch unklar, da die Einsatzmöglichkeit der Wärmepumpenkonfigurationen zur lokalen Spannungshaltung von der Leistungsfähigkeit der Wechselrichter/Leistungselektronik abhängt. Als Zusammenschlüsse mehrere Wärmepumpen in sog. Pools ist dieses Konzept durchaus denkbar. Bei der Blindleistungseinspeisung durch Wärmepumpenkonfigurationen dürfen die wirtschaftlichen Aspekte nicht vernachlässigt werden. Die finanzielle Bereitschaft Wärmepumpen im System mit leistungsfähigen intelligenten Wechselrichtern auszustatten, müsste durch politische und wirtschaftliche Anreize gefördert werden. Da momentan jedoch nicht einmal die bereitgestellte Blindleistung vergütet werden würde, scheint die Blindleistungsbereitstellung in Zukunft nicht rentabel. Zudem stellt sich die Frage, in welchem Umfang sich die Blindleistungseinspeisung zur Spannungshaltung als Effektiv erweist. Der Einsatz der Wärmepumpen zur Sektorenkopplung von Wärme und Strom wird jedoch in Zukunft eine große Rolle spielen und den Wandel der Energieversorgung prägen.

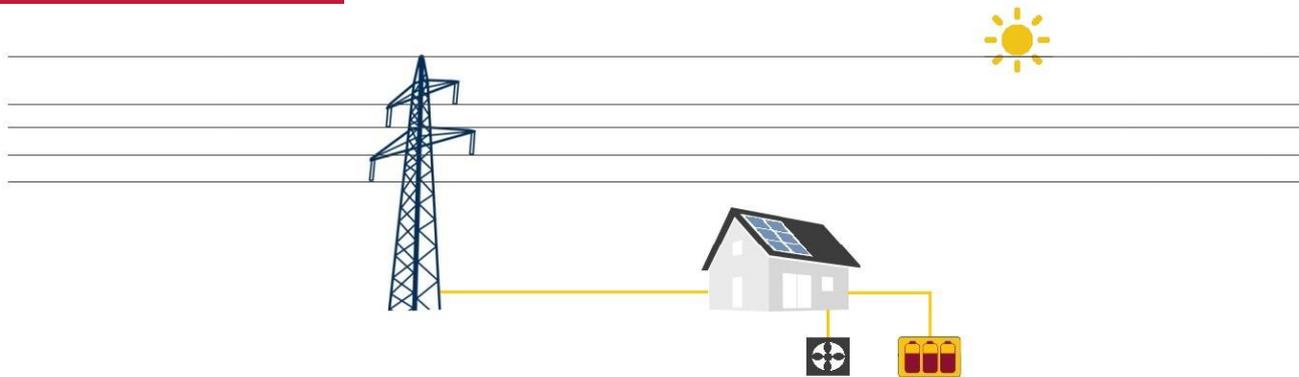
5 Literatur

- [1] Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena), Energiesysteme und Energiedienstleistungen, Berlin: dena, 2014.
- [2] Die Bundesregierung - Bis 2030 die Treibhausgase halbieren, 2019. [Online]. Available: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/klimaziele-und-sektoren-1669268> [Zugriff: 18.01.2021]
- [3] SMA Solar Technology AG, Blindleistung – Grundlagen, Anwendungen und SMA Lösungen, Niestal
- [4] K.Välilä, D. Laing-Nepustil, Power-to-Heat – Wo könnte es hingehen?, Wiesbaden: Springer-Verlag, 2020.
- [5] Bosch-thermotechnology – Was ist eine Wärmepumpe? 2020. [Online]. Available: <https://www.bosch-thermotechnology.com/de/de/wohngebaeude/wissen/heizungsratgeber/waermepumpe> [Zugriff: 16.12.2020]
- [6] F. Häfner et al., Bau und Berechnung von Erdwärmeeanlagen, Heidelberg: Springer-Verlag, 2015.
- [7] DIN Deutsches Institut für Normung e.V. – Merkmale der Spannung in öffentlichen Elektrizitätsversorgungsnetzen; Deutsche Fassung EN 50160:2010 + Cor.: 2010, Berlin: Beuth Verlag GmbH, 2011
- [8] VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V., VDE-AR-N VDE-AR-N 4105: Erzeugungsanlagen im Niederspannungsnetz; Berlin: VDE Verlag GmbH, 2018
- [9] Boris Valov, Handbuch Netzintegration Erneuerbare Energien; Wiesbaden: Springer-Verlag, 2019
- [10] M. Haslbeck, M. Sojer und T. Smolka, Mehr Netzanschlusskapazität durch regelbare Ortsnetztransformatoren, Stuttgart: Elektro Technologie Zentrum (etz), 2012
- [11] U. Lenk, I. Pyc VDE, Flexibilisierung durch Hybridisierung der Energieversorgung; Wien: Springer-Verlag, 2016



Technische
Universität
Braunschweig

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen



Möglichkeiten zur aktiven Spannungsbandstützung mittels Wärmepumpen im Kontext eines Smart-Grids

Mike Skroch, 25.01.2021

Agenda

1. Einleitung und Motivation
2. Funktionsweise von Wärmepumpen
3. Möglichkeiten zur aktiven Spannungsbandstützung
4. Einfluss von Wärmepumpen durch Wirkleistungsaufnahme
5. Einfluss von Wärmepumpen durch Blindleistungsabgabe
6. Fazit

Agenda

1. **Einleitung und Motivation**
2. Funktionsweise von Wärmepumpen
3. Möglichkeiten zur aktiven Spannungsbandstützung
4. Einfluss von Wärmepumpen durch Wirkleistungsaufnahme
5. Einfluss von Wärmepumpen durch Blindleistungsabgabe
6. Fazit

Einleitung & Motivation

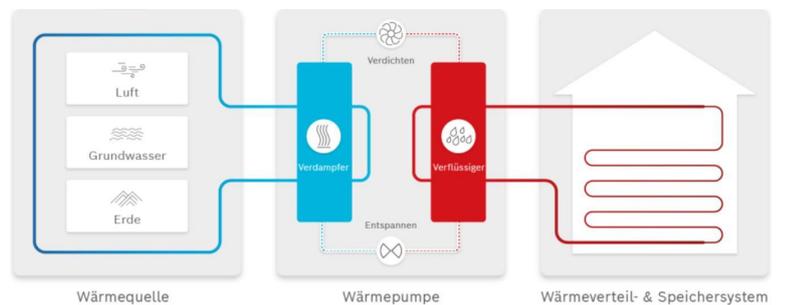
- Bis 2050: mindestens 80% Erneuerbare Energien (Bruttostromverbrauch)
- Verringerung des CO₂-Ausstoßes: bis 2030 Senkung der Treibhausgase um 55%
- Wechsel Versorgungsstruktur durch dezentrale Energieanlagen
- Innovative Technologien zur Spannungshaltung notwendig
- **Leitfragen:**
 - Wie lassen sich Wärmepumpen effizient zur Spannungsbandstützung einsetzen?
 - Welche Maßnahmen sind in Verteilnetzen am sinnvollsten?

Agenda

1. Einleitung und Motivation
- 2. Funktionsweise von Wärmepumpen**
3. Möglichkeiten zur aktiven Spannungsbandstützung
4. Einfluss von Wärmepumpen durch Wirkleistungsaufnahme
5. Einfluss von Wärmepumpen durch Blindleistungsabgabe
6. Fazit

Funktionsweise von Wärmepumpen

- **Bestandteile Wärmepumpe:**
Verdichter, Kältemittel und Kondensator
- Aufnahme Umgebungswärme
aus Wasser, Luft oder Erdreich



Quelle: www.bosch-thermotechnology.com

- Verdichtung durch Kompressor → Temperaturanstieg Kühlmittel
- Kondensation → Temperaturabgabe an Wärmeverteiler
- Prozess beginnt erneut

Agenda

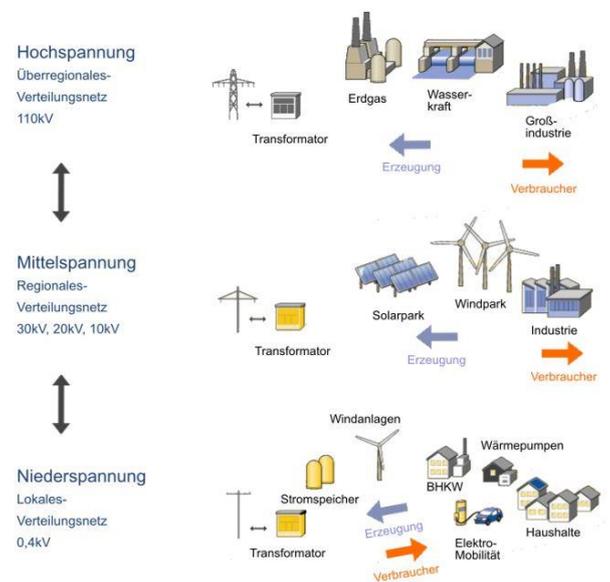
1. Einleitung und Motivation
2. Funktionsweise von Wärmepumpen
- 3. Möglichkeiten zur aktiven Spannungsbandstützung**
4. Einfluss von Wärmepumpen durch Wirkleistungsaufnahme
5. Einfluss von Wärmepumpen durch Blindleistungsabgabe
6. Fazit

Möglichkeiten zur aktiven Spannungsbandstützung

- Integration von dezentralen Energieanlagen:
 - **Hochspannungsnetz (110 kV)** → Windparks, PV-Kraftwerke
 - **Mittelspannungsnetz (10-20 kV)** → Windkraftanlagen, große PV-Anlagen, Großwärmepumpen
 - **Niederspannungsnetz (0,4 kV)** → Kleine PV-Anlagen, Wärmepumpen
- **DIN-Norm 50160:** Max. 10% Spannungsabweichung im Nieder- und Mittelspannungsnetz
- **VDE-AR-N 4105:** Max. 3% Spannungserhöhung Netzanschlusspunkt durch Erzeuger und Speichereinheiten
- **Gründe Spannungsschwankungen:** Lastabhängigkeit, Unsymmetrien, THD, Blindleistung

Möglichkeiten zur aktiven Spannungsbandstützung

- **Historisch:** Unidirektionaler Leistungsfluss
- Maßnahmen zur Spannungshaltung:
 - Synchrongeneratoren
 - Kompensationsanlagen
 - Kuppeltransformatoren
- **Gegenwart:** Bidirektionaler Leistungsfluss
- Maßnahmen zur Spannungshaltung:
 - Regelbare Ortsnetztransformatoren
 - Dezentrale Erzeugungsanlagen



Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an www.bpb.de

Agenda

1. Einleitung und Motivation
2. Funktionsweise von Wärmepumpen
3. Möglichkeiten zur aktiven Spannungsbandstützung
- 4. Einfluss von Wärmepumpen durch Wirkleistungsaufnahme**
5. Einfluss von Wärmepumpen durch Blindleistungsabgabe
6. Fazit

Einfluss von Wärmepumpen durch Wirkleistungsaufnahme

- Wärmepumpe: Innovativer Ansatz zur Synergienutzung von Strom und Wärme
- CO₂-Vermeidung bei Wärmeerzeugung durch Umwandlung von PV-Strom
- Temporär zu hohe Einspeisung durch volatile Erzeuger (Höhere Windstärken): Aufnahme von Wirkleistung

→ **Power-to-Heat**

- Temporär zu geringe Einspeisung durch volatile Erzeuger (Verschattung): Einspeisen von Wirkleistung

→ **Power-to-Heat-to-Power**



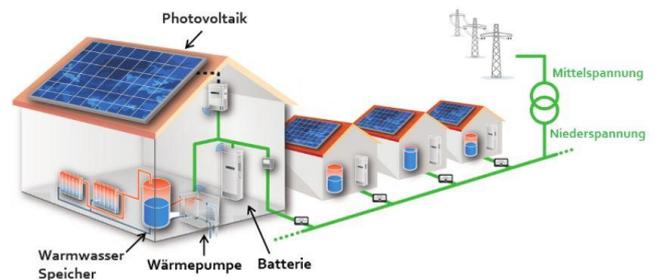
Quelle: www.energiequelle.de



Quelle: www.energiequelle.de

Einfluss von Wärmepumpen durch Wirkleistungsaufnahme

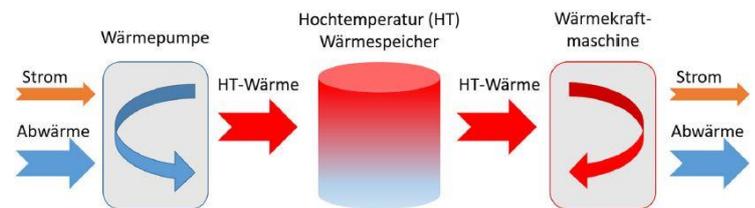
- **Power-to-Heat:**
 - Spannungserhöhung durch zu hohe Einspeisung volatiler Erzeuger (PV, Wind)
 - Aufnahme elektrischer Energie zum Betrieb der Wärmepumpe
- Einsatz privater Bereich:
 - Heizsysteme
 - Thermische Speicher
- Einsatz Industrie:
 - Umwandlung in Prozesswärme
 - Einspeisung in Nah- und Fernwärmenetz



Quelle: www.zsw-bw.de

Einfluss von Wärmepumpen durch Wirkleistungsaufnahme

- **Power-to-Heat-to-Power:**
Verstromung gespeicherter Energie durch Thermopotentialspeicher



Quelle: K.Väilä, D. Laing-Nepustil, Power-to-Heat, Springer, 2020

- Aufbau Thermopotentialspeicher: Hochtemperaturwärmepumpe, Wärmespeicher und Wärmekraftmaschine
- Funktionsweise Thermopotentialspeicher:
 - Nutzung elektrischer und Umgebungswärme zur Umwandlung in Wärme
 - Wärme wird an thermischen Speicher abgegeben
 - Hohe Netzlast: Wärme wird über Organic Rankine Cycle in elektrische Energie und Abwärme umgewandelt

Einfluss von Wärmepumpen durch Wirkleistungsaufnahme

- **SG-Ready-Label:** Wärmepumpenbaureihen mit Kommunikationsmöglichkeit, besonderer Regelungstechnik und Schnittstellenkompatiblen Systemkomponenten
- Wärmepumpen besitzen Regler mit vier Betriebszuständen:
 1. Normalbetrieb → z.B. Schaltung zu festen Uhrzeiten
 2. Sperrbetrieb → Sperrzeit zur Lastspitzenreduzierung (max. 2h)
 3. Überhöhter Betrieb → Verstärkter Betrieb (günstiger EE-Tarif)
 4. Einschaltbefehl → Anlaufbefehl bei extrem wirtschaftlichem Tarif
- Kommunikationsmöglichkeit über Ethernet z.B. Modbus TCP



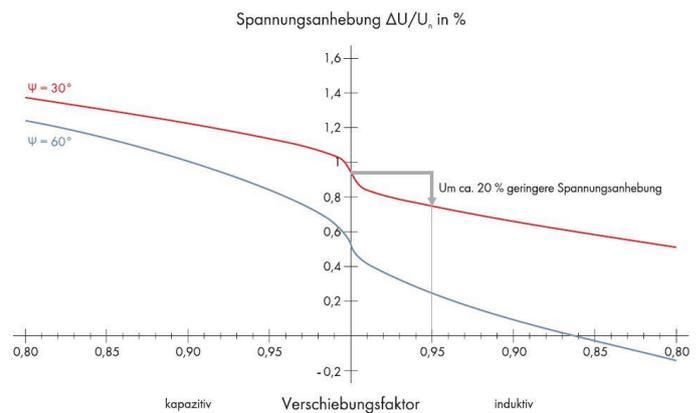
Quelle: www.waermepumpe.de

Agenda

1. Einleitung und Motivation
2. Funktionsweise von Wärmepumpen
3. Möglichkeiten zur aktiven Spannungsbandstützung
4. Einfluss von Wärmepumpen durch Wirkleistungsaufnahme
- 5. Einfluss von Wärmepumpen durch Blindleistungsabgabe**
6. Fazit

Einfluss von Wärmepumpen durch Blindleistungsabgabe

- Kompensation von Spannungsschwankungen u.a. durch Blindleistung
- Spannungsbedingte Blindleistungsvorgabe als mögliche Gegenmaßnahme
→ Q(U)-Regelung
- Spannungssenkende Wirkung im Nieder- und Mittelspannungsnetz eher gering
- Intelligente Zusammenschaltung von dezentralen Anlagen notwendig
→ SG-Ready-Label



Einfluss von Wärmepumpen durch Blindleistungsabgabe

- Besondere Wechselrichter/Leistungselektronik für Blindleistungsbereitstellung notwendig:
- Auslegung der Wechselrichter auf höhere maximale Scheinleistung
- Nur im Power-to-Heat-to-Power-Konzept möglich
- Blindleistungsbereitstellung wird für Endverbraucher nicht vergütet

→ **Mehrkosten für den Endverbraucher**

Agenda

1. Einleitung und Motivation
2. Funktionsweise von Wärmepumpen
3. Möglichkeiten zur aktiven Spannungsbandstützung
4. Einfluss von Wärmepumpen durch Wirkleistungsaufnahme
5. Einfluss von Wärmepumpen durch Blindleistungsabgabe
- 6. Fazit**

Zusammenfassung und Fazit

- Wärmepumpenkonzepte könnten innovatives Teilstück eines Gesamtkonzeptes zur Spannungshaltung darstellen
- Power-to-Heat-Konzept: Gegenwärtig könnten Wärmepumpen bereits zu hohe Einspeisung volatiler Erzeuger reduzieren und zusätzlich für CO₂-Einsparungen bei der Wärmeerzeugung sorgen (SG-Ready-Label)
- Power-to-Heat-to-Power-Konzept könnte speziell durch industrielle Anwendungen durch die Verstromung thermisch gespeicherter Energie zur Reduzierung von Lastspitzen beitragen
- Einspeisen von Blindleistung als Ausblick in die Zukunft
→ Frage nach der Kosteneffizienz und der Effektivität der Blindleistungseinspeisung von Wärmepumpenkonfigurationen

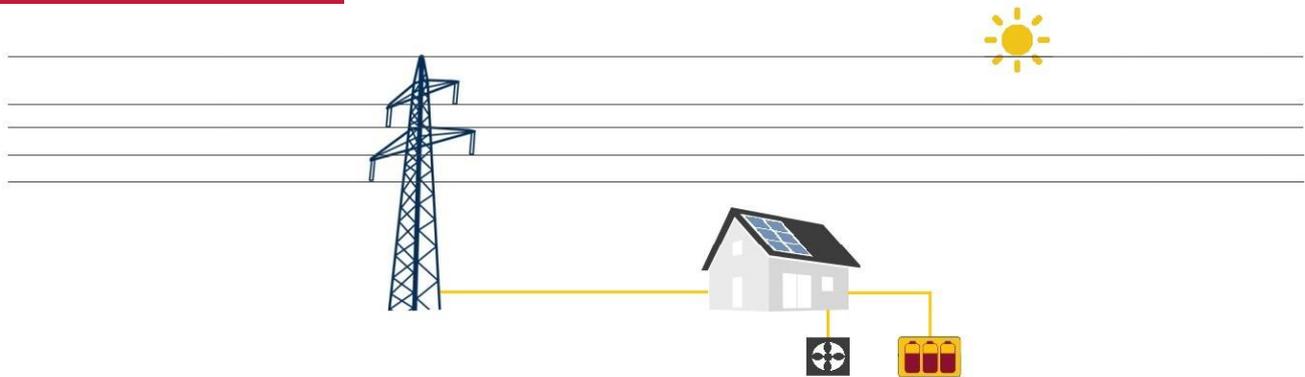
Zusammenfassung und Fazit

Mit der Schaffung von geeigneten politischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen könnten Wärmepumpen einen deutlichen Beitrag zur Stabilisierung der Spannung in Verteilnetzen liefern. Die Technologien zur Reduzierung von Einspeiseüberschüssen im Netz durch die Aufnahme von Wirkleistung, stehen durch SG-Ready-Wärmepumpen bereits zur Verfügung. Inwiefern die Bereitstellung von Blindleistung durch Wärmepumpenkonfigurationen rentabel und sinnvoll ist, wird sich erst in Zukunft zeigen.



Technische
Universität
Braunschweig

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Elektrische Energieanlagen



Möglichkeiten zur aktiven Spannungsbandstützung mittels Wärmepumpen im Kontext eines Smart-Grids

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!

Überblick und Herausforderungen zukünftiger Batterietechnologien

Overview and challenges of future battery technologies

B. Sc., Oliver Landrath

Institut für Hochspannungstechnik und elektrische Energieanlagen - **elenia**, Braunschweig, o.landrath@tu-braunschweig.de

Kurzfassung

Diese Arbeit stellt verschiedene Batterietechnologien, sowie deren Vorteile und Herausforderungen vor. Ziel der Arbeit ist es die zeitliche Relevanz neuer Batterietechnologien im Vergleich zu Lithium-Ionen-Batterien bewerten zu können. Als Ergebnis zeigt sich, dass die betrachteten Technologien zum jetzigen Entwicklungsstand mit Lithium-Ionen-Batterien noch nicht konkurrenzfähig sind, aber verschiedene Technologien in Zukunft für stationäre Anwendungen konkurrenzfähig werden könnten.

Abstract

This work presents different battery technologies as well as their advantages and challenges. The aim of the work is to be able to evaluate the temporal relevance of new battery technologies in comparison to lithium-ion batteries. The result shows that the considered technologies are not yet competitive with lithium-ion batteries at the current stage of development for mobile applications. Various technologies could become competitive in the future for stationary applications.

1 Einleitung

Batterieeigenschaften hinsichtlich Energiedichte, Leistungsdichte, Lebensdauer und Alterung zu verbessern generiert einen Forschungsauftrag nicht nur für Lithium-Ionen-Batterien, sondern auch für potentielle andere Technologien. Abhängig von der Anwendung unterscheiden sich die Anforderungen an ein Batteriesystem, sodass das Potential neuer Batterietechnologien im Vergleich zu Lithium-Ionen-Batterien bewertet werden sollte. Außerdem könnten neue Batterietechnologien ressourcenschonende Auswirkungen mit sich bringen. [1] In dieser Arbeit werden verschiedene Batterietechnologien vorgestellt sowie Vorteile und Herausforderungen aufgezeigt. Auf der Grundlage der Ausführungen soll eine Aussage bezüglich der zeitnahen Relevanz der Technologien getroffen werden.

2 Theoretische Grundlagen

In den folgenden Ausführungen werden theoretische Grundlagen zu Batterietechnologien erläutert, die zum besserem Verständnis der Arbeit dienen sollen.

Batterien sind elektrochemische Energiespeichersysteme, die sich in nicht wiederaufladbare Primärbatterien und wiederaufladbare Sekundärbatterien, sogenannte Akkumulatoren, einteilen lassen. Des Weiteren unterscheiden sie sich bezüglich der zugrunde liegenden chemischen Redoxgleichungen, die von der chemischen Zusammensetzung der Batteriezelle abhängen. Batteriezellen

bilden das Grundelement der Batterien und setzen sich mehrfach parallel und/oder seriell verschaltet zu einer Batterie zusammen. Kapazität C , elektrische Energie E und Leistung P sind Kenngrößen mit denen Batterien charakterisiert werden können. Die Kapazität, angegeben in der Einheit Ah, ist die Menge der elektrischen Ladung, die eine Batterie unter spezifischen Entladebedingungen liefert. Die elektrische Energie einer Batterie ergibt sich aus dem Produkt der mittleren Zellspannung und der Kapazität. Sie wird in der Einheit Wh angegeben. Die gravimetrische Energiedichte mit der Einheit Wh/kg bezieht die Energie auf die Masse und die volumetrische Energiedichte in Wh/l auf das Volumen der Batterie. Eine weitere Kenngröße ist die Ladeeffizienz in %, welche die entnommene Energie auf die zugeführte Energie bezieht. [2-6]

2.1 Funktionsweise und Aufbau einer Lithium-Ionen-Zelle

In diesem Unterkapitel wird der Aufbau und die Funktionsweise der Lithium-Ionen-Zelle erläutert, um einen Vergleich zu anderen Technologien ziehen zu können.

In **Abbildung 1** ist der schematische Aufbau einer Lithium-Ionen-Zelle dargestellt. Eine Lithium-Ionen-Zelle besteht aus einer negativer Elektrode (Anode) und einer positiven Elektrode (Kathode), die durch einen elektronisch nichtleitenden Separator getrennt sind. Zwischen den Elektroden befindet sich ein ionenleitendes Elektrolyt. Für das Anodenmaterial wird oftmals Graphit verwendet

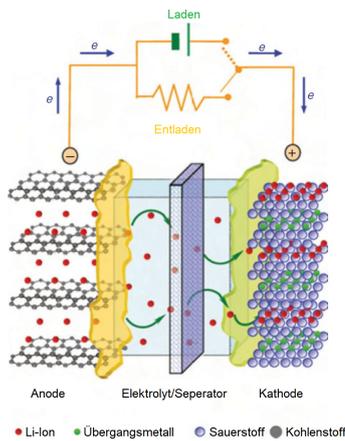


Abbildung 1 Aufbau und Funktion einer Lithium-Ionen-Zelle [5]

und die Kathoden bestehen aus einem Lithium-Metalloxid oder Metallphosphat. Die Aktivmaterialien werden mit einem Art Kleber, dem Binder, auf einem Stromableiter befestigt. Für die Anode wird Kupfer und für die Kathode Aluminium als Stromableiter verwendet. Beim Ladevorgang wandern Lithium (Li)-Ionen aus der Kathode durch den Separator zur Anode und lagern sich in dem Graphitwirtsgitter ein. Beim Entladevorgang kehrt sich die Bewegungsrichtung der Ionen um und die Ionen interkalieren in der Kathode. Für die Funktionalität der Zelle ist die Bildung einer Grenzschicht an der Anode, der sogenannten Solid Electrolyte Interface (SEI), notwendig, welche maßgeblich beim ersten Ladevorgang während der sogenannten Formierung gebildet wird. Die für Li-Ionen durchlässige Schicht entsteht unter anteiliger Zersetzung des Elektrolyten und irreversiblen Einbindung von Lithium. Die Grenzschicht setzt die Reaktivität zwischen Elektrode und Elektrolyt herab, sodass sich der Elektrolyt nicht vollständig zersetzt und ein Wiederaufladen des Akkumulators ermöglicht wird. Um die Ausbildung der SEI-Schicht zu optimieren werden spezielle Formierungsladezyklen durchgeführt, sowie auf SEI-Schichtbildung abgestimmte Elektrolytlösungen eingesetzt. [2, 3, 5, 7]

Aktuelle Lithium-Ionen-Batterien erreichen gravimetrische Energiedichten von 250 Wh/kg und 700 Wh/l volumetrische Energiedichte. In den nächsten fünf Jahren werden Werte von 400 Wh/kg und 1000 Wh/l erwartet. Je nach Zellchemie und Zelldesign liegt die Effizienz der Batterien über 90 % [8] bei einer Lade-Entladestabilität von mehreren 1000 Zyklen. [9]

3 Hauptteil / Erkenntnisse

Folgend werden verschiedene Batteriesysteme vorgestellt, sowie Vorteile und Herausforderungen aufgezeigt, sodass abschließend die zeitnahe Relevanz der Technologien für verschiedene Anwendungsbereiche eingeordnet werden kann. Der Fokus liegt dabei auf den vorgestellten Kenngrößen, der Formierung und den damit verbundenen Grenz-

schichten. Es werden aber auch fertigungs- und materialtechnische Aspekte betrachtet, falls diese Auswirkungen auf die zukünftige technische Relevanz zu scheinen haben.

3.1 Natrium-basierte Thermalbatterien

Bisherige Natrium-basierte Thermalbatterien weisen eine hohe Effizienz, Lebensdauer (Zahlenwerte einfügen), sowie niedrige Kosten und hohe Versorgungssicherheit bezüglich der Ausgangsmaterialien auf. Natrium (Na)-Schwefel (S)-Batterien werden für stationäre Speicherung von Windenergie eingesetzt. Die hohe Betriebstemperatur um 300 °C wirkt sich jedoch herausfordernd auf den wirtschaftlichen Einsatz aus, weil daraus aufwändige Gehäuseabdichtungen und Wärmeverluste resultieren, die sich negativ auf Energiedichte und Kosten auswirken. Etablierte Technologien weisen eine Zyklenlebensdauer von 15 Jahren, Effizienz von 75 % bis 85 % und eine gravimetrische Energiedichte von 100-120 Wh/kg auf [10]. [1]

3.1.1 Mitteltemperatur-Thermalbatterien

Mit einer flüssigen Na-Metall-Anode und einer wässrigen, hochkonzentrierten Iod (I)-Kathode soll eine Mitteltemperatur-Thermalbatterie im Projekt MiTemp entwickelt werden, die bei deutlich niedrigeren Temperaturen ca. 100 °C betrieben werden kann. Der auf keramischen Materialien basierende Separator Natrium Super Ionic Conductor (NaSICON) leitet Na-Ionen schon ab 50 °C besser als der zuvor verwendete Separator Natrium-beta-Aluminat, ist preiswerter herstellbar und chemisch beständiger gegenüber der Iod-Kathode. Die niedrigeren Betriebstemperaturen ermöglichen den Einsatz von günstigeren Materialkosten für das Gehäuse und die Gehäuseabdichtung. Ziel ist es einen kleinen (bis 10 kWh) bis mittelgroßen (100 kWh-200 kWh) stationären Energiespeicher zu entwickeln, der niedrige Herstellungskosten aufweist. Herausforderungen bezüglich der Entwicklung ist die richtige Zusammensetzung der Zelle, um beste Ionenleitfähigkeit und chemische Beständigkeit gegenüber der Kathodenflüssigkeit zu realisieren. Für ein möglichst gutes Benetzen des Separators durch flüssiges Natrium-Metall müssen außerdem Lösungen gefunden werden. [1]

Da sich die Technologie noch in der Entwicklung befindet, sind noch keine Angaben zu Energiedichte, Effizienz und Lebensdauer ersichtlich.

3.2 Metall-Schwefel-Batterien

Nicht thermale Metall-Schwefel-Batterien sind Metall-Schwefel-Batterien, dessen Betrieb bei Raumtemperatur erfolgt. Zu ihnen zählen beispielsweise Lithium-Schwefel-Batterien, Magnesium-Schwefel-Batterien und Natrium-Schwefel-Batterien. Der benötigte Schwefel ist in großer Menge vorhanden und kostengünstig. [1, 7, 11]

3.2.1 Lithium-Schwefel-Batterien

Bei der Entladung einer Lithium-Schwefel-Batterie bilden Lithium und Schwefel (S) verschiedene Sulfide, die sich bei der Ladung wieder zu Li und S zurückbilden. Die

Batterie kommt ohne Nickel, Mangan und Kobalt aus. Entladeprodukte sind Lithium-Sulfid Li_2S und Lithium-Polysulfide Li_2S_x ($x=2,4,6,8$). Die Polysulfide können mit dem Li-Metall reagieren, was zu einem Selbstentladungsvorgang führt, der den Umfang der gewünschten elektrochemische Reaktion mindert. Li_2S bildet eine isolierende Schicht auf der Lithium-Metall-Anode. Bezüglich der Reversibilität lassen sich die Polysulfid-Ionen leichter zurück oxidieren, wohingegen ein nicht zu vernachlässigender Teil Lithium-Sulfid irreversible vorliegt. Darüber hinaus reagiert das Lithium in jedem Lade-Entlade-Zyklus irreversible mit dem Elektrolyt und es kommt zur weiteren Wachsen der SEI-Schichten, sowie spitz wachsenden Lithiumablagerungen (Dendritenbildung) auf den Anoden. Auch der Schwefel lagert sich inhomogen an der Kathode ab. Die beschriebenen Prozesse führen zu starken Strukturänderungen auf der Elektrodenoberfläche. Durch Elektrolyt- und Li-Metall-Überschuss, was zusätzliches Volumen und Masse erfordert, kann dem Energieverlust durch die irreversiblen Prozesse vermindert werden. Die zusätzliche Masse führt jedoch dazu, dass die gravimetrische Energie nach wenigen Zyklen nur 350 Wh/kg bis 500 Wh/kg groß ist. Die theoretische gravimetrische Energiedichten bezüglich der Reduktionspotentiale liegt über 2000 Wh/kg. Der beschriebene Selbstentladungsprozess (Shuttle Effekt) der Zellen könnte durch Einsatz von Festkörperelektrolyten behoben werden. [1, 7, 8]

Ohne den Einsatz von Festkörperelektrolyten konnte bereits eine Zelle mit einer Entladekapazitätsdichte von 1200 Ah/kg im Laborformat entwickelt werden, die für 200 Zyklen stabil betrieben werden kann. Dabei wurde ein Wirkungsgrad größer als 99 % bestimmt. Ausgehen von ca. 2 V mittlerer Spannung ergäbe sich eine gravimetrische Energiedichte von 2400 Wh/kg. [12]

3.2.2 Magnesium-Schwefel-Batterien und Natrium-Schwefel-Batterien

Die theoretische auf die Masse bezogene Energiedichte von Magnesium-Schwefel- und Natrium-Schwefel-Batteriezellen liegt bei über 1000 Wh/kg [8].

3.3 Metall-Luft- und Metall-Sauerstoff-Batterien

Bei Metall-Luft-Batterien wird einer der Reaktionspartner über spezielle Elektrode aus Umgebungsluft gewonnen. Theoretisch sind hohe Energiedichten realisierbar. Für die Luftkathode wird eine Gasdiffusionselektrode aus poröser Kohlenstoffstruktur verwendet, die aus der Brennstofftechnologie bekannt ist. Für das Design der Kathode ist wichtig, dass sie mit genügend Elektrolyt benetzt ist und sich die Luft hinreichend verteilt, damit es zur Ausbildung einer Dreiphasengrenze zwischen fester Elektrodenphase, flüssiger Elektrolytphase und gasförmiger Luftphase kommt. Bisher gibt es verschiedene Anwendungen von Metall-Luft-Batterien als primären Speicher. Herausfordernd ist die Entwicklung sekundärer Speichersysteme. Die Systeme unterscheiden sich hinsichtlich des eingesetzten Anodenmaterials (z.B. Lithium, Eisen, Zink, Na-

trium oder Aluminium) und der erreichbaren Energiedichte. Herausforderungen ergeben sich bei der Erhöhung der noch sehr geringen Lebensdauer, sowie beim grundsätzlichen Verstehen der komplexen Lade- und Entladevorgänge, um Zersetzungerscheinungen kontrollieren zu können. Alternativ zur Reinigung der Luft von anderen Bestandteilen, kann auch reiner Sauerstoff beispielsweise aus Gasflaschen verwendet werden. Insgesamt sind die Systeme noch Gegenstand der Grundlagenforschung [9], weshalb die verwendeten Materialien und das Design der Technologie noch nicht feststehen und somit keine Energiedichten angegeben werden. In Forschungsprojekten wird sich eine Verzehnfachung der Energiedichten erhofft. [1, 7]

3.4 Batteriesysteme mit Lithium-Metall-Anoden

Lithium-Metall-Anoden sind für Lithium basierten Batterietechnologien (Lithium-Ionen-, Lithium-Festelektrolyt-, Lithium-Schwefel- und Lithium-Sauerstoff-Batterie) relevant und können zu einer maßgeblichen Erhöhung der volumetrischer und gravimetrischer Energiedichte von Systemen führen. Herausfordernd für die sekundäre Batteriefunktionalität ist die hohe Reaktivität des Lithiums mit dem Elektrolyten. Wenn Elektrodenmaterialien thermodynamisch nicht stabil gegenüber dem Elektrolyten sind, ist eine Deckschichtausbildung auf der Elektrode erforderlich, an die bestimmte Eigenschaften gestellt sind. Ansonsten schreitet die Reaktion zwischen Lithium und Elektrolyt solange fort, bis entweder das Elektrolyt oder das Lithium aufgebraucht sind. Wenn die Deckschicht nicht ionenleitfähig ist, wird die Elektrode elektrochemisch inaktiv. Bei Lithium-Metall-Anoden kommt es beim Ladevorgang zu Lithiumabscheidungen an der Anode, was zu einer inhomogenen Ausbildung der SEI-Schicht führt. Die Lithiumabscheidungen führen zu einem Dendritenwachstum, den es zu kontrollieren gibt, da sonst die spitzen Lithiumablagerungen zu internen Kurzschlüssen führen können. Künstliche Membranen könnten diesem unerwünschten Effekt entgegenwirken. Weitere Herausforderungen ergeben sich in der Prozesstechnik zur Herstellung dünner Lithium-Metall-Anoden unter Luft- und Wasserausschluss, um ungewollte Passivreaktionen zu vermeiden. [1, 7]

Mit dem Einsatz von Feststoffelektrolyten wird eine Anwendung von Li-Metall-Anoden erhofft. Energiedichten, die 350 Wh/kg und 1000 Wh/l übertreffen, sollen erreicht werden. Der Einsatz von Feststoffelektrolyten vermeidet flüssige, leicht entzündliche oder explosive Elektrolyte, die in Lithium-Ionen-Batterietechnologien verwendet werden und zu Sicherheitsrisiken führen können. [8]

3.5 Metall-Ionen-Systeme neben Li-Ionen-Batterien

Analog zur Li-Ionen-Interkalation der Lithium-Ionen-Batterie ergeben sich Metall-Ionen-Systeme mit anderen Ionen. Abhängig vom Metall-Ion ergeben sich mit den neu-

en Eigenschaften der jeweiligen Ionen Auswirkungen auf das komplexe Zusammenspiel der einzelnen Zellkomponenten. Mehrfachgeladene Ionen ermöglichen dabei einen mehrfachen Ladungstransport. [1, 7]

3.5.1 Natrium-Ionen-Batterie

Natrium-Ionen-Systeme werden unter anderem durch die große Verfügbarkeit des Natriums, aber auch anderen Reaktionseigenschaften des Metalls motiviert. Natrium verbindet sich nicht mit Aluminium, weshalb kostengünstigeres Aluminium als Stromsammler für die Anode, im Vergleich zum teureren Kupfer bei Lithium-Ionen-Batterien, verwendet werden kann. Aufgrund der Ionengröße kann kein Grafit als Anode verwendet werden, sondern beispielsweise Hard Carbons, was eine geringere gravimetrische Kapazität aufweist. Es wird im Vergleich zu Lithium-Ionen-Batterien eine parallel verlaufende, zeitlich verzögerte Entwicklung von Natrium-Ionen-Batterien gesehen, bei der ca. 20 bis 30 % Leistungseinbußen zu erwarten sind. [7, 8]

Eine entwickelte Natrium-Ionen-Batterie erreicht nach 1000 Zyklen eine über 82 % der anfänglichen Kapazität bei einer Energiedichte von ca. 290 Wh/kg. Die Wissenschaftler*innen extrapolieren die Energiedichte der Zelle für anwendbare Zellformate auf ca. 160 Wh/kg. [13]

4 Zusammenfassung/Fazit

Zusammenfassen werden in den Ausführungen verschiedene Batterietechnologien beschrieben, sowie Vorteile und Herausforderungen aufgezeigt. Auf Grund der unterschiedlichen Entwicklungsstadien der Technologien, konnten nicht zu allen Systemen die gewünschten Kennzahlen ermittelt werden.

Natrium-Mitteltemperatur-Batterien könnten zukünftig eine günstige Variante für stationäre Speicher darstellen, wenn ähnliche Kennzahlen, wie bei den bereits etablierten Hochtemperaturvarianten, erreicht werden. Für Metall-Schwefel-Batterien liegt das endgültige Design noch nicht fest, weshalb noch nicht abzusehen ist, ob sich zukünftige Anwendungen durch die vermeintlich höhere Energiedichte und die geringeren Schwefelkosten ableiten lassen. Ein erfolgreicher Einsatz von Festkörperelektrolyt könnte dem Selbstentladungsvorgang der Zellen entgegenwirken. Sekundäre Metall-Luft-Systeme stellen Herausforderungen auf allen Ebenen von Material bis zum Zelldesign, weshalb eine baldige Anwendung nicht abzusehen ist. Der Einsatz von Lithium-Metall-Anoden ist könnte durch Feststoffelektrolyten ermöglicht werden. Ob sich eine Kommerzialisierung der Technologie durchsetzt, ist auch von den Materialkosten des Feststoffelektrolyten abhängig. Natrium-Ionen-Batterien könnten sich mit Leistungsabschlägen zu einer günstigen Alternative für Lithium-Ionen-Batterien entwickeln, die für stationäre Speicherung eingesetzt werden können.

Insgesamt zeigt sich an dem aktuellen Entwicklungs-

stand alternativer Batterietechnologien, dass die Konkurrenzfähigkeit mit Lithium-Ionen-Batterien meist an der bisher zu niedrigen stabilen Zyklenzahl und der zu niedrigen Energiedichte scheitert, sodass in den Jahren optimierte Varianten der Lithium-Ionen-Batterie für elektromobile Anwendungen eingesetzt werden. Für stationäre Anwendungen zeigen sich jedoch kostengünstigere und rohstoffschonende Alternativen, die gegenüber der Lithium-Ionen-Technologie deshalb einen Mehrwert haben können.

5 Literatur

- [1] Kompetenzzentrum Lithium-Ionen-Batterien e.V., SZukünftige Batteriesysteme"[Online]. Available: <https://batterie-2020.de/projekte/forschungsfelder/zukuenftige-batteriesysteme/> [Zugriff am 23.01.2021].
- [2] R. Korthauer: Handbuch Lithium-Ionen-Batterien, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2013.
- [3] P. Bieker and M. Winter, Chemie in unserer Zeit 50, Wiley-VCH Verlag GmbH Co. KGaA: Weinheim, 2016, 26-33.
- [4] A. Jossen, W. Weydanz: Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen, Untermeitingen: Inge Reichardt Verlag, 2006.
- [5] B. Scrosati, Lithium batteries John Wiley Sons Inc, Hoboken: New Jersey, 2013.
- [6] M. Doppelbauer, Grundlagen der Elektromobilität, Springer Fachmedien Wiesbaden: Wiesbaden, 2020.
- [7] P. Bieker and M. Winter, Chemie in unserer Zeit 50, Wiley-VCH Verlag GmbH Co. KGaA: Weinheim, 2016, 172-186.
- [8] S. Michaelis et al., Roadmap Batterie-Produktionsmittel 2030, VDMA Verlag GmbH: Frankfurt am Main, 2020.
- [9] T. Hettesheimer et al., Entwicklungsperspektiven für Zellformate von Lithium-Ionenbatterien in der Elektromobilität, Fraunhofer-Allianz Batterien: Pfinztal, 2017.
- [10] European Association for Storage of Energy, "Sodium Sulphur Battery [Online]. Available: https://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2016/03/EASE_TD_NaS.pdf [Zugriff am 23.01.2021].
- [11] L. Mendenbach, Chemical and electrochemical behavior of sulfur and sulfides in electrochemical cells, Friedrich-Schiller-Universität: Jena, 2020.
- [12] M. Shaibani et al., Expansion-tolerant architectures for stable cycling of ultrahigh-loading sulfur cathodes in lithium-sulfur batteries, Science Advances 6, 2020.
- [13] J. Song et al., Controlling Surface Phase Transition and Chemical Reactivity of O₃-Layered Metal Oxide Cathodes for High-Performance Na-Ion Batteries, ACS Energy Lett. 5, 2020, 1718-1725.



Technische
Universität
Braunschweig

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Energiesysteme



Abb.1: Hochenergiebatterien, Quelle: P. Bleker Chemie in unserer Zeit 50, 2016

Überblick und Herausforderungen zukünftiger Batterietechnologien

Oliver Landrath, 25.01.2021

Agenda

Motivation des Themas

Fokussierung der Arbeit

Batteriegrundlagen

Zukünftige Batterietechnologien

Zusammenfassung

Fazit

Motivation des Themas

Verbesserungen der Batterieeigenschaften

Forschungsauftrag Potential neuer
Batterietechnologien im Vergleich zu LIB

Je nach Anwendung unterschiedliche Anforderungen
an Batteriesystemen

Ressourcenabhängigkeit

Fokussierung der Arbeit

Zeitnahen Technologien

Relevanz

Vorteile

Herausforderungen

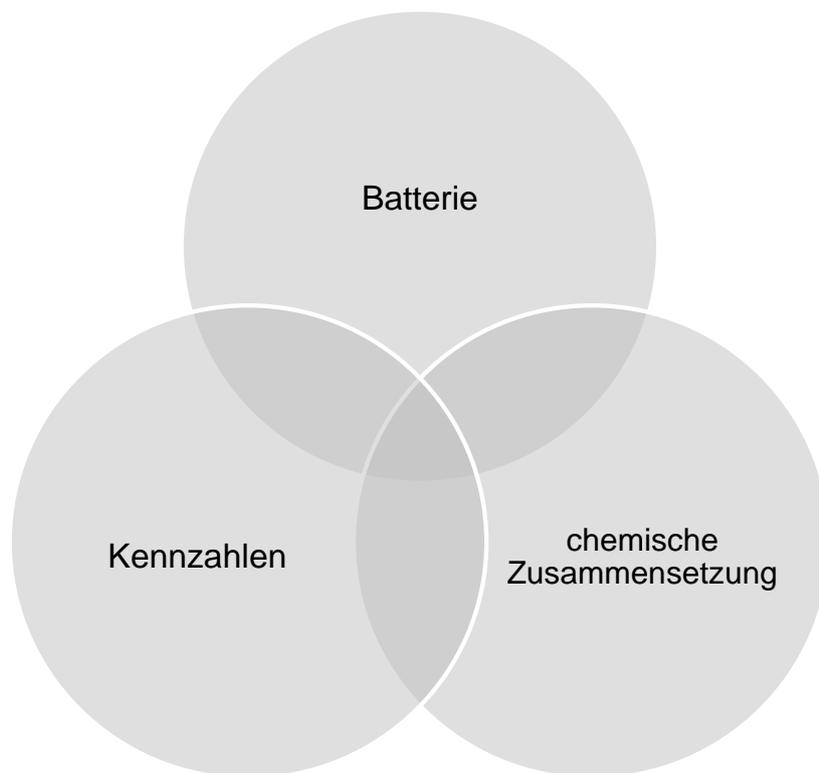
Fokussierung der Arbeit Betrachtete Batterietechnologien

Metall-Schwefel-Batterien

Batteriesysteme mit Lithium-
Metall-Anoden

Metall-Ionen-Systeme neben
Li-Ionen-Batterien

Batteriegrundlagen



Batteriegrundlagen

Aufbau einer Lithium-Ionen-Zelle

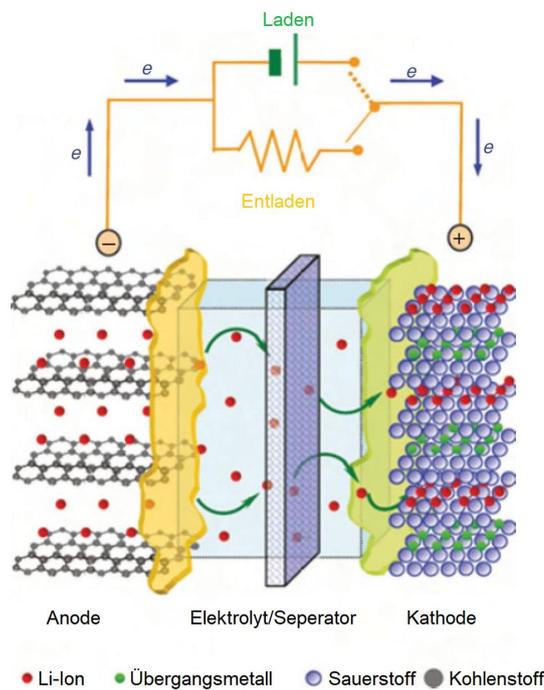


Abb. 2: Aufbau und Funktion einer Lithium-Ionen-Zelle
 Quelle: B. Scrosati, Lithium batteries, 2013.

Batteriegrundlagen

Funktion einer Lithium-Ionen-Zelle

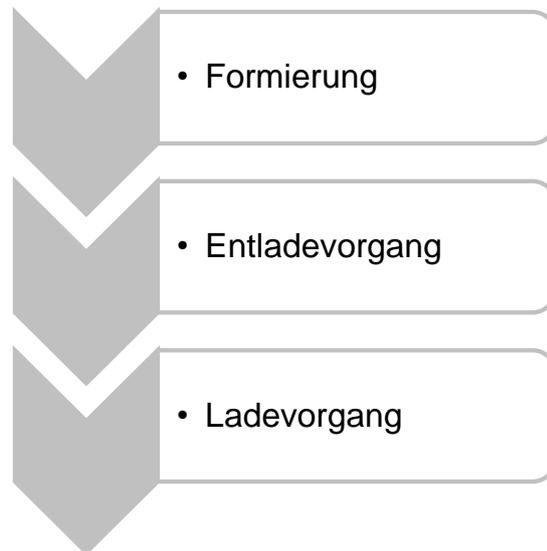
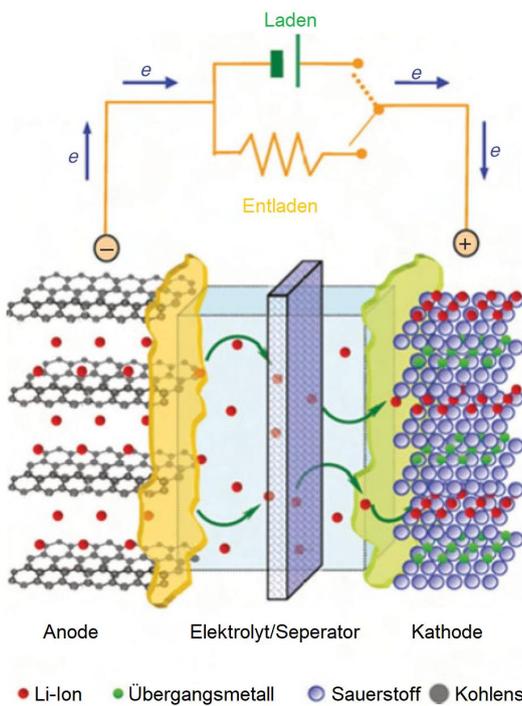


Abb. 2: Aufbau und Funktion einer Lithium-Ionen-Zelle

Quelle: B. Scrosati, Lithium batteries, 2013.

Batteriegrundlagen

Kennzahlen Lithium-Ionen-Zelle

gravimetrische Energiedichte: $250 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}$

volumetrische Energiedichte: $700 \frac{\text{Wh}}{\text{l}}$

Je nach Zellchemie Wirkungsgrad über 90 %

Zyklenstabilität über 1000 Zyklen

Zukünftige Batterietechnologien Metall-Schwefel-Batterien (nicht thermal)

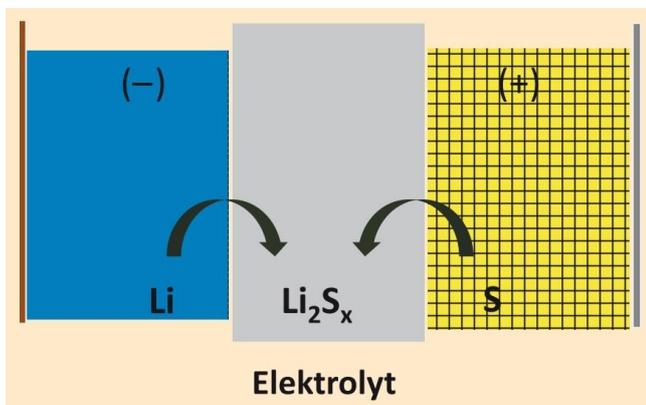
Betrieb bei Raumtemperatur

Für verschiedene Technologien relevant

Batteriesystem ohne Nickel, Mangan und Kobalt

Schwefel in großen Mengen vorhanden

Metall-Schwefel-Batterien Lithium-Schwefel-Batterien



- Entladung: Lithium und Schwefel bilden Sulfide Li_2S und Li_2S_x ($x=2,4,6,8$)
- Ladung: Zurückbildung zu Lithium und Schwefel

Abb. 3: Aufbau und Entladereaktion einer Li-S-Zelle
Quelle: P. Bieker Chemie in unserer Zeit 50, 2016

Lithium-Schwefel-Batterien Herausforderungen

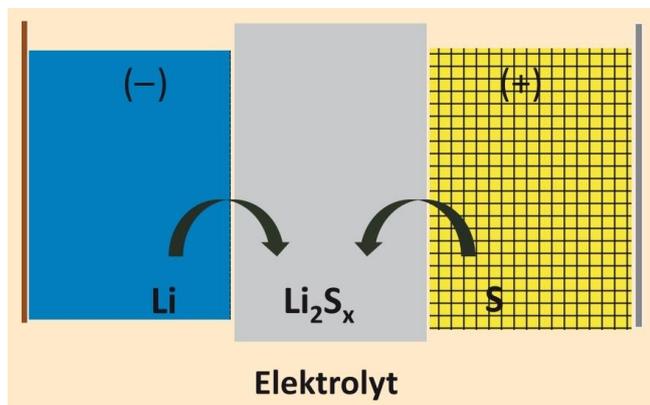


Abb. 3: Aufbau und Entladereaktion einer Li-S-Zelle
Quelle: P. Bieker Chemie in unserer Zeit 50, 2016

Selbstentladung

Reversibilität

Zusätzliches Material
und Volumen nötig

Dendritenbildung

Lithium-Schwefel-Batterien Kennzahlen

gravimetrische Energiedichte: 350 bis 500 $\frac{\text{Wh}}{\text{kg}}$

Umsetzung eines Prototyps im Laborformat 2020:

gravimetrische Energiedichte von über 2000 $\frac{\text{Wh}}{\text{kg}}$

200 Zyklen

Wirkungsgrad über 99 %

Zukünftige Batterietechnologien

Batteriesysteme mit Lithium-Metall-Anoden

Relevant für verschiedene Batterietechnologien:

- Lithium-Ionen-Batterie
- Lithium-Festelektrolyt-Batterie
- Lithium-Schwefel-Batterie
- Lithium-Sauerstoff-Batterie

Maßgebliche Erhöhung der volumetrischen und gravimetrischen Energiedichte

Batteriesysteme mit Lithium-Metall-Anode Herausforderungen

Reaktivität zwischen
Lithium und Elektrolyten

Dendritenbildung

Lösungsansätze:
Beschichtung künstlichen
Membranen, um beide
Prozesse zu unterbinden

Weitere
Herausforderungen in der
Prozesstechnik zur
Herstellung

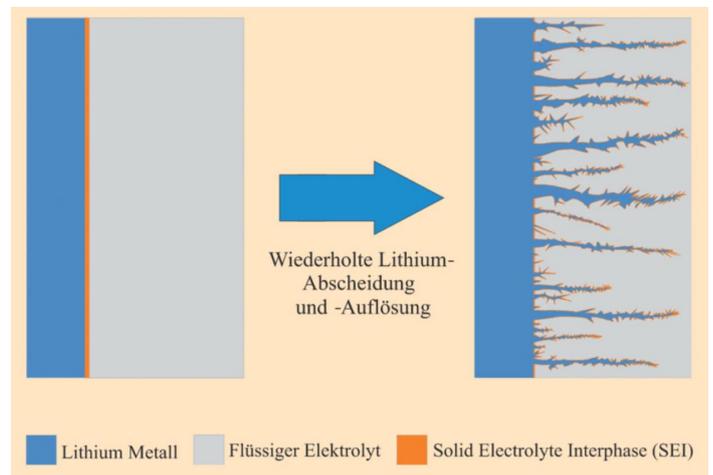


Abb. 4: Bildung von Dendriten

Quelle: P. Bieker Chemie in unserer Zeit 50, 2016

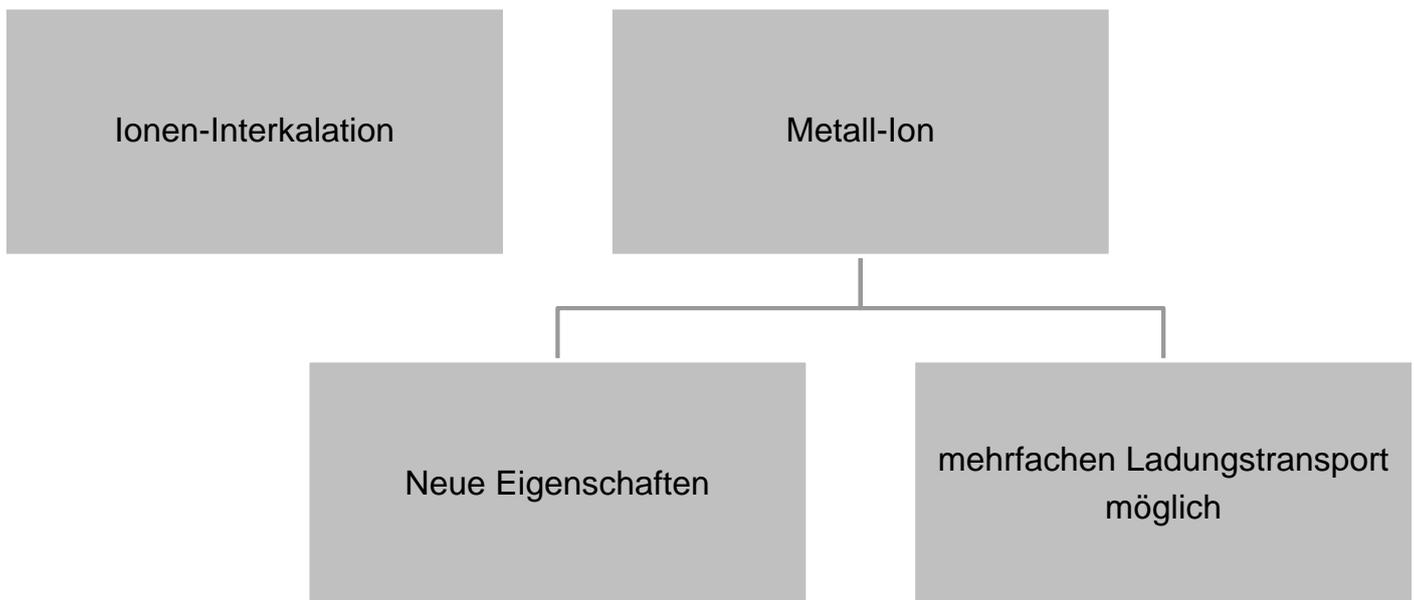
Batteriesysteme mit Lithium-Metall-Anoden Kennzahlen

Mit Einsatz von Festelektrolyten Lithium-Metall-Anoden Anwendungen ermöglichen:

Gravimetrische Energiedichten größer als $350 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}$

Volumetrische Energiedichte größer als $1000 \frac{\text{Wh}}{\text{l}}$

Zukünftige Batterietechnologien Metall-Ionen-Systeme neben Li-Ionen-Batterien



Metall-Ionen-Systeme neben Li-Ionen-Batterien Natrium-Ionen-Systeme

Hohe Verfügbarkeit von Natriumkarbonat

Aluminium als Stromsammlermaterial für Anode

Parallele, zeitlich verzögerte Entwicklung beim Vergleich mit Lithium-Ionen-Batterien

Natrium-Ionen-Systeme Herausforderungen

Aufgrund der Ionengröße: kein Graphit als Anodenmaterial möglich

20 bis 30 % Leistungseinbußen im Vergleich zu Lithium-Ionen-Batterien

Natrium-Ionen-Systeme Kennzahlen

Umsetzung eines Prototyps im Laborformat 2020:

1000 Zyklen

82 % der anfänglichen Kapazität bei einer

gravimetrische Energiedichte von ca. $290 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}$

Extrapolation auf anwendbare Zellformate: ca. $160 \frac{\text{Wh}}{\text{kg}}$

Zusammenfassung

Unterschiedliche Entwicklungsstadien der verschiedenen Technologien

Für Metall-Schwefel-Batterie steht endgültiges Design noch nicht fest:

- höhere Energiedichten und geringere Schwefelkosten Vorteile für zukünftige Anwendungen

Einsatz von Feststoffelektrolyt

- Einsatz von Lithium-Metall-Anoden erfolgen
- Selbstentladung (LiS-Batterie) entgegenwirken

Kommerzialisierungen der Technologien

- abhängig von Umsetzung und Materialkosten der Feststoffelektrolyten

Natrium-Ionen-Batterien für stationäre Speicher

Fazit

Für mobile Anwendungen:
alternative Batterietechnologien bei
aktuellem Entwicklungsstand aufgrund
geringer Zyklenzahl bei hoher
Energiedichte momentan nicht
konkurrenzfähig

- Optimierte Lithium-Ionen-Zellen werden
in den nächsten 10 bis 20 Jahren in
Anwendungen für Elektrofahrzeuge
dominieren
- möglicher Nachfolgekandidat:
 - Lithium-Schwefel-Batterie mit
Festkörperelektrolyt

Für stationäre Anwendungen:
kostengünstigere und rohstoffschonende
Alternativen, die gegenüber der Lithium-
Ionen-Technologie einen Mehrwert
haben können

Zusammensetzung und Eigenschaften von CuCr Plasmen im Vakuum

Composition and properties of CuCr plasmas in vacuum

Felten Feldt

Institut für Hochspannungstechnik und elektrische Energieanlagen - ELENIA, Braunschweig, f.feldt@tu-bs.de

Kurzfassung

Die Arbeit beschäftigt sich mit der Zusammensetzung und den Eigenschaften von CuCr Plasmen in Vakuumschalter beim Ausschaltvorgang. Hierfür wurde eine Literaturrecherche durchgeführt und das Augenmerk lag dabei auf der Arbeit von M.Lysniak [1]. In diesem Paper werden die Spektrallinien von CuCr Plasmen im diffusen Modus mittels spektroskopischer Untersuchungen analysiert. Es werden die Spektrallinien von Cu I-III, sowie Cr I-III in einem Wellenlängenbereich vom 350–810 nm angeschaut. Die axialen Verteilungen des emittierten Lichts von verschiedenen Ionisationszuständen werden vorgestellt und diskutiert.

Abstract

The work deals with the composition and properties of CuCr plasmas in vacuum circuit breakers during the switch-off. Therefore a literature search was carried out and the focus was on the work of M.Lysniak [1]. This paper analyzes the spectral lines of CuCr plasmas in diffuse mode by spectroscopic studies. The spectral lines of Cu I-III, as well as Cr I-III in a wavelength range from 350-810 nm are considered. Analysis of axial distributions of emitted light, which originates from different ionization states, is presented and discussed.

1 Einleitung

Vakuumschalter gehören zu der Klasse der Leistungsschalter und sind in der Mittelspannungsebene weit verbreitet. Ihre Aufgabe ist es, im Nenn- sowie Fehlerfall die Leitung freizuschalten. Bei diesem Schaltvorgang entsteht ein leitfähiges Plasma zwischen den Kontakten und es bildet sich ein Lichtbogen aus. Der Vakuumschalter muss die Spannungsfestigkeit wieder herstellen. [1]

Ziel dieser Arbeit ist ein besseres Verständnis der spektralen Analyse von Vakuumbögen für die eigenen Forschungsperspektiven.

Das leitfähige Plasma, welches beim Schalten entsteht, setzt sich aus Ionen, Elektronen und einem Rest neutraler Teilchen zusammen. Es kommt zu einem Auftreten von Leuchtphänomenen durch Photonenemission. Es bildet sich ein Vakuumbogen zwischen den Elektroden aus, welcher von dem Abbrand der Elektroden mit Materie versorgt wird. Der Modus des diffusen Bogens, ein leitendes Plasma ohne klar definierte Grenzen, wird mit Hilfe der optischen Emissionsspektroskopie (OES) untersucht. Da die Materie nur eine charakteristische Strahlung aussendet und die Spektrallinien sich in einigen Regionen überlappen, war die Herausforderung die Differenzierung der einzelnen Spektrallinien. [1]

2 Grundlagen Strahlung

Zunächst wird erläutert, weshalb das Plasma emittiert. Ein Atom gibt ein Photon ab bzw. emittiert Licht, wenn es von einem höheren in ein niedrigeres Energieniveau übergeht. Wird ein Atom angeregt, so geht es in ein höheres Energieniveau über und relaxiert nach kurzer Zeit. Bei diesem Vorgang wird ein Photon abgegeben. Die Anregung kann auf unterschiedlichen Wegen erfolgen. Eine Möglichkeit ist die Wechselwirkung von Materie mit Photonen. Die zwei grundlegenden Prozesse hierbei werden in Abbildung 1 dargestellt. Das Atom absorbiert ein Photon (a). Die notwendige Bedingung hierfür ist, dass die Energie des Photons mindestens der Energiedifferenz zweier Energieniveaus entsprechen muss. Ist diese Bedingung gewährleistet, kann das Photon absorbiert werden und das Atom geht in ein höheres Energieniveau über. Anschließend geht das Atom wieder in seinen Grundzustand über und emittiert dabei ein Photon (b). Die Energie des Photons kann aus der Multiplikation des Plank'schen Wirkungsquantums mit der Frequenz beschrieben werden, welche der Differenz von E_2 und E_1 entspricht. [5]

Eine weitere Möglichkeit ist die Wechselwirkung von Elektronen mit der Materie. Hierbei wird von Stoßprozessen gesprochen. Es wird zwischen zwei verschiedene Arten von Stößen unterschieden, dem elastischen und dem unelastischen Stoß. Die Energie der Elektronen wird durch ihre kinetische Energie beschrieben, welche sie durch das elektrische Feld erfahren, das zwischen den Elektronen existiert. Bei niedrigen Energien kommt es zu elastischen

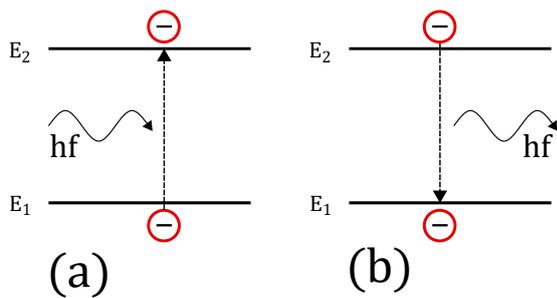


Abbildung 1 (a) Absorption eines einfallenden Photons, (b) spontane Emission vgl. [5]

Stößen, wobei fast keine Energie verloren geht und sich lediglich die Flugbahn der Elektronen ändert. Erhöht sich die Energie der Elektronen, kommt es vermehrt zu unelastischen Stößen. Die Elektronen geben einen Teil ihrer Energie an den Stoßpartner ab. Die abgegebene Energie muss mindestens der Energiedifferenz zweier Energieniveaus des Stoßpartners entsprechen. Mit der neu gewonnenen Energie wird das Atom angeregt und geht in ein höheres Energieniveau über. Mit steigender kinetischer Energie kommt es dann auch zur Ionisation der Stoßpartner. Nach kurzer Zeit relaxiert das Atom auch hier und gibt dabei ein Photon ab. [5]

Die Strahlung der Materie setzt sich aus definierten Übergängen unterschiedlicher Ionisationsgrade zusammen. Es wird hier von der charakteristischen Strahlung gesprochen.

3 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau in der untersuchten Veröffentlichung von Lysniak [1] besteht aus drei Hauptkomponenten, einem Hochstromgenerator, einem Vakuumschalter und einem Messsystem. Der Generator besteht aus 30 Kondensatoren ($525 \mu F$), welche parallel in fünf Gruppen verschaltet sind. In Reihe zu jeder Gruppe wird dann eine Induktivität ($4700 \mu H$) geschaltet und schließlich gibt es in Reihe zu dieser Kombination noch eine weitere Induktivität ($2730 \mu F$). Dieser Aufbau kann auf $18 kV$ geladen werden und wird genutzt, um einen 50 Hz AC Strom mit einem maximalen Spitzenwert von $15 kA$ zu erzeugen.

Der Vakuumschalter hat zwei CuCr Elektroden mit einem Durchmesser von je 20 mm . In dem Versuchsaufbau ist die Kathode beweglich und die Anode ist fest verbaut. Die Vakuumkammer, in welcher sich der Schalter befindet, ist mit Glasscheiben ausgestattet, um eine optische Untersuchung des Bogens zu gewährleisten.

Für die optischen Untersuchungen gibt es ein Spektrometer. Das Spektrometer ACTON SP2500 ist in Kombination mit reflektierenden und fokussierenden Spiegeln aufgebaut. Des Weiteren ist das Spektrometer mit zwei verschiedenen Gittern ausgestattet, die Gitter geben die

Auflösung des Spektrums an. Für einen Überblick des Spektrums wurde ein Gitter mit einer Gitterkonstante von 150 g/mm verwendet. Hierbei hat das Spektrum eine Breite von 120 nm . Um eine höhere Auflösung zu erreichen wurde ein Gitter mit einer Gitterkonstante von 1800 g/mm verwendet. Die Breite des Spektrums beträgt nun 12 nm .

4 Messverfahren

Der Vakuumbogen wird mit Hilfe der optischen Emissionsspektroskopie (OES) untersucht. Das Spektrum wird mit einer spezifischen Belichtungs- bzw. Integrationszeit aufgenommen, welches in Abbildung 2 veranschaulicht ist. Es ist zu erkennen, dass das Spektrum zum Zeitpunkt des Strompeaks t_1 mit einer spezifischen Integrationszeit aufgenommen wird, dargestellt durch die grau schraffierte Fläche. Aufgrund dieses Zeitintervalls befindet sich die Kathode bei den Aufnahmen an keinem exakten Punkt, da diese sich während der Aufnahme bewegt. In der Arbeit von M. Lysniak wird eine Belichtungszeit von $200 \mu s$ verwendet.

Eine Besonderheit dieser Arbeit ist die Aufteilung des Zwischenraums der Elektroden. Es wird zwischen drei verschiedenen Regionen differenziert: Anoden Zone (I), Kathoden Zone (II) und Bogensäulen Zone (III). Alle drei Gebiete weisen ungefähr eine gleiche Länge auf.

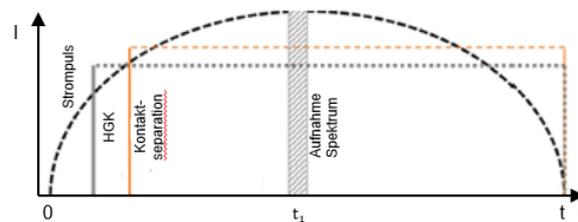


Abbildung 2 Aufnahme des Spektrums vgl. [1]

5 Ergebnisse

In Abbildung 3 ist eine Übersicht des Spektrums dargestellt. Hierfür wurden vier Aufnahmen mit den kleineren Auflösung nebeneinander gesetzt. Die Aufnahmen wurden bei einem Strom von $2,3 \text{ kA}$ aufgenommen, während der Elektrodenabstand h $4,5 \text{ mm}$ betrug. Das Spektrum jeder Zone ist in verschiedenen Farben aufgetragen und vereinzelt wurde einige einzelne Spektrallinien zugeordnet.

Im Laufe der Arbeit wird ein schmaler spektraler Bereich ($505\text{-}520 \text{ nm}$) betrachtet. In diesem Bereich befinden sich drei Spektrallinien von Cu. Die drei Linien von je einem Ionisierungsgrad sind klar voneinander abgegrenzt, was in den Abbildung 4 und 5 dargestellt wird.

Im Gegensatz zur Übersicht sind die Spektrallinien farblich gekennzeichnet um sie ihrem Ionisierungsgrad zuzuordnen.

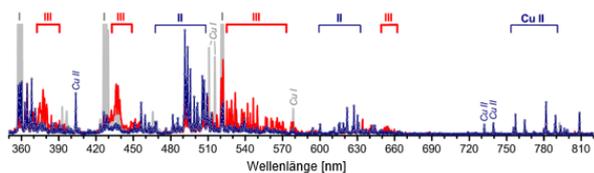


Abbildung 3 Übersicht des Spektrums mit CuCr Elektroden, $I = 2.3$ kA, $h = 4.5$ mm, Integrationszeit = $200 \mu\text{s}$, die graue Linie repräsentiert die Zone I, die blaue Linie ist für die Zone II und die rote Linie ist für die Zone III. [1]

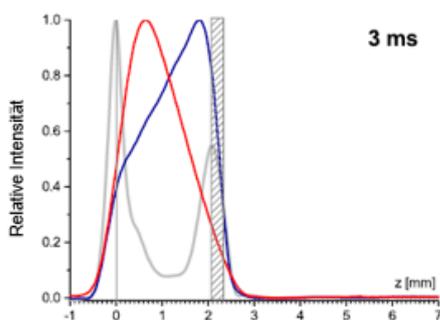


Abbildung 4 Übersicht der Verteilung zwischen den Kontakten von jeweils drei Spektrallinien, bei $t = 3$ ms und $I = 2,3$ kA, grau Cu I 510,55 nm, blau Cu II mit 508,84 nm, rot Cu III mit 513,07 nm. [1]

nen zu können: grau für Cu I, rot für Cu II und schließlich blau für Cu III. Die Anode befindet sich bei $z = 0$. Die Kathode bewegt sich während der Aufnahme und die Position der Kathode wird durch den grau schraffierten Bereich symbolisiert. In Abbildung 4, welche nach 3 ms aufgenommen wurde, ist zu erkennen, dass sich zwei Maxima von Cu I ausbilden. Das erste Maximum ist bei der Anode ($z = 0$) und ein zweites Maximum mit geringerer Intensität bei der Kathode ($z = 4,6 - 4,9$). Die Intensität von Cu I zwischen den Elektroden ist jedoch nicht sehr ausgeprägt. Die Maxima von Cu II und III befinden sich zwischen den Elektroden. Das Maximum von Cu III ist nahe der Anode und im Gegensatz dazu befindet sich das Maximum von Cu II in der Nähe der Kathode.

Wird nun der Elektrodenzwischenraum bei 5 ms betrachtet, so ist zu erkennen, dass die Intensitäten der Maxima von Cu I vertauscht sind. Es befinden sich nun mehr einfach ionisierte Atome an der Kathode als an der Anode. Die Verteilung von Cu II und III hat sich schematisch nicht geändert.

6 Diskussion

Gortschakow beschäftigt sich in seiner Arbeit [4] mit einem Spektrum, welches nach dem Stromnulldurchgang aufgenommen wurde. Er verwendete hierfür die Absorptionsspektroskopie. Dieses Verfahren war notwendig, da die Intensität der Spektrallinien nach dem Stromnull-

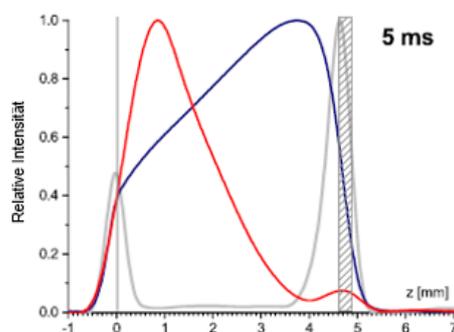


Abbildung 5 Übersicht der Verteilung zwischen den Kontakten von jeweils drei Spektrallinien, bei $t = 5$ ms und $I = 2,3$ kA. [1]

durchgang nicht mehr so intensiv ist. Er bestätigt aber das Verfahren der OES, wenn das Spektrum während der aktiven Phase betrachtet wird. Die OES wird für Studien verwendet während der aktiven Phase oder in der Nähe des Stromnulldurchgangs. [6]

Eine Arbeit, die sich mit der aktiven Phase beschäftigt, ist die von Schoenemann [3]. Es wird der Zeitpunkt des Strompeaks betrachtet, sowie einige Zeitpunkte auf der abfallenden Flanke der Stromhalbwellen. Der grundlegende Forschung ist die Gleiche, nur dass ein anderes Isoliermedium verwendet wird. Es wird das Medium CF₄-Gas benutzt. Des Weiteren liegt der Fokus bei der Arbeit [3] auf dem Druck und der Temperatur und bei der Arbeit [1] auf der Zusammensetzung. In beiden Fällen wird jedoch die Strahlung des Lichtbogenplasmas analysiert, es bleibt kritisch zu bewerten in wie fern sich das Isoliermedium auf das allgemeine Verhalten des Schaltplasmas auswirkt. Er schreibt, dass das Lichtbogenplasma meistens als homogen angenommen werden kann und es sich dementsprechend in einem lokalen thermodynamischen Gleichgewicht (LTG) befindet. Befindet sich das Plasma in einem LTG, so wird es durch eine einheitliche Temperatur charakterisiert. Tritt dieser Idealfall auf und das Plasma ist räumlich homogen, so würde es genügen, wenn die absolute Intensität mit nur einem Strahlungsübergang ausgewertet wird.

Wird die Arbeit von Lysniak [1] mit dem Paper von Methling [2] verglichen, so gibt es die meisten Gemeinsamkeiten. Es wird hier das Isoliermedium des Vakuums verwendet und die Aufnahme des Spektrums erfolgt zum Strompeak. Des Weiteren wird der Elektrodenzwischenraum in drei Teilgebiete aufgeteilt. Zunächst werden die axialen Verteilungen von einzelnen ausgewählten Spektrallinien betrachtet. Es wird gezeigt, dass jeder Ionisationszustand seine eigene Intensitätsverteilung im Elektrodenzwischenraum hat.

Es stellt sich die Frage, was passiert, wenn die Messungen bei höheren Strömen durchgeführt werden. Bei den zuvor genannten Arbeiten wurde das Plasma betrachtet, bevor es zum Auftreten von Anoden Spots kommt. Die Kathode spielt die Hauptrolle der Materialversorgung des Plasmas,

welches sich mit steigender Stromstärke ändert. Überlegungen hierzu hat sich Methling in seiner Arbeit [2] gemacht. Erhöht sich der Strom, so kommt es vermehrt zum Auftreten von Kathoden Spots und die Verdampfungsrate der Anode steigt signifikant an. Dies hat zur Folge, dass die atomare Dichte im Elektrodenzwischenraum ansteigt. Daraus resultieren mehr Kollisionen innerhalb der Materie, was zu einer Reduktion des durchschnittlichen Ladungszustands führt. Bei steigender Stromstärke erhöht sich aber der Energietransfer ins Plasma und die Leistungsdichte steigt. Daraus folgt eine erhöhte Erwärmung und eine Steigerung des durchschnittlichen Ladungszustands. [2] Das sind alles nur Spekulationen und es werden weitere Experimente benötigt um diese Frage beantworten zu können.

7 Zusammenfassung

Es wurde eine Literaturrecherche zur OES von CuCr Plasmen durchgeführt, welche sich mit atomaren und ionischen Spektrallinien von Cu und Cr beschäftigt. Das in dieser Arbeit vorliegende Spektrum wurde zum Zeitpunkt des Strompeaks aufgenommen. Die meisten Spektrallinien konnten mit Hilfe von unterschiedlichen Datenbanken zugeordnet werden, wobei einige Spektrallinien nicht identifiziert werden konnten. Um sich einen Überblick zu verschaffen, wurde zu Beginn das Spektrum mit einer kleinen Auflösung aufgenommen. Anschließend wurde ein spezifischer Bereich ausgewählt und genauer beleuchtet. Dabei wurde festgestellt, dass die Maxima der unterschiedlichen Ladungszustände sich an unterschiedlichen Orten zwischen den Elektroden befinden. Die atomaren Spektrallinien von Cu und Cr weisen je ein Maximum an den Elektroden auf und haben eine geringe Dichte im Zwischenraum. Das Maximum von einfach ionischen Emissionslinien befindet sich im Zwischenraum der Elektroden auf der Kathodenseite. Im Elektrodenzwischenraum hin zur Anode findet sich das Maximum von zweifach ionischen Spektrallinien.

8 Literatur

- [1] M. Lisnyak, A. V. Pipa, S. Gorchakov, S. Iseni, St. Franke, A. Khapour, R. Methling, and K.-D. Weltmann: Overview spectra and axial distribution of spectral line intensities in a high-current vacuum arc with CuCr electrodes, 2015
- [2] Methling, Ralf; Gorchakov, Sergey; Lisnyak, Marina V.; Franke, Steffen; Khakpour, Alireza; Popov, Sergey A.; Batrakov, Alexander V.; Uhrlandt, Dirk; Weltmann, Klaus-Dieter: Spectroscopic Investigation of a Cu—Cr Vacuum Arc
- [3] Dr.-Ing. Thomas Schoenemann, Dr. Sergey Gorchakov, Prof.Dr. Dirk Uhrlandt, Prof. Dr. Klaus-Dieter Weltmann: Einsatz optischer Analysemethoden zur Charakterisierung von Schaltlichtbögen
- [4] Sergey Gortschakow; Sergey Popov; Alireza Khak-

pour; Anton Schneider; Ralf Methling; Steffen Franke; Dirk Uhrlandt: Cu and Cr Density Determination during High-Current Discharge Modes in Vacuum Arcs

- [5] Krieger, H.: Strahlenphysik, Dosimetrie und Strahlenschutz. ISBN: 978-3-663-11534-2
- [6] A. Khakpour, St. Franke, R. Methling, D. Uhrlandt, S. Gortschakow, S. A. Popov, A. V. Batrakov, and K. D. Weltmann: Time and space resolved video spectroscopy of the vacuum arc: formation of anode spot type 1 and type 2



Technische
Universität
Braunschweig

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Energiesysteme



Eigenschaften und Zusammensetzung von CuCr Plasmen im Vakuum

Felten Feldt, 25.01.2021

Agenda

1. Motivation



2. Grundlagen



3. Hauptteil



4. Zusammenfassung



Agenda

1. Motivation



2. Grundlagen

3. Hauptteil

4. Zusammenfassung

Motivation

- Schalten erzeugt Plasma
- Plasma emittiert Licht
- Spektroskopische Untersuchungen
- Aussagen über Zusammensetzung und Eigenschaften der Materie
- Verbessertes Verständnis spektroskopischer Untersuchungen
- Literaturrecherche

Agenda

1. Motivation

2. Grundlagen

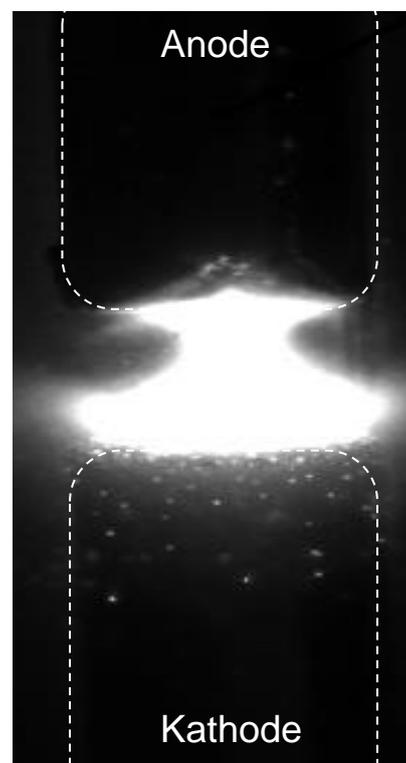


3. Hauptteil

4. Zusammenfassung

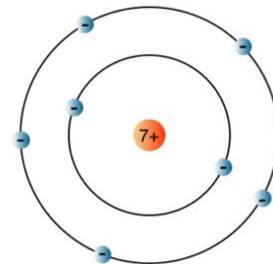
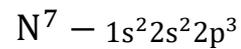
Grundlagen

- Leitendes Plasma emittiert Licht
- Wechselwirkung Photonen mit Materie
 - Notwendige Bedingung
- Wechselwirkung Elektronen mit Materie
 - Stoßprozesse



Grundlagen

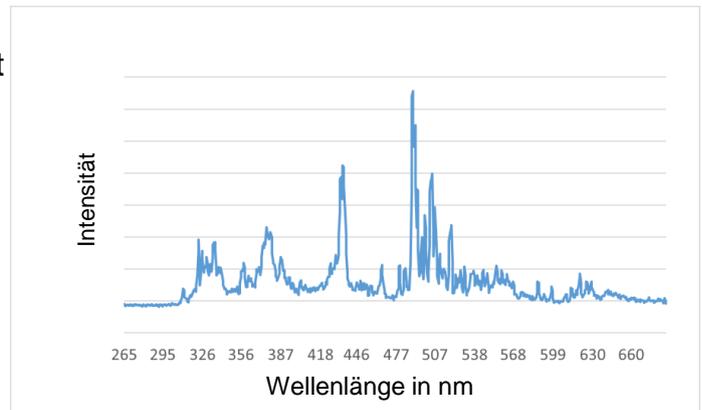
- Bohrsche Atommodell
- Beispiel Stickstoff N
 - Grundzustandskonfiguration
- Elektronenkonfiguration
 - Schale - $2s^2$
 - Unterschale - $2s^2$
 - Anzahl der Elektronen - $2s^2$
- Übergänge zwischen den Energieniveaus



Wellenlänge in nm	Übergang
Cu I 324.75	$3d^{10}4s \rightarrow 3d^{10}4p$
Cu I 327.39	$3d^{10}4s \rightarrow 3d^{10}4p$

Grundlagen

- Charakteristische Strahlung
- Linienspektrum
- Intensitätsverteilung entlang der Achse ist von der Wellenlänge abhängig
- Spektrallinien der Atome



Agenda

1. Motivation

2. Grundlagen

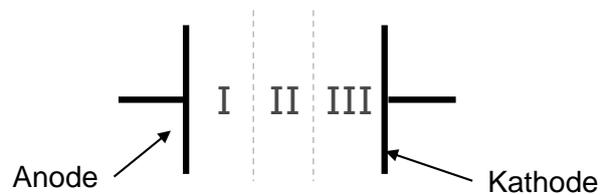
3. Hauptteil



4. Zusammenfassung

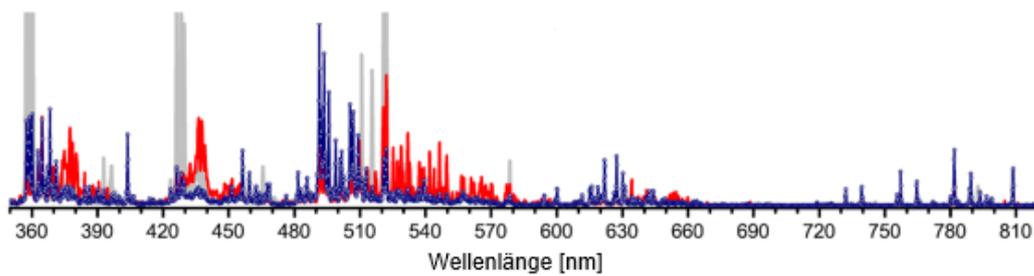
Hauptteil

- Versuchsaufbau
- Hochstromgenerator
 - Spitzenwert bis 15 kA
- Vakuumschalter
 - Schaltkammer inkl. Fenster
- Messsystem
 - Spektrometer inkl. 2 verschiedene Gitter
- Aufteilung in 3 Zonen



Hauptteil

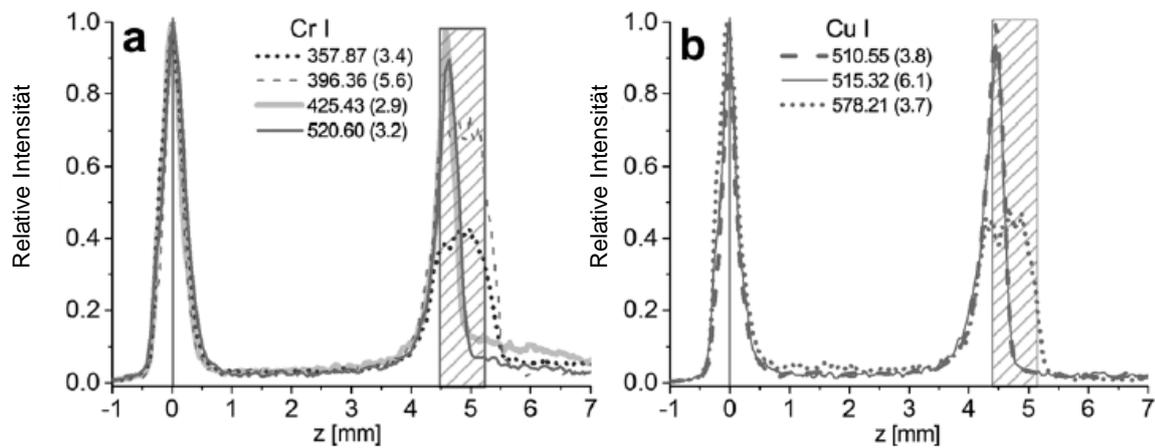
- Übersicht des Spektrums
- Zeitpunkt Strompeak (diffuser Bogen)
- Versuchsparameter: $I = 2,3 \text{ kA}$; $z = 4,5 \text{ mm}$, Integrationszeit = $200 \mu\text{s}$
- 4 Aufnahmen mit der kleineren Auflösung



Quelle – [1]

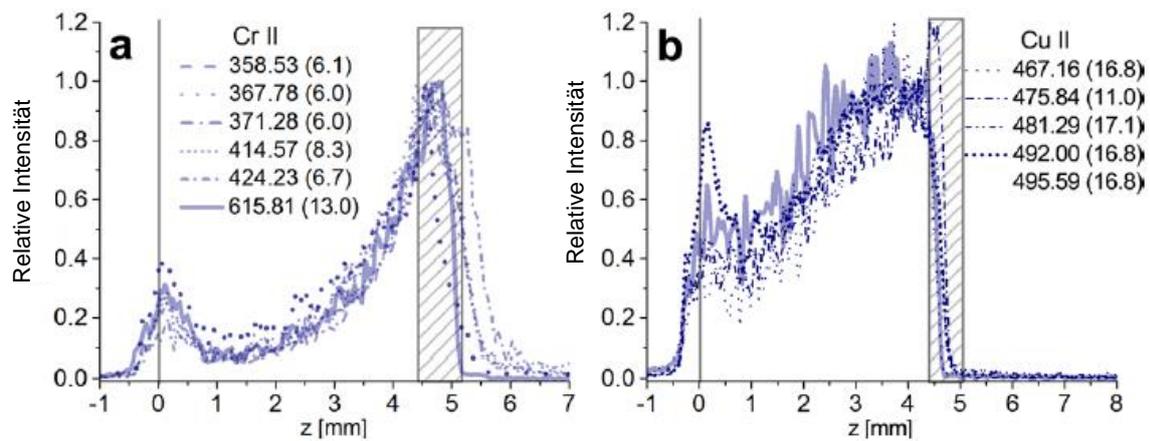
Hauptteil

- Atomare Spektrallinien
- Anode $z = 0$ mm ; Kathode $z = 4,5 - 5,2$ mm



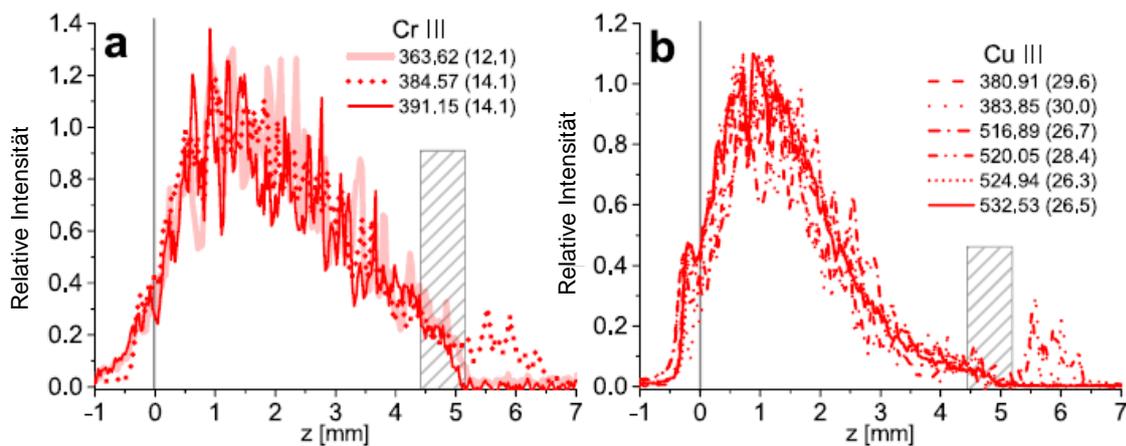
Hauptteil

- Einfach ionische Spektrallinien
- Leichtes Rauschen



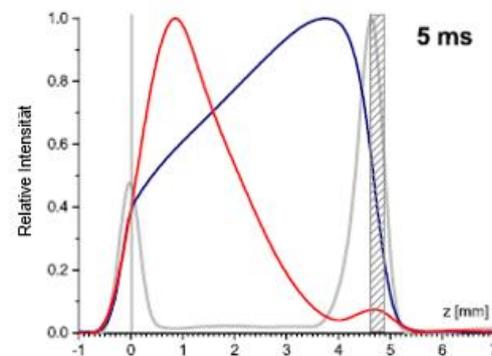
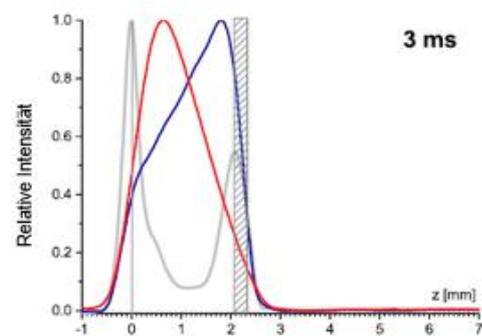
Hauptteil

- Zweifach ionische Spektrallinien
- Starkes Rauschen
- Schwache Intensität



Hauptteil

- Spektraler Bereich (505 – 520 nm)
- 3 Spektrallinien von Cu
 - Cu I 510,55nm in grau
 - Cu II 508,84nm in blau
 - Cu III 513,07nm in rot
- Position Ionisationszustände
 - Atomisch an den Elektroden
 - Einfach ionisch nahe der Kathode
 - Zweifach ionisch nahe der Anode



Quelle – [1]

Agenda

1. Motivation

2. Grundlagen

3. Hauptteil

4. Zusammenfassung



Zusammenfassung

- Aufnahme Spektrum des diffusen Bogens
 - Zum Strom Peak
- Aufteilung Elektrodenzwischenraumes
- Spezifische Intensitätsverteilung für die Ionisationszustände

Zustand	z [mm]	E_i [eV]	E [eV]
Cr I	0; 4.5	6.77	[2.9–7.8]
Cu I	0; 4.5	7.73	[3.8–7.7]
Cr II	4.3	16.50	[6–7]; [8–10]; [13–14]
Cu II	3.9	20.29	[10–11]*; [15–18]
Cr III	1.4	30.96	[11–14]
Cu III	1.1	36.83	26–30

Zusammenfassung

- Gedankenspiel
- Verdampfungsrate der Elektroden steigt
 - Atomare Dichte im Zwischenraum steigt
 - Mehr Kollisionen und Reduktion durchschnittliches Ladungsniveau
- Erhöhter Energietransfer ins Plasma
 - Erhöhte Erwärmung
 - Steigerung durchschnittliches Ladungsniveau

Quellen

- [1] M. Lisnyak, A. V. Pipa , S. Gorchakov, S. Iseni, St. Franke , A. Khapour , R. Methling, and K.-D. Weltmann: Overview spectra and axial distribution of spectral line intensities in a high-current vacuum arc with CuCr electrodes, 2015
- [2] Methling, Ralf; Gorchakov, Sergey; Lisnyak, Marina V.; Franke, Steffen; Khakpour, Alireza; Popov, Sergey A.; Batrakov, Alexander V.; Uhrlandt, Dirk; Weltmann, Klaus-Dieter: Spectroscopic Investigation of a Cu—Cr Vacuum Arc
- [3] Krieger, H.: Strahlenphysik, Dosimetrie und Strahlenschutz. ISBN: 978-3-663-11534-2

Ende

Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit !



25.01.2021 | Felten Feldt | Metalldampfspektren | Seite 20



Vakuumschalter in der Hochspannungsebene: Technologie, Design und Anforderungen

Vacuum switches in the high-voltage level: technology, design and requirements

Kai Neumann

Institut für Hochspannungstechnik und elektrische Energieanlagen – **elenia**, Braunschweig, kai.neumann@tu-bs.de

Kurzfassung

Dieser Bericht beinhaltet eine Zusammenfassung über Vakuumschalter. Dabei wird auf die zunehmende Bedeutung der Vakuumtechnik, die elektrischen Eigenschaften des Vakuums und den Aufbau mit der Funktionsweise des Vakuumschalters eingegangen. Im weiteren wird der Verlauf der Entwicklung bis zum heutigen Zeitpunkt gezeigt. Design und Anforderungsaspekte werden betrachtet. Dazu folgt ein Vergleich mit anderen Technologien, wobei mögliche Kombinationsmöglichkeiten aufgezeigt werden. Abschließend wird der heutige Stand der Vakuumtechnik zusammengefasst und eine Prognose zur weiteren Entwicklung abgegeben.

Abstract

This report contains a summary about vacuum switches. It describes the increasing importance of vacuum technology, the electrical properties of the vacuum and the design and operation of the vacuum switch. In the further the course of the development up to the present time is shown. Design and requirement aspects are considered. In addition a comparison with other technologies follows, whereby possible combination possibilities are pointed out. Finally, the current state of vacuum technology is summarized and a prognosis for further development is given.

1 Einleitung

Zu den Aufgaben von Leistungsschaltern gehört es Betriebsströme und Kurzschlussströme zu schalten. Dabei gelten die Schaltung von Betriebsströme als normale, die Schaltung von Kurzschlussströmen als abnormale Schaltbehandlung. [1] Eingesetzt werden dazu aktuell gasisolierte Leistungsschalter, wozu das Isoliergas Schwefelhexafluorid (SF_6), sowie Vakuumschalter, welche das Vakuum als Isolation nutzen. Leistungsschalter, welche Öl oder Luft als Isoliermedium nutzen werden bei Neuanlagen nahezu nicht mehr verbaut und sind somit vor allem in Bestandsanlagen zu finden. [2] SF_6 in etwa 22.800-mal so schädlich für die Umwelt wie das Treibhausgas Kohlenstoffdioxid (CO_2) [3]. Aus diesem Grund wird nach alternativen Möglichkeiten gesucht die SF_6 -Technologie zu ersetzen. Neben alternativen Isoliergasen hat sich die Vakuumtechnik für gewisse Spannungsebenen bereits etabliert. Vakuumschalter nutzen ein Vakuum als isolierendes Medium. Aufgrund des Vakuums werden keine klimaschädlichen Gase eingesetzt, was diese Technologie als CO_2 -neutral gelten lässt. Darüber hinaus haben Vakuumschalter weitere gute Eigenschaften, wie Wartungsfreiheit, hohe Nutzungsdauer und keine Zersetzungsprodukte aufgrund der entstehenden Wärme im Schaltvorgang [3].

2 Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel wird auf die Isolationseigenschaften des Vakuums eingegangen. Zudem werden das Funktionsprinzip und der Aufbau der Vakuumschaltkammer erläutert. Abschließend werden die Aufgaben der Kontakte in der Vakuumschalter beschrieben.

Die Grundidee zum Einsatz von Vakuum als Isolationsmedium geht auf Überlegungen des Physikers Friedrich Paschen aus dem Jahre 1889 zurück. Dieser untersuchte die Isolationseigenschaften von verschiedenen Medien in Abhängigkeit vom Abstand und Druck. [1]

Weitere Untersuchungen zeigten später, dass sich unter einem Druck von 1×10^{-2} ein Betriebsvakuum einstellt [4, 2]. Eine Übersicht zu den Durchschlag-Blitzstoßspannungen der Isolationsmedien SF_6 , Vakuum, Luft und Öl ist in Abbildung 2.1 dargestellt. Dabei zeigt sich, dass Vakuum für Blitzstoßspannungen bis etwa 175 kV, SF_6 für Blitzstoßspannungen ab etwa 175 kV die besseren Isolationseigenschaften besitzt.

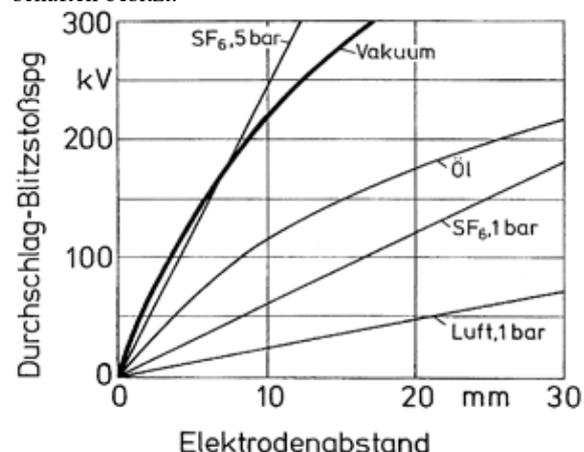


Abbildung 2.1 Durchschlag-Blitzstoßspannungen verschiedener Medien in Abhängigkeit vom Abstand [5]

2.1 Technologie Vakuumschalter

Bei der Kontakttrennung im Allgemeinen entsteht ein Lichtbogen. Aufgabe der Leistungsschalter ist es diesen zu löschen. Bei Vakuumschaltern wird aufgrund des Vakuums von einem Vakuumbogen gesprochen. Dieser wird mit dem Stromnulldurchlauf gelöscht. Eine Rückzündung des Vakuumbogens wird aufgrund der elektrischen Durchschlagsfestigkeit des Vakuums verhindert. [4] Vakuumschalter eignen sich aufgrund des genannten Löschrinzips ohne Anpassungen und Erweiterungen ausschließlich für Wechselstromanwendungen [6].

Der Aufbau der Vakuumschaltkammer ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Zentrale Elemente bilden dabei die Schaltkontakte, auch Elektroden genannt. Hier findet der Schaltvorgang statt. Umgeben sind diese von verschiedenen Schirmen zur Aufnahme des bei der Schaltung entstehenden Metaldampfs. Die Elektrode, welche mit dem Antrieb verbunden ist, wird zudem von einem Faltenbalg abgedichtet. [1]

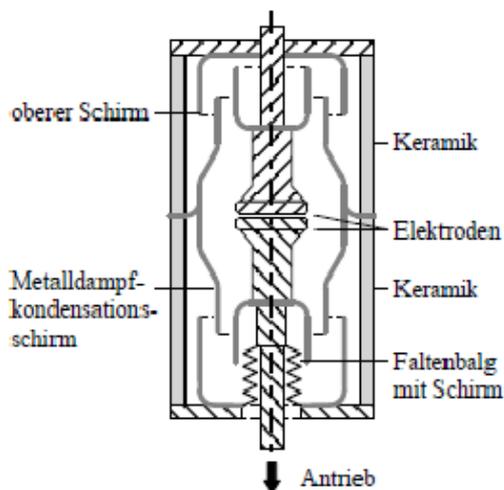


Abbildung 2.2 Aufbau einer Vakuumschaltkammer[1]

3 Hauptteil / Erkenntnisse

Die Vakuumtechnik bietet viele Vorteile gegenüber anderen eingesetzten Techniken in der Hochspannungstechnik. Dies ist eine der Gründe, weshalb sie sich für bestimmte Spannungsebenen bereits etabliert hat. Darüber hinaus spricht sich das Umweltbundesamt bereits seit 2002 über ein Verbot von SF₆ in Schaltanlagen bis 52 kV aus, was die Entwicklung von Alternativen zwingend erforderlich macht. [7]

3.1 Entwicklung und aktueller Einsatzbereich

Der erste Vakuumschalter wurde 1966 eingesetzt. Dieser war für eine Betriebsspannung von 12 kV und einem Strom von 16 kA ausgelegt [2]. Bereits 1971 startete Siemens mit der Serienfertigung [3]. Das Unternehmen ABB folgte im Jahre 1982 mit der Serienfertigung [8]. Ein weiterer Erfolg im Produktionsprozess ist die Einführung der Verschlusslöttechnologie. Diese ersetzte das Pumpstängelverfahren und verhindert eine aufwändige spätere Evakuierung der Schaltkammer. [3]

Ab 1996 wurden von ABB für Mittelspannungsanlagen nahezu ausschließlich Vakuum- und SF₆ Schalter eingesetzt. Dabei erlangte die Vakuumtechnik in darauffolgenden Jahren jedoch den größeren Marktanteil. Im Jahr 1998 lag der Marktanteil der von ABB eingesetzten SF₆ Schalter in der Mittelspannungstechnik nur noch in Europa und Nordafrika und dem mittleren Osten bei über 50 Prozent. Im asiatischen Raum und Nordamerika haben sich für diesen Anwendungsbereich bereits Vakuumschalter durchgesetzt. [9] Bereits ab 2002 wurden Vakuumschaltkammer für höhere Spannungen als 100 kV eingesetzt [10] und ab 2016 folgte bei Siemens die Serienfertigung von Schaltkammern für 145 kV [3]. Aktuell reicht das Einsatzgebiet von Vakuumschaltern bis zu einer Spannung von 245 kV, wobei weitere Prototypen in der Entwicklung sind [11]. In der Mittelspannungsebene haben Vakuumschalter aktuell nahezu einen Marktanteil von 100 Prozent [2].

3.2 Design

Beim Design von Vakuumschaltern stehen die Kontakte im Fokus, da dort der eigentliche Schaltvorgang erfolgt. Ein sicheres Schalten muss hierbei über die gesamte Lebensdauer des Schalters gewährleistet sein. Der größte Verschleiß wird dabei durch den im Schaltvorgang entstehenden Vakuumbogen erzeugt. Über die Jahre sind verschiedene Kontaktgeometrien entwickelt worden. [4] Ihre Aufgabe ist es den Vakuumbogen so zu beeinflussen, dass der Verschleiß möglichst gering und zudem möglichst gleichmäßig ist [6]. Unterschieden wird in Axialmagnetfeld- und Radialmagnetfeldkontakte.

Beim Axialmagnetfeldkontakt (Abbildung 3.1) soll ein Kontrahieren des Vakuumbogens verhindert werden, damit sich ein diffuser Vakuumbogen über die gesamte Kontaktfläche bildet [6]. Diese Art der Kontaktgeometrie wird unter anderem vermehrt durch Siemens sowie Schneider Electric eingesetzt [12, 13].

Der Radialmagnetfeldkontakt wird in zwei unterschiedlichen Ausführungen eingesetzt. Zum einen als Topf- zum anderen als Spiralkontakt (Abbildung 3.1). Der Vakuumbogen wird durch die Kontaktgeometrie zum Rotieren gezwungen, was den Verschleiß gleichmäßig verteilt. Radialmagnetfeldkontakte als Spiralkontakt werden unter anderem vermehrt durch ABB eingesetzt. [4, 14] Zudem gibt es noch Plattenkontakte. Hier wird der Vakuumbogen nicht beeinflusst. Aus diesem Grund eignet sich diese Art von Kontakt nur für geringe Ströme bis etwa 10 kA. [6]

Das Kontaktmaterial besteht aus einer Kupferchromverbindung (CuCr). Diese Materialverbindung muss eine gute Leitfähigkeit besitzen. Darüber hinaus muss gewährleistet sein, dass es bei der Kontaktschließung keine verschweißende Verbindung eingeht. Das verwendete Material besitzt diese Eigenschaften. Kontaktverbindungen werden beim Öffnen leicht ausgebrochen. Dabei haben sich in der Praxis Chromanteile von 25 bis 50 Prozent als ein guter Wert erwiesen. Eingesetzt wird die Materialverbindung wie in Abbildung 3.1 abgebildet, ist ausschließlich an der Kontaktoberfläche. [6]

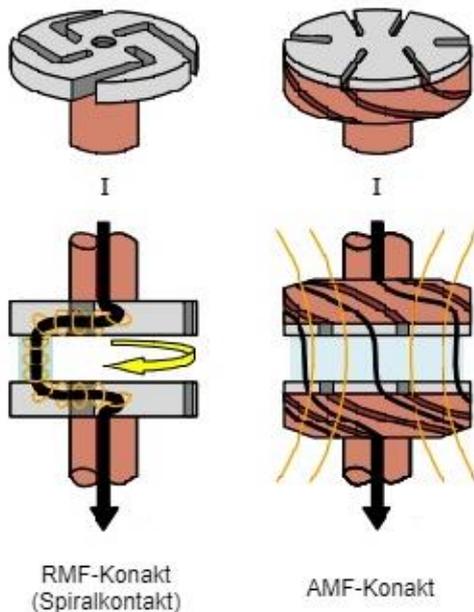


Abbildung 3.1 Häufig eingesetzte Kontaktgeometrien mit Kontaktfläche aus Kupferchrom (CuCr) [6]

Der Bereich um das Äußere der Schaltkammer, also um die Keramik herum kann zusätzlich isoliert werden. Dies kann dafür sorgen, dass der Schalter für eine höhere Spannung eingesetzt werden kann. Dabei ist Silikon als fester Stoff eine Möglichkeit. Eine weitere Möglichkeit ist der Einsatz eines isolierenden Gases. In der Vergangenheit wurde zudem Öl für diese Außenisolation eingesetzt. [10, 14]

Weiterhin besteht die Möglichkeit den Vakuumschalter als Einfach- oder Mehrfachunterbrechung zu designen. Bei Mehrfachunterbrechungen werden mehrere Vakuumschaltkammern in Reihe miteinander verbunden. Dabei muss der Antrieb dazu in der Lage sein alle Schaltkammern synchron zu öffnen und zu schließen. [15]

3.3 Anforderungen

Die technischen Anforderungen bei Mehrfachunterbrechungen gehen über die Realisierung des Antriebes hinaus. Ziel ist es bei der Mehrfachunterbrechung, dass sich die Spannungen an jeder Schaltkammer zur gleichen Zeit möglichst gleich aufteilen. Sie sollen einen idealen Spannungsteiler bilden. Diese Anforderung ist jedoch nur sehr begrenzt über den Antrieb zu realisieren. Als Folge dessen werden Kapazitäten parallel zur Schaltkammer eingebracht. Mit diesen Kapazitäten lässt sich in Verbindung mit einem synchronen Antrieb eine gleichmäßige Aufteilung der Spannung erzielen. [15]

Mit der Realisierung von Mehrfachunterbrechungen ist der Grundstein für Vakuumschalter in allen Spannungsebenen gelegt, sodass es stand jetzt bereits Prototypen von der Firma Siemens bis zu einer Spannung von 550 kV gibt [15]. Vakuumschalter dieser Spannungen benötigen jedoch eine Außenisolation, da es anderenfalls zu einem Überschlag außerhalb der Vakuumschaltkammer kommen kann. Bereits im Jahre 1968 gab es erste Vakuumschalter als Mehrfachunterbrechung. Als isolierendes Gas ist

hierbei SF₆ eingesetzt worden. Weitere Schalter über 100 kV Nennspannung nutzten dabei zudem SF₆ als Isoliergas um die Vakuumschaltkammer. [10]

Eine indirekt an die Vakuumtechnik gestellte Anforderung ist jedoch die Einsparung von CO₂ bzw. äquivalenten Treibhausgasen wie SF₆. Dies zeigt, dass langfristig die Kombination aus Vakuumtechnik und SF₆ nicht zukunftsfähig ist. Aus diesem Grund ist die Entwicklung von alternativen Gasen zudem vorangeschritten. [15]

Dabei setzen die verschiedenen Hersteller unterschiedliche Alternativen ein. Diese Gase eignen sich zudem teilweise als Gase für den Einsatz in der Schaltkammer, wie es bei SF₆ der Fall ist. Ein Vergleich dieser Gase in Abbildung 3.2 zeigt zudem wie gut die Vakuumtechnik die Anforderungen wie Schaltleistung, benötigte Antriebsenergie, Anzahl möglicher Kurzschlusschaltungen, Langzeitstabilität und Niedrigtemperaturanwendung umsetzt. Dabei sind die die besten Eigenschaften unter den Verwendeten Medien per Definition bei dem Wert 1. [16]

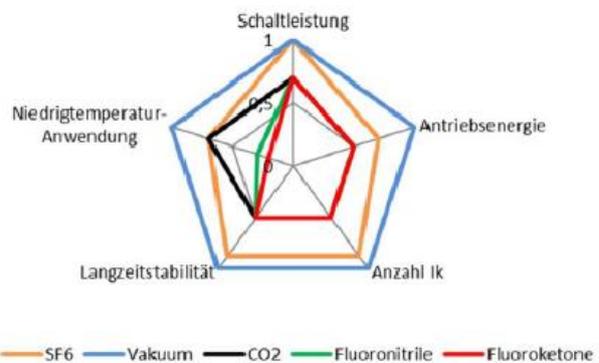


Abbildung 3.2 Bewertung der Lichtbogenlöschung verschiedener Medien [16]

Dieser Vergleich zeigt deutlich, weshalb die Vakuumtechnik schon früh in Verbindung mit SF₆ eingesetzt worden ist. Umweltaspekte spielten dabei wohl weniger eine Rolle als die guten technischen Aspekte.

4 Zusammenfassung/Fazit

Zusammenfassend zeigt sich, dass Vakuumschalter bereits jetzt dazu in der Lage sind die Anforderungen, welche in der Elektrotechnik an sie gestellt werden zu erfüllen. Darüber hinaus zeichnen sie sich als CO₂-neutrale Technik aus. Dies macht ihren Einsatz vor allem in der öffentlichen Wahrnehmung attraktiv. Dabei ist zudem die Kombinationsmöglichkeit mit anderen Gasen als SF₆ als Außenisolation gegeben. Stand jetzt werden Vakuumschalter bis 245 kV eingesetzt. In der Mittelspannung bis 54 kV werden sie nahezu ausschließlich eingesetzt. Laut den Herstellern gibt es zudem genug Alternativen zu SF₆ in der Mittelspannung. Aus diesem Grund wird über ein EU weites Verbot von SF₆ in diesem Bereich diskutiert. Über dieses möglich Verbot soll bis zum Jahre 2022 entschieden werden, wobei sich das Umweltbundesamt dafür ausspricht. [17] Mögliche Verbote oder andere Anreize wie eine starke Besteuerung von SF₆ könnten zudem für einen noch größeren Einsatz von Vakuumschaltern sorgen. Aus Sicht des Umweltschutzes ist die Vakuumtechnik stand jetzt eine der

besten Alternativen zu SF₆. Der Einsatz von Vakuumschaltern flächendeckend in allen Spannungsebenen bleibt somit nur eine Frage der Zeit.

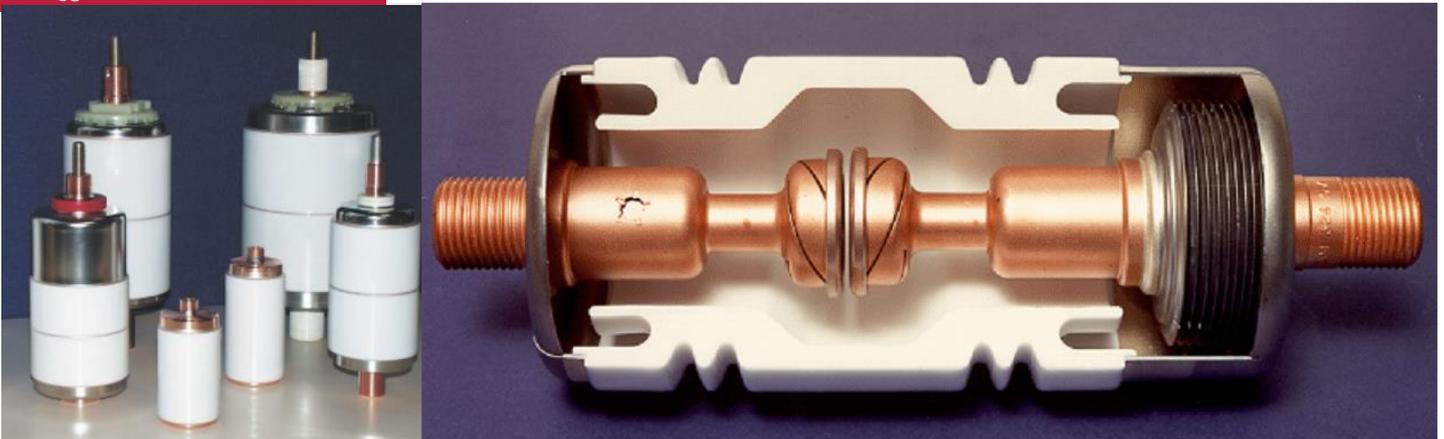
5 Literatur

- [1]. KÜCHLER., A. *Hochspannungstechnik. Grundlagen, Technologie, Anwendungen*. 3. Aufl. s.l.: Springer-Verlag, 2009. VDI-Buch. ISBN 978-3-540-78412-8.
- [2]. LESLIE T. FALKINGHAM. *Vacuum Switchgear; Past, Present, and Future*. Kitakyushu, Japan, 13. Oktober 2019.
- [3]. HELBIG, D. *Innovationen im Bereich Hochspannung Vakuum-Schalter und Clean-Air Isolation* [online]. *Kundentag 2017 – Siemens Energy Systems*, 2017 [Zugriff am: 10. Juli 2020]. Verfügbar unter: https://www.siemens.ch/energy/kundentag/download/01_Innovationen_im_Bereich_HS_Helbig_Energy_Systems_Kundentag_2017_V2.pdf
- [4]. HORN, A. *Schaltverhalten der Reihenschaltung zweier Vakuumschaltstrecken in einem Gefäß*. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2009. München: Hut, 2009. Energietechnik. ISBN 978-3-86853-160-2.
- [5]. SCHRÖDER, K.H., J. WEISER und E. VINARICKY. *Elektrische Kontakte, Werkstoffe und Anwendungen. Grundlagen, Technologien, Prüfverfahren*. 3rd ed. Berlin, Heidelberg: Vieweg, 2016. ISBN 978-3-642-45426-4.
- [6]. HEINZ, T. *Gleichstromschalten in der Mittel- und Hochspannungstechnik unter Einsatz von Vakuumschaltröhren* [online], 2017. 22 März 2017 [Zugriff am: 9. Oktober 2020]. Verfügbar unter: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/6805>
- [7]. UMWELTBUNDESAMT. *Verbot des klimaschädlichen SF₆ in Mittelspannungsanlagen möglich* [online], 2019. 5 Dezember 2019 [Zugriff am: 6. Januar 2021]. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/verbot-des-klimaschaedlichen-sf6-in>
- [8]. ABB AG. *Rekord bei ABB in Ratingen* [online]. *5.000.000ste Vakuumschaltkammer läuft vom Band*, 2016. 18 April 2016 [Zugriff am: 6. Januar 2021]. Verfügbar unter: <https://new.abb.com/news/de/detail/38583/rekord-bei-abb-in-ratingen>
- [9]. LEONHARDT ET AL. *SF₆ oder Vakuum?* [online]. *Welcher MS-Leistungsschalter ist der richtige?*, 2000 [Zugriff am: 6. Januar 2021]. Verfügbar unter: <https://library.e.abb.com/public/7936957e7f1321cec1256ddd00346f44/26-34%20M564%20-%20GER.pdf>
- [10]. PAWEŁ KUBEK. *Vacuum Circuit Breakers in High and Highest Voltage Grids*, 30. September 2017.
- [11]. ETG und V.e.E. V. *ETG-Fb. 162: VDE Hochspannungstechnik. ETG-Fachtagung*, 9. – 11. November 2020, *Online-Veranstaltung*, 2020. ETG-Fachberichte. ISBN 978-3-8007-5353-6.
- [12]. SCHNEIDER ELECTRIC GMBH. *MS-Vakuum-Leistungsschalter* [online]. *24 kV*, 2004 [Zugriff am: 2. Januar 2021]. Verfügbar unter: https://download.schneider-electric.com/files?p_en-DocType=Catalog&p_File_Name=ZXKEVO-LIS24KV_04-04+%28web%29.pdf&p_Doc_Ref=ZXKEVO-LIS24KV_04-04+%28web%29
- [13]. SIEMENS AG. *Vakuum-Leistungsschalter für Spezialanwendungen* [online] [Zugriff am: 7. Januar 2021]. Verfügbar unter: <https://new.siemens.com/global/de/produkte/energie/mittelspannung/komponenten/vakuum-leistungsschalter-fuer-spezialanwendungen.html>
- [14]. ABB AG. *Vakuum-Schaltkammern* [online] [Zugriff am: 7. September 2020]. Verfügbar unter: <https://library.e.abb.com/public/c12e33e2e78249e59d15711caa063a76/Vakuumschaltkammern.pdf>
- [15]. TOBIAS GOEBELS ET AL. *Untersuchung des Schaltverhaltens seriell verschalteter Vakuumschaltröhren in metallgekapselten und Freiluft-Schaltgeräten für die Hochspannungsebene* [online], 2020 [Zugriff am: 1. Januar 2021]. Verfügbar unter: <https://www.vde-verlag.de/proceedings-de/455353088.html>
- [16]. M. KUSCHEL ET AL. *Entwicklungsstand, Vor-Ort-Erfahrungen und Ausblick zu SF₆-freien Hochspannungsschaltanlagen* [online], 2020 [Zugriff am: 1. Januar 2021]. Verfügbar unter: <https://www.vde-verlag.de/proceedings-de/455353087.html>
- [17]. KARSTEN BURGESS ET AL. *Konzept zur SF₆-freien Übertragung und Verteilung elektrischer Energie* [online], 2017. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2503/dokumente/sf6_zwischenbericht_ecofys-ethz_website_final.pdf



Technische
Universität
Braunschweig

elenia
Institut für Hochspannungstechnik
und Energiesysteme



Vakuumschalter in der Hochspannungstechnik: Technologie, Design, Anforderungen

Kai Neumann, 26.01.2021

Gliederung

1. Motivation
2. Technologie Vakuumschalter
3. Entwicklung
4. Anwendungsbereich und Design
5. Anforderungen für Hochspannungsanwendungen
6. Fazit und Ausblick

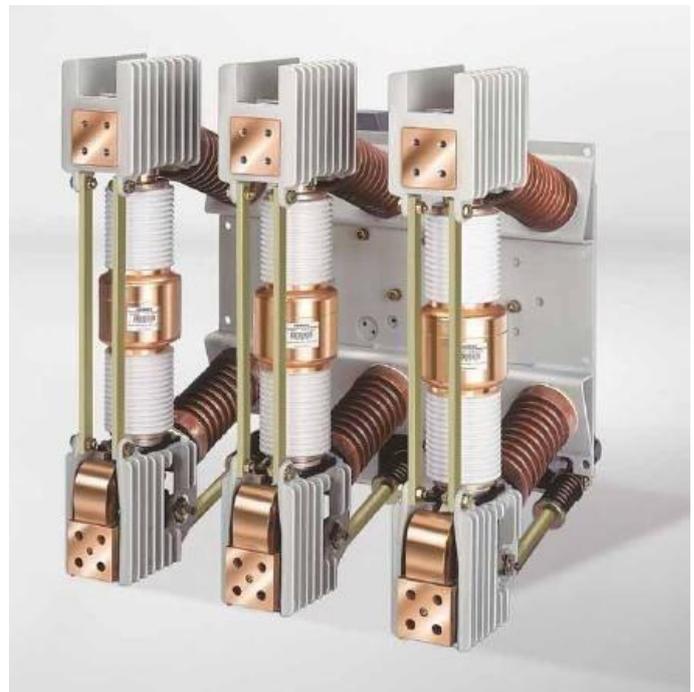
1. Motivation

Leistungsschalter [1]

- mechanisches Schaltgerät
- normale Schaltungen
- abnormale Schaltungen (Kurzschluss)

Leistungsschaltertypen [2]

- SF₆-Schalter
- Gas-/Luftschalter
- Vakuumschalter

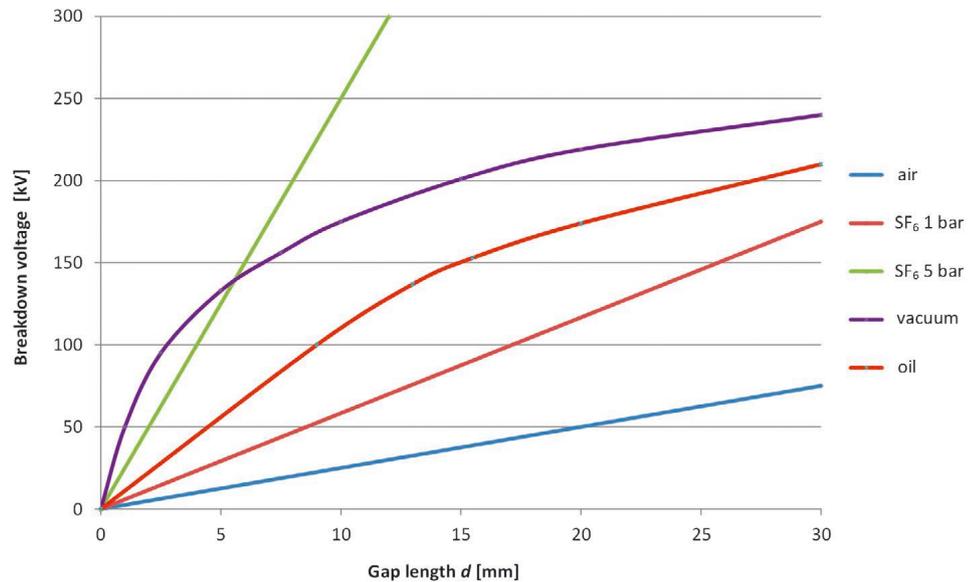


Bildquelle: <https://new.siemens.com/global/de/produkte/energie/mittelspannung/komponenten/vakuum-leistungsschalter-fuer-spezialanwendungen.html>

1. Motivation Vakuumschalter

Eigenschaften von Schaltmedien

- Früher häufig Öl eingesetzt
 - Nachteile: Umweltverträglichkeit, nicht komprimierbar
- Gase
 - isolierende Eigenschaften
 - löschende Eigenschaften
- Betriebsvakuum unter 10^{-2} Pa Druck [4]



Bildquelle: Paweł Kubek. Vacuum Circuit Breakers in High and Highest Voltage Grids, 30. September 2017.

2. Technologie Vakuumschalter

Vakuumschalter Aufbau

- 2 Kontakte, davon einer beweglich
- Metallfaltenbalg zur Abdichtung
- Schirmungen
- Außenhülle aus Keramik
- Vakuum im Inneren mit etwa 10^{-5} Pa [4]

Funktionsprinzip:

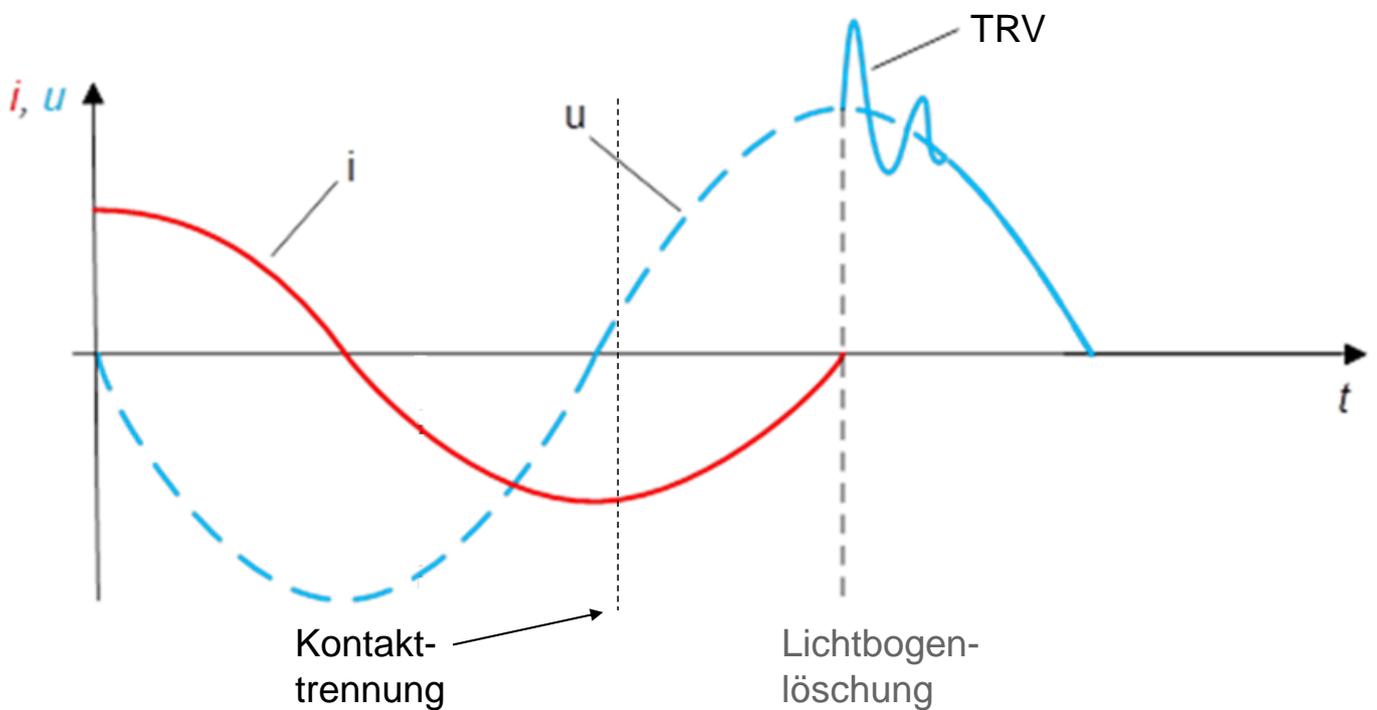
- Kein Gas was ionisiert werden könnte
- Nullpunktlöscher („Isoliergas“)
- Vorteile: keine schädlichen Stoffe, einfache Wartung
- Nachteile: (noch) nicht für alle Spannungsebenen einsetzbar, DC Anwendung



Bildquelle: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/508/109745508/att_962622/v1/HG_11_03_3AH3_DE_2018_Web_201809200826049499.pdf

25.01.2021 | Kai Neumann | Vakuumschalter: Technologie, Design, Anforderungen | Seite 5

2. Technologie Vakuumschalter



Bildquelle: vgl. Kapetanovic, M. High voltage circuit breakers. Bosnia: Sarajevo, 2011. ISBN 978-9958-629-39-6

Gliederung

1. Motivation
2. Technologie Vakuumschalter
- 3. Entwicklung**
4. Anwendungsbereich und Design
5. Anforderungen für Hochspannungsanwendungen
6. Fazit und Ausblick

3. Entwicklung

1966

- Erster Vakuumschalter im kommerziellen Betrieb [5]

1971

- Serienfertigung bei Siemens
 - Produktionsstandort in D aktuell: Berlin

1981

- Serienfertigung bei ABB
 - Produktionsstandort in D aktuell: Ratingen

~1995

- Verschlusslötverfahren löst Pumpstängelverfahren ab
 - Kein aufwändiges evakuieren mehr nötig

1998

- Marktanteil bei ABB (Mittelspannung) fast überall > 50%
 - Europa, Nordafrika und der mittlere Osten vermehrt SF₆

2002

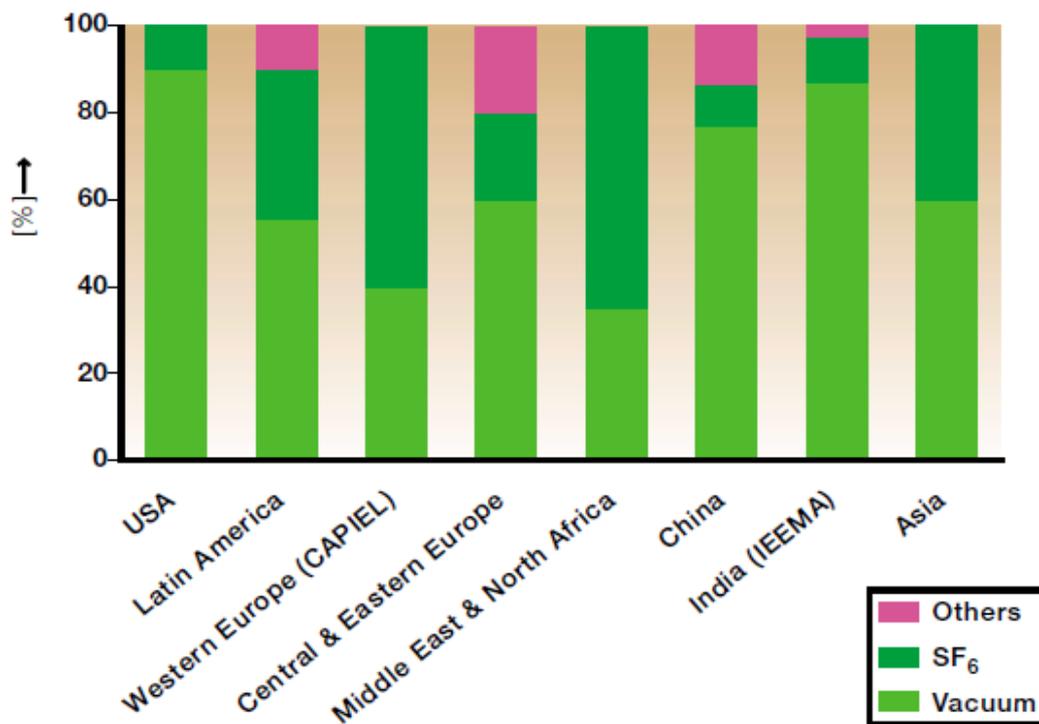
- Erste Vakuumschaltkammern für über 100 kV
 - Hochspannungsanwendung immer wahrscheinlicher

2016

- Serienfertigung von 145 kV Schaltkammern bei Siemens

3. Entwicklung

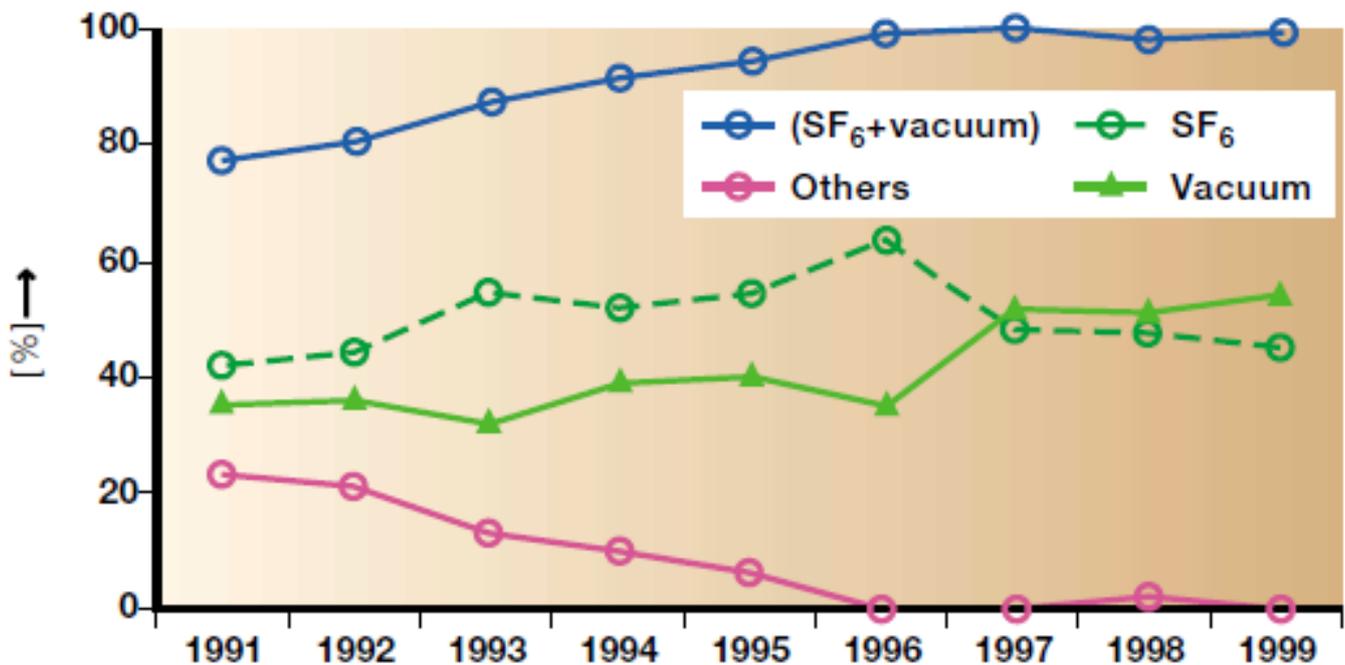
Marktanteil in der Mittelspannung (1998)



Bildquelle: <https://library.e.abb.com/public/7936957e7f1321cec1256ddd00346f44/26-34%20M564%20-%20GER.pdf>

3. Entwicklung

Marktanteile ABB in Mittelspannung



Bildquelle: <https://library.e.abb.com/public/7936957e7f1321cec1256ddd00346f44/26-34%20M564%20-%20GER.pdf>



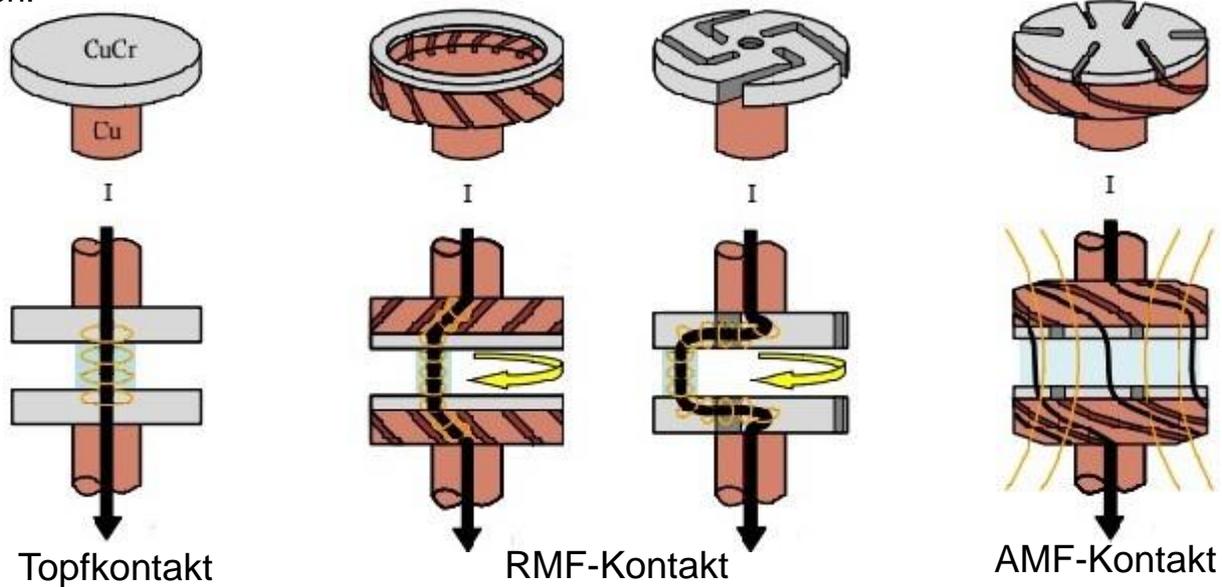
Gliederung

1. Motivation
2. Technologie Vakuumschalter
3. Entwicklung
- 4. Anwendungsbereich und Design**
5. Anforderungen für Hochspannungsanwendungen
6. Fazit und Ausblick

4. Anwendungsbereich und Design

Designmöglichkeiten in der Schaltkammer

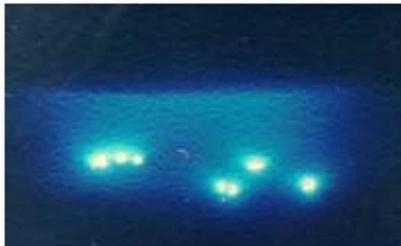
- Kontaktform
 - Ziel: beeinflussen Vakuumbogen
- Arten:



Bildquelle: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/6805>

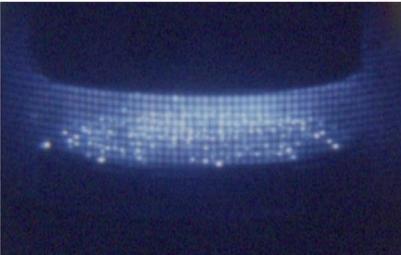
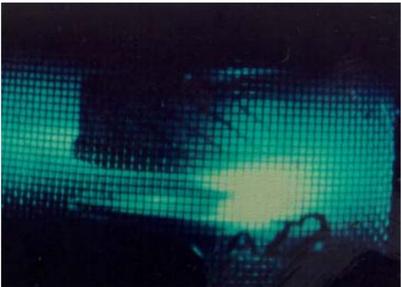
25.01.2021 | Kai Neumann | Vakuumschalter: Technologie, Design, Anforderungen | Seite 12

4. Anwendungsbereich und Design



Kontaktmaterial

- Anforderung:
 - gute Leitfähigkeit
 - geringes Verschweißen
 - geringe Ausbrüche
- Material:
 - Kupferchromverbindung
 - Chromanteil etwa bei 25-50 Prozent



Bildquelle: Leslie T. Falkingham. Vacuum Switchgear; Past, Present, and Future. Kitakyushu, Japan, 13. Oktober 2019.

25.01.2021 | Kai Neumann | Vakuumschalter: Technologie, Design, Anforderungen | Seite 13

4. Anwendungsbereich und Design

Außenisolation

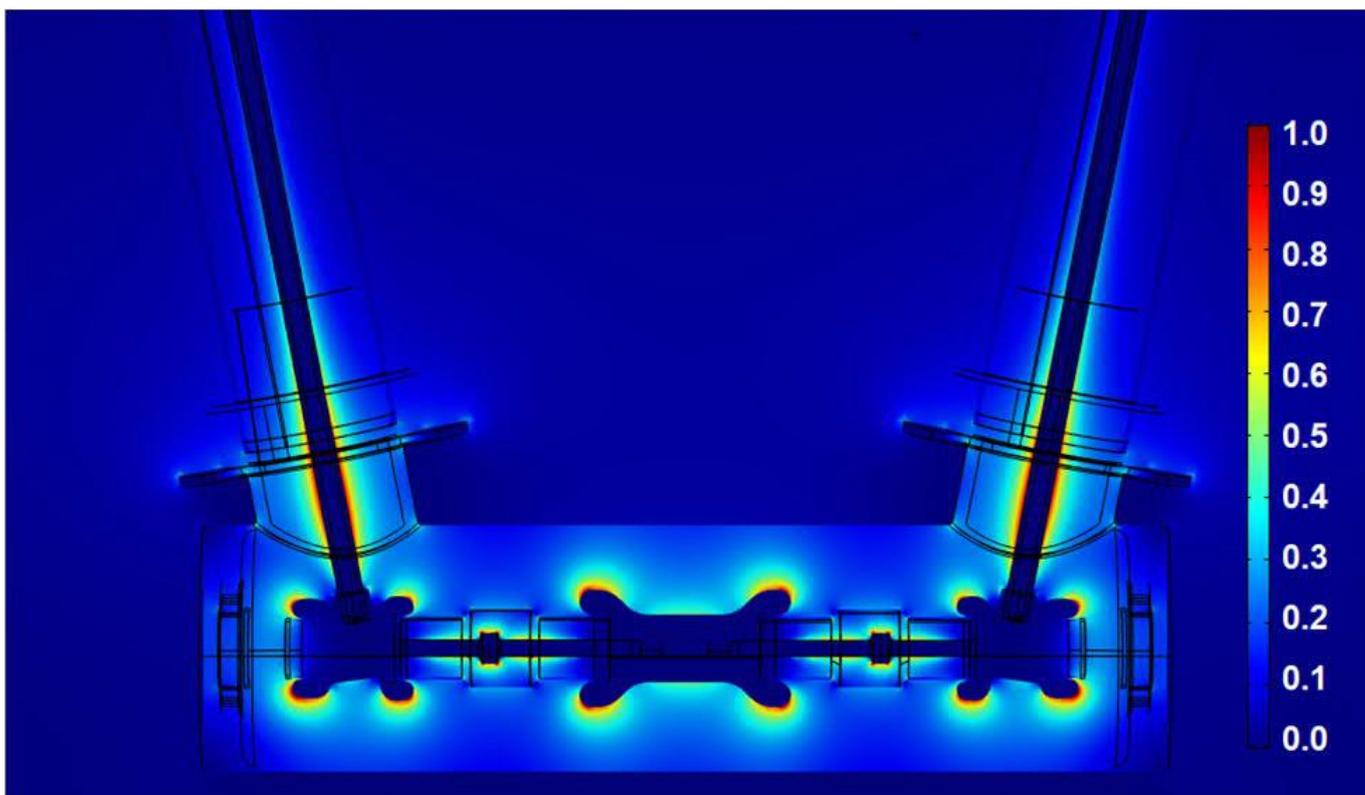
- Silikon
- Luft
- SF₆
- Alternative Gase

Doppelunterbrechung/ Mehrfachunterbrechung

- Möglichkeit höhere Spannung zu schalten
 - Antrieb
 - Spannungspotential



4. Anwendungsbereich und Design



Bildquelle: <https://www.vde-verlag.de/proceedings-de/455353088.html>

25.01.2021 | Kai Neumann | Vakuumschalter: Technologie, Design, Anforderungen | Seite 15

Gliederung

1. Motivation
2. Technologie Vakuumschalter
3. Entwicklung
4. Anwendungsbereich und Design
- 5. Anforderungen für Hochspannungsanwendungen**
6. Fazit und Ausblick

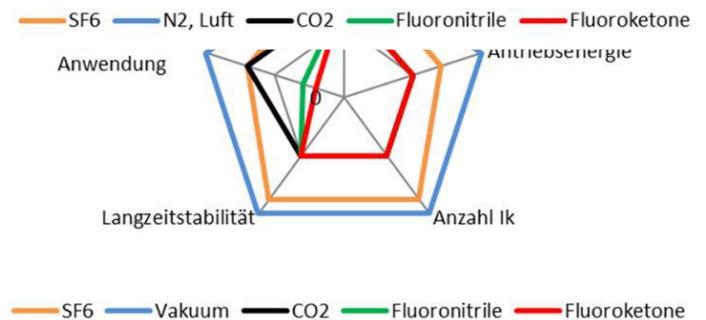
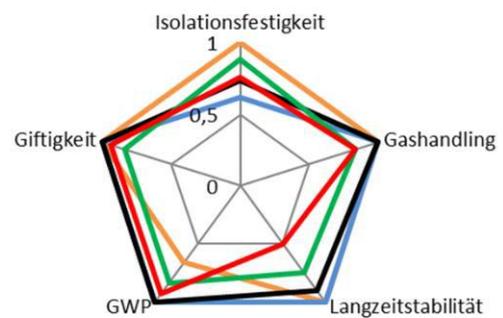
5. Anforderungen für Hochspannungsanwendungen

Umwelt

- Global Warming Potential (GWP)
- Giftigkeit
- Handling
- Stabilität
- Isolationsfestigkeit

Technisch

- Stabilität
- Isolationsfestigkeit
- Antriebsenergie
- Schaltleistung
- Anzahl schaltbare Kurzschlussströme
- Niedrigtemperaturanwendung



5. Anforderungen für Hochspannungsanwendungen

Anwendung in der Hochspannung

- Mehrfachunterbrechungen
 - Probleme:
 - Schalten muss möglichst Synchron erfolgen
 - Antriebsform
 - „Idealer Spannungsteiler“
- Kombination mit anderen Gasen
 - SF₆ eingesetzt
 - Vorteile Vakuumtechnik genutzt
 - Umweltaspekt ungeachtet

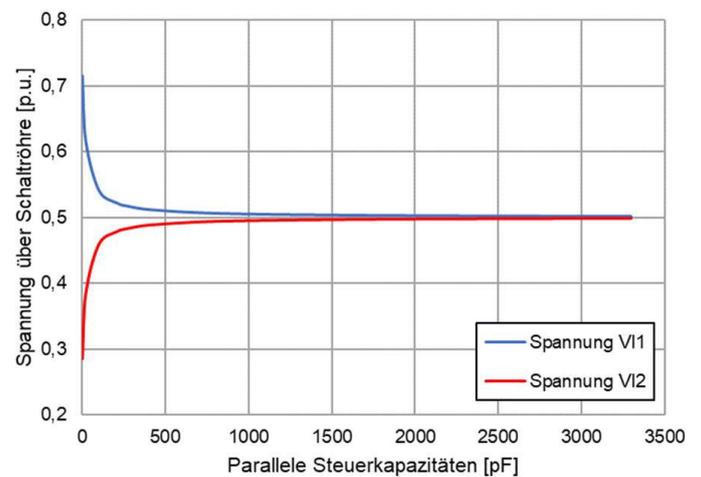
Nennspannung	Schaltkammern	Jahr
132 kV	8	1968
145 kV	2	1976
204 kV	2	1985

Tabelle: Doppelunterbrechungen größer 100 kV Nennspannung [7]

5. Anforderungen für Hochspannungsanwendungen

Spannungen aufteilen

- keine Norm für Synchronität beim Schalten
 - Einsatz von Kapazitäten
 - Intern sowie extern möglich
 - 500 pF bereits ausreichend
 - Aufteilung 48 zu 52 Prozent erreicht



Gliederung

1. Motivation
2. Technologie Vakuumschalter
3. Entwicklung
4. Anwendungsbereich und Design
5. Anforderungen für Hochspannungsanwendungen
- 6. Fazit und Ausblick**

6. Fazit und Ausblick

Stand jetzt:

- Marktanteil in der Mittelspannung
 - Nahezu 100 %
 - Kein SF₆ dort benötigt
- Rechtliche Aspekte
 - 2002 erste Stimmen zur Einsparung von SF₆
 - 2022: Abstimmung über SF₆ Verbot
in Mittelspannungsanwendungen (EU) [4]
 - Marktanteil ohnehin sehr gering
- Hochspannung
 - Erste Anwendungen bereits in frühen Entwicklungsjahren
 - 145 kV Schaltkammern bereits in Serienproduktion
 - 245 kV Schaltkammern bereits gefertigt

6. Fazit und Ausblick

Ausblick

- Rechtlich:
 - Umweltbundesamt für Verbot von SF₆, Vakuum gute Alternative [4]
 - Besteuerung von SF₆ nicht unwahrscheinlich

- Technisch:
 - Erste Vakuum-Prototypen in Versuchen für alle Ebenen
 - Hersteller engagiert Alternativen einzusetzen
 - Kombinationsmöglichkeiten aus Vakuum und alternativen Gasen gegeben

- Hersteller:
 - Regelungen können Markt erweitern
 - Außenwirkung
 - Aktive Forschung in Alternativen

Literaturverzeichnis

- [1] Lindmayer, Schaltgeräte, Berlin: Springer Verlag 1987
- [2] HELBIG, D. *Innovationen im Bereich Hochspannung Vakuum-Schalter und Clean-Air Isolation. Kundentag 2017 – Siemens Energy Systems*, 2017
https://www.siemens.ch/energy/kundentag/download/01_Innovationen_im_Bereich_HS_Helbig_Energy_Systems_Kundentag_2017_V2.pdf
- [3] HORN, A. *Schaltverhalten der Reihenschaltung zweier Vakuumschaltstrecken in einem Gefäß*. Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2009. München: Hut, 2009. Energietechnik. ISBN 978-3-86853-160-2.
- [4] KARSTEN BURGESS ET AL. *Konzept zur SF6-freien Übertragung und Verteilung elektrischer Energie* [online], 2017. Verfügbar unter: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/2503/dokumente/sf6_zwischenbericht_ecofys-ethz_website_final.pdf
- [5] LESLIE T. FALKINGHAM. *Vacuum Switchgear; Past, Present, and Future*. Kitakyushu, Japan, 13. Oktober 2019.
- [6] HEINZ, T. *Gleichstromschalten in der Mittelund Hochspannungstechnik unter Einsatz von Vakuumschaltröhren* [online], 2017. 22 März 2017 [Zugriff am: 9. Oktober 2020]. Verfügbar unter: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/6805>
- [7] PAWEŁ KUBEK. *Vacuum Circuit Breakers in High and Highest Voltage Grids*, 30. September 2017.

Bestimmung von DC-Netztopologien im Nieder- und Mittelspannungsbereich

Determination of DC network topologies in low and medium voltage range

B. Sc. Hendrik Gundelach

Institut für Hochspannungstechnik und Energiesysteme - **elenia**, Braunschweig, h.gundelach@tu-braunschweig.de

Kurzfassung

Die Gleichspannung gewinnt aufgrund der Energiewende und der voranschreitenden Technologien zunehmend an Bedeutung. Viele Erzeuger und Verbraucher arbeiten in der Gleichspannungsebene. Aufgrund des aktuellen Wechselspannungsnetzes sind mehrere Transformationen nötig, um diese Energien zu verteilen. In diesem Bericht wird das Gleichspannungsnetz betrachtet, welches eine attraktive Alternative zum Wechselspannungsnetz bietet, um die Transformationen von Spannungen zu reduzieren. Neben Normen und Gesetzgebungen zum DC-Netz werden verschiedene Erzeuger und Verbraucher vorgestellt, die in einem Gleichspannungsnetz Anwendung finden könnten.

Abstract

Due to the energy transition and the advancing technologies, direct voltage is becoming increasingly important. Many producers and consumers work on the DC voltage level. Due to the existing AC voltage network, several transformations are necessary to distribute the energy. This report looks at the direct voltage network, which is an attractive alternative to the alternating voltage network. In addition to standards and legislation for the DC network, various producers and consumers that could be used in a DC voltage network are presented.

1 Einleitung

Aufgrund des beschlossenen Bundes-Klimaschutzgesetzes (KSG) im Dezember 2019 schreitet die Energiewende in Deutschland weiter voran. Hierunter fällt die Zunahme von erneuerbaren Energien im Netz, wie Photovoltaik (PV)-Anlagen, welche häufig eine Gleichspannung (DC-Spannung) liefern. In der Industrie und in privaten Haushalten nehmen DC-Verbraucher zu. Hierzu zählen elektrische Maschinen, Rechenzentren, Ladestationen für E-Fahrzeuge sowie LED-Beleuchtungssysteme. Da das aktuelle Verbund- und Versorgungsnetz in Deutschland mit einer Wechselspannung arbeitet, sind in diesen Fällen mehrere Transformationen zwischen Gleich- und Wechselspannung nötig. Eine Reduzierung der Transformationen würde durch ein DC-Netz erreicht werden, womit ein besserer Wirkungsgrad bei weniger Komponenten erreicht werden könnte.[1]

In diesem Bericht wird dazu das aktuelle AC-Netz betrachtet und mit einer DC-Netz-Topologie verglichen. Hinsichtlich eines DC-Netzaufbaus wird auf verschiedene Normen, gesetzliche Rahmenbedingungen sowie den Netzschutz eingegangen. Anschließend werden Forschungsprojekte im DC-Bereich betrachtet, bevor verschiedene DC-Netztopologien im Nieder- und Mittelspannungsbereich vorgestellt werden.[1]

2 Theoretische Grundlagen

Wechselspannungsnetz

Das aktuelle Verbund- und Versorgungsnetz wird mit einer Wechselspannung betrieben. Dieser Netzaufbau ist in der Abbildung 1 vorgestellt. Es werden vier verschiedene Spannungsebenen verwendet:

- Höchstspannungsebene (220kV und 380kV)
- Hochspannungsebene (110kV)
- Mittelspannungsebene (10 und 20kV)
- Niederspannungsebene (0,4kV)

In den Ebenen werden je nach Anschlussleistung verschiedene Verbraucher und Erzeuger angeschlossen. Kraftwerke mit Leistungen im Gigawatt-Bereich speisen in die Hoch-/Höchstspannungsebene ein. In die Niederspannungsebene speisen Energieanlagen im Kilowatt-Bereich ein. Hintergrund sind die entstehenden Stromstärken nach der Formel:

$$P = U \cdot I \quad \Rightarrow \quad I = \frac{U}{P} \quad (1)$$

Großindustrien mit Leistungen im dreistelligen Megawatt-Bereich, wie beispielsweise Stahlwerke, sind an den hohen Spannungsebenen angeschlossen. Gewerbegebiete und

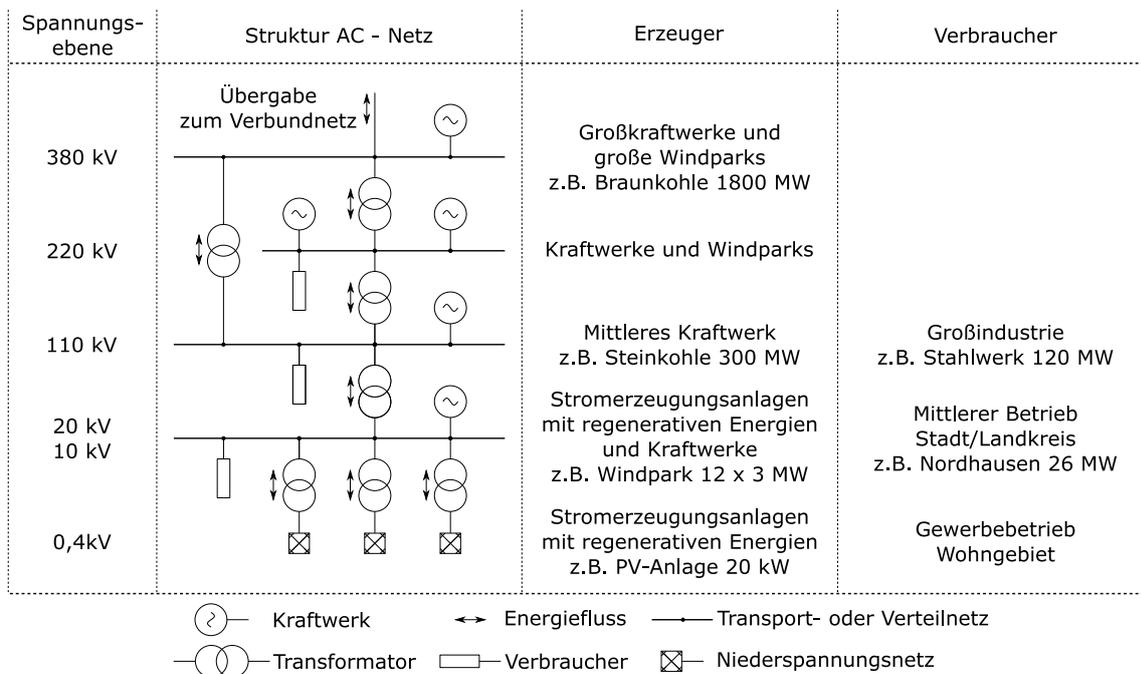


Abbildung 1 Aufbau eines Wechselspannungsnetzes - nach [2][3]

Wohngebiete hingegen werden von niedrigen Spannungsebenen versorgt. Zur Energiewandlung zwischen den verschiedenen Wechselspannungsebenen dienen Transformatoren.[2]

3 Hauptteil - DC-Netze

Gleichspannungsnetz

Eine alternative zum Wechselspannungsnetz ist das Gleichspannungsnetz, welches in Abbildung 2 gezeigt ist. Dieses Beispiel DC-Netz ist an der Technischen Universität Braunschweig im Aufbau. Das Institut für Hochspannungstechnik und Energieanlagen ist aktuell bei der Planung des 3000V Netzes zu den bestehenden 1000V und 380V Ebenen. Folgende Komponenten sind Bestandteile eines DC-Netzes:

Gleichrichter

Der Gleichrichter dient zur Wandlung von Wechselstrom in Gleichstrom. Diese finden häufig Anwendung in Netzteilen, um Geräte mit einer Gleichspannung zu versorgen. Im einfachsten Fall wird hierzu eine Diode und ein Kondensator verwendet. Im DC-Netz findet dieser ebenfalls Anwendung, um das DC-Netz aus dem konventionellen AC-Netz zu versorgen. Es gibt gesteuerte und ungesteuerte Varianten mit Mittelpunkt-, Brücken oder Wechselschaltungen.[4][5]

Wechselrichter

Um aus einer Gleichspannung eine Wechselspannung zu erzeugen, wird ein Wechselrichter verwendet. Dieser nutzt beispielsweise bei einer B6-Brücke zwei Schalter die mit einer Pulsfolge versorgt werden. Die Pulsfolge

zur Erzeugung einer Sinus-Spannung wird üblicherweise mit einer Pulsweitenmodulation erzeugt, welche ein Rechteck-Signal mit unterschiedlicher Breite für die Schalter liefert. Sie unterscheiden sich in selbstgeführte (elektronische Schalter) und fremdgeführte (Netz oder Last) Stromrichter.[4][5]

Gleichspannungswandler

Zur Wandlung von Gleichspannungen auf unterschiedlichen Spannungsebenen werden Gleichspannungswandler verwendet. Diese nutzen Magnetfeldspeicher oder Kondensatoren zur Speicherung der Eingangsenergie und geben diese auf einer anderen Spannungsebene frei. Speziell erfolgt die Umsetzung mithilfe eines periodisch arbeitenden Schalters. Beispiele sind Hoch- und Tiefsetzsteller sowie Sperr- und Resonanzwandler.[4][5]

Active Front End

Ein Active Front End ist ein bidirektionaler AC/DC-Wandler. Dieser ermöglicht einen Leistungsfluss zwischen Gleich- und Wechselspannung. Durch diesen kann kinetische Energie bei beispielsweise Bremsvorgängen von rotierenden Antriebsmaschinen in das Netz eingespeist werden. In dem aktuellen Wechselspannungsnetz wird diese Energie häufig durch Widerstände in Wärme umgesetzt.[5]

Speichertechnologien

Eine Speicherung der Energie erfolgt häufig in Batterien oder Kondensatoren. Diese nehmen überschüssige Energie aus dem Netz auf und geben sie bei Bedarf wieder ab. PV-Anlagen liefern beispielsweise aufgrund des Tag-/Nachtzyklus einen unregelmäßigen Energiebeitrag.[5]

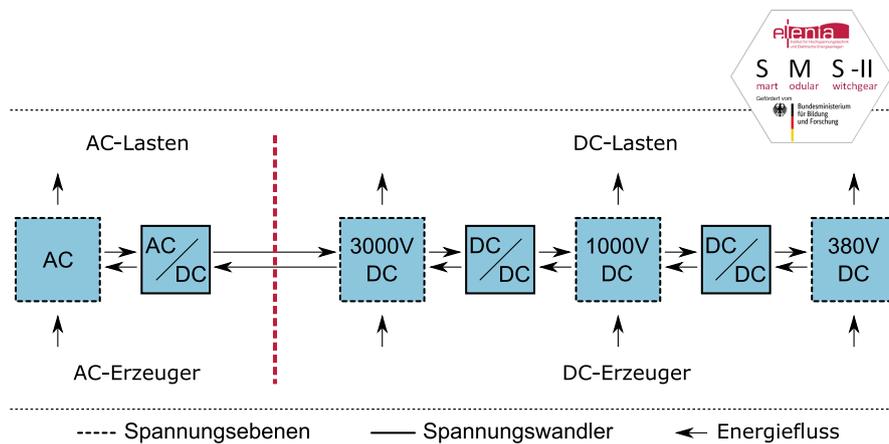


Abbildung 2 Aufbau eines Gleichspannungsnetzes - nach Smart Modular Switchgear II der TU Braunschweig

3.1 Vergleich von AC- und DC-Netzen

In der Wechselspannungsebene sind bewährte Schutzkonzepte zur Sicherheit vorhanden. Diese basieren auf Wissen und Erfahrungen der letzten Jahrzehnten. Aufgrund der voranschreitenden Technologien ist die Erzeugung von hohen Spannungen für weite Übertragungen bei weniger Materialaufwand und einem hohen Wirkungsgrad möglich. Das Gleichspannungsnetz hat den Vorteil, dass durch die genutzte Gleichspannung kein Skin-Effekt vorliegt. Somit ist die Stromdichte über den Leiterquerschnitt gleichmäßig verteilt und der Leiterquerschnitt kann reduziert werden.[6] Außerdem werden weniger Spannungsumwandlungen benötigt wenn DC-Erzeuger und DC-Verbraucher zusammen im Netz vorliegen, welches einen höheren Wirkungsgrad zur Folge hat.[1]

3.2 Normungs-Roadmaps

In den deutschen Normungs-Roadmaps vom VDE sind bereits viele Felder abgedeckt. Dazu zählt die *Smart-Grids Version 2.0*, welche insbesondere für den Netzbau, die Integration der erneuerbaren Energien und den Aufbau eines Smart-Grid Anwendung findet. Weitere sind die *Smart Home + Building Version 2.0* für Technologien in Wohnräumen und -gebäuden, *Active Assisted Living* für den medizinischen, technologischen und wirtschaftlichen Bereich sowie *Energiespeicher* und der *Elektromobilität 2020*. [1]

3.3 Gesetzliche Rahmenbedingungen

Neben den Normen gibt es gesetzliche Rahmenbedingungen, die im Gleichspannungsnetz eingehalten werden müssen. Hierzu zählt das *Energiewirtschaftsgesetz* - mit der Sicherstellung eines unverfälschtem Wettbewerbes bei der Versorgung und die *Niederspannungsanschlussverordnung* - welche grundlegende Netzanschlussbedingungen und dessen Nutzungen festlegt. Außerdem regelt die *Niederspannungs-Richtlinie* - die Bereitstellung der Energie innerhalb bestimmten Spannungsgrenzen zwischen 75V und 1500V und die *EMV-Richtlinie* - sichert ein angemessenes Niveau der elektromagnetischen Verträglichkeit im AC- und DC-Bereich.[1]

3.4 Netzschutz

In dem Wechselspannungsnetz ist der Netzschutz durch Erfahrungen und aufgebautem Wissen realisiert. Bei dem Gleichspannungsnetz müssen ebenfalls verschiedene Schutzkonzepte verwendet werden, um Fehler wie Über- und Unterspannungen, Unterbrechungen oder überhöhte Temperaturen zu vermeiden. Speziell liegen im Gleichspannungsnetz gefährliche Körperströme vor, die eine explizite Betrachtung benötigen.[1]

3.5 Forschungsprojekte

Im Bereich der Nieder- und Mittelspannungsgleichstrom-ebenen haben viele Unternehmen und Institute Projekte und Forschungsaktivitäten. Folgend sind aus [1] verschiedene Projekte mit ihren Bearbeitern und dem Thema kurz vorgestellt:

- FEN (RWTH Aachen) - Forschungscampus Flexible Elektrische Netze
- Schaufenster Elektromobilität (BMW, RWE etc.) - DC Ladestationen am Olympiapark
- SMS (TU Braunschweig, BMWi, BMBF) - Schalt- und Schutzkonzepte in DC-Spannungsebenen
- DCC+G (Siemens etc.) - Gleichstrom in Gebäuden
- DC-Industrie (Fraunhofer IISB) - Verteilung von Energie in Produktionsanlagen

Das Projekt DC-Industrie hat viele Partner der Industrie (Siemens, ABB etc.) sowie Forschungsinstitute (TU Braunschweig, Uni Stuttgart,..). Dabei ist ein DC-Netz im Betriebs Spannungsbereich von 485V bis 750V aufgebaut. Es bezieht die Energie aus dem AC-Netz, aus erneuerbaren Energien wie PV- und Windkraftanlagen sowie Batteriespeichern. Dieses intelligente Netz lässt sich einfach erweitern. Bei einem Netzausfall kann dieses Netz über einen gewissen Zeitraum autark arbeiten. Mit diesem Netz wurden bereits Modellanlagen mit verschiedenen Vorteilen realisiert. In einer Anlage konnte die Anschlussleistung um 85% reduziert werden. Bei anderen wurden Produktionsausfallzeiten oder Kupferleitungen reduziert.[7]

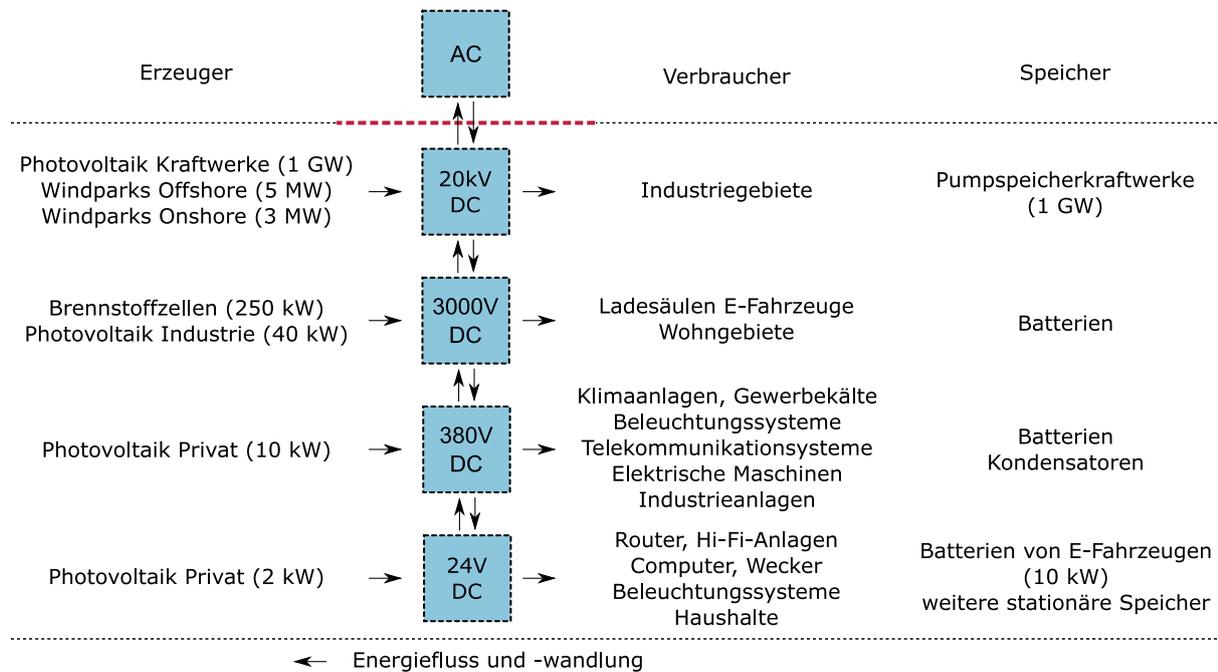


Abbildung 3 Netztopologien im Gleichspannungsnetz - Zuordnung nach [2][6][7][8][9][10][11]

3.6 Netztopologien

In einem Gleichspannungsnetz können verschiedene Erzeuger, Verbraucher und Speicher direkt angeschlossen werden. Hierbei sind wie im Wechselspannungsnetz die Anschlussleistungen relevant. Diese liefern in Abhängigkeit der Spannungsebene nach der Formel 1 die jeweiligen Stromstärken. Folgend werden verschiedene DC-Netzebenen im Nieder- und Mittelspannungsbereich vorgestellt die in der Abbildung 3 gezeigt sind.

24V

Das 24V Netz ist attraktiv für einen Hausanschluss. Dieses kann aus höheren Spannungsebenen oder aus einer kleinen Eigenheim PV-Anlage versorgt werden. Die Batterie eines Elektrofahrzeuges könnte als Energiespeicher verwendet werden, um Energie für einen bestimmten Zeitraum zu speichern. Verbraucher in dieser Spannungsebene sind Elektrogeräte wie Router, Hifi-Anlagen, Computer und Beleuchtungssysteme.

380V

Das 380V Netz würde für eine Industrieanlage passen. Auch hier erfolgt die Einspeisung der Energie aus einer anderen Spannungsebene oder über größere PV-Anlagen. Verbraucher wären Klimaanlagen, Beleuchtungssysteme, Rechnerzentren und elektrische Maschinen. Speziell besteht hier auch die Möglichkeit bei Leistungsstarken Verbrauchern ein +380V und ein -380V Netz zu nutzen, um das doppelte Spannungsniveau zu erreichen.[10]

3kV und 20kV

Aus der Mittelspannungsebenen können Wohngebiete oder Industriegebiete versorgt werden. Speziell in das 20kV-Netz können größere Erzeuger wie Windparks ihre

Leistung einspeisen. Weitere Spannungsebenen oberhalb der 20kV-Ebene sind denkbar, um die Übertragung über weitere Strecken verlustfreier zu gestalten.

4 Zusammenfassung/Fazit

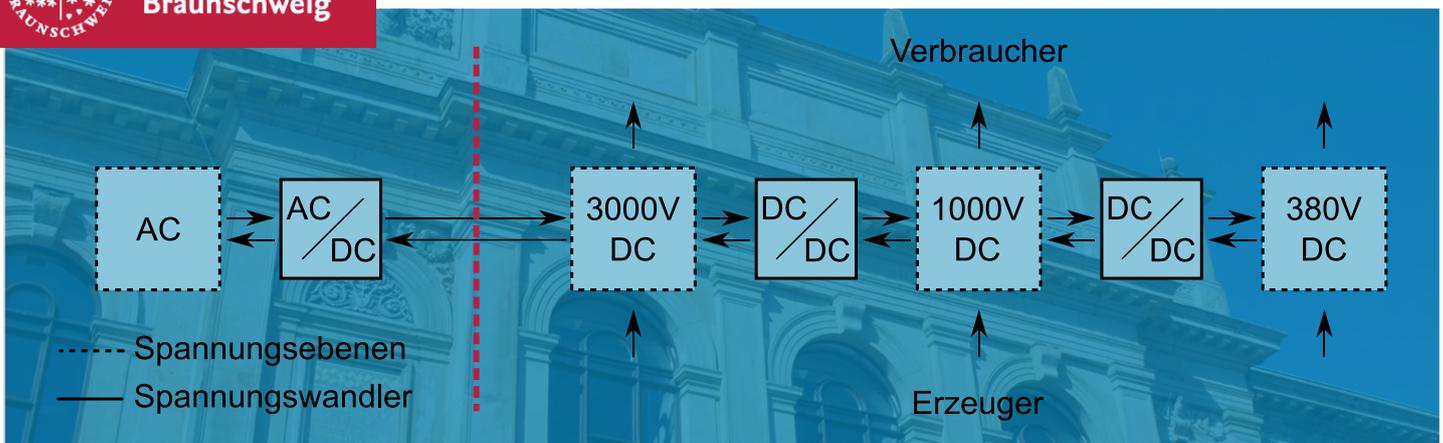
In diesem Bericht wurde der Ist-Zustand des Wechselspannungsnetzes vorgestellt und mit einem Gleichspannungsnetz verglichen. Es wurde auf verschiedene Normungs-Roadmaps, die gesetzlichen Rahmenbedingungen und den Netzschutz im DC-Netz eingegangen. Außerdem wurden Forschungsprojekte in der Gleichspannungsebenen vorgestellt und Netztopologien im Nieder- und Mittelspannungsbereich präsentiert.

DC-Netze gewinnen in der Industrie aufgrund des stetigen Wachstums von Erzeugern und Verbrauchern im Gleichspannungsbereich immer mehr an Interesse und haben Potential Kosten zu reduzieren und den Gesamtwirkungsgrad zu verbessern.

5 Literatur

- [1] VDE, Gleichstrom im Niederspannungsbereich - Deutsche Normungs-Roadmap Version 2, Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e. V., 2018
- [2] Wesselak V., Handbuch Regenerative Energietechnik, Springer 2017
- [3] Heuck K., Elektrische Energieversorgung. Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie für Studium und Praxis, Springer 2013

- [4] Specovius J., Grundkurs Leistungselektronik. Bauelemente, Schaltungen und Systeme, Springer 2017
- [5] Köhler H., Vermessung eines DC-Netzes und Analyse des transienten Verhaltens der elektrischen Größen zur Bestimmung des Fehlerortes unter Beeinflussung von Leistungselektronischen Komponenten, Masterarbeit, TU Braunschweig 2020
- [6] Schichler U., Realisierung einer Mittelspannungs-Gleichstromübertragung mit extrudierten AC-Kabeln, Elektrotechnik und Informationstechnik 2018
- [7] DC-Industrie, Gleichstrom für die nachhaltige Fabrik, Forschungsprojekt DC-Industrie Energiewende trifft Industrie 4.0, 2020
- [8] Boeke U., DC Power Grids for Buildings, IEEE 2015
- [9] Vossos V., Review of DC Power Distribution in Buildings: A Technology and Markt Assessment, Berkeley Lab 2017
- [10] Weiss R., Energy Efficient Low-Voltage DC-Grids for Commercial Buildings, IEEE 2015
- [11] März M., Niederspannungs-Gleichstromnetze - Eine thematische Einführung, Fraunhofer-Institut 2012

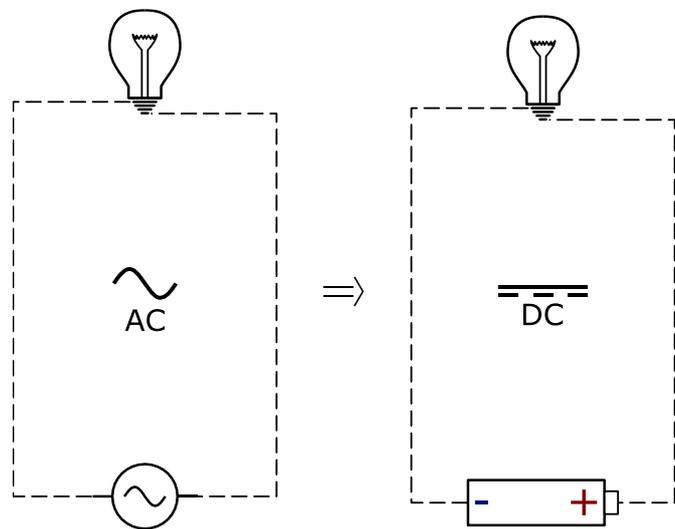


Bestimmung von DC-Netztopologien im Nieder- und Mittelspannungsbereich - Vortrag

Hendrik Gundelach, 25.01.2021

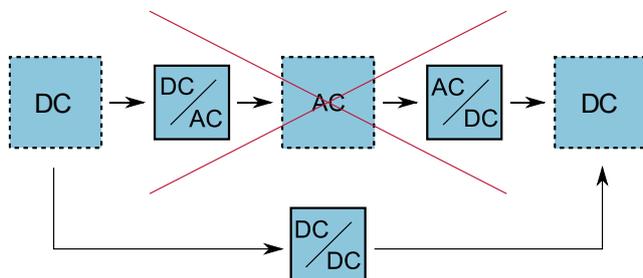
Agenda

- Einleitung und Motivation
- AC - Netze
- DC - Netze
- Normen und Gesetzgebungen DC
- Projekt - DC Industrie
- Netztopologien im DC - Netz
- Fazit und Ausblick



Motivation – Warum DC-Netz?

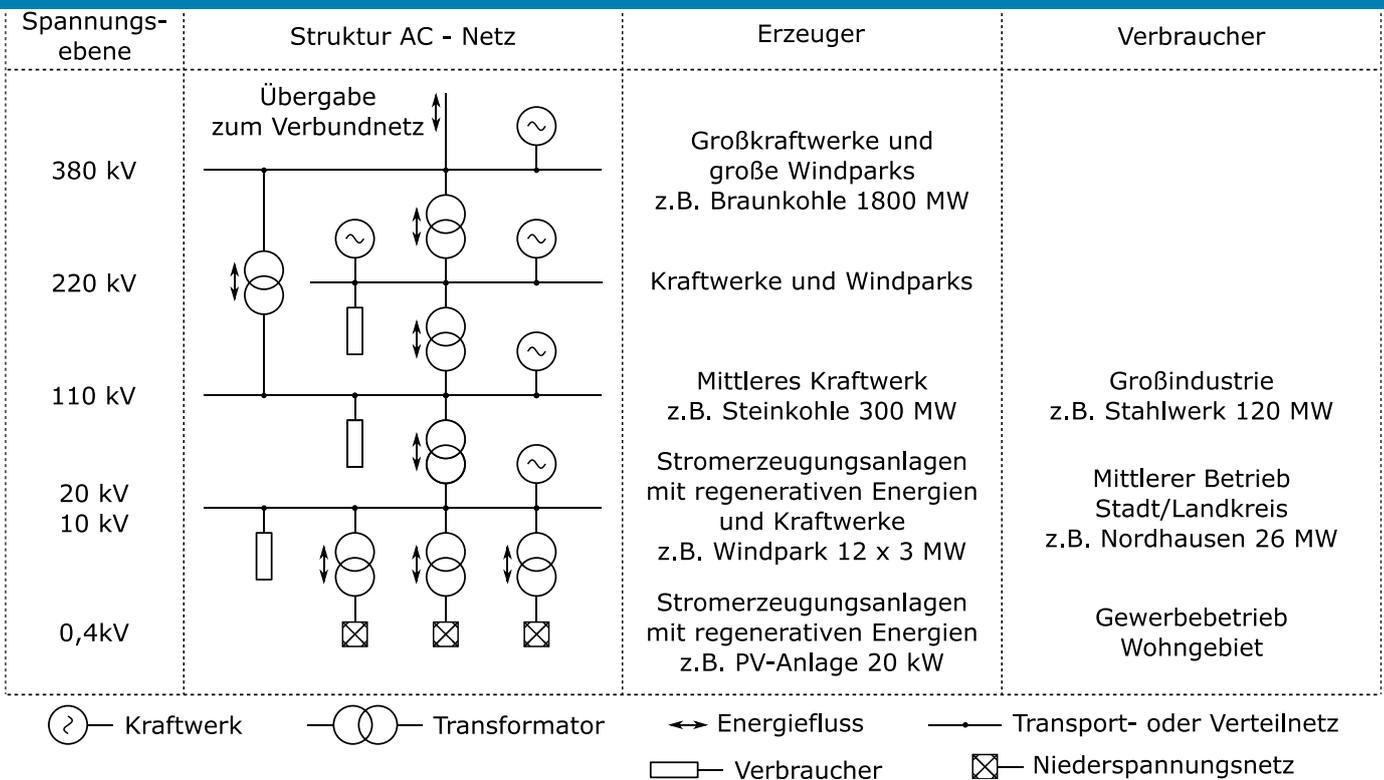
- Steigende Anzahl an regenerativen Energien
- Steigende Anzahl an DC-Verbrauchen
- Höhere Energieeffizienz
- Speicherung der Energie



Quelle (1): <https://pixabay.com>

Quelle (2): VDE

AC-Netzaufbau

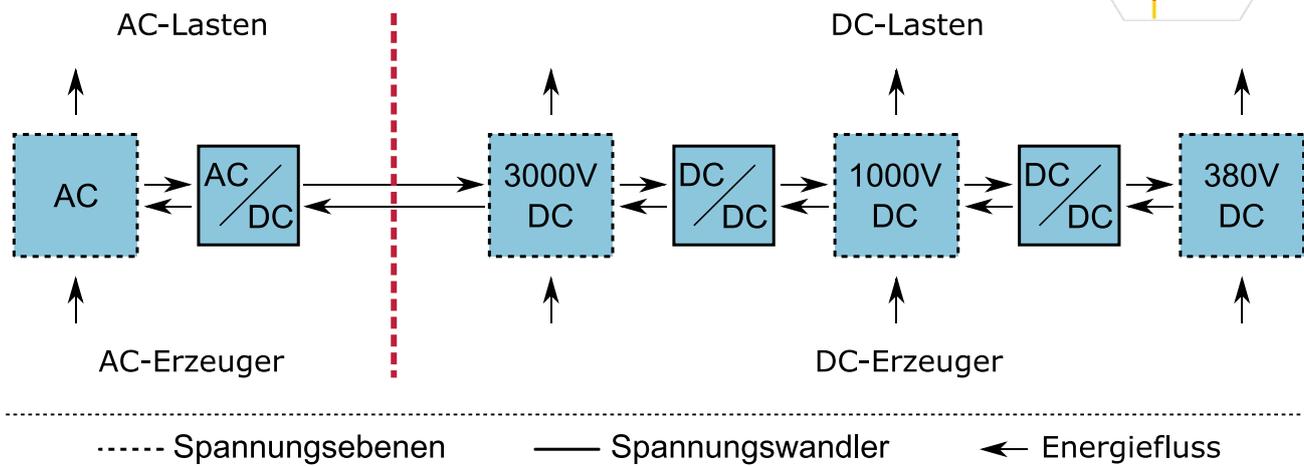


Quelle (3+4): Wesselak V., Handbuch Reg. Energietechnik; Heuck K., Elektrische Energieversorgung

25.01.2021 | Hendrik Gundelach | DC-Netztopologien | Seite 4

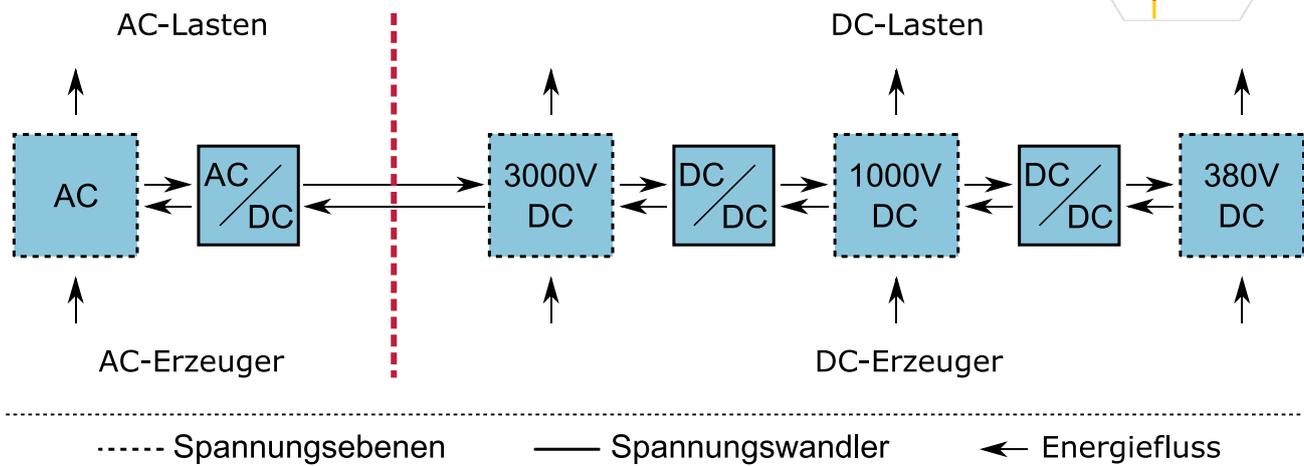
DC-Netzaufbau

- Gleichrichter
- Gleichspannungswandler
- Wechselrichter
- Active Front End
- Speichertechnologien



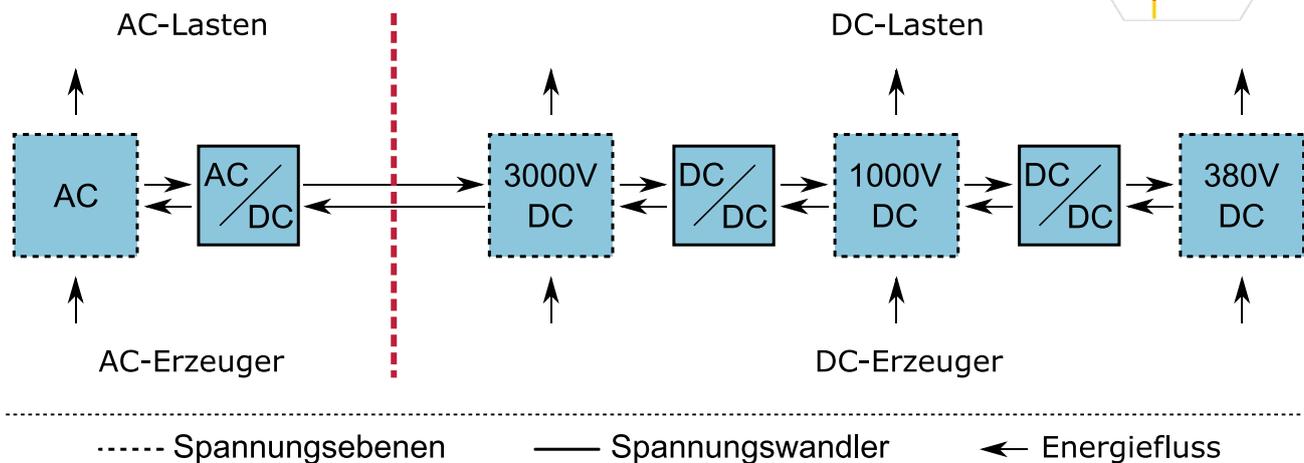
DC-Netzaufbau

- Gleichrichter
- Gleichspannungswandler
- Wechselrichter
- Active Front End
- Speichertechnologien



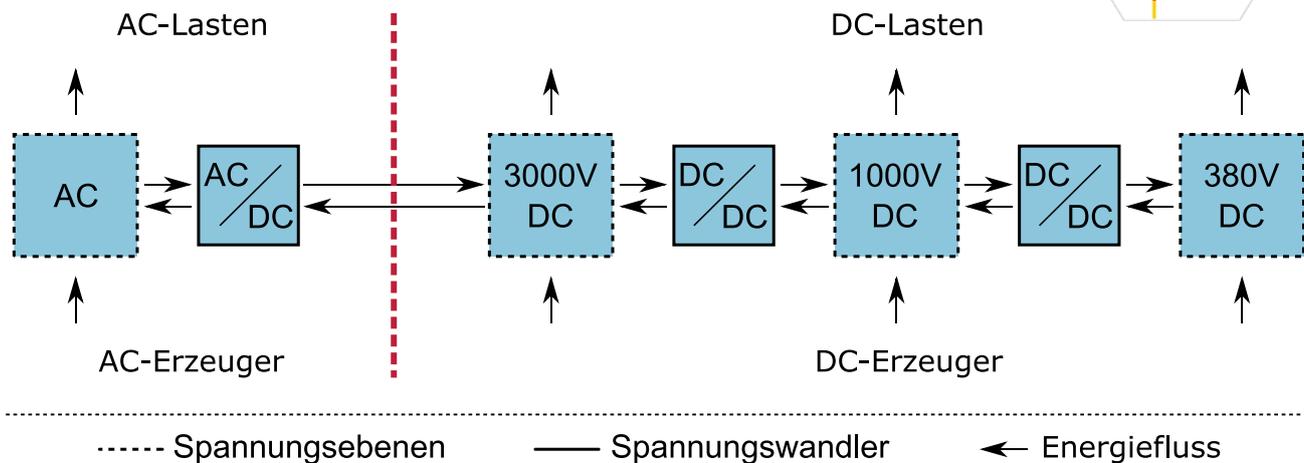
DC-Netzaufbau

- Gleichrichter
- Gleichspannungswandler
- Wechselrichter
- Active Front End
- Speichertechnologien



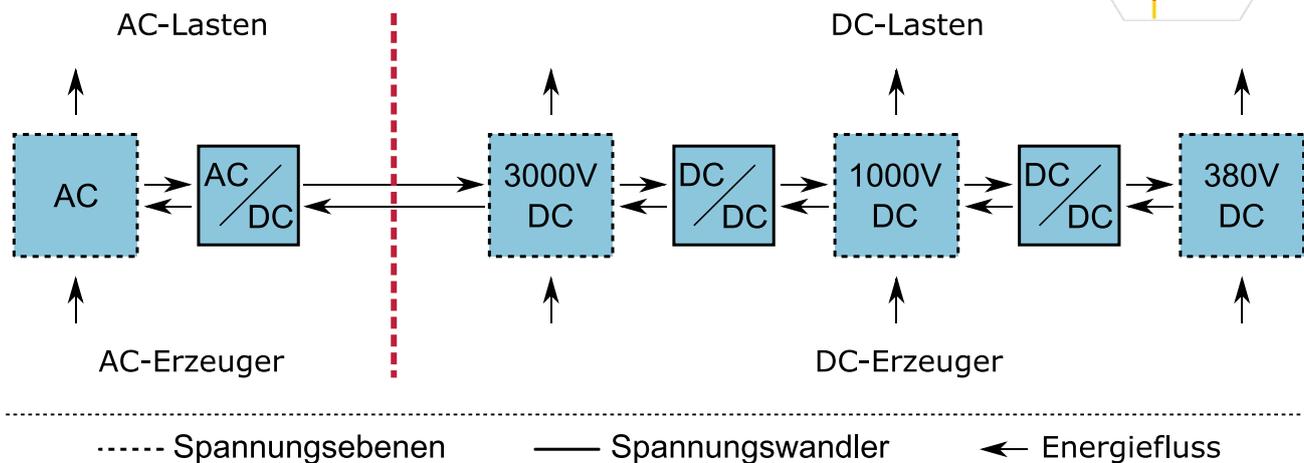
DC-Netzaufbau

- Gleichrichter
- Gleichspannungswandler
- Wechselrichter
- Active Front End
- Speichertechnologien



DC-Netzaufbau

- Gleichrichter
- Gleichspannungswandler
- Wechselrichter
- Active Front End
- Speichertechnologien

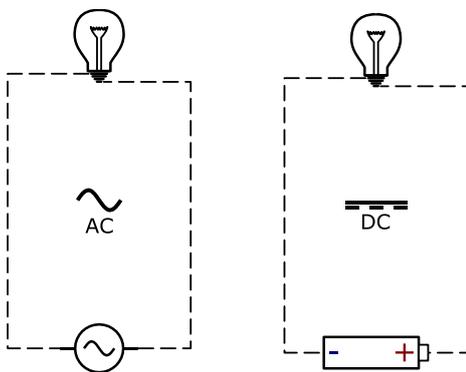


Vorteile AC vs. Vorteile DC

- AC Vorteile
 - Übertragung
 - Sicherheit (bewährte Schutzkonzepte)
 - Wissen und Erfahrung



Quelle (5): <https://pixabay.com/>



- DC-Vorteile
 - Dezentrale Energieerzeuger (erzeugen oft DC)
 - Weniger Umwandlungen (DC-AC-DC)
 - Höherer Wirkungsgrad
 - kein Skin-Effekt
 - Leiterquerschnitt von AC nach DC um Faktor 0,867

Quelle (2): VDE

Normungs-Roadmaps DC-Netz

- Smart-Grids
 - Umbau des Netzes
- Smart Home + Building
 - Technologien in Wohnräumen und –gebäuden
- Active Assisted Living
 - Medizinischen, technologischen, wirtschaftlichen Bereichen
- Energiespeicher
 - Batterien zum Ausgleich von Angebot und Nachfrage



Quelle (6): <https://pixabay.com/>

Quelle (2): VDE

25.01.2021 | Hendrik Gundelach | DC-Netztopologien | Seite 11

Gesetzliche Rahmenbedingungen im DC-Bereich

- Energiewirtschaftsgesetz
- Niederspannungsanschlussverordnung (NAV)
- Niederspannungs-Richtlinie (LVD) 75 bis 1500 V DC
- EMV-Richtlinien



Quelle (7): <https://pixabay.com/>

Netzschutz - Gleichstromnetz

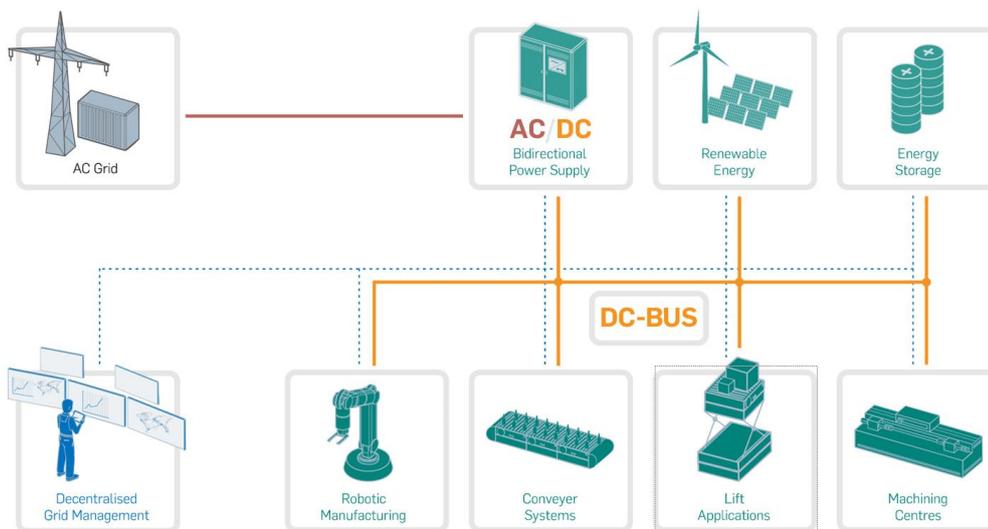
- Gefährliche Körperströme
- Überhöhte Temperaturen
- Überstrom
- Unterspannung, Überspannung, EMV
- Unterbrechungen
- Lichtbögen



Quelle (8): <https://pixabay.com/>

Forschungsprojekt - DC-Industrie

- Vorteile (Erweiterbarkeit, Energieaustausch, Eigenständigkeit)
- Verschiedene Modellanlagen
- Nachteile (teurere Schutzeinrichtungen)
- 485 V bis 750 V



DC-INDUSTRIE
ENERGIEWENDE TRIFFT INDUSTRIE 4.0

Supported by:
Federal Ministry
for Economic Affairs
and Energy
on the basis of a decision
by the German Bundestag



Quelle (9): <https://dc-industrie.zvei.org/>

25.01.2021 | Hendrik Gundelach | DC-Netztopologien | Seite 14

DC Spannungsebenen – Beispiel Normen

Anwendung	Spannung (DC) in V	Norm
PKW	12	DIN EN 60038
LKW, Busse	24	DIN EN 60038
PKW, LKW, E-light vehicle	48	DIN IEC/TS 61851-3 LEV
ELV (SELV, PELV) Grenze	120	DIN EN 61140
Zentrale Notstromversorgung	220	DIN EN 50171
Telekommunikation	48, 60, 354, 358	ETSI EN 300 132
Elektrofahrzeuge (60-800V)	400	DIN EN 60038
Trolley Busse	600	EN 50163
Straßenbahnen	600, 750	EN 50163
Industrielle Stromrichter	300-1200	EN 61800-5-1
PV	1500	DIN EN 60038

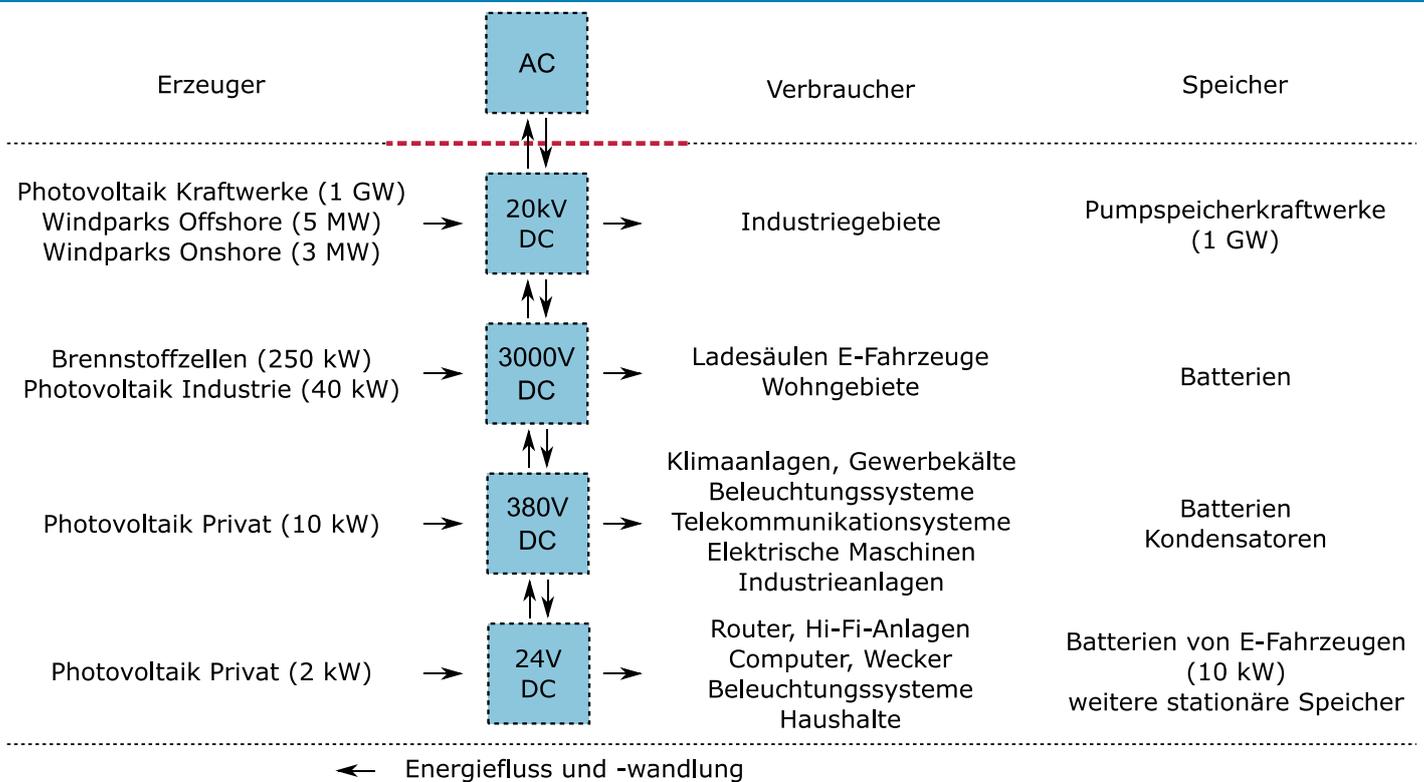
Quelle (2): VDE

25.01.2021 | Hendrik Gundelach | DC-Netztopologien | Seite 15

DC Spannungsebenen – Markt

Anwendung	Spannung (DC) in V	Quelle
USB	5	(2)
Beleuchtungssysteme	5, 12, 24, 48, 380	(2)
Haushalte	24	(10), (2)
Schneider Electric	120 - 250	(2)
Solar IC (Bangladesh)	230	(2)
Bachmann GmbH & Co. KG	+/- 380	(11), (2)
Telekommunikationsanlagen		
Industrie Netze		
Rechenzentren		
DC – Industrie	485 - 750	(12)

DC-Netzaufbau und Gerätekonzepte



Quelle: (3),(10),(11),(12),(13),(14)

Fazit und Ausblick

- Klimaabkommen
 - Erneuerbare Energien steigen
 - DC Verbraucher steigen
- AC-Netz / DC-Netz
- Anforderungen + Rechtliches
- Netztopologien kennengelernt



Quelle (15): <https://pixabay.com/>

Ausblick

- DC-Netze werden kommen
 - zuerst in der Industrie – später im privaten Bereich
- Niederspannungsinsellösungen

Quellen

- Quelle (1): <https://pixabay.com/de/vectors/recycleIn-gr%C3%BCn-erde-umwelt-%C3%B6kologie-29227/>
- Quelle (2): VDE, Gleichstrom im Niederspannungsbereich – Deutsche Normungs-Roadmap Version 2, Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V., 2018
- Quelle (3): Wesselak V., Handbuch der Regenerativen Energietechnik, Springer 2017
- Quelle (4): Heuck K., Elektrische Energieversorgung, Erzeugung, Übertragung und Verteilung elektrischer Energie für Studium und Lehre, Springer 2013
- Quelle (5): <https://pixabay.com/de/photos/ma%C3%9Fstab-frage-bedeutung-2635397/>
- Quelle (6): <https://pixabay.com/de/illustrations/leiterbahn-platine-technologie-3157426/>
- Quelle (7): <https://pixabay.com/de/illustrations/paragraf-paragraph-recht-gericht-684509/>
- Quelle (8): <https://pixabay.com/de/vectors/schild-rosette-heraldischen-schild-31869/>
- Quelle (9): <https://experience.dc-industrie.zvei.org/>
- Quelle (10): März M., Niederspannungs-Gleichstromnetze – Eine thematische Einführung, Fraunhofer-Institut 2012
- Quelle (11): Weiss R., Energy Efficient Low-Voltage DC-Grids for Commercial Buildings – IEEE 2015
- Quelle (12): DC-Industrie, Gleichstrom für die nachhaltige Fabrik – Forschungsprojekt DC Industrie - 2020
- Quelle (13): Boeke U., DC Power Grids for Buildings, IEEE 2015
- Quelle (14): Vossos V., Review of DC Power Distribution in Buildings: A Technology and Market Assessment, Berkeley Lab 2017
- Quelle (15): <https://pixabay.com/de/photos/erde-internet-globalisierung-2254769/>

Fragen?



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!
Fragen?